

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -  
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

**Par** : Medjahdi Aymen Abdelfettah

**Sujet**

**Etude comparative entre les technologies mobiles 4G et 5G**

Soutenu publiquement, le 22/06/2023, devant le jury composé de :

Mme Meliani Maghnia  
M.Merzougui Rachid  
M. Djemai Abderrezak

Professeur  
Professeur  
MCB

Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen

Présidente  
Examinateur  
Encadrant

Année universitaire : 2022 / 2023

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes qui me sont les plus chères,

À mes chers parents, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours académique avec leur patience, leur encouragement et leur sacrifice.

À mes frères, en leur souhaitant la réussite dans leur vie.

À tous mes proches de la famille, mes amis, et tous ceux qui comptent pour moi et je compte pour eux, en espérant être toujours à la hauteur de leurs attentes.

# Remerciements

Avant tout, je remercie Allah pour m'avoir donné le pouvoir de réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements à mon encadrant, monsieur Djemai Abderrezak, pour ses conseils et suggestions qui m'ont aidé à mener à bien ce travail.

J'exprime ma reconnaissance à madame Meliani Maghnia pour avoir accepté de présider le jury.

Je tiens également à remercier monsieur Merzougui Rachid d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants durant toutes ces années d'études.

Je remercie encore toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

## Résumé

Le développement de la technologie mobile a radicalement changé la façon dont nous communiquons et accédons à l'information.

Avec l'introduction de chaque réseau de nouvelle génération, vient un moyen plus rapide et plus efficace d'utiliser nos smartphones. Les deux générations les plus récentes sont la 4G et la 5G, chacun ayant ses propres avantages uniques.

Ce travail vise à donner un aperçu des différences en termes d'architecture, de performances et de mise en œuvre entre ces deux générations de réseaux mobiles.

Nous examinerons les avantages que la 5G apporte par rapport à la 4G et explorerons dans quelle mesure la 5G est bien positionnée pour répondre à la demande croissante de services de données mobiles à haut débit.

**Mot clés:** LTE, WiMAX, 4G, 5G, réseaux mobiles.

---

## Abstract

The development of mobile technology has drastically changed how we communicate and access information.

With the introduction of each new generation network, comes a faster and more efficient way to use our phones. The two most recent generations are 4G and 5G, each having its own unique benefits.

This work seeks to provide an overview of the differences in terms of architecture, performance, and implementation between these two generations of mobile networks.

We will examine the benefits that 5G brings over 4G and explore how well 5G is positioned to meet the increasing demand for high-speed mobile data services.

**Keywords:** LTE, WiMAX, 4G, 5G, mobile networks.

---

## ملخص

لقد أدى تطور تكنولوجيا الاتصالات إلى تغيير جذري في الطريقة التي نتواصل ونصل بها إلى المعلومات. مع كل توفر جديد لشبكة لاسلكية، تأتي طريقة أسرع وأكثر كفاءة لاستخدام هواتفنا الذكية. أحدث جيلين هما 4G و 5G، لكل واحد منهما مزاياه الفريدة.

يهدف هذه العمل إلى تقديم لمحة عامة عن الاختلافات من حيث الهندسة، الأداء والتنفيذ بين هذين الجيلين من الشبكات اللاسلكية.

سننظر أيضا الى المزايا التي تتفوق بها شبكة الجيل الخامس على شبكة الجيل الرابع ونستكشف مدى تمتعها بكفاءة عالية لتلبية الطلب المتزايد على خدمات البيانات عالية السرعة.

الكلمات المفتاحية: LTE, WiMAX, شبكة الجيل الرابع, شبكة الجيل الخامس, الشبكات اللاسلكية.

# Table des matières

Dédicace .....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Introduction générale.....	2

## Chapitre I: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 4G

I.1. Introduction .....	4
I.2. Les standards avancés du UIT-R (IMT-Advanced).....	4
I.3. La signification du terme 4G.....	5
I.4. La standardisation LTE.....	5
I.4.1. Introduction.....	5
I.4.2. Objectifs.....	6
I.4.3. Architecture .....	6
I.4.3.1. La partie cœur : EPC.....	6
I.4.3.2. La partie radio: eUTRAN .....	9
I.4.3.3. La partie multimédia: IMS .....	10
I.4.4. Caractéristiques .....	10
I.4.4.1. La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés .....	10
I.4.4.2. Débits et fréquences .....	11
I.4.4.3. L'efficacité spectrale cellulaire .....	11
I.4.4.4. Latence .....	12
I.4.4.5. L'agilité en fréquence .....	12
I.4.4.6. La mobilité .....	12
I.4.5. Les modes de duplexage.....	13
I.4.5.1. Le duplexage en fréquence ou frequency division duplex (FDD) .....	13
I.4.5.2. Le duplexage en temps ou time division duplex (TDD) .....	13
I.4.6. Structure d'une trame LTE .....	14
I.4.6.1. Structure de type 1 : FDD.....	14

I.4.6.2. Structure de type 2 : TDD .....	14
I.4.7. Les ressources blocks .....	15
I.4.8. La modulation .....	16
I.4.9. Les techniques d'accès.....	16
I.4.10. L'OFDM.....	17
I.4.10.1. L'OFDMA sur la partie downlink.....	17
I.4.10.2. SC-FDMA sur la partie uplink.....	18
I.4.11. La technologie MIMO.....	19
I.4.12. Le handover.....	20
I.4.12.1. Intra-LTE handover .....	20
I.4.12.2. Inter-LTE handover .....	20
I.4.12.3. Inter-RAT .....	21
I.4.13. Les canaux.....	21
I.4.13.1. Les canaux logiques.....	22
I.4.13.2. Les canaux de transport .....	22
I.4.13.3. Les canaux physiques .....	23
I.4.13.4. Les signaux physiques .....	24
I.4.14. LTE-Advanced .....	24
I.4.14.1. Introduction.....	24
I.4.14.2. Les techniques du LTE-Advanced.....	25
I.4.14.2.1. L'Agrégation de porteuses .....	25
I.4.14.2.2. Modulation d'amplitude en quadrature supérieure (QAM).....	25
I.4.14.2.3. MIMO d'ordre supérieur .....	25
I.4.14.2.4. Le concept coordinated multipoints (CoMP) .....	26
I.4.14.2.5. Le support des nœuds relais .....	27
I.5. La standardisation WiMAX .....	28
I.5.1. Introduction.....	28
I.5.2. Objectifs.....	28
I.5.3. Architecture .....	29
I.5.3.1. User terminals (Subscriber stations) ou (Mobile stations) .....	29
I.5.3.2. ASN (Access service network) .....	29
I.5.3.3. CSN (Connectivity service network) .....	30
I.5.4. Principe de fonctionnement du WiMAX.....	30
I.5.5. Modes de fonctionnement .....	31

I.5.6. L'évolution des standards .....	31
I.5.7. Les types du WiMAX.....	32
I.5.7.1. WiMAX fixe .....	32
I.5.7.2. WiMAX mobile.....	34
I.5.8. Méthodes de duplexage .....	38
I.5.9. MIMO .....	39
I.5.10. Modulation adaptative.....	39
I.5.11. Les applications du WiMAX.....	39
I.6. Conclusion.....	41

## **Chapitre II: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G**

II.1. Introduction.....	43
II.2. Caractéristiques .....	43
II.2.1. La Capacité en nombre d'utilisateurs simultanés.....	43
II.2.2. Débits .....	43
II.2.3. Fréquences.....	43
II.2.4. L'efficacité spectrale cellulaire .....	43
II.2.5. Latence .....	44
II.3. Applications .....	44
II.3.1. L'automatisation industrielle.....	44
II.3.2. L'agriculture connectée .....	44
II.3.3. Véhicules autonomes.....	44
II.3.4. Gestion du trafic.....	45
II.3.5. Robotique .....	45
II.4. Les technologies émergentes des réseaux 5G.....	45
II.4.1. Millimeter wave (mmWave).....	45
II.4.2. Massive multiple input multiple output (Massive MIMO or mMIMO) .....	46
II.4.3. Ultra dense network (UDN).....	47
II.5. Architecture .....	47
II.5.1. Non-Standalone (NSA).....	48
II.5.2. Standalone (SA) .....	50
II.6. Structure du trame.....	51
II.7. Les techniques d'accès.....	53
II.8. La modulation QAM .....	53

II.9. Le handover .....	53
II.10. Hiérarchie des canaux dans la 5G.....	55
II.11. Conclusion.....	58
 <b>Chapitre III: Comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G</b>	
III.1. Introduction .....	60
III.2. Les différences clés entre 4G et 5G .....	60
III.2.1. Débit.....	60
III.2.2. Latence.....	60
III.2.3. L'efficacité énergétique.....	61
III.2.4. Coût .....	62
III.2.5. Sécurité .....	62
III.2.6. Capacité .....	65
III.2.7. Architecture .....	66
III.2.8. Fréquences .....	67
III.2.9. Mobilité.....	68
III.2.10. Densité cellulaire.....	68
III.2.11. Espacement des sous-porteuses.....	69
III.2.12. Les usages développés.....	69
III.3. Conclusion.....	71
Conclusion générale .....	73
Références bibliographiques.....	75



# Liste des figures

Figure I.1: Architecture de l'EPC.....	7
Figure I.2: Architecture de l'eUTRAN.....	9
Figure I.3: La partie multimédia (IMS).....	10
Figure I.4: Structure de trame en FDD .....	14
Figure I.5: Structure de trame en TDD .....	15
Figure I.6: Structure ressource block.....	16
Figure I.7: Schémas de modulation utilisés par LTE .....	16
Figure I.8: Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO .....	19
Figure I.9: Les types de canaux dans la technologie LTE.....	21
Figure I.10: Transmission à bande passante plus large grâce à l'agrégation de porteuses .....	25
Figure I.11: Techniques MIMO améliorées dans downlink et uplink.....	26
Figure I.12: Schéma de réception CoMP en liaison montante .....	26
Figure I.13: Exemple d'un nœud relais .....	27
Figure I.14: Architecture du réseau WiMAX basée Sur IP .....	29
Figure I.15: Architecture en couche de la norme IEEE 802.16d.....	32
Figure I.16: WiMAX hard handover .....	36
Figure I.17: WiMAX macro diversity handover .....	36
Figure I.18: WiMAX fast base station switching handover .....	37
Figure II.1: Bandes de fréquences 5G new radio (5G NR): The mmWave .....	46
Figure II.2: Concept MIMO massif .....	46
Figure II.3: Exemple d'un réseau UDN.....	47
Figure II.4: 3GPP standardization roadmap.....	48
Figure II.5: Les variantes du NSA option-3.....	49
Figure II.6: EN-DC architecture .....	49
Figure II.7: Architecture SA.....	50
Figure II.8: La trame temporelle 5G-NR .....	52
Figure II.9: Les paramètres de la trame temporelle 5G-NR.....	52
Figure II.10: Aperçu de la connectivité inter-5G entre le EPC et le 5GC.....	55
Figure II.11: Hiérarchie des canaux 5G .....	56

Figure III.1: Exemple d'un découpage réseau .....	65
Figure III.2: Différence entre l'architecture 4G LTE et 5G.....	67
Figure III.3: Bandes de fréquences utilisées par 5G.....	67
Figure III.4: Fréquences utilisées par les réseaux LTE opérationnels en novembre 2013 .....	68
Figure III.5: Projection des services offerts par la 5G .....	70

# Liste des tableaux

Tableau I.1: Les paramètres LTE .....	18
Tableau I.2: Les différences entre les technologies 4G LTE et LTE Advanced.....	24
Tableau I.3: Les différentes normes du WiMAX .....	31
Tableau III.1: Comparaison de la sécurité LTE et 5G .....	63

# Liste des abréviations

<b>2G</b>	Deuxième Génération
<b>3G</b>	Troisième Génération
<b>3GPP</b>	The 3rd Generation Partnership Project
<b>4G</b>	Quatrième Génération
<b>5G</b>	Cinquième Génération
<b>5G NR</b>	5th Generation New Radio
<b>5GC</b>	5th Generation Core
<b>AKA</b>	Authentication and Key Agreement
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSS</b>	Base Station Subsystem
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>CDMA2000</b>	Code Division Multiple Access 2000
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>DL</b>	Downlink
<b>EAP-AKA</b>	Extensible Authentication Protocol - Authentication and Key Agreement
<b>EDGE</b>	Enhanced Data rate for GSM Evolution
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>eNB</b>	Evolved NodeB
<b>EN-DC</b>	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access-New Radio Dual Connectivity
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPDG</b>	Evolved Packet Data Gateway
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>E-UTRAN</b>	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>GGSN</b>	Gateway GPRS Support Nodes
<b>GP</b>	Guard Period
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>HLR</b>	Home Location Register
<b>IEEE</b>	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMS</b>	IP Multimedia Subsystem
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-A</b>	Long Term Evolution-Advanced

<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>mmWave</b>	Millimeter-wave
<b>NAS</b>	Non-Access Stratum
<b>NGN</b>	Next Generation Network
<b>NSA</b>	Non-Standalone
<b>NSS</b>	Network Switching Subsystem
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PCRF</b>	Policy & Charging Rules Function
<b>PDN/PGW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>SA</b>	Standalone
<b>SAE</b>	System Architecture Evolution
<b>SEAF</b>	Security Anchor Function
<b>SGSN</b>	Serving GRPS Support Node
<b>SGW</b>	Serving Gateway
<b>SUCI</b>	Subscription Concealed Identifier
<b>SUPI</b>	Subscription Permanent Identifier
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>TD-SCDMA</b>	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access
<b>UDN</b>	Ultra-Dense Networks
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UICC</b>	Universal Integrated Circuit Card
<b>UIT</b>	Union Internationale Des Télécommunications
<b>UIT-R</b>	l'Union Internationale Des Télécommunications - Secteur Des Radiocommunications
<b>UL</b>	Uplink
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable and Low Latency Communications
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WRC-07</b>	World Radiocommunication Conference 2007

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les télécommunications mobiles ont connu une énorme évolution, cette dernière comprend un débit de données augmenté, un temps de latence réduit, et une taille du réseau optimisé.

Cette évolution a permis l'utilisation des communications sans fil à d'autres raisons que les appels vocaux.

Il est devenu possible de transférer d'énormes données via les réseaux mobiles, à commencer par des images, des vidéos, des appels vidéo et des fichiers de données et de même contrôler à distance des machines.

D'autre part, la complexité du réseau sans fil a augmenté à mesure que les fonctionnalités singulières deviennent plus avancées.

Dans le but d'approfondir la réflexion sur l'évolution en particulier des réseaux mobiles 4G et 5G, le présent travail se veut une synthèse des architectures, technologies et l'ensemble des techniques déployées dans le développement de ces réseaux.

L'objectif principal est de mener une étude comparative entre les technologies 4G existantes et la technologie 5G émergente, en examinant leurs caractéristiques clés, leurs spécifications techniques et leurs indicateurs de performance.

Nous commençons d'abord par décrire les technologies LTE et WiMAX en termes d'architecture, de canaux de transmission, de techniques d'accès et de duplexage, de modulation et les applications.

Ensuite, on va parler de la 5G et de la façon dont elle vise non seulement à surpasser les capacités du réseau 4G, mais aussi à atteindre et à dépasser les objectifs de la 4G en terme de vitesse, de latence et de densité cellulaire.

Enfin, nous examinons et comparons les réseaux mobiles 4G Long Term Evolution (4G) par rapport aux réseaux de cinquième génération (5G).

# **Chapitre I : Les principales caractéristiques de la technologie mobile 4G**



### I.1. Introduction

Historiquement, le premier service commercial 4G a été lancé à Stockholm, en Suède, en 2009 par TeliaSonera et Ericsson [1].

Les exigences de la 4G ont été normalisées par l'union internationale des télécommunications - secteur des radiocommunications (UIT-R) et nommées international mobile telecommunications advanced (IMT-Advanced).

Ce chapitre commence par discuter les exigences IMT-Advanced 4G, puis explique pourquoi le LTE et le WiMAX mobile 1.0 sont considérés comme des technologies 4G même si elles ne répondent pas à la définition complète de la 4G faite par l'UIT.

Après, nous mettons en contexte ces deux technologies mobiles 4G, exposons leurs principales caractéristiques, architectures et différentes normes.

Le chapitre se termine en concluant pourquoi le LTE est la technologie 4G dominante.

### I.2. Les standards avancés du UIT-R (IMT-Advanced)

Les exigences émises pour ce qui est commercialisé comme un service d'accès internet et de téléphonie mobile 4G sont les normes IMT-Advanced émises par le secteur des radiocommunications de l'UIT (UIT-R) de l'union internationale des télécommunications (UIT) en 2008 [2].

Ces systèmes permettent d'accéder à une variété importante de services de télécommunication, y compris des services mobiles avancés pris en charge par des réseaux à la fois mobiles et fixes.

Les IMT-Advanced disposent également de capacités pour des applications multimédias de haute qualité dans une large gamme de services et de plates-formes, offrant une amélioration significative des performances et de la qualité de service.

Cela étant dit, plusieurs exigences ont été identifiées, y compris, mais sans s'y limiter à [2]:

- Débits de données améliorés jusqu'à 100 Mbps pour une mobilité élevée et 1 Gbps pour une faible mobilité.
- Mobilité jusqu'à 350 km/h et une latence inférieure à 100 ms.

- Temps d'interruption du transfert 27,5 ms pour l'intrafréquence, 40 ms dans une bande spectrale et 60 ms entre les bandes spectrales.
- Efficacité spectrale maximale de 15 bit/s/Hz dans la liaison descendante et de 6,75 bit/s/Hz dans la liaison montante.
- Les bandes de canaux évolutives jusqu'à 40 MHz et doivent être prises en charge par la technologie d'interface radio.

### I.3. La signification du terme 4G

À l'origine, l'UIT avait prévu que le terme 4G ne soit utilisé que pour les systèmes qui satisfaisaient aux exigences des IMT-Advanced.

LTE et le WiMAX mobile 1.0 (IEEE 802.16e) ne l'ont pas fait.

C'est pour cette raison que la communauté des ingénieurs a décrit ces systèmes comme 3.9G.

Mais, ces considérations n'ont pas empêché la communauté commerciale de décrire le LTE et le WiMAX mobile 1.0 en tant que technologies 4G.

Bien que cette description était injustifiée de point de vue de la performance, il y avait une raison derrière cela : il y a une claire transition technique dans le passage de l'UMTS au LTE, qui n'existe pas dans le passage du LTE au LTE-Advanced.

Ce qui signifie que ces technologies ont apporté de nombreuses améliorations de performances par rapport aux systèmes 3G.

En décembre 2010, l'UIT a donné son autorisation à l'utilisation de la 4G pour décrire non seulement le LTE et le WiMAX mobile 1.0, mais aussi toute autre technologie offrant des meilleures performances que les premiers systèmes 3G [3].

### I.4. La standardisation LTE

#### I.4.1. Introduction

Le LTE, qui a été défini par 3GPP, représente une évolution des normes de téléphonie mobile existantes telles que le GSM/EDGE, le CDMA2000, le TD-SCDMA et l'UMTS.

À l'origine, cette norme était perçue comme une norme de 3ème génération 3.9G, définie dans le contexte des technologies IMT-2000.

Cependant, dans les versions 8 et 9 de cette norme, elle ne respectait pas toutes les spécifications requises par l'UIT pour être qualifiée de norme 4G.

Mais, comme on a vu dans la partie signification du terme 4G, en raison de commercialisation et des améliorations de performance par rapport aux premiers systèmes 3G, la communauté commerciale (les opérateurs) ont l'a commercialisée sous l'appellation 4G.

### I.4.2. Objectifs

La LTE est conçue pour améliorer les services afin de prendre en charge de nouvelles applications innovantes, et vise à atteindre les objectifs suivants:

- Offrir de meilleurs débits aux utilisateurs.
- Optimisation des ressources du réseau.
- Fournir une meilleure qualité de service.
- Améliorer l'efficacité spectrale.

### I.4.3. Architecture

Le 3GPP a lancé un système sans fil basé uniquement sur des réseaux à commutation de paquets. Il y avait deux projets d'étude dans ce domaine de recherche.

L'un est le projet LTE, qui a étudié la conception d'un nouveau réseau radio et d'une nouvelle architecture d'interface radio.

L'autre est le projet service architecture evolution (SAE), qui s'est concentré sur la conception d'une nouvelle architecture de réseau central.

Par la suite, ces deux projets ont été combinés en un seul projet, appelé programme evolved packet system (EPS) composé du réseau d'accès (E-UTRAN) et du réseau central (EPC) [4].

Tandis que le service IMS permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles.

#### I.4.3.1. La partie cœur : EPC

Le cœur de réseau appelé EPC utilise les protocoles internet pour la signalisation qui permet des temps de latence réduits, le transport de la voix et des données [5].

La LTE permet également l'interconnexion des routeurs avec d'autres eNodeB distants, les réseaux d'autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et l'internet.

L'EPC simplifie aussi le réseau d'architecture à tout IP, comme il assure la mobilité entre les systèmes 3GPP, et les systèmes non-3GPP [5].

Il est constitué de plusieurs éléments comme illustré sur la figure I.1.

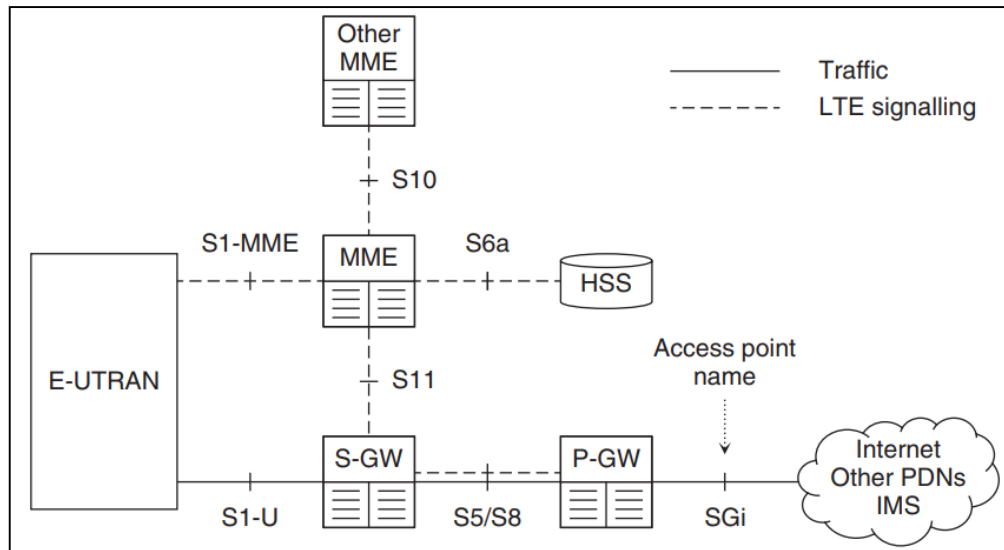


Figure I.1: Architecture de l'EPC [5].

