

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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** :

**SEGHIRI Naouel**

**SIDHOUM Lamia**

**Sujet**

**Etude, analyse et optimisation de la capacité  
et la qualité de service de réseau 4G-LTE**

Soutenu publiquement, le **25/06/2018**, devant le jury composé de :

Mr. BORSALI Ahmed Riad	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr. ZERROUKI Hadj	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr BAHRI Sidi Mohammed	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examinateur

Année Universitaire 2017-2018

# *Dédicace*

---

*Nous dédions ce modeste travail à nos parents qui ont consacré leurs  
jeunesses pour nos auspices;*

*A tous les membres de nos familles, petits et grands :  
Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de notre affection ;*

*Et aussi à tous et toutes nos amis (es) sans exception ;*

*A notre Encadrant Dr H.ZERROUKI pour ses précieux conseils et ses  
aides durant toute la période du travail ;*

*Et à tous ceux qui nous aime et qu'on aime ...*

# Remerciement

---

*Au terme de ce projet de fin d'étude, nous tenons à remercier ALLAH qui nous a donné le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout et de ramener ce présent travail à son ultime point.*

*Nous adressons nos remerciements à notre encadrant Mr «ZERROUKI Hadj», Maître de conférences à l'université de Tlemcen, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous tenons à remercier avec plus grande gratitude Mme «HASSAINE Nawel», M.C à l'Université de Tlemcen, de l'honneur qu'il nous fait d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.*

*Nous remercions également Mr «BAHRI Sidi Mohammed», M.C à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de se joindre à ce jury comme examinateur.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tout le cadre professoral et administratif de département de télécommunications.*

*Nous tenons à remercier nos famille de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.*

*Nous saisissons également cette opportunité pour remercier tous nos invités qui nous ont honorés par leur présence.*

*Nous tenons, enfin, à remercier tous ceux qui ont contribué et/ou collaboré de près ou de loin dans l'élaboration de ce projet de fin d'étude.*

*Merci à tous.  
Merci pour tout.*

## Résumé :

Le monde a connu ces dernières années une explosion d'innovation dans le monde connecté, plus précisément le monde des mobiles. Ce monde connecté est plus en plus rapide. Cela nécessite un réseau mobile performant, d'où interviens les chercheurs pour améliorer ce dernier, la technologie LTE, connu par son nom commercial la 4G, qui est une évolution de la norme UMTS (la 3G) a pu répondre à plusieurs besoins avec une meilleur qualité de service, des hauts débits et une capacité élevée. Malgré ces évolutions, mais on cherche toujours à améliorer l'expérience de la clientèle, d'où le but de notre études.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous étudions les différentes technologies qui vont contribuer à l'augmentation de la capacité du réseau 4G-LTE comme : L'introduction de l'OFDM et l'OFDMA, la technique MIMO , La modulation et le codage adaptatifs AMC, ainsi que l'analyse et l'optimisation de tous les paramètres et les facteurs influant sur la capacité et la qualité de service de réseau LTE.

A l'aide d'un progiciel de planification et d'optimisation professionnel des réseaux cellulaires « Atoll », nous simulons un milieu dense urbain ou le nombre d'utilisateur est variable, dans le but d'atteindre une capacité maximale et une meilleure qualité de service.

**Mot clé :** 4G, LTE, Capacité, OFDM, MIMO, AMC, Qualité de service, Quantification, Optimisation, Nombre d'utilisateurs.

## Abstract :

The world has known a great evolution in recent years an explosion of innovation in the connected world, specifically the world of mobiles. This connected world is getting faster and faster. This requires a powerful mobile network, from which the researchers intervene to improve it, LTE technology, known by its trade name 4G, which is an evolution of UMTS (3G) has been able to meet several needs with a better quality of service, high data speeds and high capacity. Despite these developments, we are always looking to improve the customer experience, hence the purpose of our studies.

In the framework of this end-of-studies project, we are studying the various technologies that will contribute to increasing 4G-LTE network capacity, such as: The introduction of the OFDM and the OFDMA, the MIMO technique, adaptive modulation and coding AMC, as well as analysis and optimization of all parameters and factors affecting LTE network capacity and quality of service.

With of a professional planning and optimization tool of cellular networks "Atoll", we simulate a dense urban environment where the number of user is variable, in order to reach a maximum of capacity and a better quality of service.

**Keyword:** 4G, LTE, Capacity, OFDM, MIMO, AMC, Quality of service, Quantification, Optimization, Number of users.

# Table des matières

---

Dédicace .....	I
Remerciement .....	II
Résumé .....	III
Abstract .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux .....	X
Liste d'abréviations .....	XI
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Evolution des réseaux de télécommunications cellulaires

I.1 Introduction.....	4
I.2 Evolution des réseaux cellulaires .....	4
I.2.1 La première génération (1G) .....	4
I.2.2 La deuxième génération (2G) .....	5
I.2.2.1 Le réseau GSM.....	5
I.2.2.2 Réseau GPRS (2.5 G) .....	7
I.2.2.3 Réseau EDGE (2.75) .....	9
I.2.3 La troisième génération des réseaux mobiles.....	9
I.2.3.1 Le réseau UMTS .....	9
I.2.3.2 Le HSPA .....	11
I.2.3.3 Le HSPA+.....	11
I.2.4 La quatrième génération .....	12
I.2.4.1 Réseau LTE .....	12
I.2.4.2 Le réseau LTE-A .....	12
I.2.5 La cinquième génération.....	12
I.3 Conclusion .....	13

## Chapitre II : Etat de l'art de réseau 4G/LTE

II.1 Introduction.....	16
II.2 L'Objectif de la 4G/LTE .....	16
II.3 Architecture du système LTE.....	16
II.3.1 Equipement Utilisateur (UE).....	16
II.3.2 Réseau d'accès E-UTRAN.....	17
I.3.2.1 eNodeB .....	18
II.3.3 Réseau cœur EPC ( <i>Evolved Packet Core</i> ).....	19

# Table des matières

---

II.4 La couche physique .....	21
II.4.1 Les bandes de fréquences .....	21
II.4.2 La structure de multiplexage .....	21
II.4.2.1 La structure de la trame de type 1 .....	22
II.4.2.2 La structure de la trame de type 2 .....	22
II.4.3 La modulation .....	23
II.4.3.1 La modulation 16-QAM .....	24
II.4.3.2 La modulation 64-QAM .....	24
II.4.3.3 La modulation QPSK .....	25
II.4.4 Les types de transmission utilisée dans la 4G .....	25
II.4.5 LTE MIMO ( <i>Multiple Input Multiple Output</i> ) .....	27
II.4.6 Les canaux radio .....	27
II.4.6.1 Les canaux logiques .....	27
II.4.6.2 Les canaux de transport .....	28
II.4.6.3 Les canaux physiques .....	28
II.5 Le Handover dans LTE .....	29
II.6 Conclusion .....	30

## Chapitre III : Etude de la capacité et la QoS dans les réseaux LTE

III.1 Introduction .....	32
III.2 Etat d'art de la capacité dans le réseau LTE .....	32
III.2.1 Capacité en nombre d'utilisateurs .....	32
III.2.2 Dimensionnement de capacité .....	32
III.2.2.2 Calcul dimensionnement de capacité Downlink (DL) .....	34
III.3 La qualité de service dans le réseau LTE .....	35
III.3.1 Définition .....	35
III.3.2 But de la QoS .....	35
III.3.3 Paramètres de la QoS .....	36
III.3.3.1 Le débit .....	36
III.3.3.2 La perte de paquets .....	36
III.3.3.3 Le délai de transit (latence) .....	36
III.3.3.4 La gigue .....	36
III.3.3.5 La bande passante .....	36
III.3.3.6 Priorité des paquets .....	37
III.3.4 Les informations utilisées pour assurer la QoS .....	37
III.3.5 Qualité de service dans le réseau 4G : .....	37

# Table des matières

---

III.3.6 Exemple de Qualité de Service .....	38
III.4 Les technologies qui ont permis l'augmentation de la capacité .....	38
III.4.1 La technologie d'accès : OFDMA, SC-FDMA .....	38
III.4.1.1 Concept de bloc de ressources .....	38
III.4.1.2 L'OFDM, OFDMA, SC-FDMA .....	39
III.4.2 La technologie MIMO .....	39
III.4.2.1 principe de la technologie MIMO.....	40
III.4.2.2 Catégories des techniques du MIMO.....	40
III.4.2.3 Architectures MIMO .....	41
III.4.2.4 Capacité des technologies MIMO.....	41
III.4.3 La technique du Modulation et codage adaptatifs .....	43
III.4.4 La technologie SON ( <i>Self-Organizing Network</i> ).....	44
III.4.4.1 L'auto-configuration .....	44
III.4.4.2 L'auto-optimisation .....	44
III.4.5 La technique d'agrégations de porteuses .....	44
III.3.6 La technique du Coordinated Multi Point operation (CoMP) .....	45
III.3.7 La technologie des Réseaux Hétérogène (HetNet) .....	46
III.4.8 Utilisation des petites cellules.....	47
III.5 Conclusion .....	47

## Chapitre IV : Simulation de la capacité dans le réseau 4G/LTE

IV.1 Introduction .....	48
IV.2 Description du Logiciel Atoll.....	48
IV.3 Planification d'un réseau LTE .....	50
IV.3.1 Pré-planification .....	50
IV.3.2 Planification .....	54
IV.3.2.1 Paramètres de simulation pour la planification d'un réseau LTE .....	54
IV.3.2.2 Création des sites (eNodeB) .....	54
IV.3.3 Poste-Planification .....	56
IV.3.3.1 Etude des prédictions du réseau LTE .....	56
IV.3.4 Optimisation.....	58
IV.4 Impacte de l'augmentation du nombre d'utilisateurs sur la capacité .....	58
IV.4.1 Cas de 10 utilisateurs .....	58
IV.4.2 Cas de 50 utilisateurs .....	59
IV.4.3 Cas de 100 utilisateurs .....	59
IV.5 Impacte de l'utilisation des systèmes MIMO sur la capacité.....	60
IV.5.1 Cas de 10 utilisateurs .....	61

# *Table des matières*

---

IV.5.2 Cas de 50 utilisateurs .....	61
IV.5.3 Cas de 100 utilisateurs .....	63
IV.6 Conclusion .....	64
Conclusion générale .....	65
Bibliographie .....	67

# Liste des figures

---

Figure I-1 : Evolution de la téléphonie mobile à travers les années .....	4
Figure I-2 : Architecture de réseau GSM.....	5
Figure I-3 : Architecture de réseau GPRS.....	8
Figure I-4 : Architecture de réseau UMTS.....	10
Figure I-5 : La 5G moteur du changement industriel et sociétal .....	13
Figure II.1: Architecture générale du réseau LTE.....	17
Figure II.2: Les interfaces du réseau d'accès .....	19
Figure II.3 : Architecture de l'EPC (Evolved Packet Core).....	19
Figure II.4 : la structure de trame en mode FDD .....	22
Figure II.5 : la structure de trame en mode TDD .....	22
Figure II.6 : Constellation QAM à 16 états .....	24
Figure II.7 : Constellation QAM à 64 états .....	24
Figure II.8 : Constellation QPSK .....	25
Figure II.9 : Schéma du principe du modulateur QPSK .....	25
Figure II.10 : Principe de l'OFDM.....	26
Figure II.11 : Les deux techniques d'accès multiple OFDMA/SC-FDMA .....	26
Figure II.12 : Principe de la technologie MIMO .....	27
Figure II.13 : Le mappage entre les canaux logiques.....	29
Figure III.1 : Illustration de calcul de dimensionnement de capacité .....	33
Figure III.2 : Bloc de ressources .....	38
Figure III.3 : Différence entre OFDMA et SC-FDMA .....	39
Figure III.4 : Principe de la technologie MIMO .....	40
Figure III.5 : Type d'architectures MIMO.....	41
Figure III.6 : Capacité des systèmes MIMO par rapport aux systèmes SISO et SIMO.....	42
Figure III.7 : Les types de modulations dans le LTE.....	43
Figure III.8 : Utilisation de la modulation adaptative.....	43
Figure III.9 : Agrégation de porteuses dans LTE .....	45
Figure III.10 : Exemple de la technique CoMP .....	45
Figure III.11 : Exemple d'un HetNet avec des larges et des petites cellules. ....	46
Figure III.12 : Les Petites Cellules.....	47
Figure IV.1 : La page principale d'Atoll.....	49
Figure IV.2 : processus de planification .....	50
Figure IV.3 : Création d'un nouveau projet.....	50
Figure IV.4 : Modèles de projet dans l'Atoll.....	51

# Liste des figures

---

Figure IV.5 : Choix du système de coordonnées .....	51
Figure IV.6 : Liste des systèmes de coordonnées .....	52
Figure IV.7 : Importation de la carte numérique .....	52
Figure IV.8 : Map Atoll de la ville d'Oran .....	52
Figure IV.9 : Focus de la zone à planifier .....	52
Figure IV.10 : Emplacement des sites sur la Map .....	55
Figure IV.11 : Configuration d'antennes des eNodeBs .....	55
Figure IV.12 : Prédiction au niveau de signal du réseau LTE .....	56
Figure IV.13 : Prédiction de la couverture par débit .....	57
Figure IV.14 : Prédiction de la couverture par indicateur de qualité .....	57
Figure IV.15 : La DCF de la capacité effective de la cellule : cas de 10 utilisateurs/ cellule .....	58
Figure IV.16 : La DCF de la capacité effective de la cellule : cas de 50 utilisateurs/ cellule .....	59
Figure IV.17 : La DCF de la capacité effective de la cellule : cas de 100 utilisateurs/ cellule .....	60
Figure IV-18 : La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4X2): cas de 10 utilisateurs .....	61
Figure IV.19 : Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 10 utilisateurs. ....	61
Figure IV-20 : La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4X2): cas de 50 utilisateurs .....	62
Figure IV.21 : Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 50 utilisateurs. ....	62
Figure IV-22 : La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4X2): cas de 100 utilisateurs .....	63
Figure IV.23 : Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 100 utilisateurs.....	63

# *Liste des tableaux*

---

<b>Tableau II.1</b> : les différentes catégories d'UEs pour le système LTE.....	17
<b>Tableau II.2</b> : la configuration de la trame TDD .....	23
<b>Tableau III.1</b> : Surface de zon.....	35

# Liste d'abréviations

---

**1G** : Première Génération  
**2G** : Deuxième Génération  
**3G** : Troisième Génération  
**4G** : Quatrième Génération  
**5G** : Cinquième Génération  
**3GPP** : 3rd Génération Partnership Project  
**16-QAM** : 16 Quadrature Amplitude Modulation  
**64-QAM** : 64 Quadrature Amplitude Modulation  
**4-PSK** : Quadrature Phase Shift Keying  
**8-PSK** : Eight Phase Shift Keying

## A

**AUC** : Authentification Center  
**ADSL** : Asymmetric Digital Subscriber Line  
**AMC**:Adaptive Modulation and coding  
**ACK**:ACKnowledgement

## B

**BSS** : Base Station Sub-system  
**BTS** : Base Station Sub-system  
**BSC** : Base Station Controller  
**BG** : Border Gateway  
**BCCH** : Broadcast Control Channel  
**BCH** : Broadcast Channel  
**BLER** : Block Error Rate  
**BER** : Bit Error Ratio

## C

**CDMA** : Code Division Multiple Access  
**CN** : Core Network  
**CMAS** : Commercial Mobile Alert System  
**CCCH** : Common Control Channel  
**CQI** : Channel Quality Information  
**CA** : Carrier Aggregation  
**CC** : Component Carrier  
**CoMP** : Coordinated Multi Point operation