### 1.4.3.1.1 HSS (Home subscriber server)

Le HSS est la base de données principale qui contient les informations liées à l'abonnement pour soutenir les entités du réseau qui gèrent effectivement les appels/sessions [6].

### 1.4.3.1.2. MME (Mobility management entity)

L'entité de gestion de mobilité joue un rôle essentiel dans l'architecture LTE EPC.

En fait, MME est le nœud de signalisation principal dans l'EPC.

Il est chargé de la gestion de la mobilité et de l'authentification des utilisateurs, gère les zones de localisation et le handover [6].

### **I.4.3.1.3. PDN GW (Packet data network gateway)**

C'est le nœud de connexion entre les UEs et les réseaux externes. C'est-à-dire le point d'entrée du trafic de données pour les UEs.

Il assure également la taxation des flux en fonction des règles fournies par le PCRF ou sur la base de l'inspection de paquets définie par des politiques locales [6].

### **I. 4.3.1.4. PCRF (Policy & charging rules function)**

La fonction de règles de politique et de tarification (PCRF) agit en tant que point de décision de politique pour le contrôle de la politique et de la tarification des flux de données/applications de service et des ressources de support IP [6].

Cela permet au PDN-GW de différencier les flux de données de service et de les facturer de manière appropriée.

### **I.4.3.1.5. S-GW (Serving gateway)**

La fonction principale du S-GW est le routage et le transfert des paquets de données utilisateur.

Il est également responsable des transferts inter-eNB et assure la mobilité entre LTE et d'autres types de réseaux, comme entre 2G/3G et P-GW [6].

### **I.4.3.1.6. ANDSF (Access network discovery and selection function)**

L'ANDSF aide l'UE à découvrir les réseaux d'accès à proximité et de fournir des règles pour gérer les connexions à ces réseaux [6].

### **I.4.3.1.7. EPDG (Evolved packet data gateway)**

La fonction principale de l'EPDG est de sécuriser la transmission de données avec un UE connecté à l'EPC via un accès non-3GPP [6].

### **I.4.3.1.8. SGSN (Serving GRPS support node)**

Achemine les données entre les stations de base et les GGSN (Gateway GPRS support node) et gère les messages de signalisation qui configure les flux de données [6].

### I.4.3.2. La partie radio: eUTRAN

La partie radio du réseau, appelée eUTRAN est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) par l'intégration des stations de base avec des liaisons et des liens IP reliant les eNodeB entre eux.

L'e-UTRAN gère les communications radio entre le mobile et le réseau cœur évolué [5], et constitué principalement d'eNodeB comme illustré sur la figure I.2.

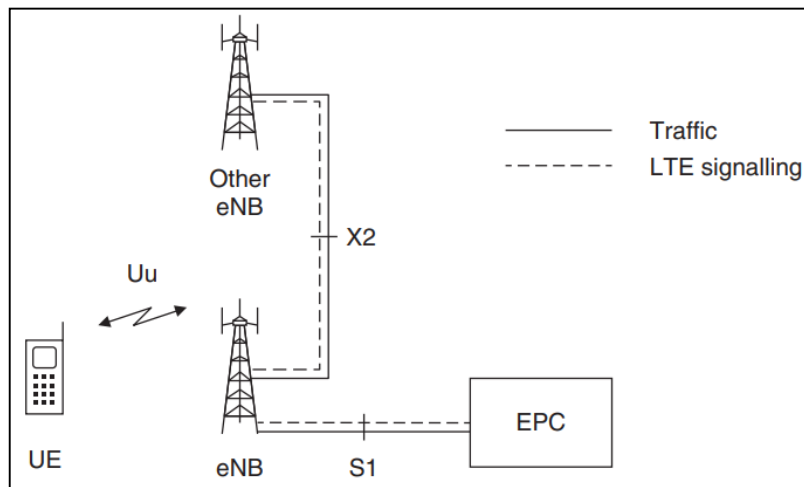


Figure I.2: Architecture de l'eUTRAN [5].

#### I.4.3.2.1. L'UE

Les UEs sont les équipements mobiles (smartphone, tablette, laptop) qui doivent être compatibles au réseau 4G.

#### I.4.3.2.2. eNodeB

L'eNodeB est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM et du NodeB dans l'UMTS.

Il envoie et reçoit des signaux radio vers et depuis les appareils mobiles en utilisant le réseau LTE.

Et aussi contrôle le fonctionnement de base de tous les appareils mobiles en leur envoyant des messages de signalisation tels que des commandes de transfert qui se rapportent à ces signaux radio [5].

### I.4.3.2.3. L'interface X2

C'est une interface logique introduite principalement dans le but de la signalisation et le transfert de paquets durant le handover [5].

### I.4.3.2.4. L'interface S1

L'eNodeB est relié au cœur du réseau à travers l'interface S1, c'est à dire que S1 est l'interface intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau cœur [5].

### I.4.3.3. La partie multimédia: IMS

Le sous-système de réseau principal IP multimédia comprend tous les éléments de réseau nécessaires pour fournir des services multimédias.

Il permet aux opérateurs de proposer à leurs abonnés une large gamme de services multimédias, tels que la voix, la vidéo, la messagerie, les données et les technologies basées sur le web [7].

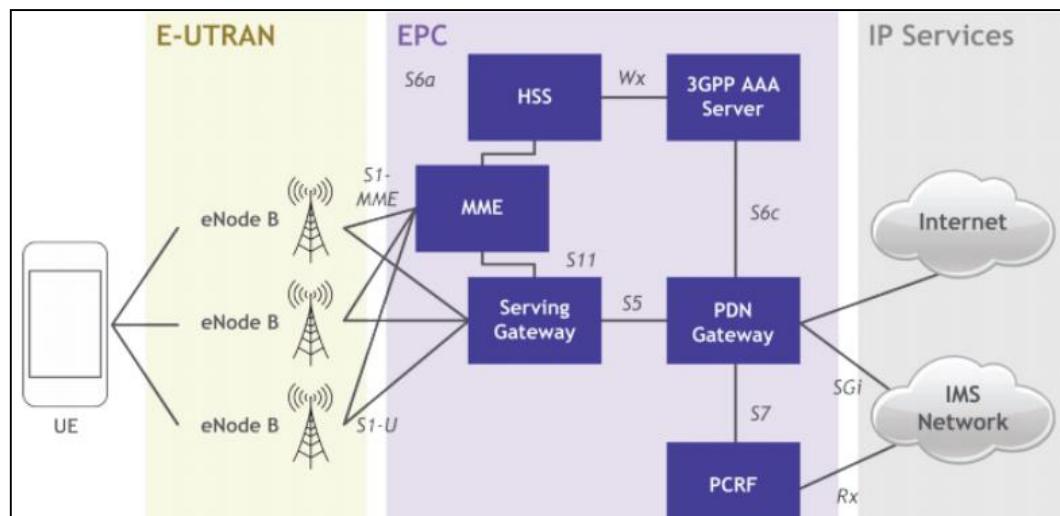


Figure I.3: La partie multimédia (IMS) [8].

## I.4.4. Caractéristiques

### I.4.4.1. La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés

Il est prévu que le système soit capable de supporter au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule en état actif pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures [9].

### I.4.4.2. Débits et fréquences

Le débit fourni à un utilisateur dépend de plusieurs facteurs, notamment ses conditions radio, tels que sa position dans la cellule, les techniques de transmission utilisées et la disponibilité des ressources spectrales.

Les objectifs de débit maximal établis pour la LTE sont les suivants [9]:

- 100 Mbit/s en voie descendante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 5 bit/s/Hz.
- 50 Mbit/s en voie montante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 2,5 bit/s/Hz.

En complément, le débit est considéré comme un critère de comparaison entre les opérateurs car des vitesses plus élevées ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services.

En ce qui concerne les fréquences utilisées, la WRC-07 a identifié des spectres additionnels inférieurs à 1 GHz et supérieurs à 2 GHz [10] :

- 450 – 470 MHz.
- 790 – 960 MHz.
- 1 710 – 2 025 MHz.
- 2 110 – 2 200 MHz.
- 2 300 – 2 400 MHz.
- 2 500 – 2 690 MHz ou bande de fréquences 2,6 GHz.

Les bandes de fréquences suivantes ont également été identifiées au niveau régional :

- **610 – 790 MHz** pour le Bangladesh, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Nouvelle-Zélande, la Papouasie-Nouvelle Guinée, les Philippines et Singapour.
- **698 – 790 MHz** pour le continent américain.
- **3 400 – 3 600 MHz** sans allocation globale mais acceptée par un grand nombre de pays d'Asie, d'Océanie, d'Europe, d'Afrique, du Moyen-Orient et la Russie.

### I.4.4.3. L'efficacité spectrale cellulaire

Parmi les objectifs du LTE l'accroissement de l'efficacité spectrale cellulaire et l'augmentation de la capacité du système.

Le LTE devait supporter une efficacité spectrale trois à quatre fois supérieure à celle de HSPA Release 6 en liaison descendante et deux à trois fois supérieure en liaison montante [9].



### **I.4.4.4. Latence**

La latence d'un système se traduit concrètement par sa capacité à répondre rapidement aux demandes des utilisateurs, et on distingue:

#### **I.4.4.4.1. La latence du plan de contrôle**

L'objectif du LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager [9].

#### **I.4.4.4.2. La latence du plan usager**

Effectivement, le LTE vise une latence du plan utilisateur inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau. Cela permet de répondre aux exigences de qualité de service pour des applications en temps réel, telles que la voix sur IP et la visioconférence [9].

### **I.4.4.5. L'agilité en fréquence**

Le LTE doit être capable d'opérer sur des porteuses de différentes largeurs de bande pour s'adapter à des allocations spectrales variées.

Les largeurs de bande requises étaient de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant [9].

Cette flexibilité permet de mieux optimiser l'utilisation du spectre disponible et de répondre aux besoins de différents types de déploiement, comme les zones rurales ou urbaines, zones denses ou moins peuplées.

### **I.4.4.6. La mobilité**

La mobilité est une fonction essentielle pour un réseau mobile. Le LTE vise à maintenir une connectivité opérationnelle pour les utilisateurs (UEs) qui se déplacent à différentes vitesses.

Il est optimisé pour des tailles de cellule de 5km, fonctionne avec des performances dégradées jusqu'à 30 km et prend en charge des tailles de cellule jusqu'à 100 km [5].

Il est également optimisé pour des vitesses mobiles jusqu'à 15 km/h, fonctionne avec des performances élevées jusqu'à 120 km/h et prend en charge des vitesses allant jusqu'à 350 km/h [5].

### I.4.5. Les modes de duplexage

Le duplexage joue un rôle fondamental en définissant la méthode de séparation des transmissions entre la voie descendante et montante.

La voie descendante (DL) correspond à la transmission de la station de base vers l'UE, tandis que la voie montante (UL) correspond à la transmission de l'UE vers la station de base.

Il existe deux modes de duplexage gérés par l'interface radio du LTE :

#### I.4.5.1. Le duplexage en fréquence ou frequency division duplex (FDD)

Le mode FDD utilise deux fréquences porteuses distinctes pour la voie montante et la voie descendante, ce qui offre une grande résistance aux interférences et facilite le déploiement du réseau [9].

De plus, il permet aux stations de base et aux utilisateurs d'émettre et de recevoir simultanément en FDD [9].

Cependant, le mode FDD présente quelques contraintes liées à la séparation des voies comme la nécessité d'une bande de garde entre les porteuses dédiées aux voies montante et descendante pour éviter les interférences [9].

De plus, le LTE requiert l'utilisation d'un duplexeur à la fois dans le terminal et dans la station de base [9].

#### I.4.5.2. Le duplexage en temps ou time division duplex (TDD)

En mode TDD, les transmissions montantes et descendantes utilisent la même fréquence porteuse, et la séparation entre les deux directions est effectuée dans le domaine temporel.

Cette approche offre plusieurs avantages, tels que la possibilité d'optimiser le système pour une éventuelle asymétrie du trafic entre les deux voies et de configurer un plus grand nombre de sous-trames descendantes que de sous-trames montantes [9].

Cependant, le mode TDD présente également des contraintes, telles que la nécessité de synchroniser toutes les stations de base d'une même zone géographique en temps, ce qui peut être plus complexe à fournir par liaison de transmission [9].

De plus, il est nécessaire que les stations de base appliquent la même configuration d'asymétrie entre la voie montante et la voie descendante, ce qui restreint la flexibilité de reconfigurer cette asymétrie [9].

### I.4.6. Structure d'une trame LTE

Afin de maintenir la compatibilité entre les différentes versions de LTE, la structure de la couche physique a été essentiellement conservée.

Cette structure se caractérise par l'utilisation de deux types de trames, chacune étant spécifique à un mode de duplexage comme nous allons discuter ci-dessous.

#### I.4.6.1. Structure de type 1 : FDD

En FDD, dix sous-trames sont disponibles pour la voie montante et dix sous-trames pour la voie descendante par période de 1 ms.

Dont chaque sous-trame est divisée en deux slots de 0.5 ms chacun [9].

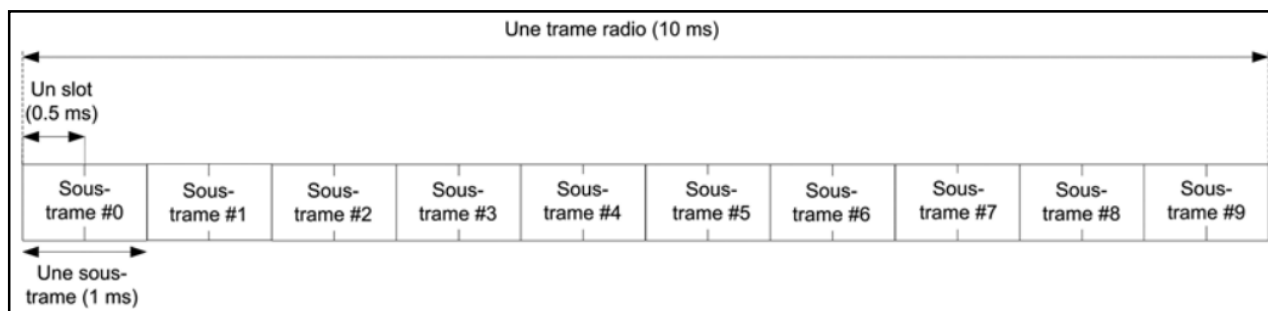


Figure I.4: Structure de trame en FDD [9].

#### I.4.6.2. Structure de type 2 : TDD

Dans la structure type 2 on trouve également une trame d'une durée de 10ms et se compose de 10 sous-trames de 1ms chacun, une sous-trame se compose de 2 intervalles de temps d'une durée de 0.5ms.

Un intervalle de temps spécial est inséré qui contient une période de sécurité et des symboles pilotes, l'un de ses rôles est de laisser le temps pour que la partie électronique des équipements passe du mode descendant vers le mode montant [9].

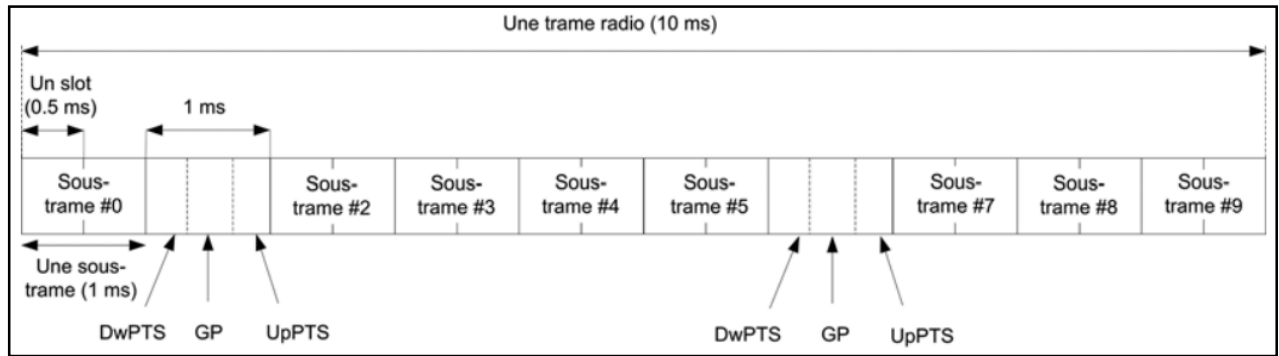


Figure I.5: Structure de trame en TDD [9].

### I.4.7. Les ressources blocks

Lors de la transmission UL ou DL, les sous-porteuses sont divisées en plusieurs blocs appelés "ressources blocks".

Cette technique permet au système de subdiviser la sous-porteuse en petites parties dans la bande passante, sans combiner les données de cette sous-porteuse avec les autres sous-porteuses.

L'unité de base est l'élément de ressource (RE), qui couvre un symbole par une sous-porteuse.

Chaque élément de ressource transporte généralement deux, quatre ou six bits de canal physique, selon le type de modulation.

Les éléments de ressource sont regroupés en blocs de ressources, dont chacun s'étend sur 0,5 ms (one slot) sur 180 kHz (12 sous-porteuses).

La station de base utilise des blocs de ressources pour la planification basée sur la fréquence, en allouant les symboles et les sous-porteuses dans chaque sous-trame en unités de blocs de ressources [5].

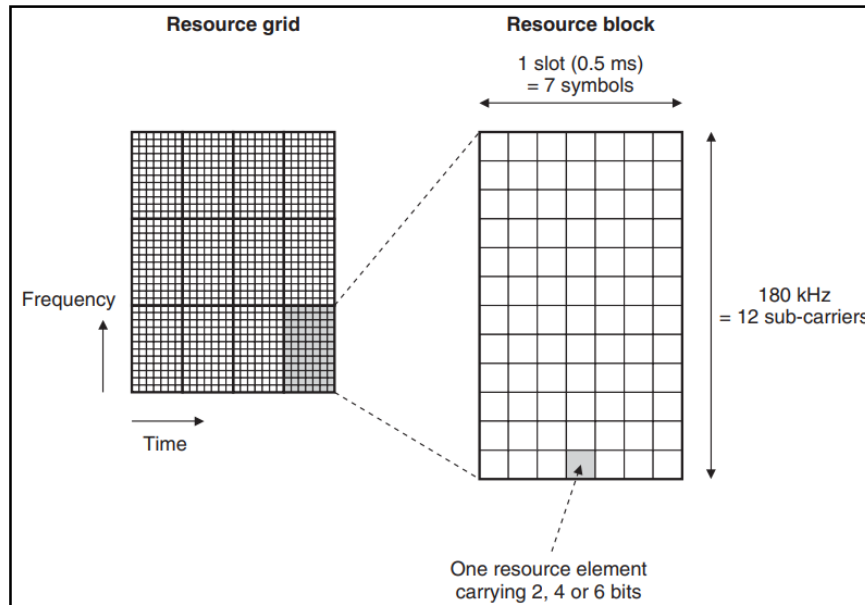


Figure I.6: Structure resource block

## I.4.8. La modulation

La modulation utilisée dans le LTE est une modulation adaptative qui varie en fonction de la distance qui sépare l'abonné de l'eNodeB.

Les sous-porteuses sont modulées avec : QPSK, 16QAM et 64QAM [5].

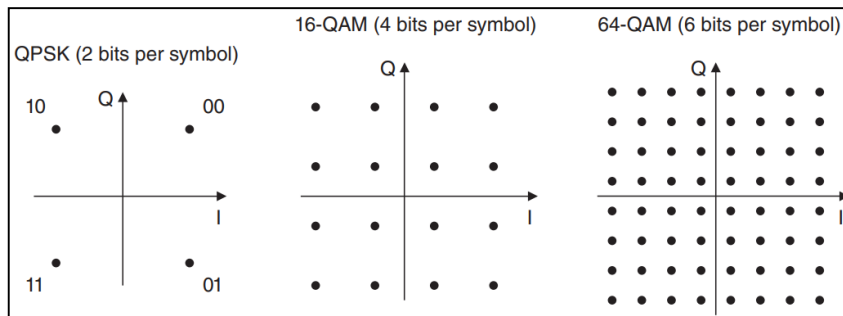


Figure I.7: Schémas de modulation utilisés par LTE

## I.4.9. Les techniques d'accès

La modulation du LTE est basée sur l'utilisation de la technologie OFDM et les technologies d'accès multiples associés, OFDMA et SC-FDMA.

L'utilisation du codage OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access) est une technologie de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence pour la liaison descendante.

Tandis que la SC-FDMA est une technologie de codage radio utilisée pour la liaison montante, elle se caractérise par un accès multiple par répartition en fréquence.

### **I.4.10. L'OFDM**

La norme LTE se repose sur une technique de modulation multi porteuses qui est l'OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing), cette modulation lui permet d'assurer une meilleure transmission qu'une modulation mono-porteuse.

Car elle représente une robustesse plus efficace contre les effets des canaux sélectifs, du fait que l'information est transmise sur de multiples porteuses, elle ne risquera pas d'être dégradée par l'effet du canal [11].

Le principe de cette modulation est de découper la bande spectrale du canal de transmission en plusieurs sous-porteuses orthogonales, cette condition est primordiale et indispensable à l'OFDM, car sans cette condition, on aura un phénomène d'interférences entre les sous-porteuses qui peuvent nuire à la transmission.