## D

**DC-HSDPA**: Dual Carrier High Speed Downlink Packet Access  
**DL**: Down Link  
**DwPTS** : Downlink Pilot Time Slot  
**DCCH**: Dedicated Control CHannel

**DTCH** : DedicatedTraffic CHannel  
**DL-SCH** : Downlink Shared Channel  
**DCF**: Distributed Coordination Function

## E

**eNB** : evolved Node B  
**EIR** : Equipement Identity Register  
**EDGE**: Enhanced Data for GSM Evolution  
**EUTRAN**: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network  
**EPC**: Evolved Packet Core  
**EPS**: Evolved Packet System  
**ETWS**: Earthquake and Tsunami Warning System

## F

**FEC** : ForwardError Correction  
**FDD** : Frequency Division Duplex  
**FI** : Fréquence Intermédiaire

## G

**GSM** : Global System for Mobile communications  
**GPRS**: General Packet Radio Service  
**GGSN**: Gateway GPRS Support Node  
**GMSK** : Gaussian Minimum Shift keying  
**GP** : Gap Period  
**GPS** : Global Positioning System

## H

**HLR** : Home Location Register  
**HSPA** : High Speed Packet Access  
**HSPA+** : High Speed Packet Access+  
**HARQ** : HybridAutomaticResponsereQuest  
**HSS** : Home Subscriber Server  
**HO** : HandOver  
**Het Net** : Heterogeneous Network

## I

**IMSI** : International Mobile SubscriberIdentity  
**IMEI** :International Mobile Equipment Identity  
**IP** : Internet Protocol  
**IMS** : IP MultimediaSubsystem  
**I** : In phase

# Liste d'abréviations

---

**ICI** : Inter Cell Interference

## L

**LTE** : Long Term Evolution

**LTE-A** : Long Term Evolution Advanced

## M

**MS** : Mobile Station

**MSC** : Mobile-service Switching Center

**MSISDN** : Mobile Station ISDN Number

**MIMO** : Multiple-Input Multiple-Output

**MISO** : Multiple-Input Single-Output

**MME** : Mobility Management Entity

**MAP** : Mobile Application Part

**MCCH** : Multicast Control Channel

**MTCH** : Multicast Traffic Channel

**MCH** : Multicast Channel

**MCS** : Modulation & Coding Schema

## N

**NSS** : Network Sub-System

**NMC** : Network Management Centre

**NAS** : Non-Access Stratum

**NACK** : No ACKnowledgement

## O

**OSS** : Operating Sub-System

**OMC** : Operations and Maintenance Centre

**OMC-G** : Operations And Maintenance Centre  
GPRS

**OMS** : Operations and Maintenance System

**OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiple

**OFDMA** : Orthogonal Frequency Division Multiple  
Access

## P

**PLMN** : Public Land Mobile Network

**PCU** : Power Control Unit

**PSTN** : Public Switched Telephone Network

**PGW** : Packet Gateway

**PDN** : Public Data Network

**PDN GW** : Public Data Network Gateway

**PWS** : Public Warning System

**PCRF** : Policy and Charging Rules Function

**PRB** : Physical Resource Blocks

**PCCH** : Paging Control Channel

**PDSCH** : Physical Downlink Shared Channel

**PDCCH** : Physical Downlink Control Channel

**PMCH** : Physical Multicast Channel

**PBCH** : Physical Broadcast Channel

**PCFICH** : Physical Control Format Indicator Channel

**PUSCH** : Physical Uplink Shared Channel

**PUCCH** : Physical Uplink Control Channel

**PRACH** : Physical Random Access Channel

**PDP** : Packet Data Protocol

## Q

**Q** : Quadrature

**QDS** : Qualité De Service

**QOS** : Quality Of Service

**QPSK** : Quadrature Phase Shift Keying

## R

**RTCP** : Real Time Transport Control Protocol

**RNIS** : Réseau Numérique à Intégration de Services

**RNC** : Radio Network Controller

**RNS** : Radio Network Subsystem

**RL10** : la Release 10

**RRM** : Radio Ressource Management

**RAN** : Radio Access Network

**RACH** : Random Access Channel

**RE** : Resource Element

## S

**SGSN** : Serving GPRS Support Node

**SAE** : System Architecture Evolution

**SGW** : Serving Gateway

**SS7** : Signaling System 7

**SC-FDMA** : Single Carrier-Frequency Division  
Multiple Access

**SISO** : Single-Input Single-Output

**SIMO** : Single-Input Multiple-Output

**SINR** : Signal to Interference & Noise Ratio

**SON** : Self Organizing Network

# Liste d'abréviations

---

## T

**TRX** : Transmitter/ Receiver  
**TMN** : Télécommunications Management Network  
**TGV** : Train à Grande Vitesse  
**TDD** : Time Division Duplex  
**TA** : Time Advance  
**TDMA** : Time Division Multiple Access  
**TCP** : Transmission Control Protocol

## U

**UMTS** : Universal Mobile Telecommunications System  
**UTRAN** : Universal Terrestrial Radio Access Network  
**UIT** : Union Internationale des Télécommunications

**UL** : Up Link

**UpPTS** : Uplink Pilot Time Slot

**UL-SCH** : Uplink Shared Channel

**UDP** : User Datagram Protocol

## V

**VLR** : Visitor Location Register

**VoIP** : Voice Over Internet Protocol

## W

**WCDMA** : Wideband CDMA

**WiMax** : Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WIFI** : Wireless Fidelity

**WGS 84** : World Geodetic System

# *Introduction générale*

---

Les besoins des utilisateurs dans la téléphonie mobile ont vu de nombreux rebondissement au début des années 70. L'objectif était d'avoir un moyen de télécommunication sans fil fiable capable de transmettre la voix d'un point donné à un autre, en effet après des recherches approfondies qui ont abouti à la première génération de la téléphonie mobile qui est la téléphonie analogique utilisée uniquement pour passer les appels traditionnels.

Après ce premier pas, les besoins ont changé et on a pensé à améliorer la qualité de services ; donc on a digitalisé cette première technique pour avoir une nouvelle technologie qui est la 2G en 1989 (dont on a le GSM, le GPRS, et l'EDGE), après vient la 3G qui s'appuie sur la norme UMTS basée sur la technologie W-CDMA et qui offre un débit plus rapide que la 2G, ensuite, nous avons la 4G qui sera le nœud de notre mémoire, et enfin, vient le futur réseau 5G qui sera déployer à partir de 2020.

Notre mémoire aura comme but d'étudier et d'analyser les différentes technologies influentes sur la capacité et la qualité de service de réseau 4G LTE en utilisant le logiciel de planification et d'optimisation des réseaux cellulaires "Atoll", afin d'avoir le choix optimal pour obtenir une meilleure capacité et une bonne qualité de service.

La capacité dans LTE ne se limite pas seulement au nombre de communications téléphoniques, qui peuvent être maintenues simultanément par une même cellule, mais elle se matérialise par le nombre d'utilisateurs pouvant être connectés simultanément et par le débit total maximal pouvant être écoulé par une cellule fortement chargée.

De ce fait, nous avons organisé notre plan de projet en 4 chapitres:

Le premier chapitre donnera un aperçu général des différentes évolutions des réseaux de télécommunications cellulaires ou nous parlerons de toutes les générations de téléphonie cellulaire qui ont existé depuis la 1<sup>ère</sup> génération jusqu'à la 5<sup>ème</sup> génération, dont la 4<sup>ème</sup> sera le nœud de notre mémoire. Cette évolution a pour but d'apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur.

Le deuxième chapitre présente une étude approfondi sur le réseau 4G-LTE qui nous permettra d'avoir une vision approfondie de ce réseau (architecture, caractéristiques, couche physique...).

Le troisième chapitre sera consacré à étudier et découvrir les différentes technologies qui vont influencer sur la capacité et la qualité de service dans un réseau 4G-LTE. Dans ce chapitre nous présentons un état d'art de la capacité dans LTE ainsi que et les avancées technologiques clé qui ont contribués à l'amélioration de la capacité.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous passerons à la réalisation de plusieurs scénarios de simulation pour faire l'analyse et l'optimisation de la capacité et la QoS dans le réseau LTE en se basant sur l'outil de planification et d'optimisation Atoll, là où nous établissons une synthèse sur l'impact des différents paramètres, nombre d'utilisateurs et type d'antenne sur la capacité.

Et enfin, une conclusion récapitule notre travail et présente les connaissances acquises suite à ce projet de fin d'étude.

---

---

## **Chapitre I :**

Evolution des réseaux de  
télécommunication cellulaires.

---

---

## I.1 Introduction

Dès les années 80, l'évolution technologique voit l'apparition sur le marché des systèmes de téléphonie mobile, qui permettent à leurs abonnés d'appeler et être appelés sans dépendre d'une ligne fixe et de poser pour la première fois la question « devine d'où je t'appelle ».

Le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vues le jour (1G, 2G, 3G, 4G et prochainement la 5G qui sera déployer à partir de 2020) et ont connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel qui ne cesse d'augmenter, une bande passante de plus en plus large et un des avantages d'une telle bande passante est le nombre d'utilisateur pouvant être supportés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes générations de téléphones mobiles, leurs architectures ainsi que d'autres services pouvant être utilisés par chacune de ces générations cellulaires.

## I.2 Evolution des réseaux cellulaires

Avant d'expliquer l'état actuel des technologies utilisées aujourd'hui, il nous semble intéressant de rappeler l'évolution des réseaux cellulaires, cela a pour avantage de savoir de quoi nous sommes partis pour mieux se positionner à l'heure actuelle.

La communication mobile a beaucoup évolué en quelques décennies (figure I.1), dans qui viennent par le biais de diverses générations de dispositifs et réseaux compatibles avec les nouvelles normes de télécommunication.



Figure I.1 : Evolution de la téléphonie mobile à travers les années.

### I.2.1 La première génération (1G)

Les systèmes de première génération, paru dans les années 80 sous la cote 1G, utilisant une transmission en mode analogique étaient en mesure de gérer uniquement le trafic voix. La qualité de communication offerte par la première génération de téléphones cellulaires, décidément encombrant

équipement, avaient des limites évidentes liées au type de signal, comme la mauvaise qualité audio et des interruptions fréquentes.

## I.2.2 La deuxième génération (2G)

La deuxième génération (2G) de systèmes cellulaires repose sur une technologie numérique qui a été développée à la fin des années 1980. Ces systèmes cellulaires utilisent une technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Ce système apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur.

Enumérés ci-dessous sont les caractéristiques du GSM qui explique sa popularité et sa large acceptation :

- Efficacités spectrale améliorée.
- L'itinérance internationale.
- Ensembles mobiles et stations de base à faible coût.
- Discours de haute qualité.
- Compatibilité avec le RNIS et les autres services de compagnies de téléphone.
- Prise en charge de nouveaux services [1].

### I.2.2.1 Le réseau GSM

Le réseau GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC -réseau fixe). Il se distingue par un accès spécifique appelé la liaison radio [2].

La figure I.2 présente l'architecture du Réseau GSM.

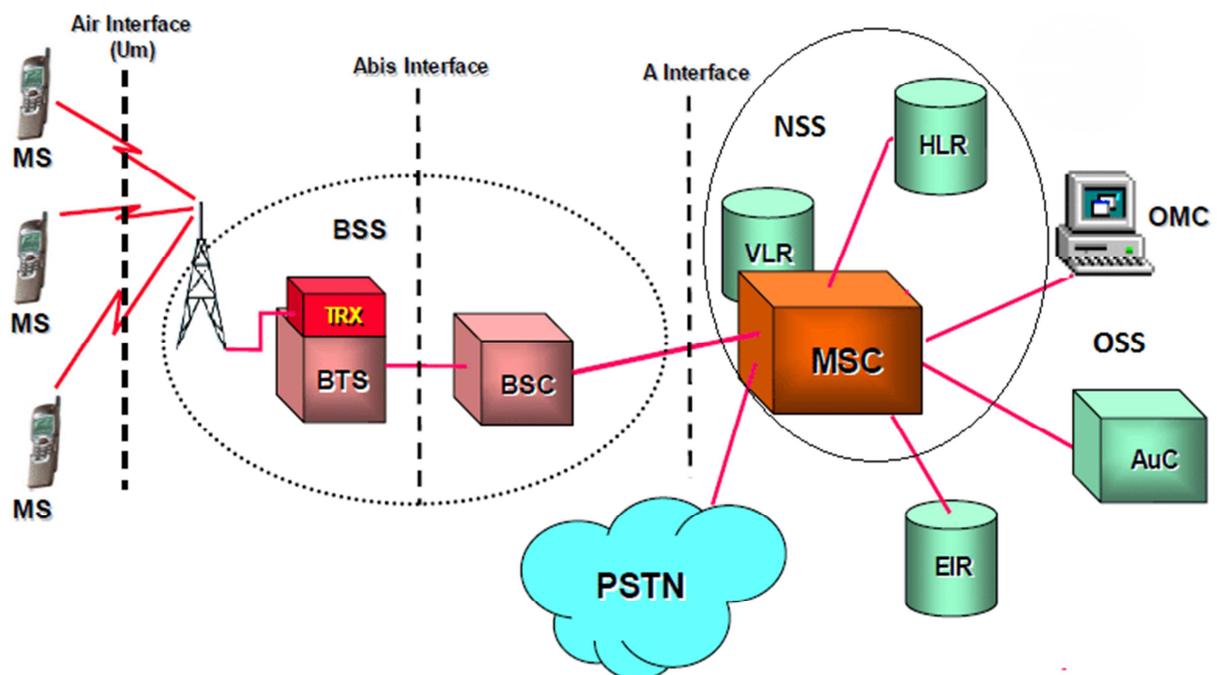


Figure I.2 : Architecture de réseau GSM[2].

Le réseau GSM peut être divisé en trois sous-ensembles :

➤ **Le sous-système radio -BSS :**

Le BSS pour Base station Sub-System, il assure la transmission radioélectriques entre avec le mobile, gère la ressource radio et permet la mobilité du mobile. Il est composé des équipements suivants :

**a) MS : Mobile Station**

C'est l'équipement terminal muni d'une carte SIM permettant d'accéder au PLMN (Public Land Mobile Network), le PLMN étant un réseau GSM exploité par un opérateur sur un territoire.

**b) BTS : Base Tranceiver Station**

C'est un ensemble d'émetteurs-récepteurs appelés TRX (TRX signifie que le matériel est capable de gérer une paire de fréquences GSM). Notamment, il s'occupe de la transmission radio, il gère la couche physique et il effectue des mesures radio pour vérifier qu'une communication en cours se déroule correctement.

**c) BSC : Base Station Controller**

C'est l'organe "intelligent" du BSS, qui gère la ressource radio. C'est également un commutateur qui réalise une concentration des circuits vers le MSC.

Il commande l'allocation des canaux, utilise les mesures effectuées par la BTS pour contrôler les puissances émises par le mobile et prend la décision d'exécution duhandover lorsque le mobile change de cellules [3].

➤ **Le sous-système d'acheminement -NSS :**

Le NSS pour Network Sub-System, c'est un réseau fixe qui permet le traitement de l'appel pour l'établissement de la communication, la gestion de l'itinérance et de la mobilité. Il comprend des commutateurs, des passerelles vers le R.T.C.P et le RNIS ainsi que des bases de données. Il comporte les équipements suivants :

**a) MSC : Mobile-services Switching Centre**

C'est le commutateur du service mobile. Il gère l'établissement de la communication grâce aux messages de signalisation échangés avec le mobile d'une part et les entités du NSS d'autre part. Il effectue le transfert des messages courts SMS et exécute le handover lorsqu'il y est impliqué.