Au début, l'idée était d'attribuer à chaque sous-porteuse une sous-bande, de cette manière, on évitera les interférences.

L'inconvénient de cette première technique est que la bande de fréquences n'est pas exploitée d'une manière optimale.

On devrait plutôt superposer les sous-porteuses, mais à une condition, que le spectre des autres sous-porteuses doit être nul à chacune des fréquences centrales, et il va falloir aussi insérer un écart entre les sous-porteuses [12].

#### **I.4.10.1. L'OFDMA sur la partie downlink**

Cette technique permet d'obtenir un débit binaire plus élevé pour une même largeur spectrale, grâce à son efficacité spectrale élevée.

Elle est également capable de maintenir un débit élevé même dans des environnements défavorables. Car elle se repose sur la répartition d'un signal numérique à transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses.

Cette technique permet ainsi d'optimiser l'utilisation du spectre en divisant la bande passante disponible en plusieurs sous-bandes de fréquence, chacune étant allouée à un utilisateur ou à un service spécifique.

## Chapitre I: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 4G

En utilisant des signaux orthogonaux, l'OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access) permet d'éviter les interférences mutuelles.

Afin de préserver l'orthogonalité du signal malgré les effets des trajets multiples, un préfixe cyclique (CP), d'une longueur importante, est ajouté au début des symboles émis.

Si le préfixe cyclique n'est pas suffisamment long, il ne parviendra pas à compenser l'étalement du retard. En revanche, s'il est trop long, cela réduira la capacité de débit de données. Il est donc important de trouver un équilibre adéquat pour assurer à la fois la diminution des effets des trajets multiples et une capacité de débit de données optimale.

Deux types de préfixe cyclique sont pris en charge en LTE, principalement l'OFDM utilise un préfixe cyclique normal de 4,69  $\mu$ s de durée et, dans certains cas, un CP d'une durée de 16,7  $\mu$ s peut être utilisé. Avec la longueur de symbole dans LTE réglée sur 66,7  $\mu$ s [13].

Largeur de bande (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de ressource blocs	6	15	25	50	75	100
Nombre de porteuses	72	180	300	600	900	1200
Longueur de préfixe cyclique	4,69 $\mu$ s pour 6 symboles OFDM et 5,21 $\mu$ s pour le premier symbole.					

Tableau I.1: Les paramètres LTE [13].

### I.4.10.2. SC-FDMA sur la partie uplink

L'intérêt majeur du SC-FDMA est dans le sens de transmission uplink où il consiste aussi à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses un signal numérique.

Et en complément de l'OFDMA conventionnel, une transformation de Fourier discrète (DFT) est utilisée pour pré-coder le signal.

Cette technique est particulièrement utilisée dans les communications terre-satellite et dans la transmission montante des réseaux 4G LTE.

Son avantage réside dans son PAPR (peak-to-average power ratio) qui est plus faible par rapport à celui de l'OFDMA, ce qui bénéficie l'efficacité énergétique et le coût des terminaux mobiles.

SC-FDMA est utilisée principalement pour les liaisons uplink, plus particulièrement pour la partie radio (eUTRAN) de LTE, car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc d'augmenter l'autonomie de sa batterie [5].

### I.4.11. La technologie MIMO

MIMO est une technique de communication sans fil qui utilise plusieurs antennes à la fois du côté émetteur et du côté récepteur pour envoyer et recevoir des signaux simultanément.

Cela tire parti de la façon dont les signaux rebondissent et atteignent le récepteur de différentes manières.

Elle divise le flux de données en flux séparés, chacun étant transmis sur une antenne différente, et le récepteur est capable de traiter ces flux séparément pour améliorer la qualité du signal global [14].

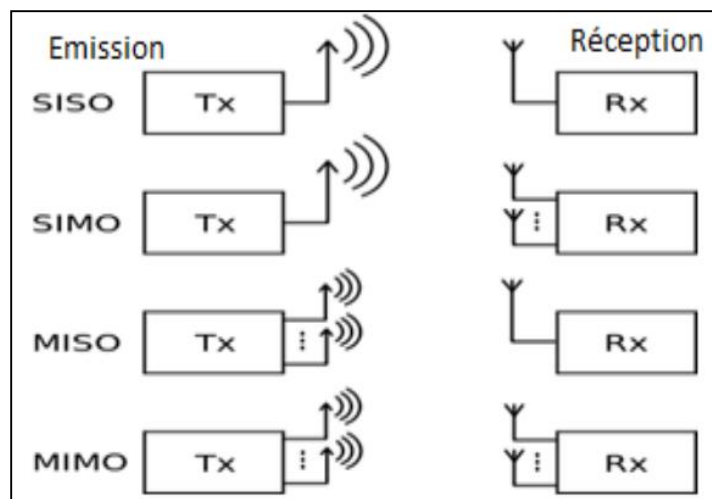


Figure I.8: Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO [9].



### I.4.12. Le handover

Le handover est l'ensemble des algorithmes et des procédures qui assurent la continuité de la connexion entre un UE en mobilité et le réseau qui est sensible à la congestion.

Le handover assure une voix sans coupure. Donc, il est un composant essentiel dans un système de communication mobile.

Il existe 3 principaux handovers dans le LTE :

#### I.4.12.1. Intra-LTE handover

Dans ce cas, les cellules source et cible font partie du même réseau LTE.

##### I.4.12.1.1. Intra-MME/SGW : Handover avec l'interface X2

Ce type de handover est effectué lors de disponibilité de l'interface X2 qui se situe entre deux eNodeB, sans aucune implication de la part d'EPC.

La libération des ressources au niveau de l'eNodeB source est déclenchée par l'eNodeB cible [15].

##### I.4.12.1.2. Intra-MME/SGW : Handover avec l'interface S1

Dans le cas où l'interface X2 n'est pas disponible et que l'eNodeB source et l'eNodeB cible font partie du même MME/SGW, le transfert est effectué via l'interface S1.

Le S-eNB (eNodeB source) initie le transfert en envoyant un message handover via le point de référence S1-MME.

L'EPC ne modifie pas les décisions prises par le S-eNB [15].

#### I.4.12.2. Inter-LTE handover

Le handover se produit vers d'autres nœuds LTE.

##### I.4.12.2.1. Inter-MME handover

Dans le transfert inter-MME, deux MME sont impliquées dans le transfert, la source MME et la cible MME.

La MME source (S-MME) est en charge de l'eNodeB source et la MME cible (T-MME) est en charge de l'eNodeB cible.

Ce type de transfert se produit lorsque l'UE se déplace entre deux MME différents mais connectés au même SGW (Serving gateway) [15].

## I.4.12.2.2. Inter-MME/SGW Handover

C'est la même chose qu'Inter-MME, mais la seule différence est qu'ici, l'UE doit passer d'un MME/SGW à un autre MME/SGW.

L'eNodeB source fait partie d'un MME/SGW et l'eNodeB cible se trouve dans un autre MME/SGW [15].

## I.4.12.3. Inter-RAT

C'est un type de handover entre des différentes technologies radio.

### I.4.12.3.1. Handover d'eUTRAN à l'UTRAN

Dans ce handover, l'eNodeB source est connecté à la MME source et au SGW et le RNC cible est connecté au SGSN cible et au SGW cible, dont les ressources sont réservées dans l'UTRAN lors du transfert [15].

## I.4.13. Les canaux

Le LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de canal afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, et on distingue trois classes de canaux comme illustré dans la figure I.9.

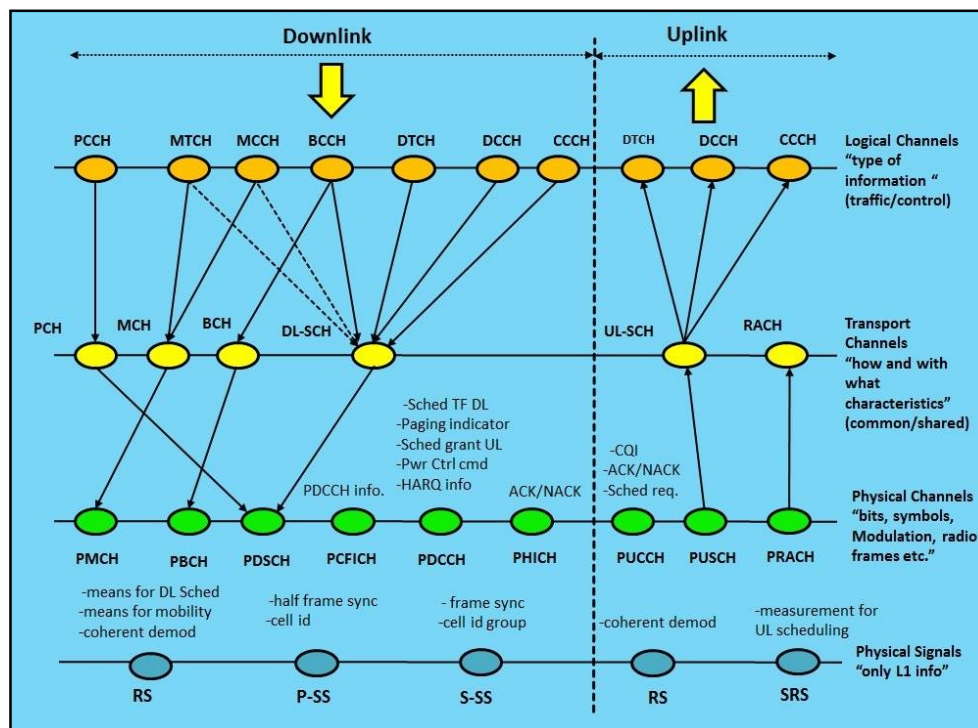


Figure I.9: Les types de canaux dans la technologie LTE [59].

### I.4.13.1. Les canaux logiques

Qui opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent [16].

#### I.4.13.1.1. Canaux logiques en downlink

- Paging control channel (PCCH) : Utilisé pour la pagination de terminaux mobiles.
- Multicast traffic channel (MTCH) : Utilisé pour une transmission de données multicast.
- Multicast control channel (MCCH) : Utilisé pour contrôler les informations nécessaires à la réception multicast.
- Broadcast control channel (BCCH) : Fournit des informations système à tous les terminaux mobiles connectés à l'eNodeB.
- Dedicated traffic channel (DTCH) : Utilisé pour la transmission des données utilisateur.
- Dedicated control channel (DCCH) : Utilisé pour transporter des informations de contrôle spécifiques à l'utilisateur.
- Common control channel (CCCH) : Utilisé pour les informations d'accès aléatoire.

#### I.4.13.1.2. Canaux logiques en uplink

- Dedicated traffic channel (DTCH)
- Dedicated control channel (DCCH)
- Common control channel (CCCH)

### I.4.13.2. Les canaux de transport

Les canaux de transport sont utilisés pour transférer les informations aux couches supérieures et au MAC (Media access control) [16] :

#### I.4.13.2.1. Canaux logiques en downlink

- Paging channel (PCH) : Utilisé pour la pagination.
- Multicast channel (MCH) : Utilisé pour transmettre les configurations des transmissions multidiffusion.

- Broadcast channel (BCH) : Correspond au canal de contrôle de diffusion (BCCH).
- Downlink shared channel (DL-SCH) : Utilisé pour le transfert de données en liaison descendante.

### **I.4.13.2.2. Canaux logiques en uplink**

- Uplink shared channel (UL-SCH): Utilisé pour le transfert de données en liaison montante.
- Random access channel (RACH) : Utilisé pour les exigences d'accès aléatoire.

### **I.4.13.3. Les canaux physiques**

Les canaux physiques dans LTE sont [16] :

#### **I.4.13.3.1. Canaux physiques en downlink**

- PMCH (Physical multicast channel) : Transporte les services de diffusion et de multidiffusion multimédias (MBMS).
- PBCH (Physical broadcast channel) : Transporte des informations système pour les UEs nécessitant d'accéder au réseau.
- PDSCH (Physical downlink shared channel): Transporte les données codées DL-SCH.
- PCFICH (Physical control format indicator channel): Informe l'UE du format du signal reçu.
- PDCCH (Physical downlink control channel) : Transporte principalement des informations de planification de différents types.
- PHICH (Physical hybrid ARQ indicator channel) : Utilisé pour signaler l'état de HARQ (Hybrid automatic repeat request).

#### **I.4.13.3.2. Canaux physiques en uplink**

- PUCCH (Physical uplink control channel) : Fournit les diverses exigences de signalisation de contrôle.
- PUSCH (Physical uplink shared channel) : Transporte les données codées UL-SCH.
- PRACH (Physical random access channel) : Utilisé pour les fonctions d'accès aléatoire.

### I.4.13.4. Les signaux physiques

La couche physique utilise également des signaux physiques :

#### I.4.13.4.1. Signaux physiques en downlink

- RS (Reference signal) : Fournit le point de référence pour la puissance de la liaison descendante [17].
- P-SS (Primary synchronization signal) : Utilisé pour la synchronisation de trame radio [18].
- S-SS (Secondary synchronization signaling): Un signal de synchronisation secondaire.

#### I.4.13.4.2. Signaux physiques en uplink

- SRS (Sounding reference signals) : des signaux physiques transmis en liaison montante permettant à l'eNB d'estimer le CSI sur une plage de fréquences dans le système pour allouer les ressources radio à l'UE [19].

### I.4.14. LTE-Advanced

#### I.4.14.1. Introduction

LTE-Advanced, ou LTE-A est une évolution de la norme LTE concentré sur l'amélioration de la capacité du réseau en lui permettant d'atteindre le statut véritable de la norme 4G [20] :

	<b>LTE</b>	<b>LTE Advanced</b>
Bandes passantes prises en charge	1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz	1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz
Agrégation de porteuses	Non supporté	Possibilité de combiner jusqu'à cinq (5) fréquences porteuses
Modulation d'amplitude en quadrature (QAM)	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	256 QAM
Configurations d'antenne MIMO	MIMO 4×4 Downlink ; 2×2 Uplink	MIMO 8×8 Downlink ; 4×4 Uplink

Tableau I.2: Les différences entre les technologies 4G LTE et LTE Advanced [21].

### I.4.14.2. Les techniques du LTE-Advanced

Le LTE Advanced est une amélioration ajoutée à LTE pour améliorer les débits de données de pointe à 1 Gbps grâce à :

#### I.4.14.2.1. L'Agrégation de porteuses

La première différence entre LTE et LTE Advanced est l'agrégation de porteuses, une technique qui permet aux réseaux LTE Advanced d'augmenter la bande passante totale en combinant plusieurs porteuses (canaux).

LTE Advanced prend en charge l'agrégation jusqu'à cinq (5) porteuses, permettant à LTE Advanced d'offrir une bande passante de porteuse maximale de 100 MHz en combinant cinq porteuses de 20 MHz [22].

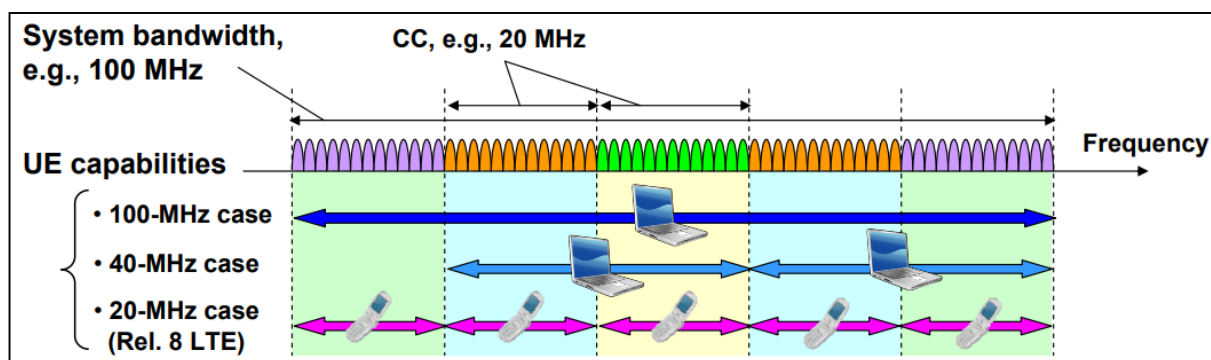


Figure I.10: Transmission à bande passante plus large grâce à l'agrégation de porteuses [20].

#### I.4.14.2.2. Modulation d'amplitude en quadrature supérieure (QAM)

La technologie LTE utilise la modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK), la modulation d'amplitude en quadrature 16 (QAM) et la modulation 64 QAM.

LTE Advanced utilise 256 QAM, une modulation d'ordre supérieur à la LTE d'origine, pour générer des débits binaires beaucoup plus élevés par symbole [21].

#### I.4.14.2.3. MIMO d'ordre supérieur

Les réseaux LTE Advanced utilisent 8 x 8 MIMO dans la liaison descendante par rapport à 4 x 4 dans le LTE.

Cela signifie que les réseaux LTE Advanced peuvent avoir huit (8) couches de communication de la station de base au téléphone mobile.

Dans le sens de la liaison montante, du téléphone à la station de base, les réseaux LTE Advanced utilisent une configuration MIMO de 4 x 4, ce qui est supérieur au 2 x 2 utilisé par le LTE d'origine [22].

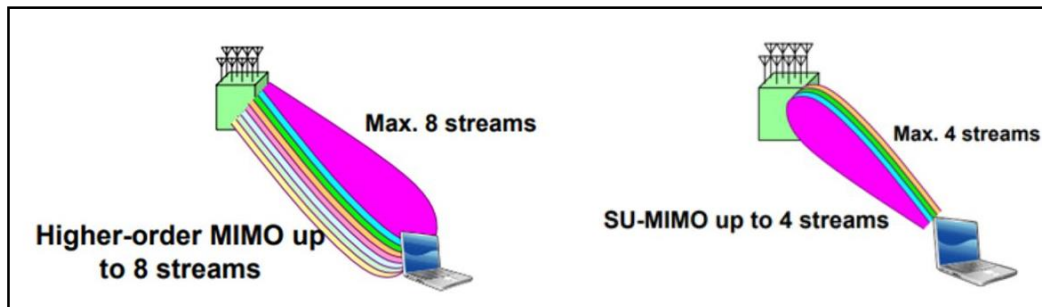


Figure I.11: Techniques MIMO améliorées dans downlink et uplink [20].

#### I.4.14.2.4. Le concept coordinated multipoints (CoMP)

C'est une technique DL/UL pour transformer les interférences inter-cellules en signal utile, améliorer la capacité du système et le débit des utilisateurs aux frontières de la cellule où les performances peuvent être dégradées.

Cette technique offre une coordination entre un certain nombre d'eNBs géographiquement séparés.

De cette manière, un UE au niveau du bord d'une cellule est capable d'être desservi par deux ou plusieurs eNBs pour améliorer les signaux de réception et transmission et augmenter le débit en particulier dans des conditions de bord de la cellule [20].

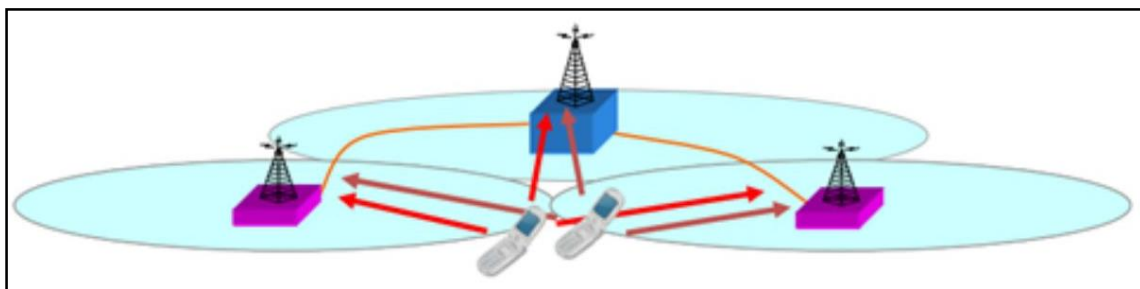


Figure I.12: Schéma de réception CoMP en liaison montante [20].

### I.4.14.2.5. Le support des nœuds relais

Dans le LTE-Advanced, la possibilité de la planification efficace des réseaux hétérogènes (heterogeneous network) c.-à-d. un mélange de grandes et petites cellules est augmenté par l'introduction des nœuds de relais (RNs).

Les nœuds de relais sont des basses stations de base de puissance qui fourniront les capacités augmentées aux bords de cellules, et des secteurs pour se relier aux régions éloignées son raccordement de fibre.

Le nœud relais est connecté à l'eNB donneur (DeNB) via une interface radio, Un, qui est une modification de l'interface aérienne E-UTRAN Uu.

Ainsi, dans la cellule distributeur, les ressources radio sont partagées entre UE desservies directement par le DeNB et les nœuds relais.

Lorsque Uu et Un utilisent des fréquences différentes, le relais Le nœud est appelé RN de type 1a, pour le RN de type 1 Uu et Un utilisent les mêmes fréquences.

Dans ce dernier cas, il existe un risque élevé d'auto-interférence dans le nœud de relais, lors de la réception sur Uu et de la transmission sur Un en même temps (ou vice versa).

Cela peut être évité en partageant le temps entre Uu et Un, ou en ayant différents emplacements de l'émetteur et du récepteur.

Le RN supportera dans une large mesure les mêmes fonctionnalités que l'eNB - cependant, le DeNB sera responsable du sélection des MME [22].

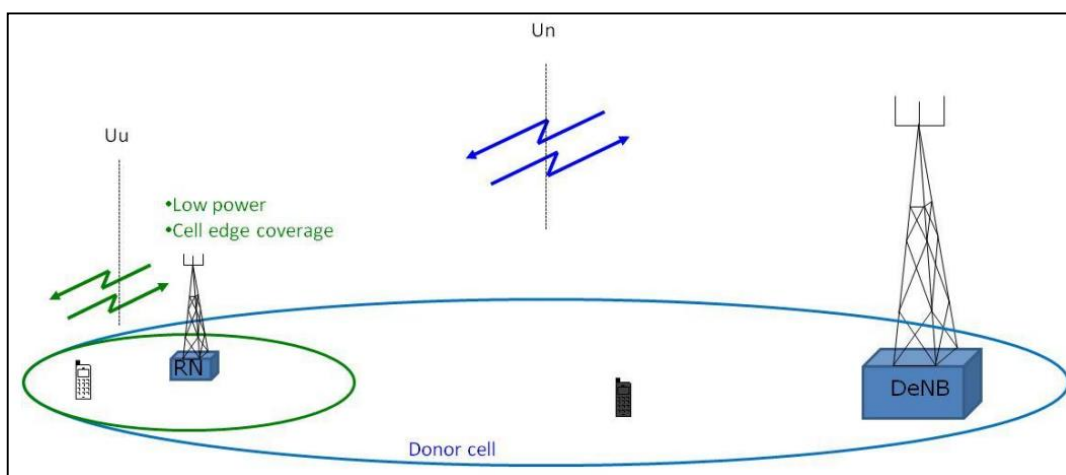


Figure I.13: Exemple d'un nœud relais [22].



### I.5. La standardisation WiMAX

#### I.5.1. Introduction

Le WiMAX (Worldwide Interoperability For Microwave Access) est une technique de transmissions de données qui vise à fournir un accès haut débit sans fil à longue distance pour une variété d'applications.

En 1999, IEEE a autorisé le démarrage du groupe de travail 802.16, également connu sous le nom de groupe de travail WirelessMAN, qui a produit quelques résultats en 2002 [23].

D'autre part, le WiMAX Forum, un partenariat industriel établi en 2001, jouait un rôle important dans la promotion et la certification du WiMAX. Tandis que L'IEEE 802.16 a continué à développer la technologie, visant une nouvelle version adaptée aux terminaux mobiles [23].

La norme correspondante a été approuvée fin 2005, conduisant à ce que l'on appelle souvent le WiMAX mobile ou m-WiMAX [23].

Dans cette partie, on va établir une présentation de WiMAX en explorant ces objectifs, son architecture et ces différents standards, pour passer après à une conclusion entre le WiMAX et son concurrent le LTE.

#### I.5.2. Objectifs

Le WiMAX a pour principal objectif de permettre une connectivité Internet haut débit sur une vaste zone de couverture, s'étendant sur plusieurs kilomètres de rayon.

Les premiers déploiements en WiMAX devraient permettre à des zones isolées, mal desservies par les câbles ou souhaitant bénéficier d'une connexion sans fil, de disposer d'un accès Internet à large bande.

Le développement du WiMAX pourrait donc jouer un rôle important dans l'aménagement numérique du territoire.

Car les débits théoriques du WiMAX peuvent atteindre les 70Mbit/s avec une portée de 50 kilomètres [24].

### I.5.3. Architecture

IEEE 802.16e définit uniquement les couches PHY et MAC [23].

Cependant, dans le besoin d'interfaces au niveau des couches supérieures en tant qu'une norme de communication sans fil, l'architecture du réseau WiMAX, a été développée sur une plateforme tout IP.

La figure I.14 illustre l'architecture WiMAX qui comprend 3 éléments principaux :

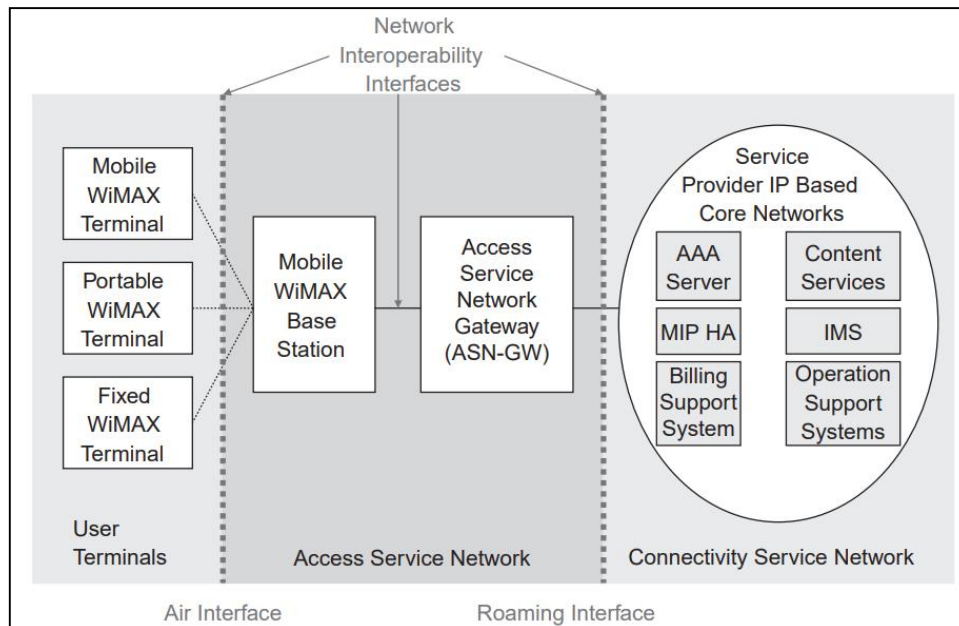


Figure I.14: Architecture du réseau WiMAX basée Sur IP [23].

#### I.5.3.1. User terminals (Subscriber stations) ou (Mobile stations)

Ce sont les équipements utilisateurs qui peuvent être mobiles ou fixes.

#### I.5.3.2. ASN (Access service network)

C'est le réseau d'accès radio du WiMAX, regroupe une ou plusieurs stations de base et des passerelles ASN-GW.

L'ASN assure la couverture radio ainsi que la gestion des fonctionnalités d'accès MAC (Medium Access Control), telles que le paging, la gestion des ressources radio et la mobilité entre les stations de base (BS) dans la norme 802.16e. Tandis que les passerelles ASN-GW assurent l'interconnexion avec le CSN [24].

- **BS (Base station/ Station de base)**

La station de base est un élément important pour fournir l'interface hertzienne aux stations mobiles et à l'abonné.

De plus, elle gère des fonctionnalités supplémentaires telles que l'établissement du tunnel, le déclenchement du transfert, l'application de la politique de QoS et la gestion des ressources radio [24].

- **ASN-GW (ASN gateway/ Passerelle ASN)**

Dans l'architecture de réseau WiMAX, la passerelle de réseau de service d'accès fonctionne normalement comme un point d'agrégation de trafic dans l'ensemble du réseau.

Cela offre des fonctions supplémentaires telles que la radio-messagerie, la gestion de la localisation intra-ASN, et la mise en cache des profils d'abonnés [24].

### **I.5.3.3. CSN (Connectivity service network)**

C'est un ensemble de fonctionnalités assurant la connectivité IP aux stations d'abonnés WiMAX.

Le CSN regroupe des passerelles pour l'accès Internet, des routeurs, ainsi que des bases de données [23].

### **I.5.4. Principe de fonctionnement du WiMAX**

Le WiMAX utilise des ondes radio pour établir une connexion Internet.

Une station de base est connectée au réseau de fibre optique du fournisseur d'accès Internet, tandis qu'une antenne est installée sur le toit de l'utilisateur et connectée à un routeur.

Les ondes radio sont diffusées entre l'antenne et la station de base, ce qui entraîne une connexion Internet à des vitesses variables en fonction bien sûr de météo et de topographie.

La portée des ondes WiMAX peut s'étendre jusqu'à 50 kilomètres de la station de base [24].

Cependant, les vitesses WiMAX peuvent être diminuées par des obstacles tels que des montagnes ou des bâtiments dans les régions urbaines.

En conséquence, WiMAX est le mieux adapté aux endroits peu peuplés et géographiquement éloignés.

### I.5.5. Modes de fonctionnement

#### I.5.5.1. Visibilité indirecte (NLOS non line of sight)

Où une petite antenne sur un ordinateur se connecte à la base du WiMAX. Dans ce mode, WiMAX utilise une plage de fréquences inférieure de 2 GHz à 11 GHz [25].

Les transmissions à faible longueur d'onde ne sont pas facilement perturbées par des obstacles physiques.

#### I.5.5.2. Visibilité direct (LOS line of sight)

Une antenne parabolique fixe est installée de manière à pointer directement vers la station de base WiMAX depuis un toit ou un poteau.

La connexion en mode line of sight est plus solide et plus stable, elle est donc capable d'envoyer beaucoup de données avec moins d'erreurs.

Les transmissions en visibilité directe utilisent des fréquences plus élevées, avec des portées de 10 à 66 GHz [25].

### I.5.6. L'évolution des standards

L'évolution de l'IEEE 802.16 est présentée dans le tableau suivant :

Standard	Description	Date de publication
IEEE std 802.16-2001	Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences de 10GHz à 66 GHz.	8 avril 2002
IEEE std 802.16c-2002	Définit les options pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003
IEEE std 802.16a-2003	Modification apportée au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.	1 avril 2003
IEEE std 802.16-2004 (802.16d)	Il s'agit de l'actualisation des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.	1 octobre 2004
IEEE std 802.16e-2005 (802.16e)	Apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile, jusqu'à 122 km/h.	7 décembre 2005
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC et PHY.	22 janvier 2006
IEEE 802.16m (WiMAX Mobile 2.0)	Débits jusqu'à 1 Gbit/s et 100 Mbit/s en mobile grande vitesse.	2009

Tableau I.3: Les différentes normes du WiMAX

### I.5.7. Les types du WiMAX

#### I.5.7.1. WiMAX fixe

##### I.5.7.1.1. Introduction

La norme IEEE 802.16-2004 est conçue pour un usage fixe, comme l'utilisation d'une antenne fixée sur un toit, similaire à une antenne de télévision.

Il fonctionne dans les bandes de fréquences 2,5 GHz et 3,5 GHz, ainsi que dans la bande 5,8 GHz.

Le débit théorique du WiMAX peut atteindre jusqu'à 70 Mbits sur une distance de 10 km.

##### I.5.7.1.2. Architecture en couche de la norme IEEE 802.16d

L'IEEE 802.16d a été développée suivant une architecture en couches, comme illustré dans la figure suivante :

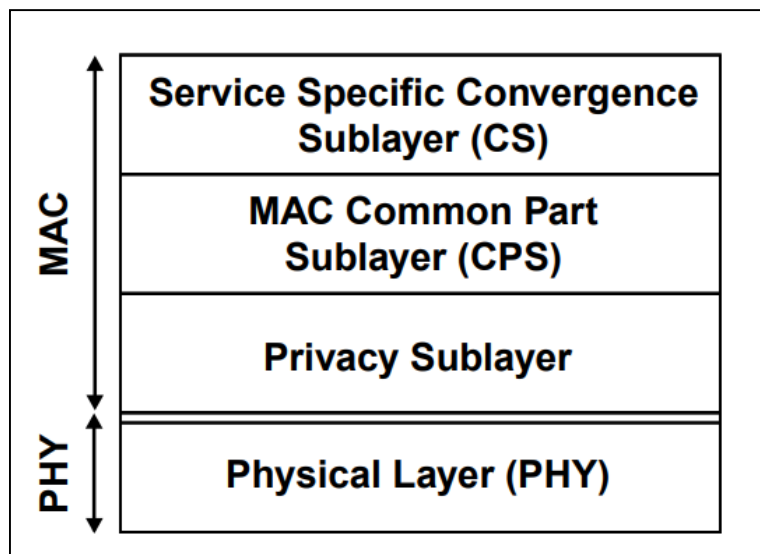


Figure I.15: Architecture en couche de la norme IEEE 802.16d [23].

##### I.5.7.1.2.1. La couche MAC (Media access control)

La couche MAC décrit et spécifie les problèmes de composition et de transmission des messages, fourniture de services, allocation des ressources et maintenance des connexions.

Elle s'appuie sur 3 sous-couches [23]:

- **La sous-couche CS (Service specific convergence sublayer)**

La sous couche CS réside au-dessus du sous couche CPS et fournit l'interface entre la couche MAC et la couche réseau.

Elle accepte et classe les unités de données de protocole (PDU) entrantes dans les connexions appropriées, en fonction d'un ensemble de critères de correspondance de paquets.

- **La sous-couche CPS (Common part sublayer)**

Cette sous couche forme le noyau de la couche MAC, étant donné qu'elle contient les fonctions relatives au contrôle du lien radio, comme les règles d'accès, et l'allocation de la bande passante.

- **La sous-couche PS (Privacy sublayer)**

Elle fournit la sécurité à travers le réseau sans fil à large bande en cryptant la connexion entre la station de base et l'abonné au service.

De plus, la couche PS est utilisée pour l'authentification et l'échange de clés de sécurité.

### **I.5.7.1.2.2. La couche physique (PHY)**

La couche physique du WiMAX spécifie les spécifications électriques, le contrôle des collisions et la dynamique de synchronisation du matériel comme les antennes, convertissant les bits de données des couches supérieures en signaux électriques transmis par voie aérienne.

La norme identifie deux entités, les stations de base (BSs) et les stations d'abonné (SSs), et fournit cinq interfaces radio pour la couche PHY afin d'optimiser les déploiements de systèmes, ceux-ci incluent [23]:

- **WirelessMAN-SC** : Une interface radio modulée à porteuse unique pour les bandes de fréquences 10-66 GHz.
- **WirelessMAN-SCa**: Une interface radio modulée à porteuse unique pour les bandes autorisées inférieures à 11 GHz.
- **WirelessMAN-OFDM**: Schéma de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence composé de 256 porteuses orthogonales pour les bandes autorisées inférieures à 11 GHz.
- **WirelessMAN-OFDMA**: Un schéma OFDM avec 2048 porteuses pour les bandes autorisées inférieures à 11 GHz.
- **WirelessHUMAN**: (Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks) Utilisé pour les bandes sans licence inférieures à 11 GHz.

### I.5.7.2. WiMAX mobile

#### I.5.7.2.1. Introduction

C'est le standard IEEE 802.16e. Il prévoit la possibilité la connexion des clients mobiles au réseau internet.

#### I.5.7.2.2. Architecture en couche de la norme 802.16e ou WiMAX mobile

Le 802.16e est une version améliorée du standard 802.16-2004, et est considérée comme la version mobile du standard.

De plus cette version porte des nouvelles améliorations pour les couches PHY et MAC, tel que la gestion de la mobilité entre des stations de base WiMAX et les terminaux.

##### I.5.7.2.2.1. La couche MAC

Les spécifications de la couche MAC, du WiMAX mobile prennent forme sur la base de la norme 802.16-2004 tout en ajoutant des nouveaux services comme :

- **Gestion de la qualité de service**

Plusieurs paramètres de qualité de service sont définis, tels que la garantie de l'intégrité des données transportées, la garantie d'un temps de latence maximum et un débit minimum.

- **La sécurité**

La technologie WiMAX mobile est sécurisée et offre plusieurs fonctionnalités clés, notamment:

- ❖ **Key management protocol**

Privacy and Key Management Protocol Version 2 (PKMv2) est la base de la sécurité du WiMAX mobile, qui gère la sécurité au niveau de la couche MAC [26].

- ❖ **Device/User authentication**

Supporté grâce au protocole EAP [23].

- ❖ **Traffic encryption**

L'AES-CCM est l'algorithme de chiffrement utilisé pour protéger les données des utilisateurs à travers l'interface MAC du WiMAX Mobile, dont les clés nécessaires à cet algorithme sont générées par l'authentification EAP.

### ❖ **Control message protection**

Les données de contrôle sont protégées à l'aide d'AES, ou des schémas basés sur MD5 [26].

### ❖ **Fast handover support**

Dans le fast handover, l'authentification est optimisée grâce à l'utilisation du mécanisme du 3-way Handshake.

Cela permet d'accélérer le processus d'authentification en réduisant le nombre d'échanges nécessaires entre l'utilisateur et le réseau [23].

### • **Contrôle de puissance**

Le mode "Idle" peut être initié par le BS ou le MS lorsque le MS n'a aucun trafic en cours [23].

Ce mode vise à économiser la puissance au niveau du MS ainsi que les ressources au niveau de la BS.

### • **Gestion de la mobilité**

Le handover et la durée de vie de la batterie sont deux problématiques dans le domaine de la téléphonie mobile.

Le WiMAX mobile supporte le mode "Idle" pour assurer un bon fonctionnement du terminal mobile.

De plus, cette version du WiMAX supporte le handover de l'utilisateur en basculant d'une station de base à une autre sans avoir de coupure au niveau de la communication.

Le standard 802.16e supporte trois types de handover qui sont:

### ❖ **Hard handover (HHO)**

Au cours du HHO, la station abonnée mobile communique avec une station de base à la fois.

La connexion avec l'ancienne BS est annulée avant l'établissement de la nouvelle.

Le HHO est exécuté après que la puissance du signal de la cellule voisine dépasse la force du signal de la cellule actuelle.

Cette situation est illustrée dans la figure I.16, où la ligne au bord des cellules présente l'endroit où le HHO est réalisé.



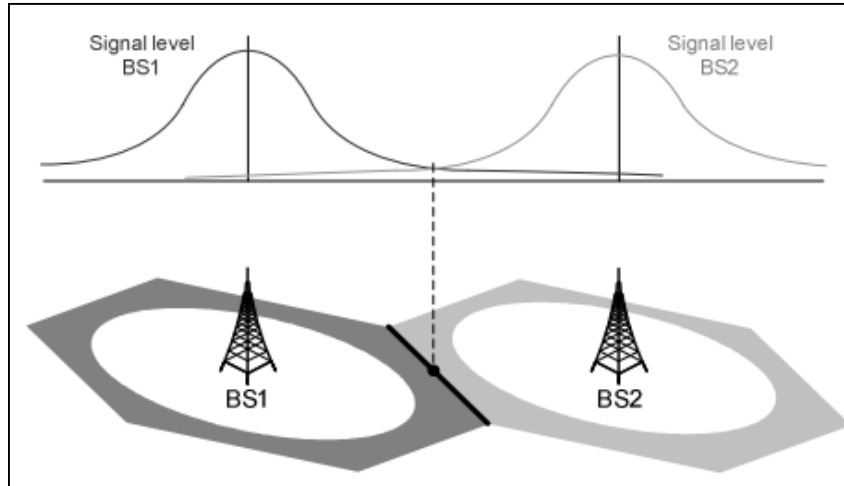


Figure I.16: WiMAX hard handover [27].

❖ **Macro diversity handover (MDHO)**

Durant la procédure de MDHO dans l'UL, deux stations de bases ou plus transmettent des données vers la station mobile de l'abonné de telle sorte qu'il existe la diversité en réception.

Tandis que dans le sens montant, les transmissions de la station mobile abonnée sont reçues par plusieurs stations de bases.

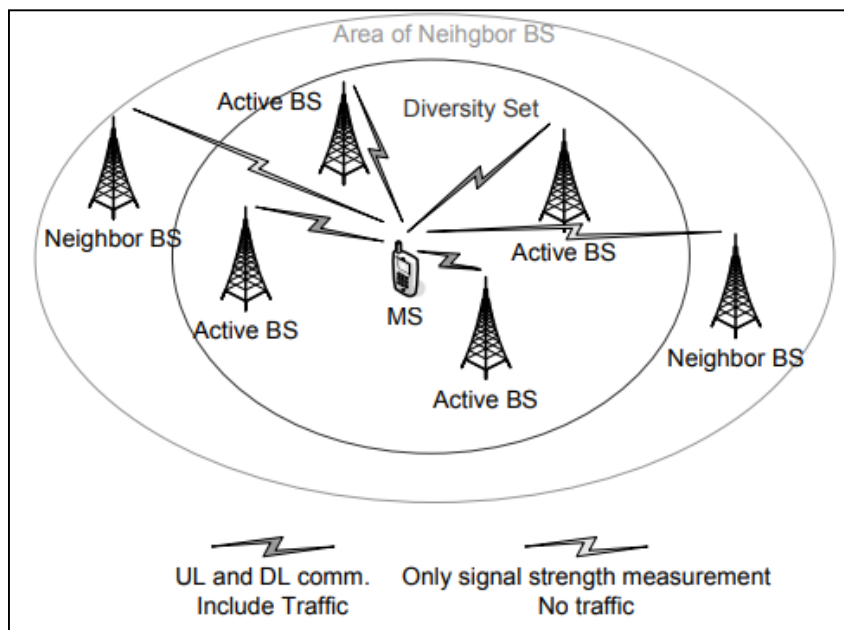


Figure I.17: WiMAX macro diversity handover [27].

### ❖ Fast base station switching (FBSS)

Le principe est plus ou moins semblable à celui du MDHO en ce sens qu'il y a toujours la notion d'ensemble des stations de bases participantes à la procédure de handover.

Ici, la différence réside dans le fait que la station de base principale est la seule station avec laquelle la station mobile abonnée échange du trafic dans les deux sens, ce qui inclut les messages de gestion.

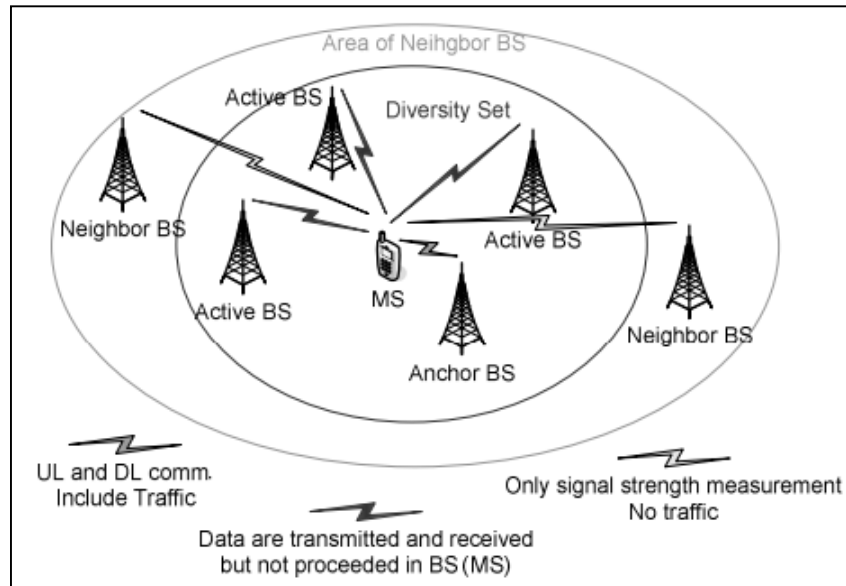


Figure I.18: WiMAX fast base station switching handover [27].