**b) VLR : Visitor Location Register**

C'est une base de données qui mémorise les données d'abonnement des abonnés présents dans une zone géographique. Les données mémorisées par le VLR sont similaires à celles du HLR mais concernent seulement les abonnés mobiles présents dans la zone considérée.

**c) HLR : Home Location Register**

C'est la base de données qui gère les caractéristiques de chaque abonné [3] :

- l'identité internationale de l'abonné utilisée par le réseau (IMSI) ;

- le numéro d'annuaire de l'abonné (MSISDN) ;
- le profil de l'abonnement.

➤ **Le sous-système d'exploitation et de maintenance -OSS :**

L'administration du réseau GSM consiste à évaluer ses performances et optimiser l'utilisation des ressources de façon à offrir un niveau de qualité aux usagers. L'OSS permet à l'opérateur d'administrer le réseau.

L'administration du réseau s'effectue par le biais des équipements décrits dans les paragraphes suivants.

**a) TMN : Télécommunications Management Network**

C'est l'ensemble formé par les équipements de médiation, le système d'exploitation et les réseaux de transport. Le management est réalisé par les OMC (Operations and Maintenance Centre) qui permettent une supervision locale des équipements ainsi que par le NMC (Network Management Centre) qui assure l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé.

**b) EIR : Equipment Identity Register**

C'est une base de données annexe contenant les identités des terminaux (IMEI) ; elle peut être consultée lors des demandes de services d'un abonné pour vérifier que le terminal utilisé est autorisé à fonctionner sur le réseau.

**c) AUC : Authentication Centre**

C'est une base de données qui mémorise pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour l'authentification de l'utilisateur et pour chiffrer les communications [3].

### 1.2.2.2 Réseau GPRS (2.5 G)

Le GPRS (General Packet Radio Service) est une technologie de transport de données en mode paquet. Il s'agit, sans devoir changer tous les équipements du réseau d'infrastructure GSM existant, par ajout de deux nouveaux équipements, le GGSN et le SGSN, d'offrir des débits de transmission pouvant atteindre 171 Kbits/s au lieu de 14,4 Kbits/s en mode circuit.

Dans le cas du mode circuit, la ressource radioélectrique est immobilisée en permanence, ce qui correspond à un trafic de données en continu. Dans le cas du mode paquet, la ressource radioélectrique est immobilisée que lorsque des données sont transmises et le canal redevient libre en l'absence de trafic [4]. La figure I.3 présente l'architecture du réseau GPRS.

Un réseau GPRS est un réseau IP. Qui est donc constitué de routeurs IP. L'introduction de la mobilité nécessite par ailleurs la précision de deux nouvelles entités :

➤ **Le nœud de service SGSN (Serving GPRS Support Node) :**

SGSN se charge dans son aire de service des transmissions de données entre les stations mobiles et le réseau mobile. Le SGSN est relié par des liens Frame Relay au sous-système radio GSM (BSS).

Le SGSN est connecté à plusieurs BSC et présent dans le site d'un MSC. Le SGSN assure la gestion des abonnés mobiles actifs et le relaiage des paquets de données vers le GGSN.

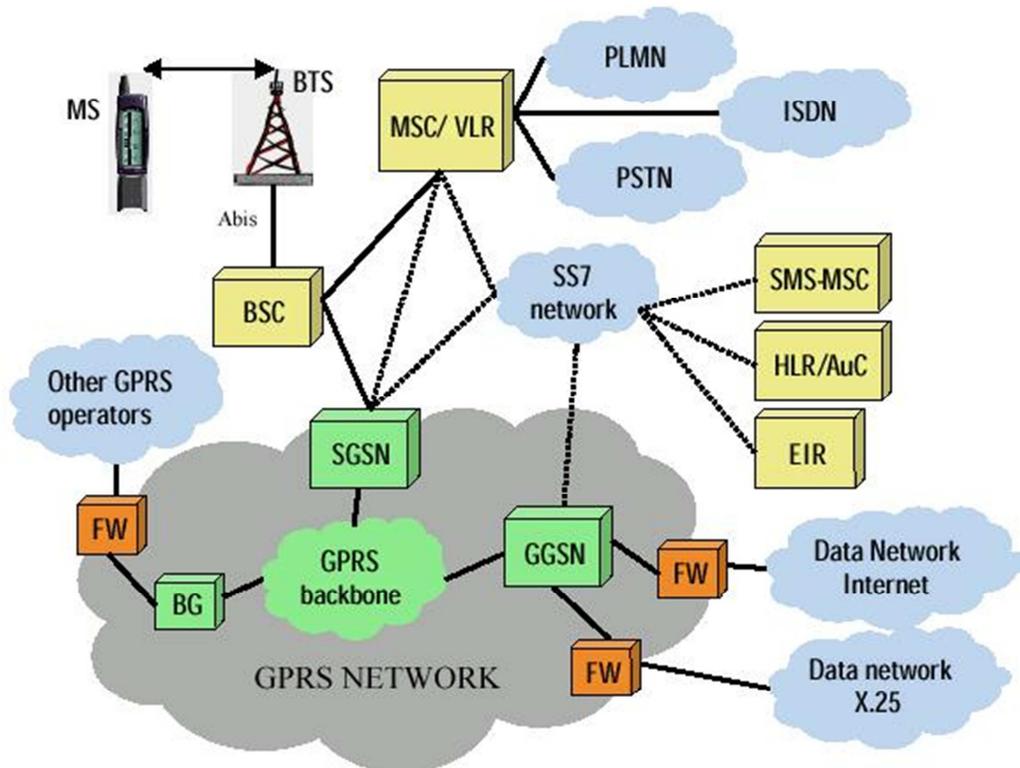


Figure I.3 : Architecture de réseau GPRS[2].

➤ **Le nœud de passerelle GGSN (Gateway GPRS Support Node) :**

L'entité GGSN (Gateway GPRS Support Node) joue le rôle d'interface à des réseaux de données externes (X.25, IP). Le GGSN est un routeur qui permet de gérer les transmissions de paquets de données :

- il décapsule des paquets GPRS provenant du SGSN (les paquets de données émis par le mobile) et les envoie au réseau externe correspondant.
- il permet d'acheminer les paquets provenant des réseaux de données externes vers le SGSN du mobile destinataire.

Le GGSN est généralement présent dans le site d'un MSC.

➤ **Le module BG pour la sécurité :**

L'entité BG (Border Gateway) assure une fonction équivalente au GGSN. Elle est utilisée lors de l'interconnexion entre deux réseaux GPRS, lorsque le mobile est sur un réseau visiteur. Ces BG jouent le rôle d'interface avec les autres PLMN (Public Land Mobile Network) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux [3].

➤ **Le type de transmission dans le réseau GPRS :**

Ce standard utilise un mode de transmission par paquet. Lorsque le mobile transmet des données vers un terminal fixe, les données sont transmises via le BSS (BTS + BSC) au SGSN qui envoie ensuite les données vers le GGSN qui les route vers le destinataire.

Le routage vers des terminaux (terminal mobile vers terminal mobile ou terminal fixe vers terminal mobile) utilise le principe de l'encapsulation et des protocoles tunnels. Les données revues par le GGSN sont transmises au SGSN dont dépend le mobile destinataire.

### I.2.2.3 Réseau EDGE (2.75)

L'EDGE pour *Enhanced Data for GSM Evolution* ne concerne que la circulation des données, la voix continuant toujours de transiter sur le réseau GSM. Il s'agit d'une simple évolution de la technologie GSM/GPRS dont sa particularité réside dans l'adaptation du schéma de modulation, en fonction de la qualité de la liaison.

Pour une liaison de bonne qualité, EDGE utilise la modulation 8-PSK (*Eight Phase Shift Keying*). Cette technique de modulation offre une efficacité spectrale supérieure à la modulation utilisée par le GSM et GPRS (GMSK –*Gaussian Minimum Shiftkeying*) et nous permet d'obtenir des débits moyens de 130 kb/s en réception et de 60 kb/s en émission (3 fois plus importants que celui de GPRS) [3].

## I.2.3 La troisième génération des réseaux mobiles

La troisième génération de réseaux mobiles (3G) regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), issu du GSM et largement déployé autour du globe, et le CDMA2000, issu de l'IS-95 et déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment un schéma d'accès multiples à répartition par les codes (CDMA). Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur l'UMTS, car c'est cette famille de technologies qui va donner naissance au LTE [5].

### I.2.3.1 Le réseau UMTS

#### a) Généralités

En intégrant à l'origine les services multimédia à haut débit (2 Mbit/s), l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) constitue l'évolution naturelle des systèmes de communication entre mobile.

Les bandes de fréquences allouées à l'UMTS se situent autour de 2 GHz avec une largeur de bande de 230 MHz. Les débits offerts à une station sont directement en relation avec la taille d'une cellule [6] :

- De 144 à 384 Kbit/s en zone rurale pour des mobiles dont la vitesse de déplacement est inférieure à 500 km/s (TGV !);
- De 384 à 512 Kbit/s en zone urbaine pour des vitesses de déplacement inférieures à 120 km/s ;
- Jusqu'à 2 Mbit/s à moins de 10 km de la base radio.

L'UMTS est basé sur la technique d'accès multiple WCMDA (*WidebandCDMA*) qui consiste à exploiter une plus large bande de fréquence pour envoyer un grand nombre de données par paquet [7].

#### b) Architecture générale du réseau

L'UMTS comprend deux grandes parties : le réseau d'accès appelée l'UTRAN et le réseau cœur appelée CN. L'architecture se présente comme montre la figure I.4 :

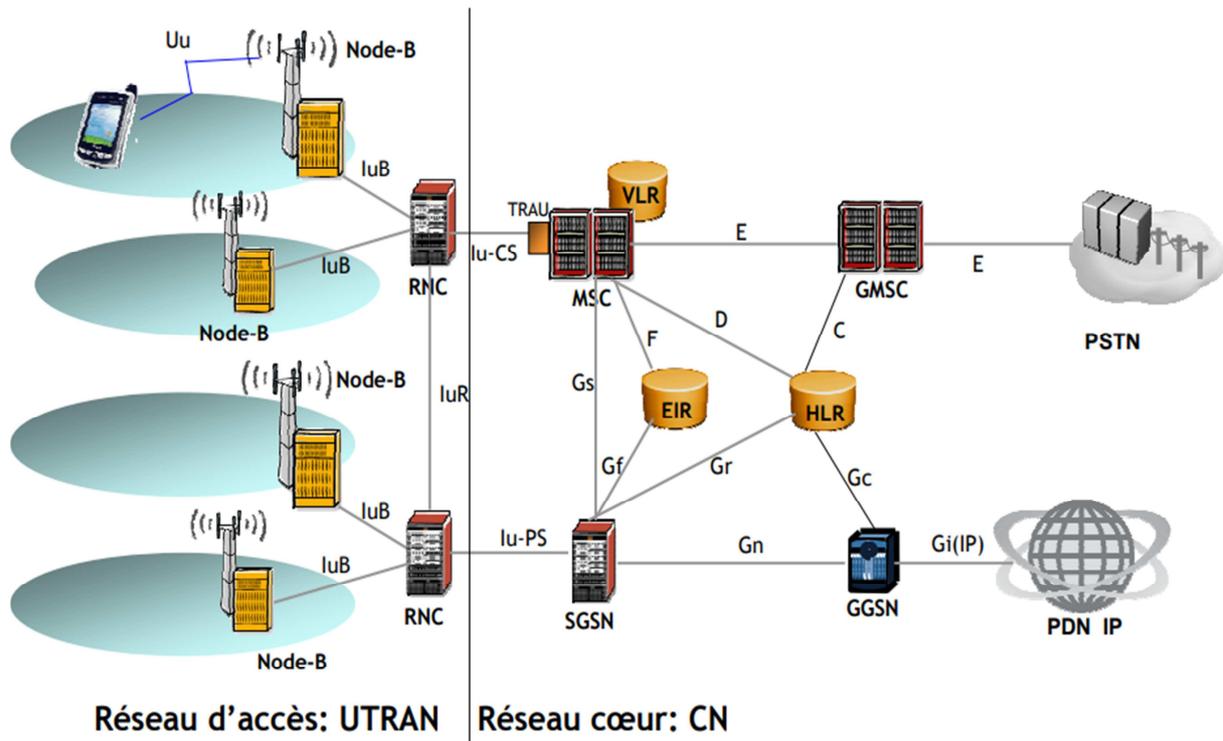


Figure I.4 : Architecture de réseau UMTS [1].

### ➤ Le réseau d'accès

C'est le réseau qui prend en charge le contrôle et la gestion des ressources radio, il permet l'échange d'information entre le terminal mobile et le réseau cœur. L'UTRAN est composé du RNC (Radio Network Controller) et de Nœud B correspondant respectivement aux BSC et BTS du réseau GSM. Ces deux entités forment le RNS (*Radio Network Subsystem*) [8].

#### a) Le nœud B

Il effectue des fonctions semblables à celle de la BTS (*Base transceiver Station*) des réseaux GSM et GPRS. Il gère principalement la couche physique de l'interface air (le codage du canal, l'entrelacement, l'adaptation du débit et l'étalement).

#### b) Le RNC (*Radio Network Controller*)

Le rôle principal du RNC est de router les communications entre le nœud B et le réseau cœur de l'UMTS. Il travaille au niveau des couches 2 et 3 du modèle OSI (contrôle de puissance, allocation de codes). C'est le point d'accès pour l'ensemble des services vis-à-vis du réseau cœur.

### ➤ Le réseau cœur

Le réseau cœur CN regroupe l'ensemble des équipements assurant les fonctions telles que le contrôle d'appels, le contrôle de la sécurité et la gestion de l'interface avec les réseaux externes. Ces derniers se scindent en deux catégories : celle des réseaux circuit (Réseau Numérique à Intégration de Service RNIS) et celle des réseaux paquet (réseau Internet) [9].

### ❖ *La qualité de service*

UMTS permet à partir d'un Smartphone l'accès à internet avec les mêmes fonctionnalités qu'une liaison ADSL, la mobilité en plus. Pour cela il met en œuvre quatre classes de trafic réparties en deux types de service [6] :

- Les services dits temps réel :
  - La classe <<conversational>> pour les flux voix, vidéo et la VoIP ;
  - La classe <<streaming>> pour les flux audio et vidéo ;
- Les services de type <<best effort>> :
  - La classe <<interactive>> pour la navigation sur le Web, sans garantie de débit et de délai ;
  - La classe <<backgroud>> pour les transferts de données (messagerie, téléchargement, transfert de fichiers...)

### ❖ *Les limites de l'UMTS*

Malgré tous les espoirs mises sur ce nouveau standard de réseaux, l'UMTS présente plusieurs inconvénients dont principalement [10] :

- Prix de licence élevé.
- Effort de développement important à fournir par les équipementiers.
- Effort important à fournir par les opérateurs.
- Changement des équipements usagers.
- Concurrent du WiMAX (30 Mbits/s).

#### **I.2.3.2 Le HSPA**

L'innovation principale du HSPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio à une commutation par paquets. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par la fonction d'ordonnancement ou scheduling en fonction de la qualité instantanée du canal radio de chaque UE. Le débit instantané étant accru via l'utilisation de modulation à plus grand nombre d'état.

La modulation 16-QAM (16Quadrature Amplitude Modulation) est introduite pour la voie descendante. Pour la voie montante une modulation QPSK a été introduit. Afin de réduire la latence du système en cas de perte de paquets, un nouveau mécanisme de retransmission rapide des paquets erronés, appelé HARQ(*HybridAutomaticResponserQuest*), est défini entre l'UE et la station de base.

Ces évolutions offrent aux utilisateurs des débits maximum de 14,4 Mbit/s en voie descendante et de 5,8 Mbits/s en voie montante, ainsi qu'une latence réduite [5].

#### **I.2.3.3 Le HSPA+**

L'amélioration des débits de la capacité est rendue possible par l'introduction de nouvelles techniques. En voie descendante, la modulation 64-QAM est désormais prise en charge, de même que la modulation 16-QAM en voie montante. En complément, une cellule peut transmettre des données à un utilisateur sur deux porteuses simultanément en voie descendante, à l'aide de la fonctionnalité DC-

HSDPA (Dual Carrier-HSDPA). Par conséquent les débits fournis à l'utilisateur sont potentiellement doublés [5].

## I.2.4 La quatrième génération

Dans le début des années 2000, plusieurs opérateurs mobiles et équipementiers télécoms et organisations se sont réunies dans le but de développer un réseau de mobile dit 4G pour 4<sup>ème</sup> génération basée sur la 3G. Le principal avantage de ce nouveau standard est de permettre des débits pouvant aller jusqu'à 1 Gigabit/s en vitesses fixes (stable), et 100 Mbit/s pour les utilisateurs mobiles.

Par définition, la 4G assure la convergence de la 3G avec les réseaux de communication radio fondés sur le protocole IP. La connexion devra être possible quel que soit le mode de couverture [11].

### I.2.4.1 Réseau LTE

L'idée et le projet pour développer la technologie LTE (*Long Term Evolution*) sont menés par l'organisme de standardisation 3GPP visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération en téléphonie mobile.

Cette technologie a comme but de permettre le transfert de données à très haut débit. En théorie, elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 50 Mb/s en lien montant et de 100 Mb/s en lien descendant avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur et un temps de latence plus faible.

LTE implique de modifier le cœur du réseau et les émetteurs radio. La norme LTE définie par le consortium 3GPP1, a d'abord été considérée comme une norme de troisième génération « 3.9G » (car proche de la 4G), spécifiée dans le cadre des technologies 2000, car dans les « versions 8 et 9 » de la norme, elle ne satisfaisait pas toutes les spécifications techniques imposées pour les normes 4G par l'Union internationale des télécommunications (UIT).

### I.2.4.2 Le réseau LTE-A

La LTE-A (*Long Term Evolution - Advanced*) est considéré comme étant la 4.5G ou bien la passerelle entre la LTE (4G) et la 5G. La LTE-A a été introduit par la 3GPP dans la Release 10 (RL10) qui a vu le jour dans les années 2012.

LTE Advanced est donc une évolution de la norme LTE avec des compléments fonctionnels qui permettent une introduction progressive des nouvelles fonctions dans les réseaux LTE préexistants [5].

Cette technologie a été créée afin de booster la LTE en termes de débit, temps de latence, capacité, couverture et diminuer l'interférence surtout dans le sens ascendant. La LTE-A est considéré par les connaisseurs du domaine de la télécommunication comme la vrai 4eme génération ; car c'est avec les facteurs introduit dans cette 3GPP RL10 qu'on a pu obtenir de meilleures performances.

## I.2.5 La cinquième génération

La 4G a à peine fini de se déployer que la future génération de réseau mobile pointe son nez. Ce sera la 5<sup>ème</sup> génération de réseau mobile. Elle promet un débit dix fois supérieur à la 4G.

Les chercheurs du monde entier étudient actuellement des concepts et des technologies potentiels pour la cinquième génération de réseaux mobiles (5G). De nombreux cas d'utilisation ont été résumés dans différents livres blancs et révèlent des exigences ambitieuses. Les technologies et les concepts actuellement en cours d'examen pour répondre à ces exigences sont très variées.

Il est indéniablement nécessaire de mieux comprendre les nouvelles interfaces hertziennes potentielles, qui opèrent à des fréquences supérieures à celles correspondant aux technologies des réseaux cellulaires actuels, qui vont de 6 GHz jusqu'à 100 GHz, ainsi que les technologies d'antennes avancées comme la MIMO massive et la formation de faisceaux.

Surtout, ce futur réseau se distinguera par une innovation majeure : « Dotées d'un millier de semi-conducteurs, ses antennes sont capables de « suivre » chaque Smartphone connecté à elle, jusqu'à ce qu'il sorte de son périmètre en optimisant en permanence le signal.

Déployée à partir de 2020, la 5G apportera des services personnalisés au grand public comme aux entreprises. La 5G visedes secteurs très variés, qui n'auraient pas nécessairement d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des piliers importants d'une société: l'énergie, la santé, les médias, l'industrie ou le transport [12].

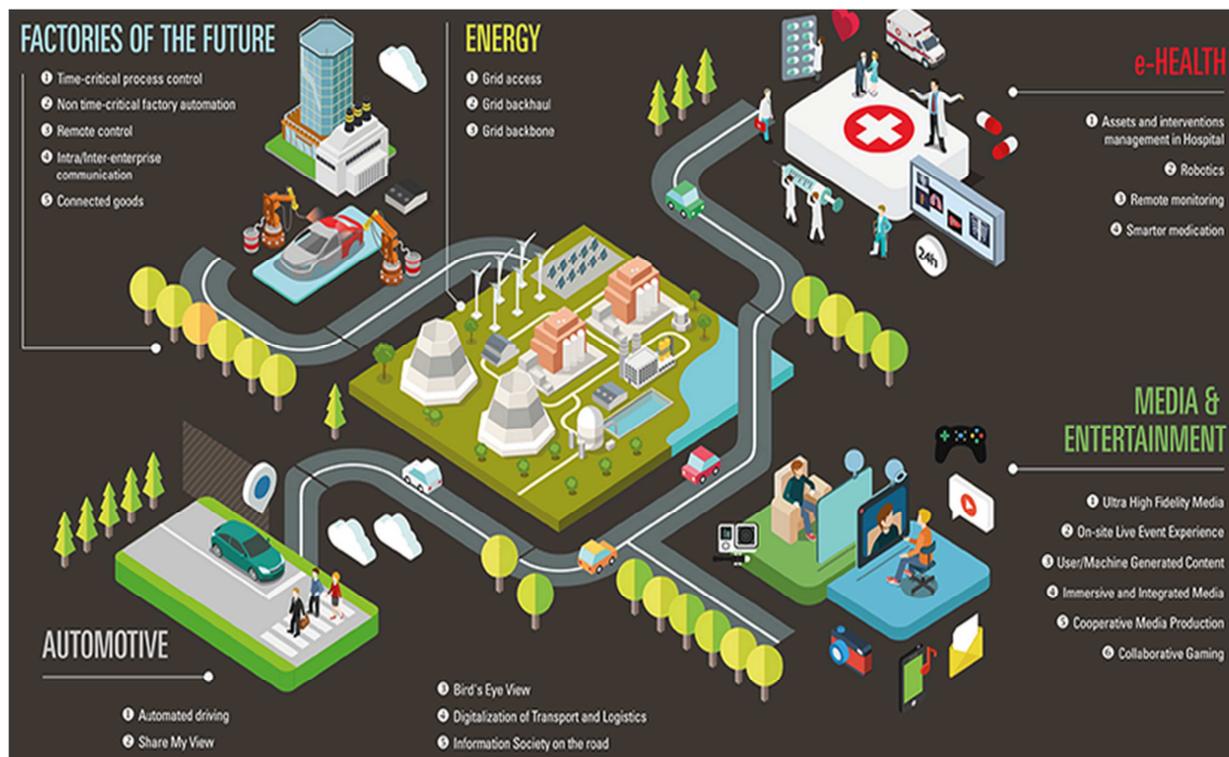


Figure I.5 : La 5G moteur du changement industriel et sociétal [12].

### I.3 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté d'une façon générale les différentes générations de téléphone mobiles et les principales caractéristiques de chacun d'eux.

On a passé de la première génération analogique en suite la deuxième génération GSM et son architecture, le GPRS, l'EDGE puis le réseau UMTS ainsi que ses deux évolutions HSPA et HSPA+.

Pour les réseaux 4G (LTE et LET-A), nous avons présenté un bref aperçu explicatif, nous allons le détailler dans le prochain chapitre. Finalement, nous avons présenté le futur réseau 5G qui est encore en voie d'étude et de standardisation.

---

---

## **Chapitre II :**

Etat de l'art de réseau 4G/LTE

---

---

## II.1 Introduction

Les téléphones cellulaires sont en progression constante. Ils sont utilisés non seulement pour les communications vocales, mais également, grâce aux avancées technologiques, pour la partie vision, dans le partage d'applications et même comme modems sans fil ou navigateurs web.

Dans le début des années 2000, plusieurs opérateurs mobiles et équipementiers télécomset organisations se sont réunies dans le but de développer un réseau de mobile, dit nouvelle génération, basée sur la 3G et appelée LTE (Long Term Evolution). Le principal avantage de ce nouveau standard, est de permettre des débits pouvant aller jusqu'à 1 Gigabit/s en vitesses fixes (stable), et 100 Mbit/s pour les utilisateurs mobiles.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un aperçu général sur le réseau 4G (LTE), son architecture, ses spécifications techniques, plus précisément, la couche physique et principalement l'interface air et les innovations apportées par rapport aux autres réseaux cellulaires.

## II.2 L'Objectif de la 4G/LTE

La 4G vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert Intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

## II.3 Architecture du système LTE

L'architecture générale du système LTE est montrée sur la figure II-1, le réseau LTE est composé de deux entités principales : le réseau d'accès radio terrestre universel évolué (EUTRAN) qui est le réseau d'accès radio pour l'EU, et le cœur de paquets évolué (EPC) qui est le cœur du réseau. L'architecture du réseau cœur est aussi désignée par, évolution d'architecture de service (SAE), et la combinaison de l'E-UTRAN et de l'EPC est aussi appelée système paquet évolué (EPS) [14].

### II.3.1 Equipement Utilisateur (UE)

En LTE, l'UE communique avec l'E-UTRAN et l'EPC en utilisant les protocoles appropriés la communication du plan utilisateur se termine au niveau de l'eNodeB et supporte tous les protocoles afférents au plan utilisateur. Dans le côté plan de contrôle, l'UE communique avec l'eNodeB et le MME à travers les protocoles RRC et NAS respectivement.

Pour pouvoir supporter différentes capacités matérielles, différents équipements utilisateurs (UE) sont définis (Tableau II.1). Les catégories sont différenciées selon le débit maximal, supporté, des données dans les deux liaisons montante et descendante. En plus le nombre maximale de couches de données (ou flux de données) diffère selon la catégorie de l'UE.

Par exemple, le débit maximal pour la catégorie 1 pour les deux liaisons descendante et montante est approximativement de 10 et 5 Mbps respectivement.

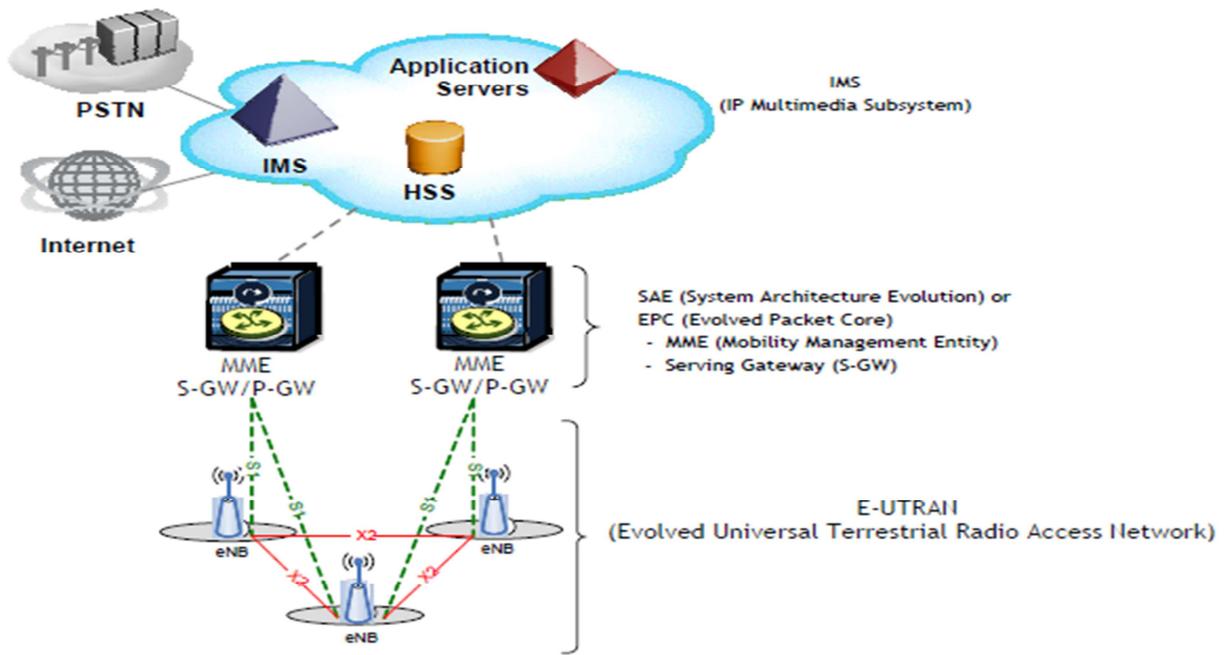


Figure II.1 : Architecture générale du réseau LTE [1].

En plus cette catégorie ne supporte pas la réception de plus d'un seul flux de données en liaison descendante simultanément. En outre la catégorie 5 des UE's peut supporter quatre voies de données en liaison descendante simultanément. En plus il est capable de transmettre en utilisant la modulation 64-QAM dans la liaison montante.

Caractéristique	Catégorie				
	1	2	3	4	5
Débit maximal (DL)/ (UL) en (Mbps)	10/5	50/25	100/50	150/50	300/75
Bande passante RF	20MHZ	20MHZ	20MHZ	20MHZ	20MHZ
Modulation supportée dans la liaison descendante(DL)	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Modulation supportée dans la liaison ascendante(UL)	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
Diversité en réception (Rx)	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
BS diversité (Tx)	1-4 Tx	1-4 Tx	1-4 Tx	1-4 Tx	1-4 Tx
MIMO dans la liaison descendante (DL)	Optionnel	2x2	2x2	2x2	4x4

Tableau II.1 : Les différentes catégories d'UE's pour le système LTE.

### II.3.2 Réseau d'accès E-UTRAN

L'E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) désigne le réseau d'accès à la LTE, il a une architecture horizontale vu que les contrôleurs des stations de base ont été supprimés ; il est composé de stations de base nommées eNodeB, d'antennes radio et des liaisons de transmission (en fibre optique, en cuivre ou en faisceaux hertziens).