### 1.5.7.2.2. La couche physique

Le WiMAX mobile apporte de nouvelles améliorations à la couche physique, notamment l'OFDMA connu dans le standard 802.16 sous le nom de SOFDMA (Scalable OFDMA).

SOFDMA introduit de nombreuses variations à l'interface WirelessMAN-OFDMA du standard 802.16-2004, non seulement pour améliorer ses fonctionnalités, mais aussi pour être capable de supporter la mobilité des utilisateurs.

Ces variations permettent une meilleure allocation des ressources de fréquence, une gestion plus efficace des interférences et une adaptation dynamique aux conditions changeantes du canal, ce qui est essentiel pour les réseaux mobiles.

### I.5.8. Méthodes de duplexage

La couche PHY de 802.16e prend en charge le TDD et FDD ; cependant, la version initiale du WiMAX mobile n'inclura que le TDD [26].

#### I.5.8.1. Le duplexage FDD (Frequency division duplexing)

Dans le mode FDD les canaux de liaison montante et de liaison descendante sont situés dans deux bandes de fréquences différentes.

Cela permet d'éviter les interférences entre les signaux de transmission et de réception.

De plus, une durée de trame fixe est utilisée à la fois pour la liaison descendante et la liaison montante ce qui facilite l'utilisation de différents types de modulation sur les canaux.

- **FDD full-duplex**

Une station abonnée (SS) en mode full-duplex est capable d'écouter en permanence le canal de liaison descendante ce qui lui permet de transmettre et de recevoir simultanément.

- **FDD half-duplex**

Une station abonnée (SS) en mode half-duplex peut seulement écouter le canal de liaison descendante lorsqu'elle ne transmet pas sur le canal de liaison montante (uplink). Par conséquent, elle n'est pas capable de transmettre et de recevoir simultanément.

Une SS en mode half-duplex est moins coûteuse et moins complexe qu'une SS en mode full-duplex, mais elle est moins efficace en termes de capacité de transmission.

#### I.5.8.2. Le duplexage TDD (Time division duplexing)

Les transmissions downlink et uplink se font sur le même canal (même fréquence porteuse), mais à des périodes temporelles différentes.

La trame de données utilisée dans ce contexte présente une durée fixe et est divisée en deux sous-frames distinctes.

Une caractéristique avantageuse des systèmes TDD est que les émetteurs-récepteurs nécessaires à leur mise en œuvre sont généralement moins complexes, ce qui entraîne des coûts réduits [26].

Cette approche permet donc une utilisation plus économique de la technologie sans fil.

### I.5.9. MIMO

En principe, la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) permet d'augmenter le débit de données proportionnellement au nombre d'antennes de transmission.

Cela est possible car chaque antenne peut transporter un flux distinct de symboles de données, ce qui permet une transmission simultanée de plusieurs flux de données.

Ainsi, plus il y a d'antennes, plus le débit de données potentiel peut être élevé grâce à l'exploitation de la diversité spatiale et des techniques de multiplexage [28].

### I.5.10. Modulation adaptative

La modulation du signal est ajustée en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) du signal radio.

Lorsque la qualité du lien radio est très bonne, le plan de modulation le plus élevé est utilisé, ce qui augmente la capacité du système.

Cependant, lorsque la qualité du lien radio est moins optimale, la qualité de la modulation est dégradée tout en maintenant la même qualité de connexion et la stabilité du lien [23].

Cela signifie que, pour maintenir une connexion stable, le système ajuste la modulation pour compenser les conditions de signal plus faibles, même si cela peut entraîner une réduction de la capacité globale du système.

### I.5.11. Les applications du WiMAX

- **Ligne d'abonné numérique (DSL - digital subscriber line)**

L'une des principales utilisations du WiMAX sera un complément ou une alternative au câble et à l'ADSL.

Le WiMAX fixe offre une bonne solution pour l'accès haut débit dans les nouveaux sites.

Une grande partie du monde ne dispose pas d'une infrastructure à large bande. Le WiMAX est donc une bonne solution car il peut être déployé rapidement et à moindre coût qu'un réseau filaire.

- **Liaison mobile**

Le coût du réseau de transmission et ces liens (backhuls) pour les réseaux mobiles représente une part importante de leurs coûts récurrents.

Le WiMAX peut fournir des liaisons point à point jusqu'à 50km et peut fournir des débits de données capables de prendre en charge plusieurs E1s (liaisons standard de 2 Mbit/s) [29].

Les opérateurs peuvent donc utiliser les équipements WiMAX pour acheminer le trafic des stations de base vers leur réseau.

- **Haut débit temporaire**

En raison de la facilité de déploiement du WiMAX, la technologie pourrait être utilisée pour des situations temporaires telles que des événements sportifs et des chantiers de construction.

- **La sécurité publique**

Les services de police envisagent d'équiper leurs véhicules avec des ordinateurs qui ont un accès sans fil.

WiMAX offre une bonne solution pour cela en raison de la sécurité.

Le WiMAX pourrait également fournir des caméras de vidéo surveillance avec une connectivité haut débit aux centres de contrôle et aux véhicules de soutien permettant aux agents de visualiser les situations et de prendre des décisions en temps réel [29].

### I.6. Conclusion

Suite à la soumission et à l'évaluation des propositions, l'UIT a annoncé que deux systèmes répondaient aux exigences des IMT évoluées : Le LTE-Advanced, et la version améliorée de WiMAX sous la spécification IEEE 802,16m, le WiMAX mobile 2.0 [2].

Qualcomm avait initialement prévu de développer un successeur 4G sous le nom Ultra Mobile Broadband (UMB). Cependant, ce système ne possédait pas deux des avantages que son prédécesseur avait fait [4].

Premièrement, il n'était pas rétrocompatible avec CMDA2000, comme il l'avait été avec IS-95.

Deuxièmement, ce n'était plus le seul système capable de fonctionner dans les bandes passantes étroites qui dominaient l'Amérique du Nord, en raison de la prise en charge flexible de la bande passante de LTE.

Pour ces raisons, aucun opérateur de réseau n'a annoncé son intention d'adopter l'UMB technologie, et le projet a été abandonné en 2008.

Au lieu de cela, la plupart des opérateurs ont décidé de passer au LTE.

Cela laissait une situation où il restait deux routes vers les communications mobiles 4G: LTE et WiMAX.

Parmi ceux-ci, le LTE bénéficie d'un grand soutien parmi les opérateurs de réseau et les fabricants d'équipements, dans la mesure où plusieurs opérateurs WiMAX ont choisi de migrer leurs réseaux vers le LTE.

En outre, contrairement au WiMAX, les réseaux mobiles LTE offrent une rétrocompatibilité avec les réseaux mobiles 2G et 3G qui ont été normalisés précédemment par le 3GPP.

Avec notamment l'utilisation des mêmes cartes SIM, ce qui permet aux fabricants de smartphones de concevoir plus facilement des terminaux compatibles GSM/UMTS/LTE que des terminaux mixtes 2G/3G/WiMAX.

En raison de cette prise en charge, LTE est la technologie de communication mobile dominante dans le monde.

Cela étant dit, nous poursuivrons notre mémoire en faisant référence au LTE comme la principale technologie 4G.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G, une avancée majeure qui promet des performances supérieures par rapport à ses prédécesseurs.

# **Chapitre II: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G**

### II.1. Introduction

La technologie 5G est le dernier développement dans le monde des communications, promettant des vitesses de données plus rapides et des réseaux plus efficaces.

Le premier lancement commercial de services 5G dans le monde a eu lieu en Corée du Sud par les opérateurs (SK Telecom, Korea Telecom et LG U+) en avril 2019 [30].

Cette technologie offre un potentiel incroyable pour les entreprises et les particuliers, en permettant une connectivité ultra-rapide et une latence réduite.

Ce chapitre a pour un but de discuter brièvement les caractéristiques, l'architecture et les technologies clés les plus prometteuses pour les réseaux mobiles 5G.

### II.2. Caractéristiques

#### II.2.1. La Capacité en nombre d'utilisateurs simultanés

La technologie 5G augmente le nombre de connexions simultanées par surface couverte.

Elle vise à supporter jusqu'à un million d'appareils connectés par kilomètre carré [31].

#### II.2.2. Débits

Le débit de données uplink est de 10 Gbps et le débit de données de downlink de 20 Gbps [32].

#### II.2.3. Fréquences

La principale caractéristique de la 5G est le spectre de fréquence qui a été divisé en trois plages [33, 34]:

- La plage de fréquence 1 (FR1) est 410 MHz – 7 125 MHz.
- La plage de fréquence 2 (FR2) est 24.25 GHz – 52.6 GHz.
- La plage de fréquence 3 (FR3) est 52.6 GHz – 116 GHz.

#### II.2.4. L'efficacité spectrale cellulaire

L'efficacité spectrale est de 15 bps/Hz en UL et de 30 bps/Hz en DL [32].



### II.2.5. Latence

La latence est de 4 ms en eMBB et de 0.5 ms en URLLC [32].

## II.3. Applications

La 5G permettra de nombreuses nouvelles applications en particulier dans les zones urbaines et les villes, parmi eux on note:

### II.3.1. L'automatisation industrielle

La technologie 5G révolutionne l'automatisation industrielle.

Avec ses vitesses élevées et sa faible latence, la technologie 5G permet le développement de nouvelles applications susceptibles de faire progresser l'automatisation industrielle.

Avec des vitesses de transfert de données plus rapides, une faible latence et une plus grande bande passante, cette efficacité conduit à une meilleure prise de décision, à des normes de sécurité améliorées et à des taux de production plus élevés.

Ce qui conduit à une rentabilité pour les entreprises utilisant la technologie 5G pour l'automatisation industrielle.

### II.3.2. L'agriculture connectée

Les performances de la technologie 5G en termes de densité et de gamme d'objets connectés pourraient bien améliorer l'agriculture industrielle.

Un grand nombre de capteurs et d'appareils peuvent désormais être connectés avec l'utilisation des réseaux 5G, permettant aux agriculteurs de surveiller plus précisément leurs cultures, et d'optimiser leur production, réduire le gaspillage et augmenter leurs profits.

### II.3.3. Véhicules autonomes

De nombreux développements dans la technologie des véhicules comme la vitesse du réseau, le débit de données et l'apprentissage automatique doivent être prêts pour que l'avenir du véhicule autonome se réalise.

Cela étant dit, les réseaux 5G vont favoriser considérablement le développement des véhicules autonomes, en raison de la latence réduite, car les véhicules pourront répondre 10 à 100 fois plus rapidement que sur les réseaux mobiles actuels.

### **II.3.4. Gestion du trafic**

La 5G peut aider à la mise en place de systèmes de transport intelligents qui permettent des communications bidirectionnelles de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule à infrastructure (V2I), afin de promouvoir la sécurité dans les systèmes de transport [35].

Ces technologies de communication avancées permettant de collecter, de traiter et de diffuser des informations sur la circulation en temps réel ce qui aide à réduire la congestion routière et à améliorer la sécurité routière.

### **II.3.5. Robotique**

Les robots trouveront des applications dans divers secteurs, tels que la construction et la maintenance dans des zones dangereuses.

Mais cela nécessite un contrôle à distance avec un retour visuel synchrone en temps réel.

Pour y parvenir, les temps de réponse du système doivent être inférieurs à quelques millisecondes.

Cela nécessite une infrastructure de communication capable de garantir un niveau de capacité en temps réel élevé, une haute fiabilité et la prise en charge de la mobilité.

Les réseaux 5G peuvent répondre à ces exigences et doivent être déployés pour permettre l'utilisation de robots et d'applications de téléprésence.

## **II.4. Les technologies émergentes des réseaux 5G**

### **II.4.1. Millimeter wave (mmWave)**

Millimeter wave ou bien la nouvelle radiofréquence 5G (5G NR), est l'une des technologies clés pour les réseaux mobiles 5G en raison de sa capacité à atteindre les immenses débits requis pour la cinquième génération.

Cette technologie avancée pour la couche physique, offrant de large spectre des fréquences radio entre 30 et 300 GHz [35].

Cependant, les bandes de fréquences allant de 24 GHz jusqu'à 100 GHz sont supposées être utilisées en premier pour la 5G.

## Chapitre II: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G

Les appareils utilisés dans la technologie mmWave sont des antennes intelligentes directionnelles, car elles peuvent surmonter les effets de propagation et atteindre des spectres de haute fréquence [36].

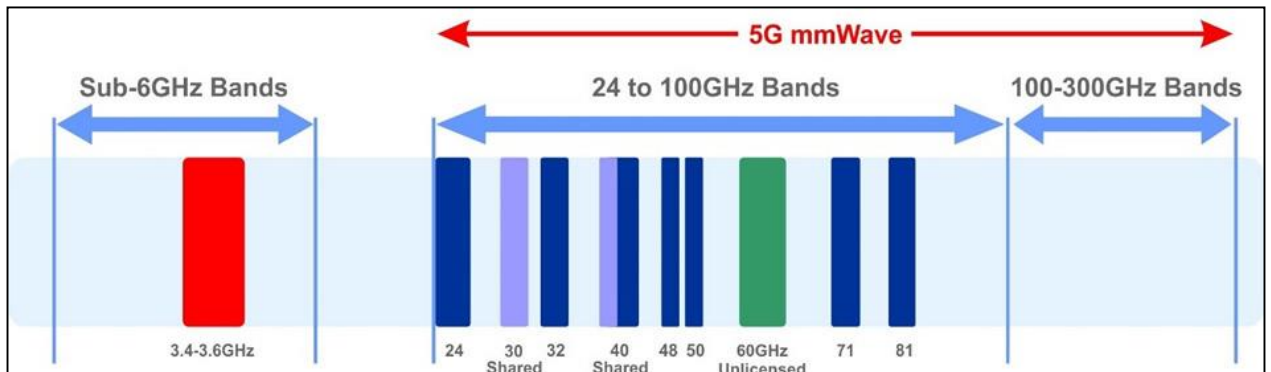


Figure II.1: Bandes de fréquences 5G new radio (5G NR): The mmWave [37].

### II.4.2. Massive multiple input multiple output (Massive MIMO or mMIMO)

Le besoin d'augmenter l'efficacité et la capacité de la communication sans fil a conduit l'industrie à largement étudier le Massive MIMO pour le futur réseau 5G.

Cette technologie fait référence à un réseau d'antennes comportant des dizaines ou des centaines d'antennes.

Le MIMO massif peut être considéré comme une forme de beamforming ou de MU-MIMO amélioré qui connecte des dizaines de dispositifs [38].

Il vise à créer des stations de base qui communiquent simultanément avec un grand nombre d'utilisateurs sur la même fréquence [38].

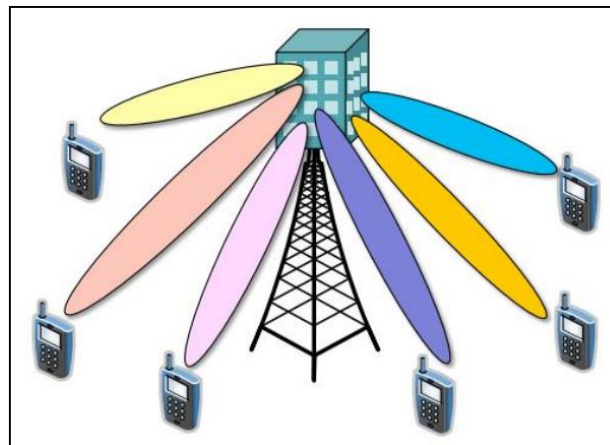


Figure II.2: Concept MIMO massif [38].

### II.4.3. Ultra dense network (UDN)

Un UDN est un réseau qui possède une densité de ressources radio beaucoup plus importante par rapport aux réseaux actuels [39].

Les motifs derrière le choix des réseaux ultra-dense sont que la technologie mmWave ne peut pas diffuser au-dessus de 100 m en raison de la dégradation de la propagation en mmWave [40].

De plus, les BS équipées d'antennes mMIMO nécessitent une énorme masse d'énergie pour desservir tous les utilisateurs à l'intérieur de la macrocellule [40].

Cela étant dit, les réseaux de petites cellules sont la solution pour les réseaux mobiles 5G.

La densité des stations de base 5G devrait fortement augmenter jusqu'à 40 ou 50 BS/Km<sup>2</sup> [40].

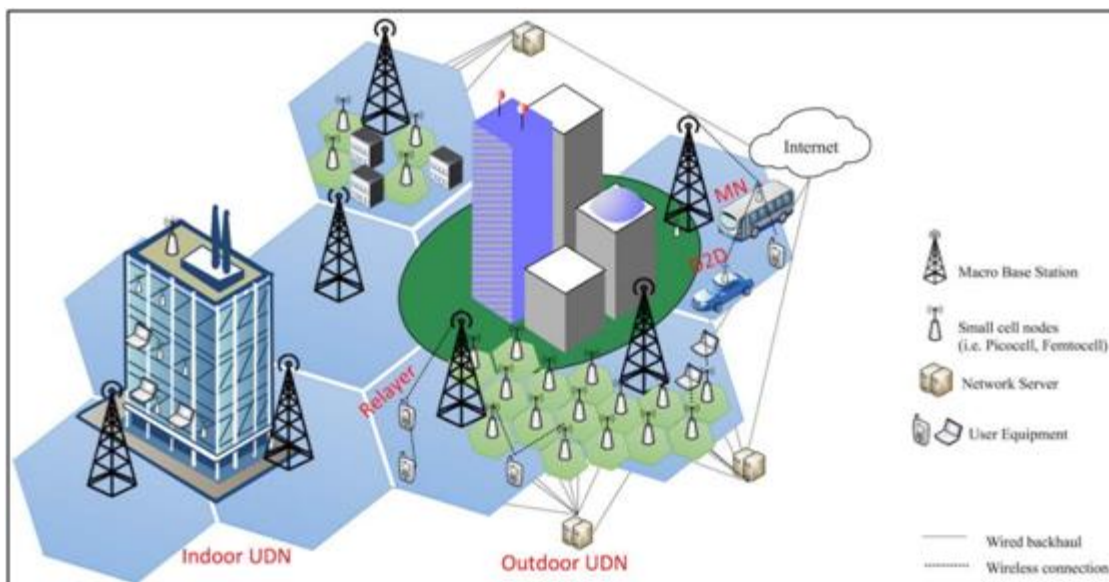


Figure II.3: Exemple d'un réseau UDN [41].

### II.5. Architecture

Avant de parler d'architecture, précisons d'abord les 2 types de déploiement de la technologie 5G.

Les opérateurs de réseaux mobiles ont le choix entre deux options principales lors du déploiement de la 5G : non-standalone (NSA) et standalone (SA).

## Chapitre II: Les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G

La NSA est le premier choix pour les déploiements initiaux de la 5G parmi les opérateurs de réseaux mobiles, grâce à l'infrastructure mobile existante.

Mais, à mesure que les déploiements SA 5G sont présentés, comme le montre la feuille de route de la normalisation 3GPP ci-dessous, il est important de comprendre la différence entre les deux architectures.

Parce que le choix du mode de déploiement détermine l'efficacité du fonctionnement du réseau 5G.

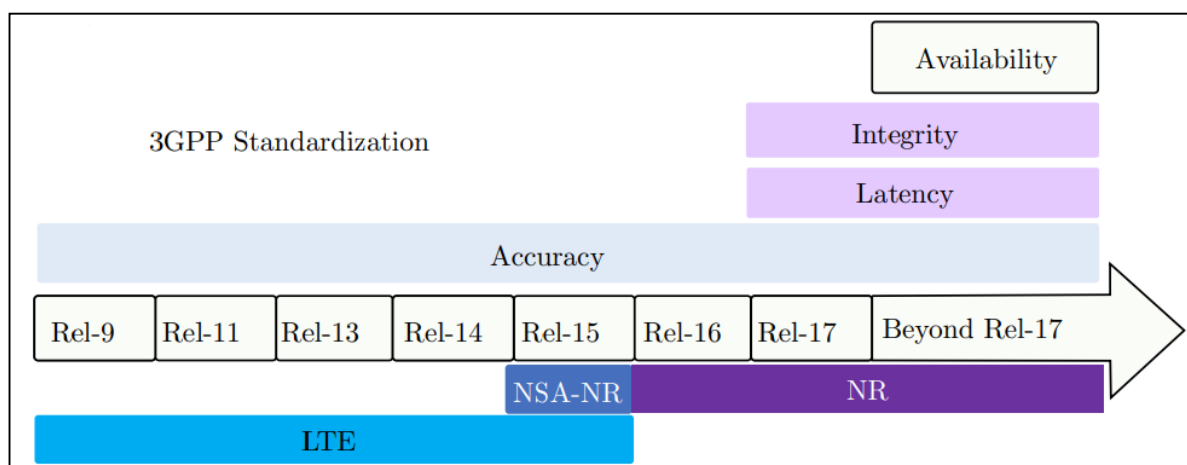


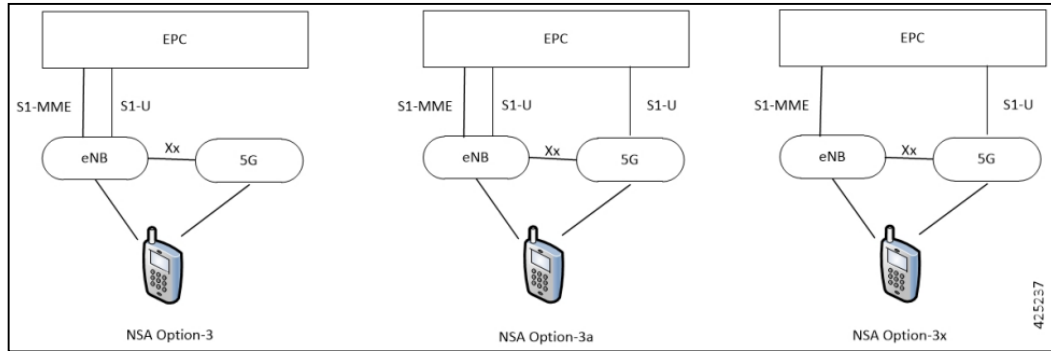
Figure II.4: 3GPP standardization roadmap [42].

### II.5.1. Non-Standalone (NSA)

NSA également connue sous le nom de Release 15 par 3GPP, est un réseau d'accès radio (RAN) 5G qui fonctionne sous l'EPC qui est le noyau 4G LTE [42].

Il comprend à la fois une station de base 4G et 5G, mais la station de base 4G a priorité. Et puisque le plan de contrôle NR est lié à l'EPC, les signaux de radiofréquence sont transmis à la station de base 4G principale [43].

Il existe 3 variantes de déploiement NSA appelées option-3 comme représenté dans la figure II.5.



**Figure II.5: Les variantes du NSA option-3 [44].**

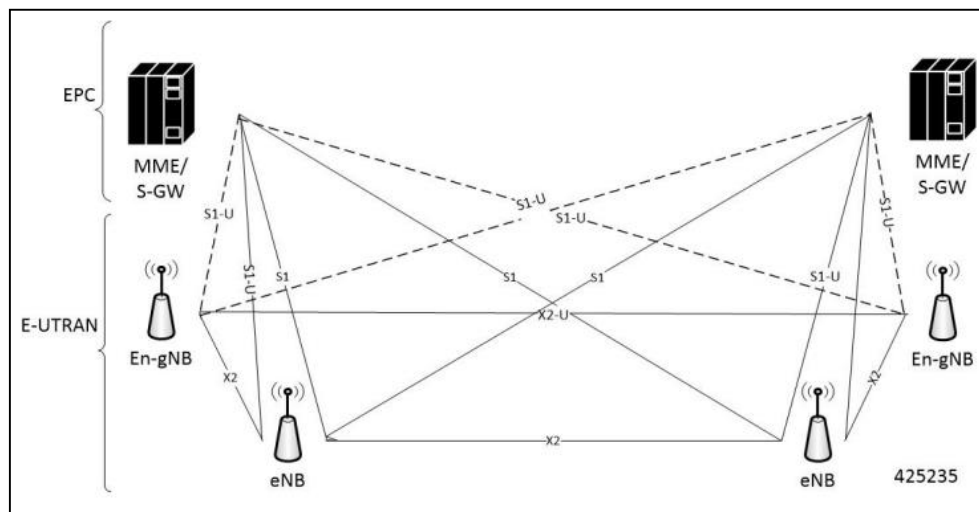
Avec l'approche 5G NSA, aussi appelée EN-DC (E-UTRA New Radio - Dual Connectivity), l'opérateur peut rapidement lancer la 5G sur le marché.

Car de cette façon, le réseau d'accès radio 5G (RAN) avec nouvelle radio (NR) est disponible en conjonction avec les services 4G et offrant également des capacités du réseau 5G [43].

L'e-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC) prend en charge la nouvelle radio 5G (NR) avec EPC.

Une UE connectée à un eNodeB agit comme un nœud maître (MN) et un en-gNB agit comme un nœud secondaire (SN) [44].

L'eNodeB est connecté à l'EPC via l'interface S1 et à l'en-gNB via l'interface X2. Le en-gNB peut être connecté à l'EPC via l'interface S1-U et à d'autres en-gNB via l'interface X2-U [44].



**Figure II.6: EN-DC architecture [44].**

### II.5.2. Standalone (SA)

Lorsqu'un réseau 5G SA est déployé, l'architecture change complètement.

En particulier, le 5G SA intègre la NG-RAN (Next Generation – Radio Access Network) 5G, associée au 5GC (5G Core) qui pourrait apporter l'ensemble des capacités 5G et est considérée comme l'architecture cible de la 5G [43].

SA exige des opérateurs de réseaux mobiles qu'ils configurent une toute nouvelle architecture.

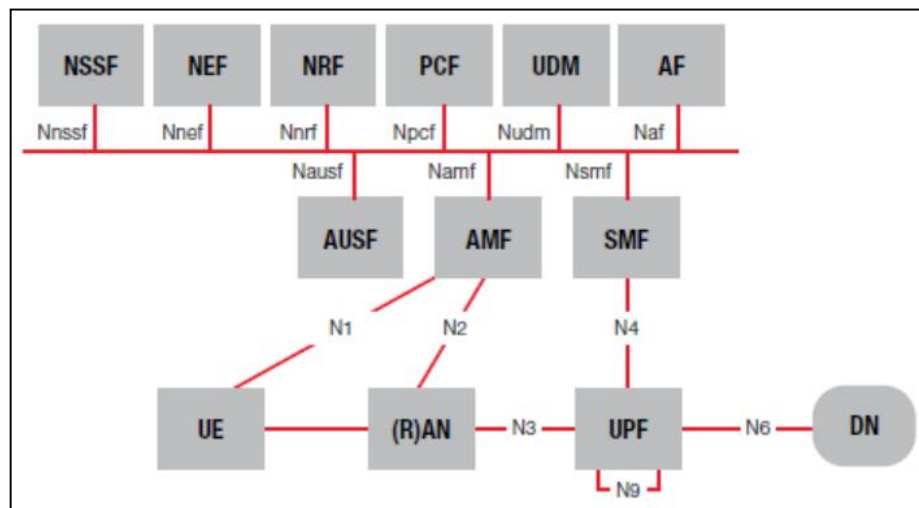


Figure II.7: Architecture SA [45].

Une multitude de nouvelles fonctions de réseau ont été incluses dans le 5GC, chacune d'entre elles effectuant des rôles très spécifiques.

Les différents composants décrits dans la figure II.7 sont expliqués comme suit :

Les équipements utilisateurs (UE): tels que les smartphones 5G ou les appareils mobiles 5G.

5G NextGen node base station (gNB): fournit une connectivité radio pour les dispositifs mobiles. Il remplace les équipements de base de station 4G actuels et agit en tant que noeud central pour la transmission et la réception de données sur le réseau 5G.

Access and mobility management function (AMF): Cette fonction gère la mobilité, l'authentification, l'autorisation, les connexions et les transferts de données [45].

Network slice selection function (NSSF): agit comme point de terminaison pour les interfaces RAN CP [45].

Network exposure function (NEF): Il agit comme une passerelle API qui permet aux opérateurs de surveiller et d'appliquer la politique d'application pour les utilisateurs du réseau [45].

NF repository function (NRF): Il prend en charge la fonctionnalité de découverte de service [45].

Session management function (SMF): Cette fonction gère les sessions de données entre les dispositifs utilisateur final et les stations de base [45].

Fonction du plan utilisateur (UPF) : Cette fonction assure la gestion des paquets de données entrant et sortant du réseau 5G, en garantissant la qualité de service appropriée pour chaque utilisateur final [45].

Data network (DN): Par exemple les services d'opérateur, l'accès à internet ou les services tiers [45].

Authentication server function (AUSF): Cette fonction gère l'authentification et la vérification de l'identité des utilisateurs du réseau 5G [45].

Unified data management (UDM): Cette fonction gère le stockage des informations d'abonnement [45].

Policy control function (PCF): Cette fonction définit et gère les politiques de gestion du réseau 5G [45].

Application functions (AF): Un serveur d'application qui existe pour différents services d'application comme l'orientation du trafic [45].

Noms des interfaces : De manière similaire à d'autres réseaux, les exigences techniques 5G donnent également des noms aux interfaces, ces noms sont énumérés de NG1 au NG15.

### II.6. Structure du trame

Une trame 5G est définie comme ayant une durée de 10 ms. Elle est découpée en 10 sous-trames de 1 ms chacune.

Chaque sous-trame est ensuite divisée en emplacements, comme illustré dans la figure II.8 [46].



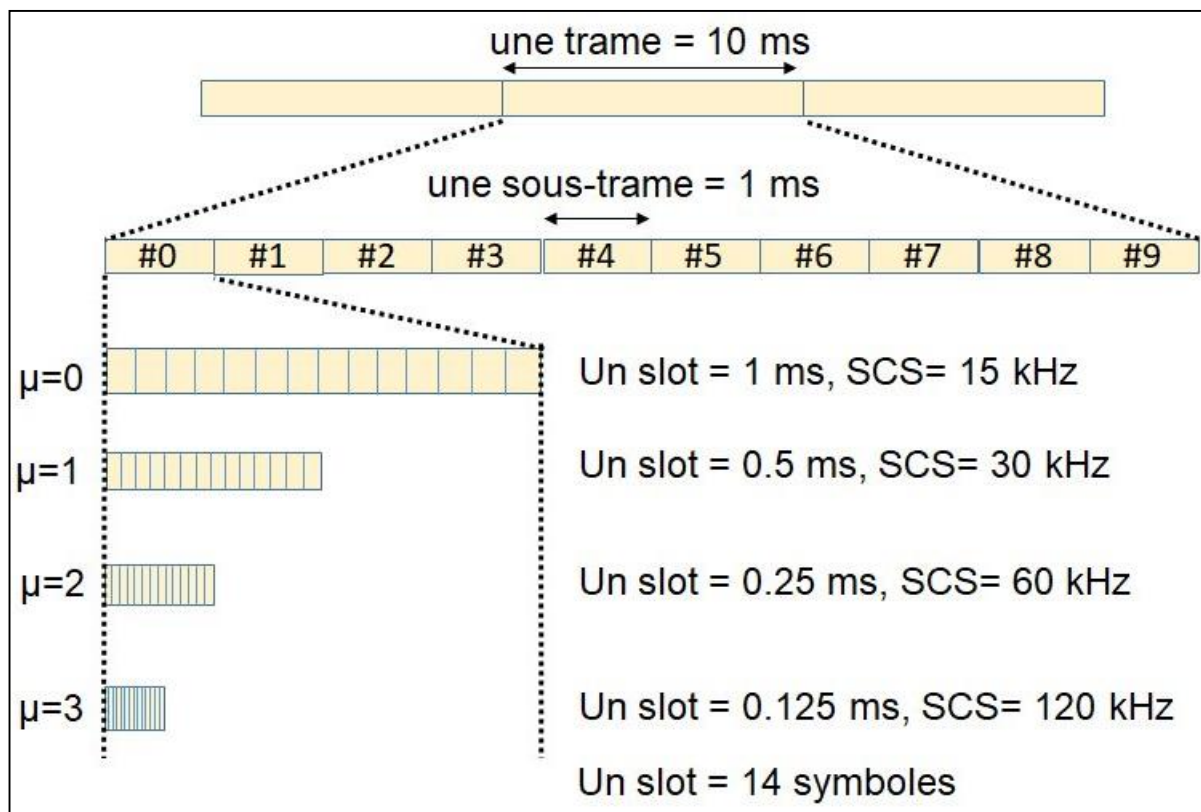


Figure II.8: La trame temporelle 5G-NR [47].

Le nombre de slots par sous-trame dépend de l'espacement entre les sous-porteuses (SCS), ce que nous faire rappeler au terme de la numérolgie.

Ce dernier fait référence à la configuration des paramètres de forme d'onde, et les différentes numérolgies sont considérées comme des sous trames basées sur OFDM ayant différents paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses, durée du symbole, et la taille du préfixe cyclique [48].

Numérolgie	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

Figure II.9: Les paramètres de la trame temporelle 5G-NR [47].

### II.7. Les techniques d'accès

Dans le réseau 5G NR, le préfixe cyclique OFDM (CP-OFDM) est la version spécifique d'OFDM utilisée pour la liaison descendante [49].

Tandis que le DFT-S-OFDM couramment appelé SC-FDMA est utilisé pour la liaison montante [49].

L'espacement des porteuses est nécessaire pour préserver l'orthogonalité des porteuses.

C'est pour ça la 5G NR consiste à utiliser un espacement flexible entre les sous-porteuses pour prendre en charge correctement les différents types de bandes de fréquence et de modèles de déploiement de la 5G.

### II.8. La modulation QAM

La modulation d'amplitude en quadrature permet d'augmenter le débit de données plusieurs fois quand on monte aux ordres de modulation élevés.

Les formats de la modulation d'amplitude en quadrature utilisés dans la 5G incluent 16QAM, 64QAM et 256QAM [50].

256 QAM est utilisé juste lorsque la qualité de la liaison est bonne, et se réduit à 64 QAM, puis 16 QAM, à mesure que la liaison se dégrade.

Donc, Il s'agit d'un équilibre entre le débit de données et la résistivité au bruit.

### II.9. Le handover

Dans les réseaux 5G, un handover peut être nécessaire pour des raisons telles que l'équilibrage de charge, les conditions radio modifiées ou le déplacement de l'utilisateur.

Autrement dit, lorsque le réseau actuel de l'UE n'est plus en mesure de le servir, ou lorsqu'un réseau plus approprié est découvert, le réseau de service déclenchera le processus de handover de l'appareil.

Cela peut se produire, par exemple, lorsque l'utilisateur se déplace ou lorsque de nombreux appareils sont connectés simultanément au même réseau.

### II.9.1. Intra-5G handovers basé sur Xn

Ce type de handover est basé sur l'interface Xn qui relie deux RANs.

Cette interface définit les protocoles de handover pour les réseaux 5G, permettant la transition transparente d'un UE entre différents réseaux d'accès radio (RAN) au sein du même système de réseau 5G.

L'interface peut être utilisée pour la livraison de messages pendant les handovers inter-RAN, dans lesquels le réseau central et son AMF restent inchangés [51].

### II.9.2. Intra-5G handovers basé sur N2

Lors de l'utilisation de l'interface N2 pour un handover, les deux RAN ne communiquent pas directement comme ils le font dans la variation basée sur Xn. Au lieu de cela, tous les messages sont acheminés via le 5GC ou l'UE.

Un handover basé sur N2 peut être utilisé lorsqu'il n'y a pas de connectivité directe entre le réseau source et le réseau cible, ou lorsqu'un handover basé sur Xn a échoué précédemment.

De plus, contrairement à l'autre variation, il peut également inclure un changement AMF dans le réseau cœur, qui transfère les capacités de sécurité de l'UE à un nouvel AMF [51].

### II.9.3. Inter-5G handovers

Afin d'assurer une rétrocompatibilité avec l'infrastructure 4G/LTE, la spécification 5G définit les handovers pour transférer un UE entre l'EPC du réseau 4G et le 5GC.

En fonction des capacités d'une UE, l'interopérabilité entre les deux réseaux peut être réalisée par enregistrement simple ou double.

Un appareil en mode double enregistrement (dual registration mode) maintient simultanément deux contextes de sécurité différents, un pour chaque système.

Cela rend le transfert entre les deux réseaux plus simple, mais nécessite plus de données à stocker du côté de l'UE.

De même, en mode d'enregistrement simple, l'appareil ne conserve que suivi d'un contexte de sécurité, mais doit effectuer un handover complet et la procédure d'enregistrement lors de la commutation entre les différents réseaux.

Semblable aux transferts intra-5G discutés précédemment, il existe différentes variantes de la procédure en fonction de la disponibilité des interfaces réseau.

Tout comme dans le transfert basé sur N2, il n'y a pas de canal de communication direct entre la source et le réseau cible.

Au lieu de cela, une connectivité indirecte peut être fournie via l'interface réseau N26 en option entre l'AMF du 5GC et l'entité de gestion de la mobilité (MME) de l'EPC [51].

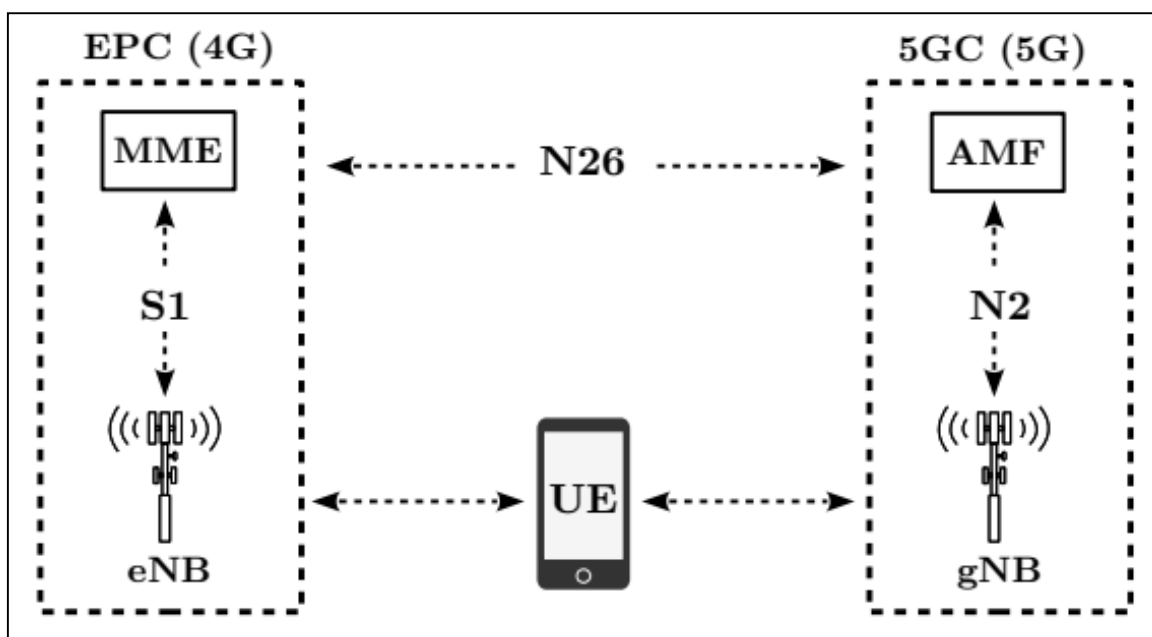


Figure II.10: Aperçu de la connectivité inter-5G entre le EPC et le 5GC [51].

### II.10. Hiérarchie des canaux dans la 5G

L'utilisation des canaux dans le réseau 5G fournit une méthode pour organiser le flux de données sur l'interface radio 5G.

Ils permettent aussi au système de communications de reconnaître le type de données qui sont envoyé et de s'en occuper en conséquence.

Il existe trois types principaux de canaux dans les systèmes 5G [52]:

**A. Canaux logiques:** Ils peuvent être l'un des deux groupes :

- **Canaux de commande :** Les canaux de commande sont utilisés pour le transfert de données à partir du plan de commande.
- **Canaux de trafic :** Les canaux logiques de trafic sont utilisés pour le transfert de données de la couche de plan utilisateur.

**B. Canaux de transport :** C'est le multiplexage des données logiques à transporter par la couche physique et ses canaux sur l'interface radio.

**C. Canaux physiques :** Ils sont utilisés pour transporter les données sur l'interface radio.

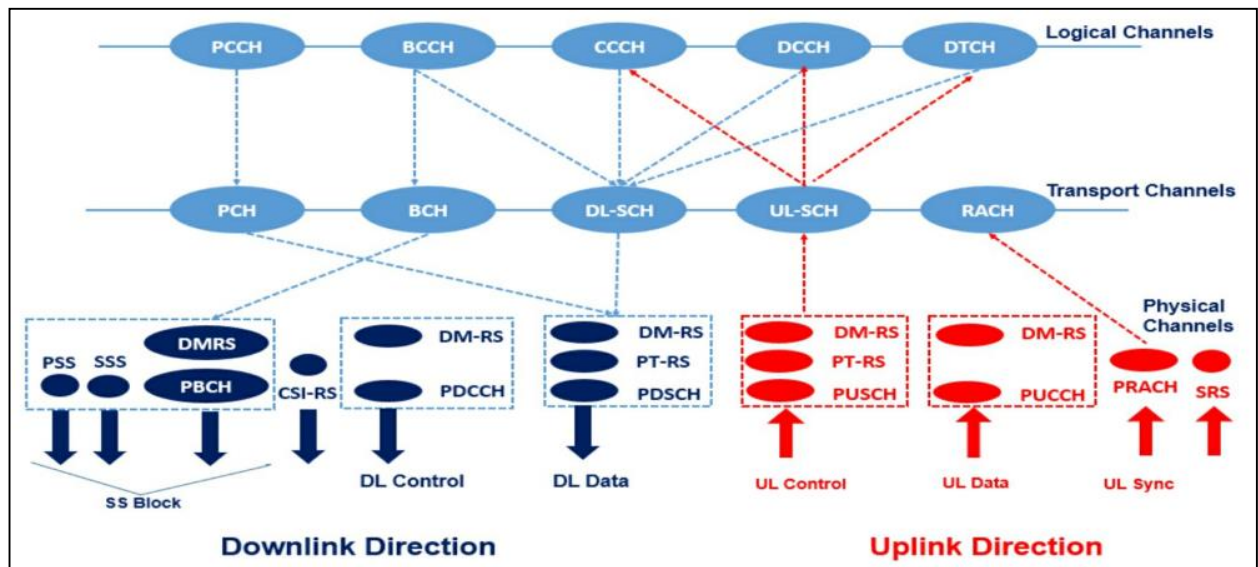


Figure II.11: Hiérarchie des canaux 5G [52].

Les noms et les descriptions des canaux utilisés pour le système de communication 5G sont donnés ci-dessous.

### II.10.1. Canaux logiques 5G NR

#### Canaux logiques de liaison descendante

- Canal de contrôle de diffusion, BCCH :  
Il est utilisé pour transmettre les informations du système du réseau vers les UEs [52].
- Canal de contrôle de pagination, PCCH :  
Il est utilisé pour localiser les UEs dont leur emplacement au niveau de la cellule n'est pas connu dans le réseau [52].
- Canal de contrôle commun, CCCH :  
Utilisé pour transmettre des informations de contrôle aux UEs [52].
- Canal de contrôle dédié, DCCH :  
Utilisé pour transporter des informations de contrôle dédiées vers ou depuis l'UE [52].

- Canal de trafic dédié, DTCH :

Dédié à un UE et est utilisé pour transporter des informations d'utilisateur vers et depuis un UE spécifique [52].

### **Canaux logiques de liaison montante**

- Canal de contrôle commun, CCCH.
- Canal de contrôle dédié, DCCH.
- Canal de trafic dédié, DTCH.

### **II.10.2. Canaux de transport 5G NR**

#### **Canaux de transport en liaison descendante**

- Canal de diffusion, BCH:

Utilisé pour transmettre les informations de système BCCH [52].