### I.3.2.1eNodeB

L'eNodeB joue le rôle du NodeB et du RNC (*Radio Network Control*) dans les réseaux UMTS. Cela permet de réduire le délai d'accès et de simplifier la fonction d'opération et de maintenance du réseau. L'eNodeB est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE. Il a pour responsabilité de gérer les tâches suivantes :

- Gestion des ressources radio (RRM).
- Contrôle du porteur radio.
- Contrôle de l'admission radio.
- Contrôle de la connexion en mobilité.
- Ordonnancement de l'UE (UL et DL).
- Sécurité en accès strate (AS).
- Effectuer les mesures comme une base pour l'ordonnancement et la gestion de lamobilité.
- Compression de l'en-tête IP.
- Le cryptage des données utilisateur.
- Routage des données utilisateur entre eNodeB et S-GW.
- Traitement de la pagination originaire du MME.
- Traitement des messages de diffusion originaires du MME et du système d'opérations et de maintenance (OMS).
- Sélection de l'élément MME dans le cas où l'UE ne fournit pas cette information.
- Traitement des messages PWS, incluant ETWS et CMAS.

Les eNodeBs sont reliés entre eux par une interface X2 (Figure II.2).

- **L'interface X2** : c'est une interface logique. Elle est introduite dans le but de permettre aux eNodeBs d'échanger des informations de signalisation durant le Handover ou la signalisation, sans faire intervenir le réseau cœur.

Les eNodeBs sont reliés au cœur du réseau à travers l'interface S1.

- **L'interface S1** : c'est l'interface intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau cœur. Elle peut être divisée en deux interfaces élémentaires : Cette dernière consiste en S1-U(S1- Usager) entre l'eNodeB et le SGW et S1-C(S1-Contrôle) entre l'eNodeB et le MME.

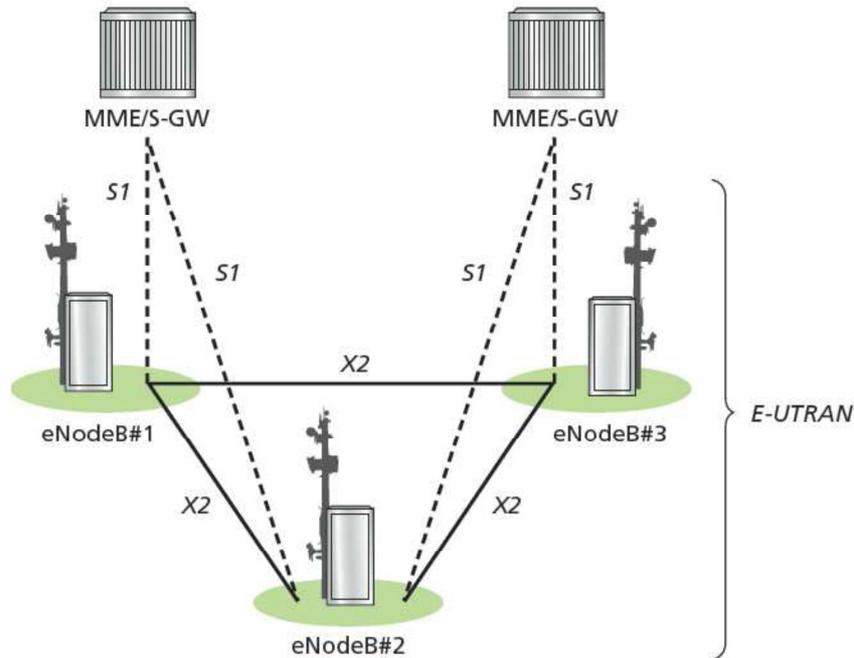


Figure II.2 : Les interfaces du réseau d'accès.

### II.3.3 Réseau cœur EPC (*Evolved Packet Core*)

L'UE communique avec l'EPC par le biais de l'E-UTRAN. Lorsqu'un UE est allumé, l'EPC est responsable de l'authentification et l'établissement de la connexion initiale nécessaire pour toute la communication qui s'en suit. A la différence de l'UMTS, le LTE a une architecture dite toute IP, qui supporte uniquement les données à commutation par paquets (PS).

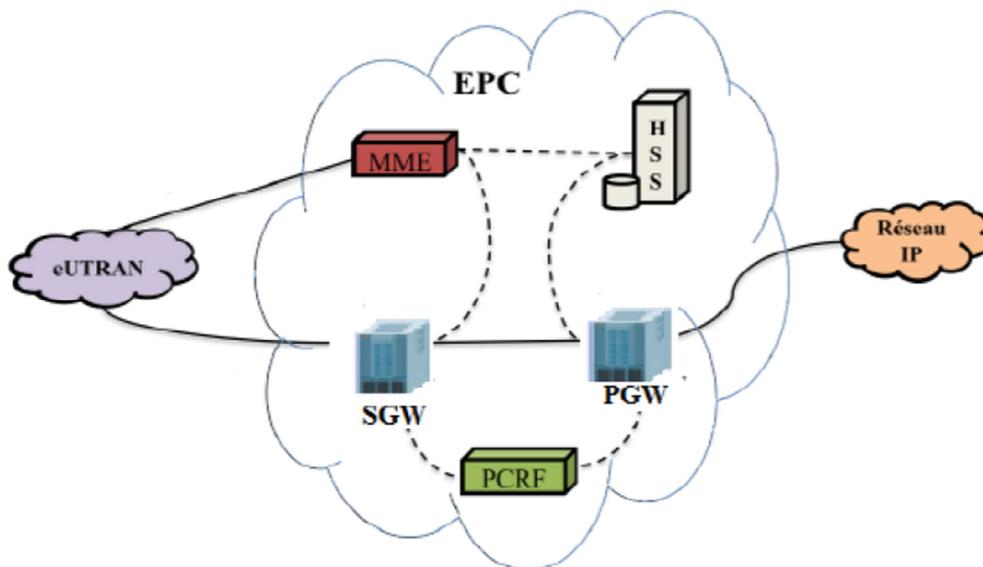


Figure II.3 : Architecture de l'EPC (*Evolved Packet Core*).

Les principales entités de l'EPC ainsi que nous avons pu l'observer dans les figures précédentes sont : MME, S-GW, PDN-GW, RCRF et HSS. Les fonctions de ces entités sont décrites de la façon suivante :

- ❖ **Mobility Management Entity(MME)**, Entité de gestion de mobilité : La MME est le nœud principal de contrôle du réseau d'accès LTE/SAE. Elle manipule un certain nombre de fonctionnalités telles que :
  - Le suivi des UE Mode Inactif (idle).
  - L'activation/ désactivation du Bearer.
  - Le choix du SGW pour un UE.
  - Le Handover Intra-LTE impliquant la location du nœud du réseau d'accès.
  - L'interaction avec le HSS pour authentifier un utilisateur en attachement et implémentation des restrictions d'itinérance.
  - Elle agit comme un licenciement pour le Non-Access Stratum (NAS).
  - Elle fournit des identités temporaires pour les UEs.
  - La SAE/MME agit en point de terminaison pour le chiffrement de protection de NAS de signalisation. Dans le cadre de cela, il s'occupe également de la gestion de la clé de sécurité. En conséquence, la MME est le point où l'interception légale de signalisation peut être effectuée.
  - La procédure de Paging.
  - L'interface S3 se terminant dans la MME fournit ainsi la fonction de plan de contrôle de mobilité entre les réseaux d'accès LTE et 2G/3G.
  - Le MME/SAE termine également l'interface S6 pour le HSS pour l'itinérance UEs.
  - La MME/SAE fournit un niveau considérable de fonctionnalités de contrôle global.
  
- ❖ **Serving Gateway(SGW)** : La passerelle de service SGW, est un élément plan de données au sein de LTE/SAE. Son objectif principal est de gérer la mobilité du plan utilisateur, elle agit également comme une frontière principale entre le RadioAccess Network, RAN et le réseau cœur. La SGW maintient également les chemins de données entre les eNodeBs et les passerelles PDN. De cette façon le SGW forme une interface pour le réseau de données par paquets à l'E-UTRAN. Aussi quand les UEs se déplacent dans les régions desservies par des eNodeBs différentes, la SGW sert de point d'ancrage de mobilité veillant à ce que le chemin de données soit maintenu.
  
- ❖ **PDN Gateway (PGW)** : la passerelle LTE/SAE PDN assure la connectivité pour l'UE à des réseaux de paquets de données externes, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données UE. L'UE peut disposer d'une connectivité avec plus d'un PGW pour l'accès à des PDNs multiples.
  
- ❖ **Home Subscriber Server (HSS)** : Avec la technologie LTE, le HLR est réutilisé et renommé HSS. Le HSS est donc un HLR évolué qui contient l'information de souscription pour les réseaux GSM, GPRS, 3G, LTE, et IMS. A la différence de la 2G et de la 3G où l'interface vers le HLR est supportée par le protocole du monde SS7, MAP, l'interface S6 s'appuie sur le protocole du monde IP, DIAMETER. Le HSS est une base de données qui est utilisée simultanément par les réseaux 2G,

3G, LTE/SAE et IMS qui appartiennent au même opérateur. Il supporte donc les protocoles MAP (2G, 3G) et DIAMETER (LTE/SAE, IMS).

## II.4 La couche physique

Dans cette partie, nous allons illustrer les différentes fonctionnalités de base de la couche physique de LTE ainsi que ses différents aspects: format de la trame, le codage, lien descendant et ascendant, etc ...

Son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio mobile :

- Utiliser FEC (*ForwardError Correction*) du canal de transmission pour les fonctions de codage et de décodage;
- Offrir le mappage des symboles codés avec les canaux physiques;
- Assurer la modulation/démodulation;
- Fournir la synchronisation des fréquences et de l'horloge;
- Mesurer les caractéristiques radios et envoyer les indications aux couches supérieures;
- Être le support de MIMO (Multiple Input Multiple Output).

La couche physique utilise la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le flux descendant (d'eNodeB vers UE) et la technique SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) pour le flux ascendant.

Elle offre aussi la possibilité d'utiliser trois modes de transmission: Full Duplex FDD (Frequency Division Duplex), HalfDuplex FDD et TDD (Time Division Duplex) [13].

### II.4.1 Les bandes de fréquences

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur de :1,4 MHz ; 3MHZ ; 5 MHZ ; 10 MHZ ; 15 MHZ et20 MHz dans une plage de fréquences allant de 450 MHz à 3,8 GHz selon les pays [5].

Le support pour les deux sens de transmission utilise deux bandes passantes appariées dans le mode FDD (*Frequency Division Duplex*) ou une seule bande passante dans le mode TDD (*Time Division Duplex*).

- Pour le **mode FDD**, chaque sens de transmission fonctionne simultanément dans la bande passante attribuée.
- Pour le **mode TDD**, les deux sens de transmission fonctionnent dans la bande passante, chaque sens se voyant attribuer une portion du temps.

### II.4.2 La structure de multiplexage

Deux structures de trames temporelles sont définies selon le mode FDD (*Frequency Division Duplex*) ou TDD (*Time Division Duplex*).

Pour le sens montant, les signaux transmis par les différents mobiles doivent être alignés temporellement, à la réception par l'unité eNodeB.

Les mobiles doivent donc être synchronisés temporellement par l'entité eNodeB qui leur communique l'avance de temps TA (Time Advance) à appliquer pour le sens montant.

### II.4.2.1 La structure de la trame de type 1

La structure de type 1 définie pour le mode FDD a une durée de 10 ms et contient 10 sous-trames (figure II.4). Chaque sous-trame est constituée de deux intervalles de temps (slots) [5].

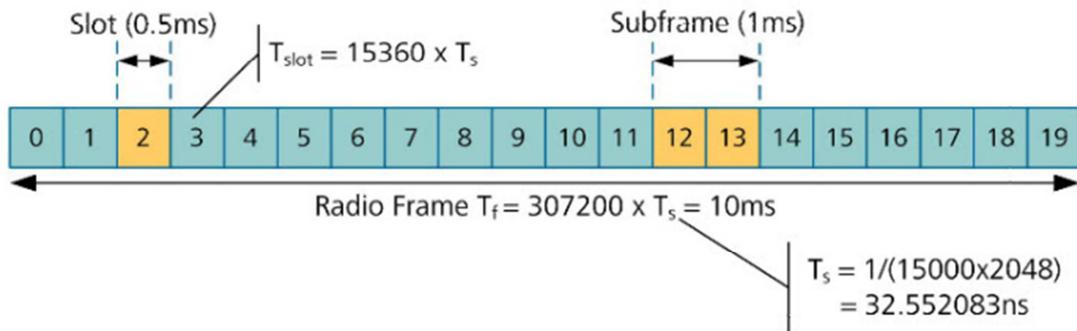


Figure II.4 : La structure de trame en mode FDD.

### II.4.2.2 La structure de la trame de type 2

La structure de type 2 définie pour le mode TDD a également une durée de 10 ms et contient deux demi-trames de 5 ms chacun (figure II.5).

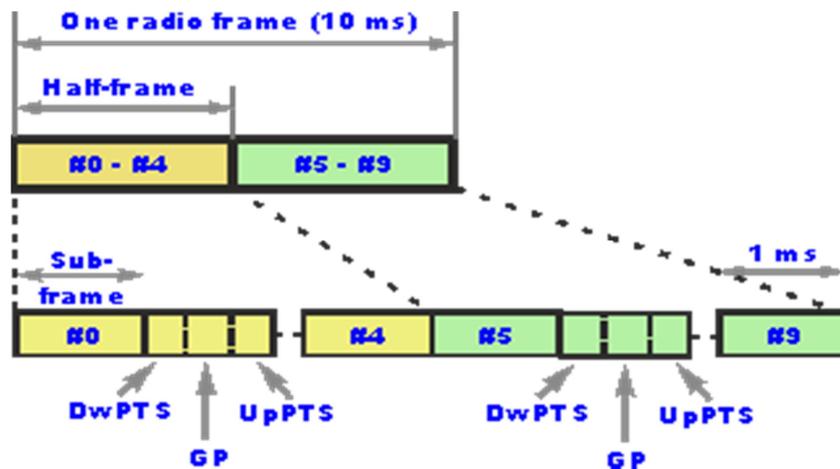


Figure II.5 : la structure de trame en mode TDD.

Chaque demi-trame comporte 5 sous-trames, dont la seconde peut correspondre à une sous-trame spéciale contenant trois champs particuliers :

- Un champ pour le pilote dans le sens descendant DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*). Ce champ peut contenir des données ;
- Un champ pour le pilote dans le sens montant UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*). Ce champ peut contenir des données ou un préambule ;

- Un temps de silence GP (*Gap Period*) entre les deux champs précédents. Cet intervalle de temps permet de composer un décalage temporel entre différents mobiles et d'éviter ainsi un recouvrement entre les deux sens de transmission.

Les sous-trames sont attribuées aux données pour les sens montant et descendant selon diverses configurations (Tableau II.2)[5] :

- Les sous-trames 0 et 5 sont toujours allouées au trafic dans le sens descendant ;
- La sous-trame 1 est toujours allouée à la sous-trame spécial contenant les trois champs particuliers ;
- La sous-trame 2 est toujours allouée au trafic dans le sens montant ;
- La sous-trame 6 peut être allouée à la sous-trame spécial contenant trois champs particuliers pour une période de 5 ms ;
- Les sous-trames 3, 4, 7, 8, 9 sont allouées au trafic descendant ou au trafic montant selon la configuration retenue.

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

**Tableau II.2 :** La configuration de la trame TDD .

D (*Downlink*) : sous-trame attribuée au sens descendant ;

U (*Uplink*) : sous-trame attribuée au sens montant ;

S (*Special*) : sous-trame spéciale contenant les trois champs particuliers.

### II.4.3 La modulation

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

L'*Adaptive Modulation and Coding* (AMC) est une technique de modulation/codage adaptative de l'information, utilisée notamment dans les transmission radio, sur les réseaux de téléphonie mobile WiMAX, UMTS (HSDPA), LTE et depuis 2012 sur les faisceaux hertziens. Elle consiste à adapter les codes correcteurs et les modulations utilisés en fonction de la qualité du signal.

Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : QPSK (4-QAM), 16-QAM, 64-QAM. Chacune de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

- ❖ Modulations Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM
- ❖ Modulations Uplink : QPSK et 16QAM

### II.4.3.1 La modulation 16-QAM

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de  $90^\circ$  avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [2]. L'amplitude et la phase de la porteuse sont simultanément modifiées en fonction de l'information à transmettre.

La figure II.6 montre la constellation, qu'elle est en conséquence le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, peut être augmentée pour un meilleur débit binaire, ou diminuée pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs binaires. Le nombre de points de la constellation est indiqué avant le type de modulation QAM.

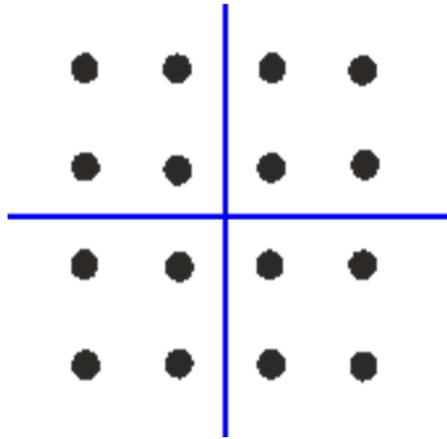


Figure II.6 : Constellation de la QAM à 16 états [2].

Le format de modulation QAM est étudié de plus en plus sérieusement dans le domaine des télécommunications par fibre optique afin de répondre à l'augmentation du débit.

### II.4.3.2 La modulation 64-QAM

Dans le cas d'une modulation, six bits sont mappés dans le symbole complexe. La constellation est constituée de 64 symboles (Figure II.7) [5].

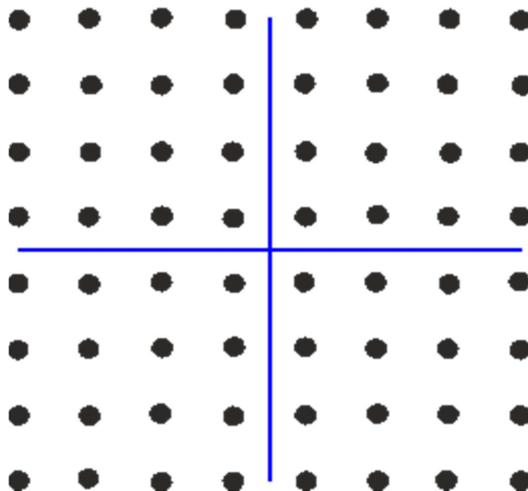


Figure II.7 : Constellation de la QAM à 64 états [5].

### II.4.3.3 La modulation QPSK

Souvent connue sous le nom de 4-PSK ou QPSK, cette modulation utilise un diagramme de constellation à quatre points, à équidistance autour d'un cercle. Avec quatre phases, QPSK peut coder deux bits par symbole.

Deux signaux en quadrature sont générés à partir d'un oscillateur local à la fréquence quadruple. Le train de donnée binaire est séparé en deux "sous trains" appelés I et Q. La paire de valeur, constitue ce que l'on appelle un symbole (Figure II.8).

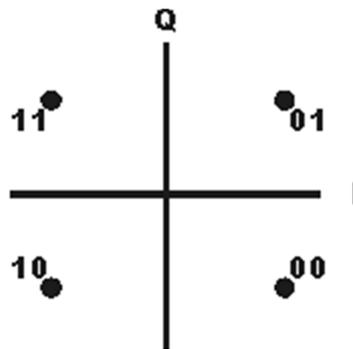


Figure II.8 : Constellation de la QPSK [5].

Pour des considérations électroniques, les signaux I et Q sont centrés sur 0V. On peut donc considérer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant aux états binaires.

Chacun attaque un multiplieur. Le résultat de chaque multiplication est sommé en sortie de façon à obtenir un signal modulé  $V_s(t)$  :  $V_s(t) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$  [2].

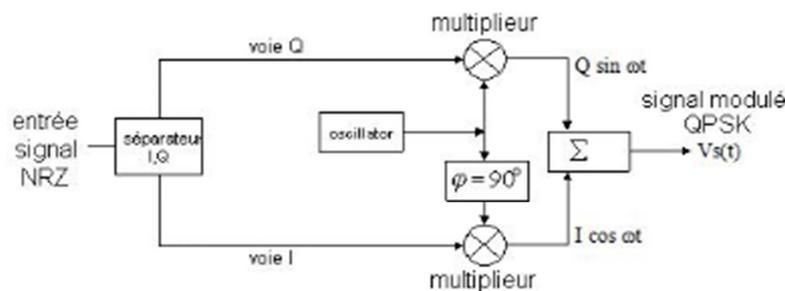


Figure II.9 : Schéma du principe du modulateur QPSK [2].

### II.4.4 Les types de transmission utilisée dans la 4G

La modulation du LTE est essentiellement sur l'utilisation de la technologie OFDM et des technologies d'accès associés, OFDMA/SC-FDMA [15].

#### a) OFDM :

Les Systèmes OFDM subdivisent la bande passante (BP) en plusieurs sous-porteuses étroites et transmettent les données en flux parallèles (Figure II.10), qui sont orthogonales entre-elles, ce qui leur permet d'être très proches les unes des autres (Espace entre sous-porteuses de 15 KHz). Un intervalle de garde est ajouté après chaque symbole pour contrer les effets du multi trajets.

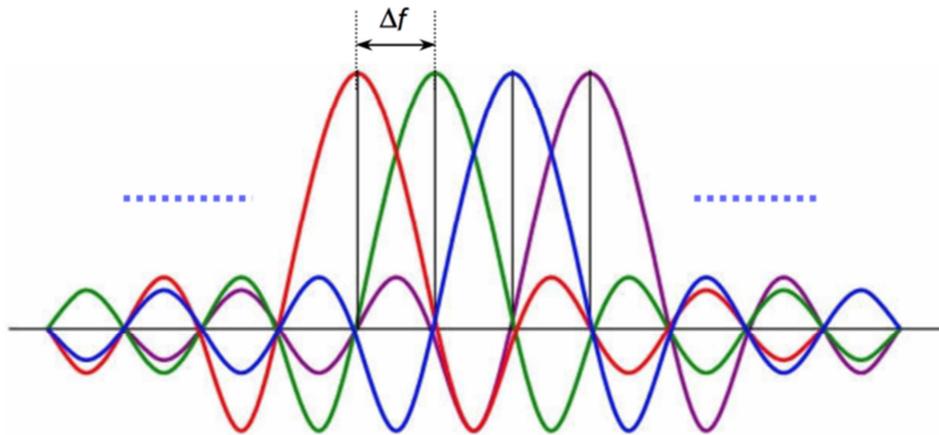


Figure II.10 : Principe de l'OFDM [15].

**b) OFDMA :**

En OFDMA, les utilisateurs se voient attribuer un nombre précis de sous-porteuses pour un time slot prédéterminé, appelées PRBs, (*Physical Resource Blocks*). Ces derniers ont chacun une dimension temps et fréquence. La Répartition des PRBs est géré par une fonction de planification à la station de base.

**c) SC-FDMA :**

En LTE Uplink, un concept différent est utilisé en technique d'accès. Bien qu'on utilise encore une forme de technologie OFDMA, l'implémentation est appelé *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*(SC-FDMA).Elle offre des performances et une complexité globale similaire à l'OFDMA mais utilise en revanche une technique de multiplexage fréquentiel à une seule porteuse, comme montre la figure II.11.

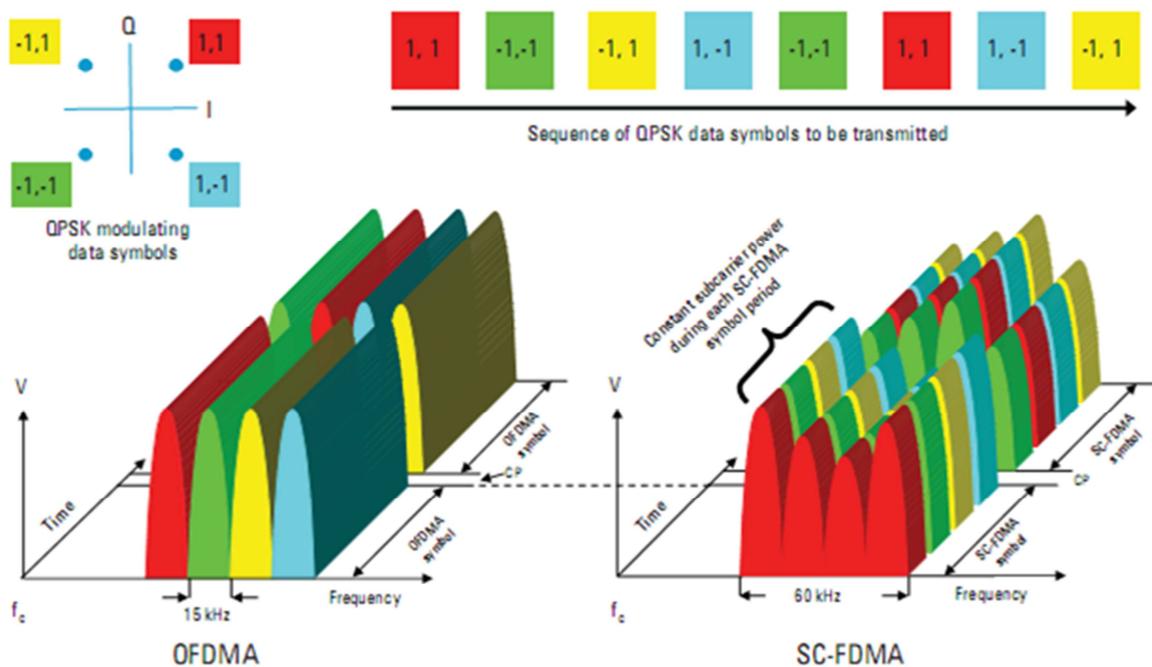


Figure II.11 : Les deux techniques d'accès multiple OFDMA/SC-FDMA[15].

### II.4.5 LTE MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

La technologie d'antenne MIMO est l'une des technologies clés utilisé par LTE. Il s'agit d'une technologie dans laquelle plusieurs antennes sont utilisées à la fois à l'émetteur et au récepteur pour améliorer la communication (permettant des transferts de données à plus longue portée et avec un débit plus élevé qu'avec des antennes utilisant la technique SISO (*Single-input Single-output*)).

La figure suivante explique le principe de fonctionnement de la technique MIMO, dans le cas où nous avons  $m$  antennes à l'émission et  $n$  de même pour la réception ( $m \times n$ ).

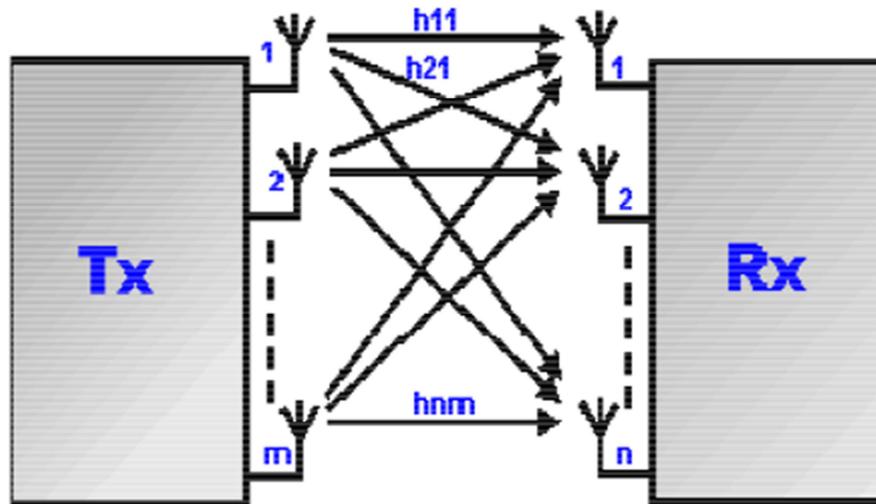


Figure II.12 : Principe de la technologie MIMO [16].

### II.4.6 Les canaux radio

Dans le but d'être flexible et permettre différents schéma pour la transmission de données, les spécifications de l'E-UTRAN ont introduit plusieurs types de canaux :

#### II.4.6.1 Les canaux logiques

Les canaux logiques correspondent aux services de transfert de données offert par les protocoles des couches hautes de l'interface radio. On distingue deux types de canaux logiques [16] :

##### a) Les canaux logiques de contrôles

- BCCH: est un canal Downlink, utilisé par le réseau pour le Broadcast des informations système de l'EUTRAN à l'ensemble des terminaux présents dans une cellule radio.
- PCCH: est un canal Downlink qui transfère les informations de paging aux terminaux dans une cellule.
- CCCH: ce canal est utilisé dans les premières phases de l'établissement de communication entre le terminal et l'E-UTRAN.
- MCCH: est utilisé pour la transmission des informations du réseau à plusieurs terminaux.
- DCCH: est un canal point-à-point bidirectionnel qui supporte les informations de contrôle entre un terminal donné et le réseau.

**b) Les canaux logiques de trafic**

- DTCH: est un canal bidirectionnel. Il peut supporter la transmission des données utilisateurs tel que la signalisation.
- MTCH: est un canal de données point-à-multipoint pour la transmission de trafic de données du réseau à un ou plusieurs terminaux.
- DCCH: est un canal point-à-point bidirectionnel qui supporte les informations de contrôle entre un terminal donné et le réseau.

**II.4.6.2 Les canaux de transport**

Les canaux de transport décrivent pourquoi et avec quelles données caractéristiques sont transférés à travers l'interface radio[16].

**a) Les canaux de transport E-UTRAN en Downlink**

- BCH: est associé au canal logique BCCH.
- DL-SCH: qui est utilisé pour transporter le contrôle d'utilisateur ou le trafic data.
- MCH: utilisé pour le contrôle des informations de transport.

**b) Les canaux de transport E-UTRAN en Uplink**

- UL-SCH: qui est l'équivalent du DL-SCH en Uplink.
- RACH: un canal de transport spécifique supportant un contrôle d'information limité. Il est utilisé durant les premières phases d'établissement de communication ou dans le cas du changement d'état.

**II.4.6.3 Les canaux physiques**

Les canaux physiques sont l'implémentation des canaux transport sur l'interface radio [16].

**a) Les canaux physiques en Downlink**

- PDSCH: qui transporte les données usager et la signalisation des couches hautes.
- PDCCH: qui transport les assignations d'ordonnancement pour le lien montant.
- PMCH: qui transporte l'information Multicast/Broadcast.
- PBCH: qui transporte les informations système.
- PCFICH : qui informe l'UE sur le nombre de symboles OFDM utilisé pour le PDCCH.

**b) Les canaux physiques en Uplink**

- PUSCH: qui transporte les données utilisateur et la signalisation des couches hautes.

- PUCCH: qui transporte les informations de contrôle, comprends les répons ACK et NACK du terminal aux transmissions Downlink.
- PRACH: qui transporte le préambule de l'accès aléatoire envoyé par les terminaux.

La figure (II.13) présente le mappage entre les canaux logiques, de transport et physiques.