- Canal de pagination, PCH:

Utilisé pour transporter les informations de pagination depuis le canal logique PCCH [52].

- Canal partagé de liaison descendante, DL-SCH:

C'est le canal de transport principal utilisé pour transmettre les données en liaison descendante [52].

#### **Canaux de transport en liaison montante**

- Canal partagé de liaison montante, UL-SCH:

C'est le canal de transport principal utilisé pour transmettre les données en liaison montante [52].

- Canal d'accès aléatoire, RACH:

Il transporte le préambule d'accès aléatoire qui est utilisé pour résoudre les collisions de messages qui peuvent se produire lorsque les UE accèdent simultanément au système [52].

### **II.10.3. Canaux physiques 5G NR**

#### **Canaux physiques en liaison descendante**

- Canal partagé physique de liaison descendante, PDSCH:

Utilisé pour transporter les données depuis le DL-SCH et ses canaux supérieurs sur une base partagée de fréquence et de temps [52].

- Canal de contrôle physique de liaison descendante, PDCCH:

Transporte les données de contrôle en liaison descendante [52].

- Canal de diffusion physique, PBCH:

Il fournit aux UEs le bloc d'informations maître, MIB, et prend en charge la synchronisation de temps et de la fréquence [52].

### **Canaux physiques en liaison montante**

- Canal d'accès aléatoire physique, PRACH:

Utilisé pour l'accès au canal [52].

- Canal partagé physique de liaison montante, PUSCH:

Utilisé pour transporter les données depuis l'UL-SCH et ses canaux supérieurs sur une base partagée de fréquence et de temps [52].

- Canal de contrôle physique de liaison montante, PUCCH:

Transporte les données de contrôle en liaison montante [52].

### **II.11. Conclusion**

Comme on a vu précédemment, la 5G a plusieurs objectifs, dont les plus importants sont de résoudre les problèmes de saturation de la 4G en zone urbaine et de permettre la transition numérique de l'industrie et des services.

Elle s'appuie sur plusieurs techniques majeures qui permettent d'améliorer la connectivité et la fiabilité, d'augmenter les débits des transferts d'information et de réduire le temps de latence.

Dans la suite, nous allons présenter une comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G, mettant en évidence les principales différences entre les deux, en termes de débit, de latence et d'autres aspects clés.

# **Chapitre III: Comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G**



### III.1. Introduction

Le monde évolue rapidement et l'industrie des télécommunications ne fait pas exception.

La transition de la 4G à la 5G représente une étape importante dans le développement de la technologie sans fil.

La 4G a permis des avancées significatives en matière de vitesse de données et de connectivité mobile, mais la 5G promet des améliorations encore plus importantes.

Dans ce chapitre, nous examinerons les principales différences entre la 4G et la 5G.

### III.2. Les différences clés entre 4G et 5G

#### III.2.1. Débit

Le débit fait référence à la quantité de données que le réseau peut transmettre en une certaine période de temps, souvent mesurée en mégabits par seconde (Mbps) ou en gigabits par seconde (Gbps).

En 4G, le débit offert est de 100 Mbps en voie descendante et 50 Mbps en voie montante [9].

En revanche, la 5G offre des débits allant jusqu'à 20 Gbps en voie descendante et 10 Gbps en voie montante [32].

Il convient de noter que les vitesses de débit réelles peuvent varier en fonction de divers facteurs, tels que la densité de population, la distance de l'utilisateur à la station de base, et la qualité du signal.

Néanmoins, la 5G reste nettement plus rapide que la 4G, en outre la 5G offre des possibilités améliorées pour les utilisateurs, telles que des vitesses de téléchargement plus rapides et une meilleure qualité de vidéo en streaming.

#### III.2.2. Latence

La latence fait référence au temps de réponse entre l'envoi et la réception d'une donnée sur un réseau.

En d'autres termes, il s'agit du délai de transit, ou retard. La technologie 4G offre une latence moyenne d'environ 100 ms [9].

Mais cela peut varier en fonction de la qualité du signal, de la distance par rapport à la tour de transmission et de la charge du réseau.

En revanche, la technologie 5G offre une latence beaucoup plus faible, d'environ 4 ms en eMBB et de 0,5 ms en URLLC [32].

Ce qui la rend idéale pour les applications nécessitant une transmission de données rapide et fiable en temps réel.

### III.2.3. L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est l'un des facteurs critiques ayant un impact considérable sur l'empreinte environnementale et les coûts opérationnels des systèmes de télécommunications modernes.

Ainsi, les opérateurs doivent désormais considérer l'efficacité énergétique tout autant que l'efficacité des données et des coûts lorsqu'ils planifient et optimisent leurs réseaux.

Les associations de l'industrie des télécommunications établissent des objectifs et des feuilles de route pour soutenir la croissance du trafic de données tout en atteignant les objectifs de durabilité.

Par exemple, la spécification 5G de 3GPP prévoit une réduction de 90% de la consommation d'énergie par rapport aux technologies 4G [53].

Pour maximiser les effets, une approche multicouche peut être adoptée pour son déploiement, y compris une gestion améliorée de l'alimentation au niveau de l'équipement, de nouvelles solutions d'implantation telles que le refroidissement liquide pour réduire la nécessité de la climatisation, et une utilisation flexible des ressources [53].

Ensemble, ces stratégies permettent de déployer des réseaux mobiles de manière innovante, ce qui peut permettre d'obtenir une efficacité énergétique par bit jusqu'à 50 fois supérieure à celle de la 4G [53].

En termes de consommation d'énergie par bit, la technologie 5G est donc plus efficace que la 4G grâce à l'utilisation optimisée des fréquences de transmission et à sa conception pour transmettre des données plus rapidement et plus efficacement.

Cependant, sans les stratégies mentionnées ci-dessus, une station de base 5G - en raison de la plus grande densité de stations de base, d'antennes, d'infrastructures Cloud et d'appareils utilisateurs - pourrait utiliser plus de 140% d'énergie qu'une station 4G couvrant une zone similaire [54].

### III.2.4. Coût

La principale différence en termes de coûts de déploiement entre la 4G et la 5G réside dans les capacités supplémentaires offertes par la 5G.

La 5G est conçue pour être plus rapide, plus fiable et plus efficace que la 4G, ce qui en fait un choix plus coûteux pour les opérateurs de télécommunications.

En ce qui concerne le déploiement de la 5G, il existe deux approches différentes : NSA et SA.

La NSA (Non-Standalone) utilise les réseaux 4G existants pour fournir une connectivité 5G, ce qui permet un déploiement plus rapide et moins coûteux.

Cependant, cette approche limite les capacités de la 5G.

L'approche SA (Standalone) est plus coûteuse et nécessite des investissements supplémentaires dans l'infrastructure de réseau 5G dédiée.

Cela permet des fonctionnalités avancées telles que des vitesses plus élevées, une faible latence et une connectivité de masse pour l'Internet des objets (IoT).

En résumé, la 5G est plus coûteuse que la 4G en raison de ses capacités supplémentaires, tandis que le déploiement de la 5G peut être effectué à moindre coût en utilisant l'approche NSA.

Cependant, pour des fonctionnalités avancées, l'approche SA est nécessaire, ce qui peut être plus coûteux en termes d'investissement initial.

### III.2.5. Sécurité

Comparée à la technologie 4G, la 5G offre un certain nombre de mesures de sécurité supplémentaires conçues pour renforcer la protection des utilisateurs individuels et des réseaux mobiles.

Dans le tableau suivant, nous examinerons les différences de sécurité entre la 4G et la 5G en nous concentrant sur les fonctionnalités de sécurité clés de la 5G et leur impact sur la sécurité globale du réseau mobile [55].

### Chapitre III: Comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G

Fonction	4G LTE	5G
Chiffrement de la confidentialité et de l'intégrité	Chiffrement sur le chemin radio entre la station mobile et l'eNodeB. Chiffrement et intégrité du plan de contrôle entre l'UE et l'entité de gestion de la mobilité (MME) Algorithmes de 128 bits.	En plus des fonctions LTE : Prise en charge actuelle d'algorithmes de 256 bits. Intégrité mise en œuvre empêchant la modification non autorisée des données utilisateur.
Authentication Key Agreement (AKA)	Clé partagée provisionnée dans l'UICC et l'AUSF (fonction serveur d'authentification) dans le réseau, ce qui permet une authentification mutuelle entre l'UE et le réseau.	En plus des fonctions LTE : 5G-AKA et EAP-AKA' pris en charge pour les technologies d'accès 3GPP et non 3GPP. Protège la confidentialité des messages de la couche non d'accès initiale (NAS) entre UE et le réseau.
Fonction d'ancrage de sécurité (SEAF) ou clé d'ancrage	Aucun	Permet la réauthentification de l'UE lorsqu'elle passe entre différents réseaux d'accès ou même de service sans avoir à exécuter l'authentification complète.
Identifiant permanent d'abonné (SUPI)	Identifiant envoyé avant l'authentification du réseau.	Le Identifiant d'abonné caché d'abonné (SUCI) fournit un mécanisme pour utiliser la clé publique du réseau domestique pour chiffrer la partie MSIN de l'identifiant d'abonné.
Contrôle domestique	Aucun	HPMN peut vérifier que l'UE est présente et demande un service auprès du VPMN - utile dans les scénarios d'itinérance et de prévention de la fraude.
Fonction d'exposition de réseau (NEF)	Aucun	Permet la sécurisation des informations du réseau 3GPP par des fonctions authentifiées et autorisées.

Tableau III.1: Comparaison de la sécurité LTE et 5G

En plus des fonctionnalités supplémentaires apportées par la 5G par rapport à la 4G, elle dispose de nombreux contrôles de sécurité intégrés dès la conception, développés pour renforcer la protection des consommateurs individuels et des réseaux mobiles, tels que :

- **Virtualisation**

La virtualisation dans le contexte de la 5G fait référence à la création d'environnements virtuels pour exécuter des fonctions de réseau.

Cela signifie que les opérateurs peuvent effectuer des opérations centrales en dehors de leur réseau, en utilisant des fonctions hébergées dans le Cloud.

Ce qui offre des avantages considérables en termes de flexibilité et d'évolutivité pour les opérateurs, mais cela peut également présenter des risques de sécurité.

Cependant, la virtualisation peut également renforcer la sécurité dans la 5G en réduisant les points de faille potentiels dans le réseau.

Par exemple, la virtualisation peut permettre l'isolation des fonctions du réseau, de sorte que les éventuelles vulnérabilités ou attaques ciblées soient limitées à une partie spécifique du réseau plutôt qu'à l'ensemble du système.

En outre, la virtualisation peut permettre une analyse en temps réel du trafic réseau, permettant aux opérateurs de détecter rapidement les activités suspectes et d'y répondre de manière appropriée.

En fin de compte, la virtualisation peut offrir aux opérateurs une plateforme plus souple et plus sécurisée pour fournir des services 5G aux consommateurs et aux entreprises.

- **Découpage de réseau**

Par ailleurs, le découpage de réseau ou "network slicing" est une autre fonctionnalité importante de la 5G.

Cette fonction permet à l'opérateur de personnaliser le comportement du réseau en adaptant (découper) le réseau aux cas d'utilisation spécifiques en utilisant le même matériel.

En découpant le réseau, les opérateurs peuvent fournir des services de manière plus ciblée, ce qui peut renforcer la sécurité globale du réseau.

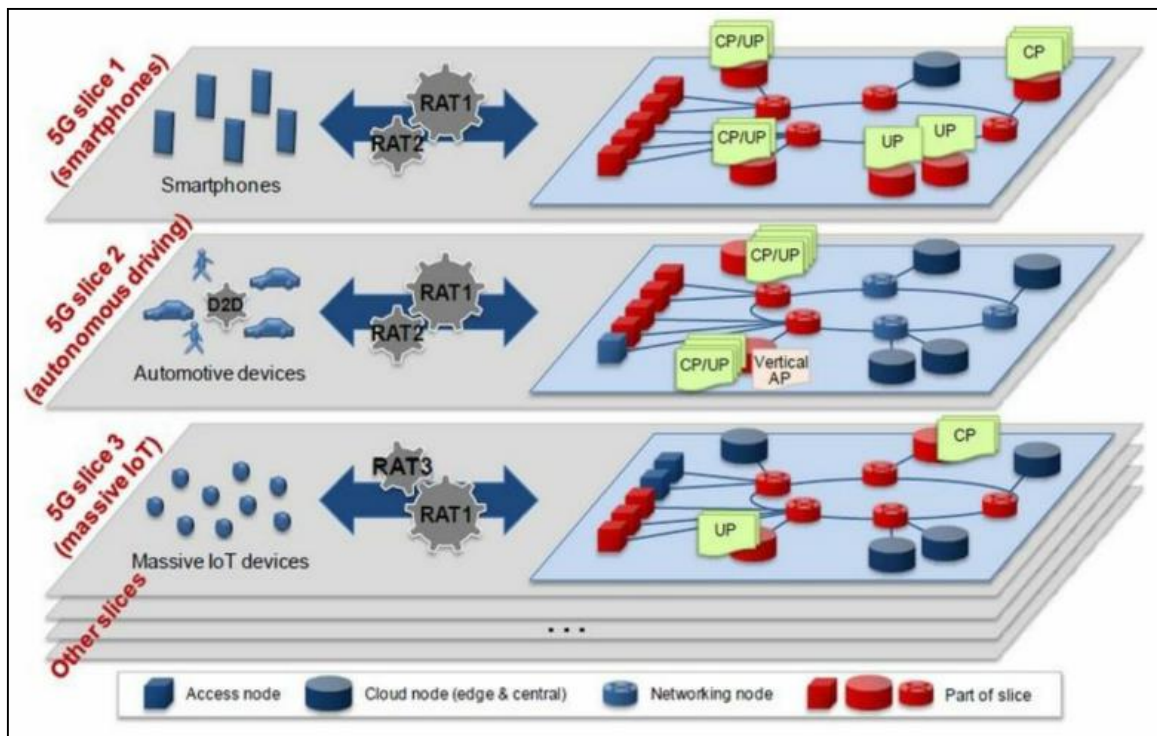


Figure III.1: Exemple d'un découpage réseau [52].

### ▪ L'utilisation de l'intelligence artificielle

Bien que ce soit un terme générique pour de nombreuses technologies, l'IA devrait être largement utilisée dans les réseaux 5G et devrait profiter à la sécurité.

Les opérateurs devraient utiliser l'apprentissage machine (ML) et l'apprentissage profond (DL) pour automatiser la détection des menaces et de la fraude.

### III.2.6. Capacité

La 5G offre une capacité réseau beaucoup plus élevée que la 4G.

Cela signifie qu'elle peut prendre en charge un plus grand nombre d'appareils connectés simultanément sans aucune perte de qualité de service.

La 5G est conçue pour prendre en charge jusqu'à un million d'appareils connectés par kilomètre carré, tandis que la 4G ne peut en prendre en charge que jusqu'à 100 000 par kilomètre carré [56].

### III.2.7. Architecture

L'architecture de réseau de la 4G repose sur trois parties principales : l'EPC pour la partie cœur, l'eUTRAN pour la partie radio et l'IMS pour la partie multimédia.

L'EPC est responsable de la gestion des paquets de données et des appels vocaux, tandis que l'eUTRAN fournit la connectivité radio pour les terminaux mobiles.

Comme nous l'avons déjà vu dans le deuxième chapitre, il existe 2 types de déploiement 5G, ce qui nous donne 2 architectures différentes.

Dans l'architecture 5G NSA, la partie cœur du réseau est toujours basée sur l'EPC, qui est le noyau 4G LTE, mais il est mis à jour pour supporter la 5G.

L'architecture de réseau 5G NSA utilise une station de base hybride, qui comprend à la fois une station de base 4G et 5G, mais la station de base 4G a la priorité.

Les signaux de radiofréquence sont transmis à la station de base 4G principale, tandis que le plan de contrôle NR est lié à l'EPC.

Cela signifie que la 5G NSA utilise l'infrastructure de la 4G pour la partie de contrôle du réseau, mais la partie radio (RAN) est mise à niveau pour supporter la 5G.

En revanche, dans l'architecture 5G SA, l'architecture du réseau change complètement.

Elle intègre la NG-RAN (Next Generation – Radio Access Network) 5G, associée au 5GC (5G Core) qui apporte l'ensemble des capacités 5G et est considérée comme l'architecture cible de la 5G.

Le 5GC est entièrement basé sur des technologies IP, avec une architecture distribuée qui permet de répartir les tâches entre différents nœuds du réseau.

Cela permet une utilisation optimale des fonctionnalités 5G, telles que la latence ultra faible et les vitesses de données élevées.

L'architecture de réseau 5G SA est conçue pour fonctionner de manière autonome, sans dépendre de l'infrastructure 4G existante.



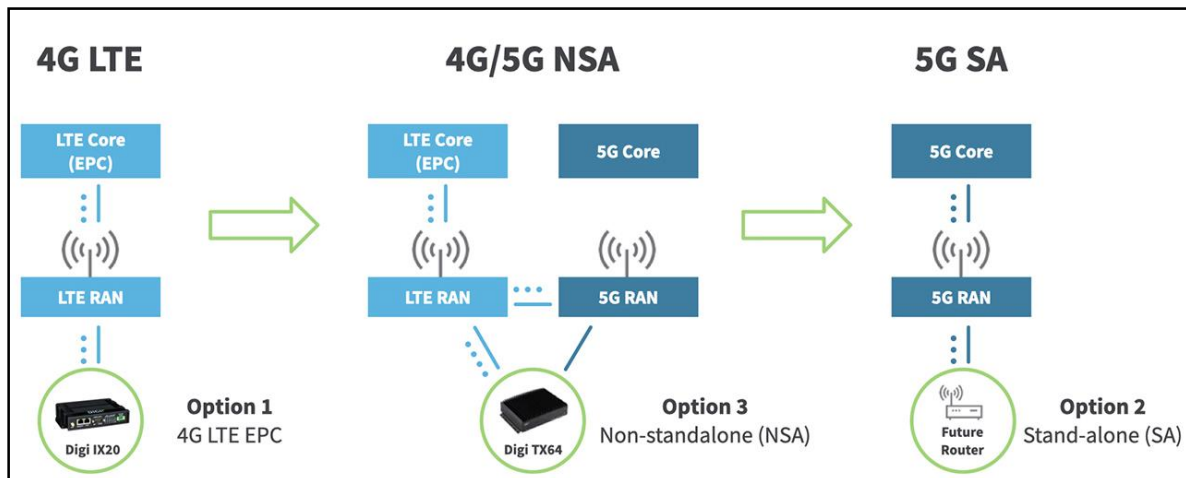


Figure III.2: Différence entre l'architecture 4G LTE et 5G [57].

### III.2.8. Fréquences

La 5G utilise des fréquences plus élevées que la 4G, ce qui lui permet d'offrir des vitesses de données plus élevées et une latence plus faible.

Les bandes de fréquence pour la 5G comprennent les bandes inférieures à 6 GHz, et les bandes plus élevées comme 24 GHz et 52 GHz [32].

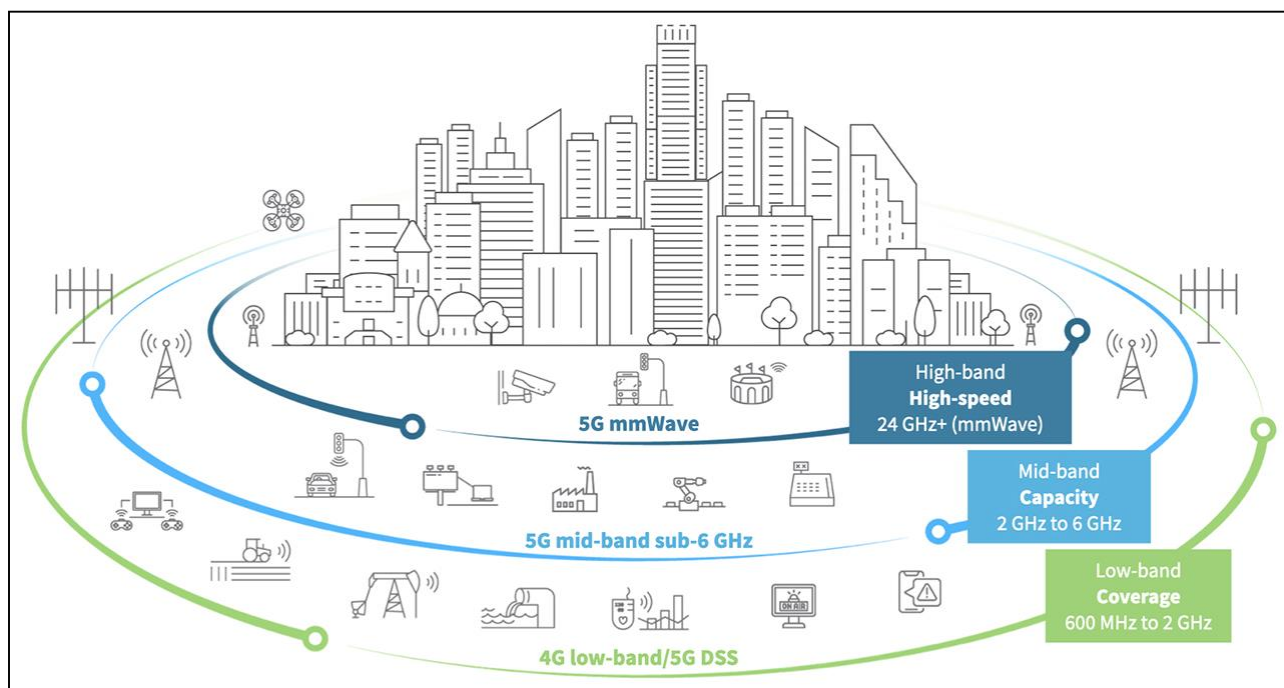


Figure III.3: Bandes de fréquences utilisées par 5G [57].



## Chapitre III: Comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G

En comparaison, la 4G utilise des fréquences allant de 700 MHz à 2,6 GHz.