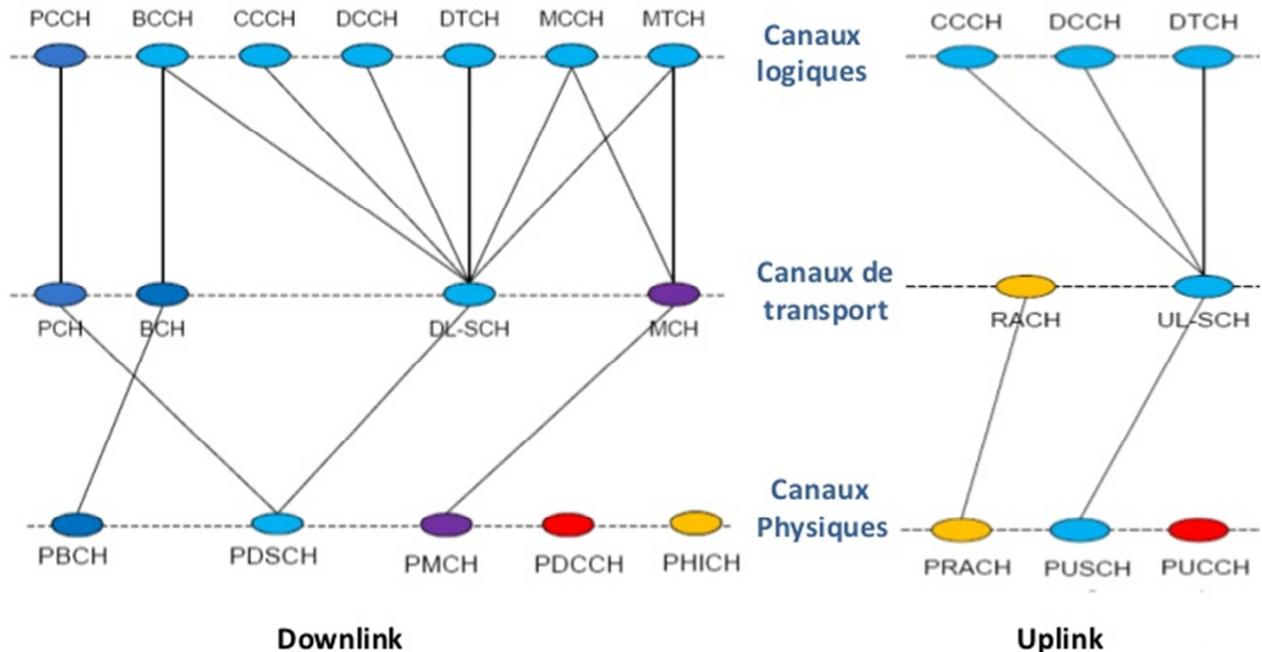


Figure II.13 : Le mappage entre les canaux logiques [16].

## II.5 Le Handover dans LTE

Dans LTE la gestion de mobilité est distribuée, les eNodeBs prennent la décision de Handover d'une façon autonome sans implication des éléments : MME et S-GW. Les informations nécessaires au Handover sont échangées entre les eNodeBs via une interface appelée X2. Le MME et le S-GW recevront une notification avec un message complet de Handover après que la nouvelle connexion aura été attribuée entre l'UE et la nouvelle eNodeB. Après réception du message, les Gateways effectuent le chemin de commutation. Durant le Handover il y a un délai durant lequel l'UE n'est pas connecté au système. Pour résoudre cela, une solution temporaire de Forwarding des données perdues de l'ancien eNB vers le nouveau eNB est proposée.

Dans ce cas il n'y a pas de mémorisation des données au niveau des Gateways. L'intérêt de cette solution est de minimiser la charge de signalisation au niveau de l'interface entre l'eNB et l'MME/S-GW. Les principales étapes du Handover sont :

- Le Handover est déclenché par l'UE qui envoie un rapport de mesure à l'eNB source qui va décider en se fondant sur le rapport reçu et sur les informations concernant la gestion des ressources radio (RRM : *Radio Resource Management*).

- La phase de préparation du Handover commence par l'envoi d'une requête de Handover (HO Request) de la part de l'eNB source vers l'eNB cible. Ce message contient toutes les informations pertinentes sur le Handover (UE - RAN, PDP Context, etc.).
- L'eNB cible enregistre le contexte, prépare les couches 1 et 2 (L1/L2) pour le Handover et répond à l'eNB source par un acquittement (HO RequestAck) qui fournira les informations sur l'établissement de nouveau lien radio.
- L'eNB source transférera toutes les informations nécessaires à l'UE, et à ce moment-là, l'eNB source arrête d'envoyer et de recevoir des données avec l'UE. Il fera alors suivre les données à l'eNB cible.
- L'UE informe l'eNB cible du succès du Handover avec un message de confirmation. Jusqu'à cet instant l'eNB cible mémorise les données reçues de l'eNB source. Après avoir reçu le message de confirmation il commence à envoyer les données bufférisées à l'UE.
- L'eNB cible initie le changement de chemin de données en envoyant un « *Handover Complete* » aux passerelles. Les informations de localisation de l'UE seront ensuite mises à jour au niveau des passerelles qui vont effectuer le changement de chemin pour que les données soient envoyées directement vers l'eNodeB cible.
- L'MME/S-GW confirment le chemin par un message '*Handover Complete Ack*', et dès que l'eNodeB cible reçoit ce message, il envoie une indication 'release Source' au eNodeB source pour qu'il libère définitivement la connexion avec l'UE.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les caractéristiques du réseau LTE, en commençant par l'architecture de ce réseau ainsi que le rôle de différentes entités. Puis nous avons présenté la couche physique et ses principales techniques utilisées dans les réseaux LTE. Enfin, nous avons présenté les différents canaux radios utilisés pour la transmission de données.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons les performances de la capacité et la qualité de service de la technologie LTE. Ainsi, nous présenterons les différentes technologies d'accès utilisées dans cette génération.

---

---

## **Chapitre III :**

Etude de la capacité et la QOS dans les réseaux LTE.

---

---

## III.1 Introduction

Parmi les grands défis de chaque opérateur mobile est celui d'augmenter son taux de popularité. Pour cela, son objectif est de regrouper le plus grand nombre d'abonnés (capacité) pour pouvoir augmenter son chiffre d'affaires, tout en fournissant une meilleure qualité de service (QOS) et des bonnes performances en encourageant de nouveaux types d'usages tels que la voix sur IP, la visiophonie et la vidéo streaming... Ces nouveaux usages, incitent une utilisation plus intensive des réseaux.

A travers ce chapitre, nous allons donner un aperçu général sur l'état de l'art de la capacité et la qualité de service dans le réseau LTE, puis nous allons citer et étudier les différentes technologies qui augmentent la capacité et qui influent sur la QOS des réseaux 4G/LTE.

## III.2 Etat d'art de la capacité dans le réseau LTE

Avant l'arrivée de LTE, la capacité du réseau se traduisait par le nombre maximal de communications téléphoniques pouvant être maintenues simultanément par une même cellule.

Désormais avec la normalisation de LTE, la capacité se matérialise par le nombre d'utilisateurs pouvant être connectés simultanément, et se caractérise par le débit total maximal pouvant être écoulé par une cellule fortement chargée [17].

### III.2.1 Capacité en nombre d'utilisateurs

La capacité d'une cellule est la valeur moyenne des débits dans un scénario impliquant plusieurs UE (User Equipment) actifs, pouvant être servis simultanément avec un débit donné.

Elle dépend de plusieurs paramètres comme, le type de milieu à planifier (urbaine, dense urbaine, rurale...), le nombre d'utilisateur connecté dans la même cellule, le type de service (VoIP, La téléchargement de fichier, vidéo streaming...), et aussi des technologies utilisés (technologie d'antennes, technologie d'accès,...). Elle est conditionnée par l'efficacité spectrale du système.

On définit l'efficacité spectrale cellulaire comme étant le nombre de bits par seconde par hertz (en bit/s/Hz), de même, l'efficacité spectrale en bordure de cellule (en bit/s/Hz) qui caractérise le débit pouvant être offert à un UE en mauvaises conditions radio.

Le réseau LTE doit supporter simultanément un large nombre d'utilisateur par cellule. Il est attendu qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures [17].

### III.2.2 Dimensionnement de capacité

Le dimensionnement de capacité permet de trouver la capacité maximale qui peut être supportée par une cellule. Son objectif est de déterminer le nombre des sites nécessaires pour satisfaire les trafics des abonnés dans une zone donnée. La capacité théorique du réseau est limitée par le nombre d'eNodeB installé dans le réseau [16].

#### III.2.2.1 Calcul dimensionnement de capacité pour les Uplink (UL)

Pour évaluer les besoins en capacités on doit suivre les tâches suivantes :

- Estimer le débit de cellule.
- Analyser les entrées de trafic fournies par l'opérateur pour estimer la demande de trafic (Nombre d'abonnés, trafic et des données, répartition géographique des abonnés dans la zone).
- Le principal indicateur de la capacité est la distribution SINR dans la cellule :  
L'augmentation de nombre d'utilisateurs augmente l'interférence et le bruit, et diminue la couverture cellulaire par suite force le rayon de la cellule à devenir plus petite [16].

### a) Débit de la cellule :

L'objectif est d'obtenir une estimation du nombre des sites en fonction des besoins en capacité. Ces derniers sont définis par les opérateurs de réseau en fonction du trafic.

Le débit de la cellule est nécessaire pour calculer le nombre de sites, son équation est la suivante [16]:

$$T_{cell} = Q_{UL} * R_{avg,UL} \quad (III.1)$$

Avec :

$$R_{avg,UL} = R_{RB} * (n_{RB} - n_{pucch}) \quad (III.2)$$

$n_{RB}$  : nombre total de blocs de ressources de la bande passante.

$n_{pucch}$  : nombre de blocs de ressources attribués aux canaux de contrôle PUCCH.

La figure suivante illustre le dimensionnement de capacité.

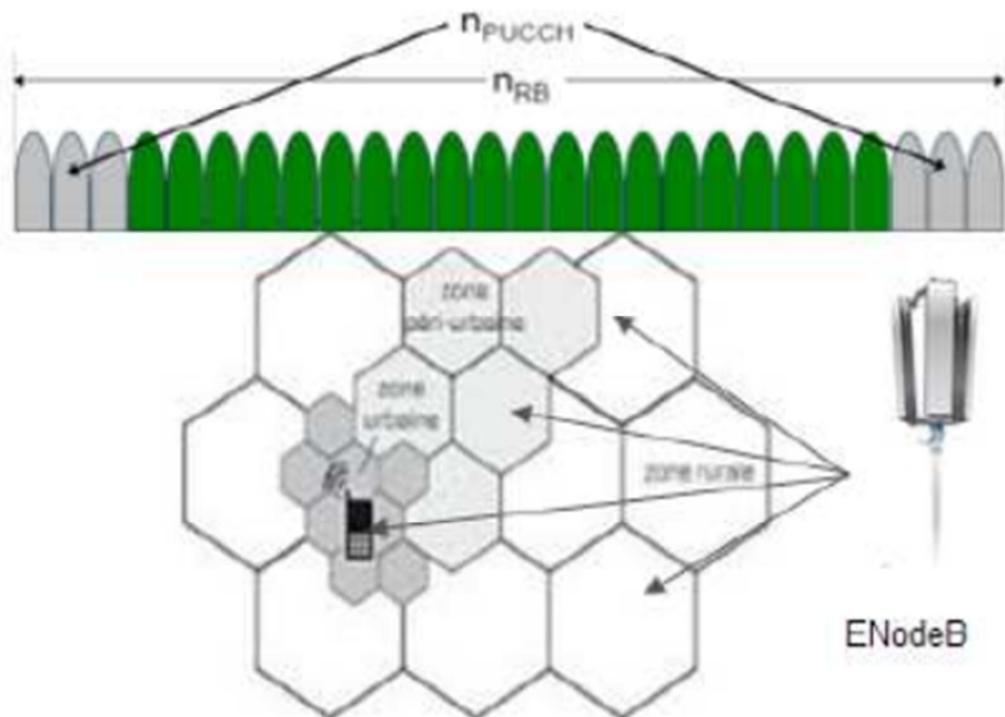


Figure III.1: Illustration de calcul de dimensionnement de capacité [16].

### III.2.2.2 Calcul dimensionnement de capacité Downlink (DL)

#### a) SINR :

La capacité Downlink (DL) est basée sur le rapport signal interférence et bruit (SINR).

Le SINR moyenne résultante  $Y_{DL,avg}$  est représentée par l'équation suivante :  $Y_{DL,avg}$

$$Y_{DL,avg} = \frac{P_{tx,RB}}{B_{DL,noise} * N_{RB,DL} * H * L_{samax}} \quad (III.3)$$

Avec

$$B_{DL,noise} = 1 + \frac{P_{tx,RB} * Q_{DL} * F}{N_{RB,DL} * L_{samax}} \quad (III.4)$$

#### b) Débit de la cellule :

Le débit de l'usager par cellule réduit proportionnellement avec le nombre de blocs des ressources  $n_{rb}$ .

$$R_{avg,DL} = n_{RB} * R_{RB} \quad (III.5)$$

Le débit de la cellule est représenté par l'équation suivante :

$$T_{cell,DL} = Q_{DL} * R_{avg,DL} \quad (III.6)$$

#### c) Nombre des sites demandés :

A l'étape finale, nous allons calculer  $T_{site}$  à partir de  $T_{cell}$  avec le cas de 3 cellules par site.

$$T_{site} = T_{cell,DL} * 3 \quad (III.7)$$

L'utilisateur va entrer comme des inputs le nombre des abonnés et le débit moyen de chacun, afin de calculer le nombre des sites :

$$N_{site} = \frac{T_{user} * N_{abonnés}}{T_{site}} \quad (III.8)$$

Le nombre des abonnés est calculé à partir de l'équation suivante [16]:

$$N_{abonnés} = [\prod_{i=1}^N (1 + \alpha_i) * (1 + \beta_i)] * d * surface \quad (III.9)$$

$d$ : La densité des abonnés par  $Km^2 = 113$ abonnés/ $km^2$ .

**Surface** : voir tableau III.1.

$\alpha$ : Augmentation de nombre des habitants.

$\beta$ : Données opérateurs, indique le taux de migration des abonnés des autres opérateurs =1%.

$N$  : calcul fait pour 15 ans d'avance.

Type de zone	Surface de la zone (Km <sup>2</sup> )
Urbaine dense	50
Urbaine	400
Suburbaine	200
Rurale	300

**Tableau III.1:** Surface de zone [16].

### III.3 La qualité de service dans le réseau LTE

#### III.3.1 Définition

La qualité de service (QoS) ou *Quality of service* (QoS) est la capacité de transmission dans de bonnes conditions un certain nombre de paquet dans une connexion entre un émetteur et un récepteur, et cela peut être présenté sous plusieurs termes tel que la disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquets ...

Elle regroupe un ensemble de technologies mise en œuvre pour assurer des débits suffisants et constants sur tous les types de réseaux [2].

#### III.3.2 But de la QoS

Le but de la QoS est donc d'optimiser les ressources du réseau et de garantir de bonnes performances aux applications. La qualité de service sur les réseaux permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse différenciés par application suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la couche réseau.

Elle permet ainsi aux fournisseurs de services de s'engager formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives sur leurs infrastructures IP.

Selon les types d'un service envisagé, la qualité pourra résider [2]:

- Le débit (téléchargement ou diffusion vidéo).
- Le délai (pour les applications ou la téléphonie).
- La disponibilité (accès à un service partagé).
- Le taux de pertes de paquets.

### III.3.3 Paramètres de la QoS

Au sein d'un réseau donné, la qualité de service est évaluée en fonction des différents équipements qui composent ce réseau, ainsi que du trafic qui y circule, etc.