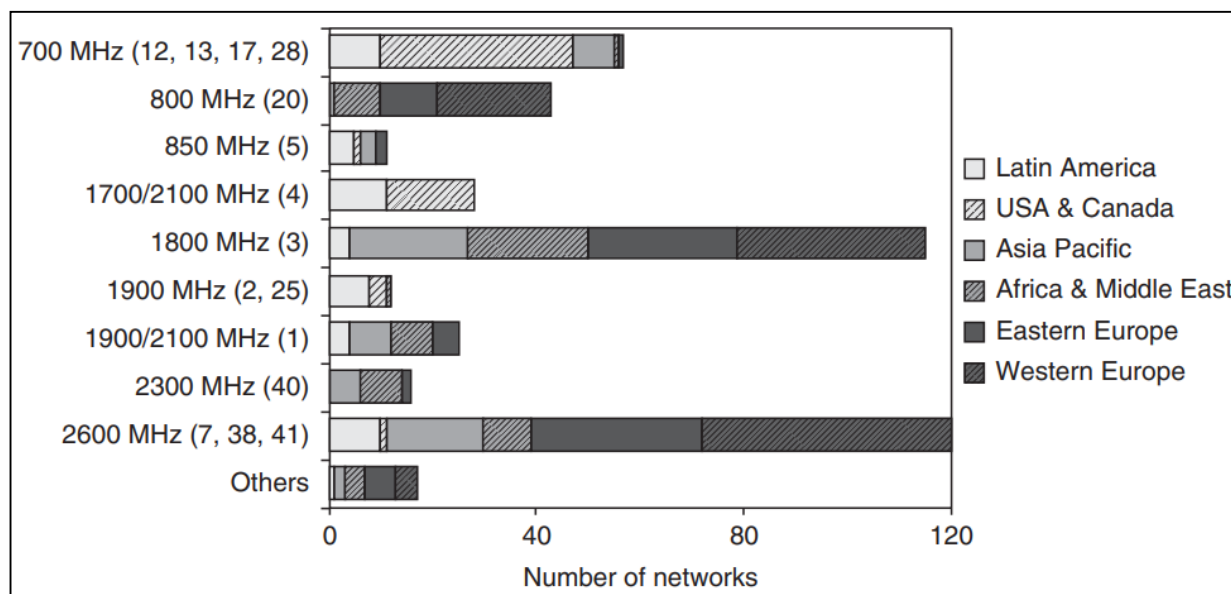


Figure III.4: Fréquences utilisées par les réseaux LTE opérationnels en novembre 2013 [5].

### III.2.9. Mobilité

La principale différence entre la mobilité de la 4G et de la 5G est la rapidité avec laquelle elles peuvent fournir des services de communication mobile de haute qualité en mouvement.

La 4G a une mobilité maximale de 350 km/h [5], tandis que la 5G est conçue pour offrir une mobilité maximale de 500 km/h [32].

Cela signifie que la 5G est mieux équipée pour gérer des scénarios de haute mobilité, tels que les véhicules autonomes et les trains à grande vitesse, en fournissant des vitesses de téléchargement plus rapides, une latence plus faible et une connexion plus stable que la 4G.

Grâce à sa capacité accrue et à une utilisation plus efficace du spectre, la 5G sera capable de prendre en charge une plus grande variété d'appareils connectés et permettra de nouveaux cas d'utilisation qui étaient auparavant impossibles avec la 4G.

### III.2.10. Densité cellulaire

Une différence clé entre la 4G et la 5G est l'utilisation de la technologie de petites cellules par la 5G, ce qui permet une densité cellulaire et une capacité de réseau plus élevées.

Les opérateurs déploieront la 5G haute bande dans des petites cellules de taille réduite à plusieurs endroits.

Cependant, en raison de la fréquence mmWave, qui a des signaux plus faibles se déplaçant sur de courtes distances, les opérateurs doivent déployer fréquemment des petites cellules dans les zones capables de supporter la 5G.

Cette fréquence est plus élevée que ce que la technologie mobile a vu jusqu'à présent.

La 4G (ou LTE), quant à elle, utilise la technologie de macrocellules pour transmettre des signaux.

Les macrocellules sont des antennes de grande taille montées sur des tours de télécommunications ou des bâtiments, et qui ont une portée plus importante que les petites cellules utilisées par la 5G.

Les signaux de la 4G peuvent donc couvrir de plus grandes distances, mais ont une capacité de réseau limitée en raison du nombre de connexions simultanées qu'ils peuvent gérer.

### III.2.11. Espacement des sous-porteuses

La 5G, ou NR (New Radio), se distingue de la 4G, ou LTE (Long-Term Evolution), par de nombreuses caractéristiques.

L'une des plus remarquables est l'espacement des sous-porteuses, qui est la distance entre les différentes fréquences utilisées pour transmettre les données.

Comparativement à la LTE, la 5G NR prend en charge plusieurs types d'espacement des sous-porteuses, ce qui permet une plus grande flexibilité dans la gestion des fréquences et des débits [56].

Alors que la LTE ne dispose que d'un seul type d'espacement de sous-porteuses de 15 kHz, la 5G NR propose une gamme d'espacements allant de 15 kHz à 240 kHz, offrant ainsi des options supplémentaires pour répondre aux besoins de différents cas d'utilisation [56].

### III.2.12. Les usages développés

Les différences entre la 4G et la 5G sont importantes, notamment en ce qui concerne les types de services et d'applications qu'elles peuvent prendre en charge.

### Chapitre III: Comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G

La 5G offre une bande passante plus large et une latence plus faible que la 4G, ce qui lui permet de prendre en charge des applications gourmandes en données telles que la réalité augmentée et virtuelle, l'Internet des objets (IoT), la télémédecine et les véhicules autonomes.

Les voitures autonomes, par exemple, nécessitent une connectivité ultra-rapide et fiable pour communiquer avec d'autres véhicules et le réseau routier, ce qui nécessite une bande passante et une latence beaucoup plus faibles que celles disponibles sur la 4G.

De même, les applications de télémédecine, telles que la chirurgie à distance ou les diagnostics à distance, nécessitent une latence très faible et une bande passante élevée, ce que la 5G peut offrir.

De plus, la 5G offre une plus grande flexibilité en termes de gestion des fréquences et des débits grâce à la prise en charge de plusieurs types d'espacement des sous-porteuses.

Cela permet une gestion plus efficace des fréquences et une meilleure utilisation du spectre.

En résumé, la 5G est conçue pour prendre en charge une gamme plus large d'applications avancées qui nécessitent des performances de communication mobile plus rapides et plus fiables que celles offertes par la 4G.

Cela ouvre la voie à de nouveaux cas d'utilisation et à des innovations dans les domaines de la santé, de la mobilité, de l'industrie et de l'Internet des objets.

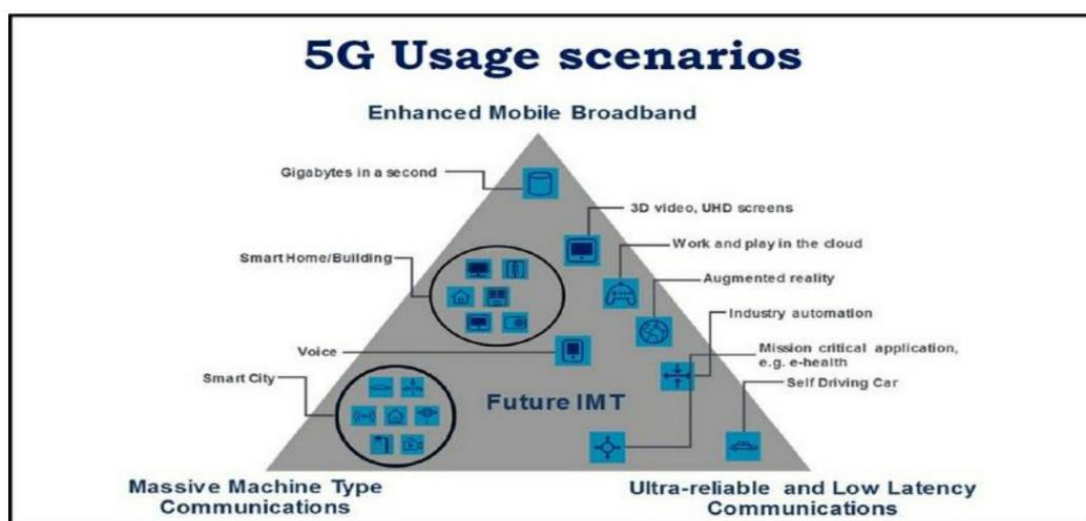


Figure III.5: Projection des services offerts par la 5G [52].

### III.3. Conclusion

En conclusion, les différences clés entre la 4G et la 5G sont significatives et offrent des améliorations notables dans de nombreux domaines.

La 5G offre des vitesses de débit plus élevées, une latence plus faible, une efficacité énergétique améliorée en termes de consommation d'énergie par bit, une couverture plus dense, une gamme plus large d'espacements de sous-porteuses pour une plus grande flexibilité dans la gestion des fréquences et des débits, ainsi qu'une qualité de service plus fiable par rapport à la 4G.

De plus, la 5G présente des avantages tels que l'utilisation de la virtualisation des fonctions de réseau et le découpage du réseau pour renforcer la sécurité.

Cependant, le coût de déploiement de la 5G peut être plus élevé, en particulier lorsque les opérateurs optent pour l'architecture standalone (SA).

Il est toutefois possible de réduire le coût en utilisant le déploiement NSA, même si cela signifie que la 5G ne sera pas lancée à pleine capacité.

En comparaison, la 4G est plus adaptée aux applications grand public telles que la navigation Web, les applications de messagerie et les réseaux sociaux.

Les usages développés pour la 5G, tels que l'IoT (Internet des objets), la réalité virtuelle et augmentée, la télémédecine, les voitures autonomes, etc., nécessitent des performances supérieures pour leur fonctionnement efficace.

En somme, la 5G est une technologie de nouvelle génération qui offre des performances significativement améliorées par rapport à la 4G, mais elle est également associée à des coûts plus élevés lors de son déploiement, nécessitant une infrastructure plus complexe pour la prise en charge de ses usages avancés.

Cependant, les avantages potentiels de la 5G pour les applications avancées pourraient bien valoir le coût supplémentaire pour les utilisateurs et les opérateurs de réseau.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

La problématique de notre projet a fait l'objet d'une étude comparative entre deux technologies mobiles de télécommunications 4G et 5G.

Le premier chapitre a introduit les bases de la technologie 4G, y compris LTE et WiMAX, ainsi que leurs architectures, caractéristiques et applications dans le domaine.

Nous avons fourni une introduction approfondie de ces technologies 4G et avons souligné leurs architectures, leurs applications et leurs fonctionnements dans le domaine des télécommunications mobiles.

Le deuxième chapitre a discuté les bases de la technologie 5G, y compris les méthodes de déploiement NSA et SA, ses architectures et ses utilisations dans les domaines de l'IoT et de l'IA.

Nous avons examiné comment la 5G a évolué pour répondre aux besoins de la prochaine génération d'appareils mobiles, offrant des vitesses plus rapides, une latence plus faible et une capacité réseau accrue.

Nous avons également abordé la question des coûts et des défis liés au déploiement de la 5G, qui nécessite une infrastructure plus dense de petites cellules et une coordination plus complexe entre les fournisseurs de services et les organismes de réglementation.

Enfin, le troisième chapitre a mis en évidence les principales différences entre 4G et 5G en termes de vitesse, de latence, d'efficacité énergétique, de fréquences, d'architectures, etc.

Nous avons présenté les avantages significatifs de la technologie 5G en termes de vitesse, de latence et de capacité réseau, et on a aussi vu qu'elle nécessite également un déploiement plus dense de petites cellules et une infrastructure de réseau plus sophistiquée, ce qui entraîne des coûts de déploiement plus élevés par rapport à la technologie 4G.

En comparaison, la 4G est adaptée aux applications grand public telles que la navigation Web, les applications de messagerie et les réseaux sociaux.

Cependant, la 5G offre non seulement ce que la 4G propose, mais également est idéale pour les applications avancées telles que l'IoT, la réalité virtuelle et augmentée, la télémédecine, les voitures autonomes et bien plus encore.

En effet, la 5G ouvre la voie à des innovations qui peuvent avoir un impact significatif sur notre vie quotidienne, comme la téléchirurgie, la conduite autonome et les villes intelligentes.

Les vitesses de débit plus élevées, la faible latence et la capacité réseau améliorée de la 5G offrent un potentiel immense pour développer des applications et des services avancés qui nécessitent des performances supérieures pour leur fonctionnement efficace.

Ainsi, la 5G offre des grandes possibilités pour les entreprises et les industries, allant des soins de santé à l'industrie manufacturière en passant par les jeux vidéo et la réalité virtuelle.

Ce travail a donc montré qu'il est important de comprendre les avantages et les défis de la technologie 5G pour une adoption efficace et réussie de cette technologie.

Les perspectives pour les futures recherches pourraient inclure une étude plus approfondie de l'impact environnemental de la 5G et de son utilisation potentielle dans les applications de la vie quotidienne.

Nous pourrions également explorer les applications potentielles de la 5G dans des domaines tels que l'éducation, la santé et les transports, pour en évaluer l'impact sur ces industries en évolution rapide.

Il serait également intéressant de modéliser une architecture de développement permettant de mettre en œuvre des mécanismes afin d'étudier l'interopérabilité entre les deux technologies mobiles 4G et 5G, et aussi évaluer et analyser les performances du handover inter-système entre la 4G et la 5G.

En conclusion, la technologie mobile 5G est une évolution importante de la technologie 4G, offrant des améliorations significatives dans de nombreux domaines.

Bien qu'il y ait des défis à relever pour son déploiement, il est clair que la 5G offre des avantages considérables pour les utilisateurs, les fournisseurs de services et la société dans son ensemble.

# Références bibliographiques

- [1] Ericsson, World's first 4G/LTE network goes live today in Stockholm. Available at: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2009/12/worlds-first-4glte-network-goes-live-today-in-stockholm> (Accessed: 13 May 2023).
- [2] Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s), M.2134, Report ITU-R. (2008). [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf)
- [3] International Telecommunication Union (2010) ITU World Radiocommunication Seminar Highlights Future Communication Technologies.
- [4] M. Sauter, "Beyond 3G Network Architectures," in Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [5] C.Cox, An Introduction to LTE, 2nd Edition: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications
- [6] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network architecture (Release 17), 3GPP TS 23.002V17.0.0
- [7] Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2 (3GPP TS 23.228 version 17.3.0 Release 17).
- [8] 3GLTEInfo, IMS VoLTE Architecture - Voice Over LTE Tutorial. Available at: <https://www.3glteinfo.com/ims-volte-architecture/> (Accessed: 13 May 2023).
- [9] Bouguen.Y, Hardouin.E et Wolff. F.X « LTE et les réseaux 4G », édition groupe Eyrolles, 2012.
- [10] I. Ben Chaabane, 4G LTE (Long Term Evolution) Regional Forum for ARAB Region: IMT Systems Technology, Evolution and Implementation, Tunis, Tunisia, 7 - 9 May 2013
- [11] Launay, Frédéric, Les réseaux de mobiles 4G et 5G, 2011.
- [12] S. Traverso M. Ariaudo, Optimisation Conjointe De Méthodes De Linéarisation De L'émetteur Pour Des Modulations Multi-Porteuses, France.
- [13] Selvakumar, Vinodhkumar, et al. Degree Project Analysis of LTE Radio Frame by Eliminating Cyclic Prefix in OFDM and Comparison of QAM and Offset-QAM. 2012.
- [14] Jerry R. Hampton, Introduction to MIMO Communications, Cambridge University press 2014.



- [15] 3GLTEInfo, 'LTE Handover Overview' (2012), 26 November. Available at: <https://www.3glteinfo.com/lte-handover-overview/> (Accessed: 13 May 2023).
- [16] Electronics Notes, LTE Channels: Physical Logical Transport», Available at: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/physical-logical-transport-data-channels.php> (Accessed: 13 May 2023).
- [17] ShareTechnote, 4G/LTE - Reference Signal, Available at: [https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_Reference\\_Signal\\_Downlink.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_Reference_Signal_Downlink.html) (Accessed: 13 May 2023).
- [18] ShareTechnote, 4G/LTE - PHY Channel, Available at: [https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_PSS.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PSS.html) (Accessed: 13 May 2023).
- [19] Shin, E. and Shin, J. (2016) 'Sounding reference signal measurement in LTE system', in 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Available at: <https://doi.org/10.1109/ICACT.2016.7423547>.
- [20] Nakamura, Takehiro. Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and beyond (LTE-Advanced). 15 Oct. 2009.
- [21] Commsbrief, LTE vs LTE Advanced: Is 4G LTE different from LTE Advanced?, (December 31, 2020). Available at: <https://commsbrief.com/lte-vs-lte-advanced-is-4g-lte-different-from-lte-advanced/> (Accessed: 13 May 2023).
- [22] Jeanette Wannstrom, LTE-Advanced, for 3GPP (Submission, May 2012)
- [23] Chen, K.-C. and Roberto (2008). Mobile WiMAX. John Wiley & Sons.
- [24] WatElectronics (2021) 'WiMAX Technology: Architecture, Working & Its Applications', WatElectronics.com, 12 June. Available at: <https://www.watelectronics.com/wimax-technology-working-standards/> (Accessed: 14 May 2023).
- [25] Chafika TATA, « Optimisation de la performance dans les réseaux WIMAX fixes », Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en Télécommunications, Université de Québec, 2009.
- [26] WiMAX Forum: Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, 2006.
- [27] Becvar, Zdenek & Zelenka, Jan. (2006). Handovers in the Mobile WiMAX.
- [28] Loutfi Nuaymi, WiMAX: technology for broadband wireless access. Wiley, (2007).
- [29] Sran Paramveer, WiMAX: Its Features and Applications, (2009).

- [30] GSMA, The 5G Guide, A Preference For Operators, April 2019.
- [31] ETSI TS 122 261 V17.11.0 (2022-10) 5G; Service requirements for the 5G system (3GPP TS 22.261 version 17.11.0 Release 17).
- [32] ETSI TR 138 913 V14.3.0 (2017-10) 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 14.3.0 Release 14)
- [33] 3GPP TS 38.104 V16.3.0 (2020-03); Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception; (Release 16).
- [34] 3GPP TR 38.807 V16.0.0 (2019-12); Technical Specification Group Radio Access Network; Study on requirements for NR beyond 52.6 GHz; (Release 16).
- [35] Zhang, Long, et al. "A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks." *IEEE Access* 7 (2019): 117460-117504.
- [36] Giordani, Marco, et al. "A tutorial on beam management for 3GPP NR at mmWave frequencies." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.1 (2018).
- [37] Accton Technology, The Emergence of 5G mmWave, Available at: <https://www.accton.com/Technology-Brief/the-emergence-of-5g-mmwave/> (Accessed: 15 May 2023).
- [38] Cyril Buey. Design and measurement of multi-antenna systems toward future 5G technologies. Electronics. Université Côte d'Azur, 2018. English. ffNNT: 2018AZUR4023ff. fftel-01927889
- [39] Liu, Jialing. "Ultra-Dense Networks (UDNs) for 5G"
- [40] Chopra, Garima, Rakesh Kumar Jha, and Sanjeev Jain. "A survey on ultra-dense network and emerging technologies: Security challenges and possible solutions." *Journal of Network and Computer Applications* 95 (2017): 54-78.
- [41] W. Yu, H. Xu, H. Zhang, D. Griffith and N. Golmie, "Ultra-Dense Networks: Survey of State of the Art and Future Directions," 2016 25th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Waikoloa, HI, USA, 2016, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICCCN.2016.7568592.
- [42] Bartoletti, Stefania, et al. "Positioning and Sensing for Vehicular Safety Applications in 5G and Beyond." *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 11, Nov. 2021, pp. 15-21.
- [43] Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., Wang, Q., Li, N., 2020. 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective. *IEEE Communications Magazine*.
- [44] Cisco. 5G Non Standalone Solution Overview.

[45] MOBILE DIVISION STUDY PAPER on 5G CORE NETWORK

[46] IlhamSalhane, MounirRifi. La technologie 5G pour les objets connectés. Colloque sur les Objets et systèmes Connectés - COC'2021, IUT d'Aix-Marseille, Mar 2021, MARSEILLE, France. fahal03593719f

[47] Launay, F. (2021). NG-RAN et 5G-NR: L'accès radio 5G et l'interface radioélectrique.

[48] Balazs Bertenyi (Chairman of 3GPP RAN) 3GPP Workshop –Tokyo, Japan, October 17, 2018

[49] Union Internationale Des Télécommunications (2014). Spécifications Détaillées Des Interfaces Radioélectriques De La Composante Satellite Des Télécommunications Mobiles Internationales-2000 (IMT-2000). Série M ed.

[50] P. Banelli et al., "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?" IEEE Signal Processing Mag., vol. 31, no. 6, pp. 80–93, Nov. 2014.

[51] Peltonen, A., Sasse, R. and Basin, D. (2021). A comprehensive formal analysis of 5G handover. Proceedings of the 14th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. doi: <https://doi.org/10.1145/3448300.3467823>.

[52] Dr V K Sachan, Fundamentals of 5G Wireless Communications.

[53] Analysys Mason. (2020). Green 5G: Sustainability and energy efficiency in the mobile network

[54] Huawei. (2020). Green 5G: Building a Sustainable World.

[55] GSMA, 'Securing the 5G Era', Available at: <https://www.gsma.com/security/securing-the-5g-era/> (Accessed: 16 May 2023).

[56] 5G : nouvelle technologie, bien plus puissante (20.10.2020). Available at: <https://business.orange.be/fr/decouvrir/nouvelles/5g-nouvelle-technologie-bien-plus-puissante> (Accessed: 16 May 2023).

[57] Digi, What Is 5G Network Architecture? (March 19, 2021). Available at: <https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture> (Accessed: 16 May 2023).

[58] ShareTechnote, 5G/NR - Frame Structure, Available at: [https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_FrameStructure.html](https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html) (Accessed: 16 May 2023).

[59] Techtrained, 'All about 4G LTE Technical Training' (2022), 4 July. Available at: <https://www.techtrained.com/what-are-the-available-transport-channels-in-lte/> (Accessed: 18 May 2023).