Des applications multimédia telles que la voix-IP ou la vidéo à la demande, en plus des applications classiques, seront de plus en plus utilisées dans ce type de réseaux. Ces applications multimédia nécessitent un niveau minimal de qualité de service en termes de bande passante, de délai, de gigue ou de taux de pertes de paquets...

#### III.3.3.1 Le débit

Il définit le volume maximal pouvant être atteint pour la transmission de l'information (bits) par unité de temps (s) dans une communication entre un émetteur et un récepteur.

#### III.3.3.2 La perte de paquets

Elle correspond aux octets perdus lors de la transmission des paquets. Elle s'exprime en taux de perte. Plutôt rare. Elle correspond au nombre de paquet de données qui n'ont pas été reçus par la destination lors d'une communication. Cela peut être causé par plusieurs facteurs, la plupart du temps due à un encombrement du réseau.

#### III.3.3.3 Le délai de transit (latence)

C'est le délai de traversée du réseau, d'un bout à l'autre, par un paquet. Les différentes applications présentes dans un réseau n'auront pas le même degré d'exigence en fonction de leur nature : faible, s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, ce degré d'exigence sera fort s'il s'agit de données "voix".

La latence dépend du temps de propagation (fonction du type de média de transmission), du temps de traitement (fonction du nombre d'équipements traversés) et de la taille des paquets (temps de sérialisation).

#### III.3.3.4 La gigue

Désigne les variations de latence des paquets. La présence de gigue dans les flux peut provenir des changements d'intensité de trafic sur les liens de sorties des commutateurs. Plus globalement, elle dépend du volume de trafic et du nombre d'équipements sur le réseau.

#### III.3.3.5 La bande passante

Il existe deux modes de disponibilité de la bande passante, en fonction du type de besoin exprimé par l'application :

- Le mode "*Burst*" est un mode immédiat, qui monopolise toute la bande passante disponible (par exemple lors d'un transfert de fichier).
- Le mode "*Stream*" est un mode constant, plus adapté aux fonctions audio/vidéo ou aux applications interactives.

### III.3.3.6 Priorité des paquets

Afin d'arbitrer entre les modes "*burst*" et "*streaming*" précédemment cités, une gestion du trafic peut soit être installée au sein du réseau, soit à ses extrémités. S'il s'agit de l'intérieur du réseau, les nœuds de ce réseau opèrent alors comme étant des éléments de classification et de priorisation des paquets qui y circulent. Si le dispositif se trouve à l'extérieur, les équipements constituant le réseau se trouvent déchargés de toute QoS. Deux mécanismes sont alors à l'œuvre :

- Le contrôle de débit TCP, qui modifie le débit des applications TCP en fonction des conditions de charge du réseau et du niveau de priorité des applications,
- La gestion des files d'attente personnalisées, qui affecte les flux entrants aux files d'attentes qui leur correspondent.

### III.3.4 Les informations utilisées pour assurer la QoS

Pour mettre en place la qualité de service, il est nécessaire de se positionner sur la reconnaissance des différents services qui sont les suivants :

- La source et la destination du paquet.
- Le protocole utilisé (UDP/TCP/etc.).
- Les ports de source et de destination dans le cas TCP et UDP.
- La validité du routage (par ex. gestion des pannes dans un routage en cas de routes multiples).
- La bande passante consommée.
- Le temps de latence.

### III.3.5 Qualité de service dans le réseau 4G :

Le développement du réseau Internet et le nombre d'utilisateurs pouvant se connectés à ce réseau impose le recours à des niveaux importants de QoS. Dans cette perspective, plusieurs groupes de travail ont vu le jour pour les réseaux 4G. Les nouveaux besoin en termes de mobilité des utilisateurs et la croissance des réseaux permettant le nomadisme des utilisateurs ont fait migrer le problème vers des réseaux sans fil.

**Le bearer EPS :** Le bearer EPS est un équivalent du contexte PDP en 2G/3G. Il représente un concept logique qui est établi entre le terminal et la PDN GW et qui agrège plusieurs flux data transportés entre les deux entités.

Il permet d'identifier de manière unique des flux de trafic recevant la même qualité de service entre le terminal et la PDN GW. Tous les flux associés à un bearer EPS reçoivent les mêmes traitements en termes de forwarding (expédition des paquets).

Il existe deux types de bearers EPS [2]:

- ✓ Le *Default bearer*, le premier bearer établi lorsque le terminal se connecte à un PDN, il reste actif durant toute la connexion.
- ✓ Les *Dedicated bearer*, tous les bearers additionnels établis avec le même PDN.

### III.3.6 Exemple de Qualité de Service

On voit à travers ces quelques exemples que les besoins en QoS peuvent être différents. Par exemple si l'on veut diffuser de la vidéo à la demande, on aura besoin d'un transfert quasi temps-réel avec une latence très faible et une gigue faible, en revanche il ne sera pas dramatique de perdre une image de temps en temps ou alors d'avoir une qualité d'image un peu dégradée.

Selon l'application utilisée, on s'efforcera de faire le bon compromis pour assurer la meilleure QoS possible, sachant qu'il n'existe pas de solution qui résolve tous les problèmes à la fois.

Avec un débit toujours plus grand proposé aux utilisateurs, les applications réseau ont évolué, ou plus exactement de nouvelles applications sont apparues : les applications multimédia. On peut compter parmi ces applications : la téléphonie sur IP, la diffusion de musique, la vidéoconférence, la vidéo à la demande. Ces nouvelles applications étant gourmandes en ressources, les réseaux traditionnels doivent mettre en œuvre des mécanismes de QoS pour ces flux dits continus. Nous allons voir ici les contraintes de ces applications [2].

Pour accroître la capacité du réseau et améliorer sa qualité de service, il faut faire une gestion intelligente des ressources spectrales disponibles, plusieurs techniques et technologies ont été mises au point.

## III.4 Les technologies qui ont permis l'augmentation de la capacité

### III.4.1 La technologie d'accès : OFDMA, SC-FDMA

#### III.4.1.1 Concept de bloc de ressources

Le bloc de ressource est le plus petit élément qui constitue les ressources physiques en LTE, c'est une grille, composé d'éléments de ressource (RE). Il est formé de 12 sous porteuses, largeurs de chacune est de 15KHz [17], comme il est illustré par la figure III.2.

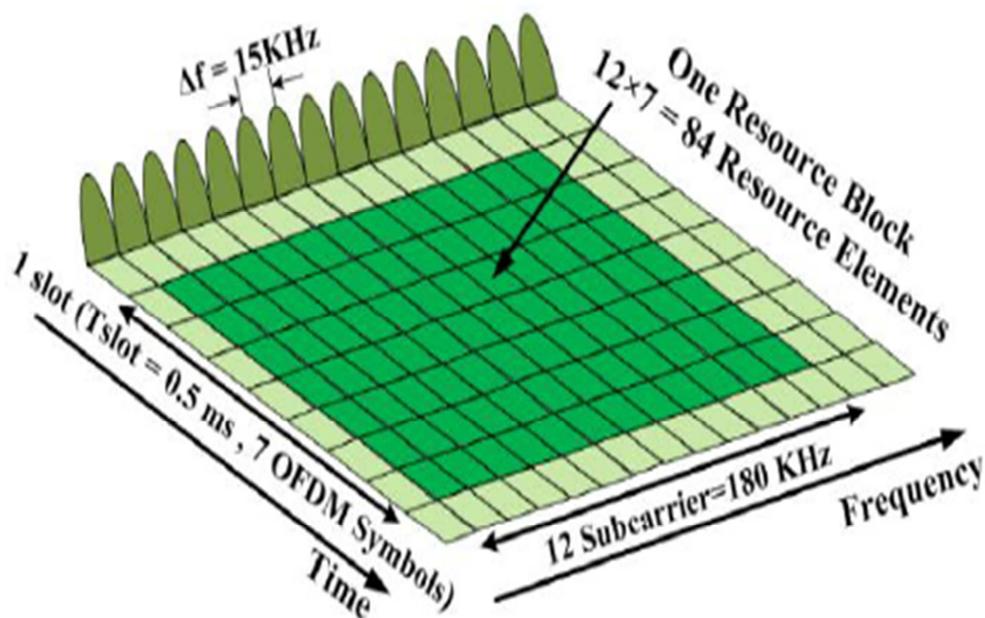


Figure III.2 : Bloc de ressources [17].

### III.4.1.2 L'OFDM, OFDMA, SC-FDMA

Le principe de l'OFDM (*Orthogonal frequency division multiplexing*) consiste à répartir le signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales, avec l'ajout d'un préfixe cyclique entre symboles OFDM pour éviter leurs interférences.

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) est la technologie d'accès multiple par rapport OFDM, elle est utilisée en LTE dans la liaison descendante. Ainsi, l'information est transmise via plusieurs sous-porteuses orthogonales. Ces sous-porteuses sont générées grâce à l'IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), et leur nombre total qui dépend de la bande spectrale. L'espacement entre sous-porteuses en LTE est fixé à 15 KHz, et le symbole OFDM est celui constitué de la totalité des symboles informations transmis via les sous porteuses.

Pour la voie montante, LTE utilise une dérivée appelé SC-FDMA. En OFDMA, les symboles sont transmis chacun à travers une sous-porteuse, alors qu'en SC-FDMA chaque symbole est étalé sur l'ensemble des sous-porteuses allouées. La figure III.3 montre la différence entre les deux méthodes d'accès OFDMA et SC-FDMA.

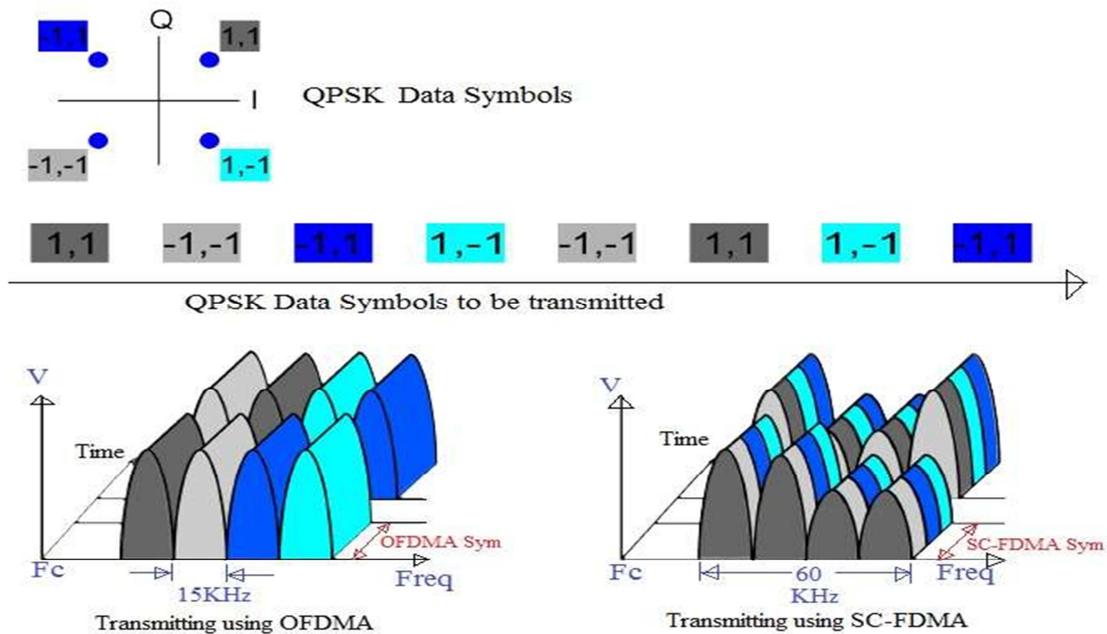


Figure III.3 : Différence entre OFDMA et SC-FDMA [17].

### III.4.2 La technologie MIMO

Les MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes du côté de l'émetteur et du côté du récepteur (figure III-4). La mise en place d'une telle structure permet à LTE d'atteindre des hauts débits et une grande capacité.

Les systèmes MIMO exploitent les techniques de [17]:

- ✓ Diversité d'espace : Diversité d'antenne.
- ✓ Diversité fréquentielle: Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes.

- ✓ Diversité temporelle : Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal.

### III.4.2.1 principe de la technologie MIMO

Le principe de la technologie MIMO consiste à émettre dans un même canal des signaux transmis sur des antennes différentes. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de  $n$  canaux différents.

Dans la figure III.4, le flux est divisé en différents flux de même fréquence qui sont envoyés à travers 3 émetteurs à 3 récepteurs. L'algorithme permet ensuite d'identifier les différents flux en vue de les restituer en un seul flux. Cet algorithme utilise la réflexion des signaux sur les murs, le sol, etc.

Alors que ces réflexions pourraient être considérées comme mauvaises, la technologie MIMO profite de ces différents canaux pour améliorer la rapidité de transmission des données [18].

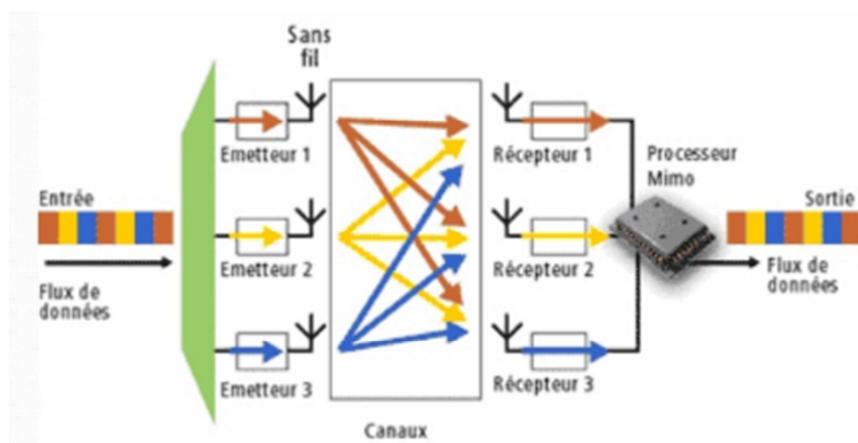


Figure III.4 : Principe de la technologie MIMO [18].

### III.4.2.2 Catégories des techniques du MIMO

On peut considérer trois catégories de MIMO [18]:

**La diversité spatiale MIMO:** On transmet simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission. Les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et sommés de façon cohérente. Cela permet d'augmenter le rapport signal sur bruit S/B (grâce au gain de diversité) de la transmission. Pour que cette technique soit efficace, il faut que les sous-canaux MIMO soient dé-corrélés les uns des autres.

**Le multiplexage spatial MIMO:** Chaque message est découpé en sous-messages. On transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes d'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine. Comme pour la diversité MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être dé-corrélés. Le multiplexage MIMO permet d'augmenter les débits de transmission (grâce au gain de multiplexage). Les techniques de diversité et de multiplexage MIMO peuvent être conjointement appliquées. Par exemple pour un système MIMO  $5 \times 5$  (c'est-à-dire 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), on peut configurer un sous-système MIMO  $2 \times 3$  pour faire du multiplexage et un sous-système MIMO  $3 \times 3$  pour faire de la diversité MIMO.

**Le MIMO –Beamforming (formation de faisceau):** Le réseau d'antennes MIMO est utilisé pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau). On peut ainsi créer des lobes constructifs / destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de *beamforming* permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).

### III.4.2.3 Architectures MIMO

On peut distinguer plusieurs configurations ou architectures de système MIMO, et cela dépendra du nombre d'antennes utilisés à l'émission et à la réception (Figure III.5).

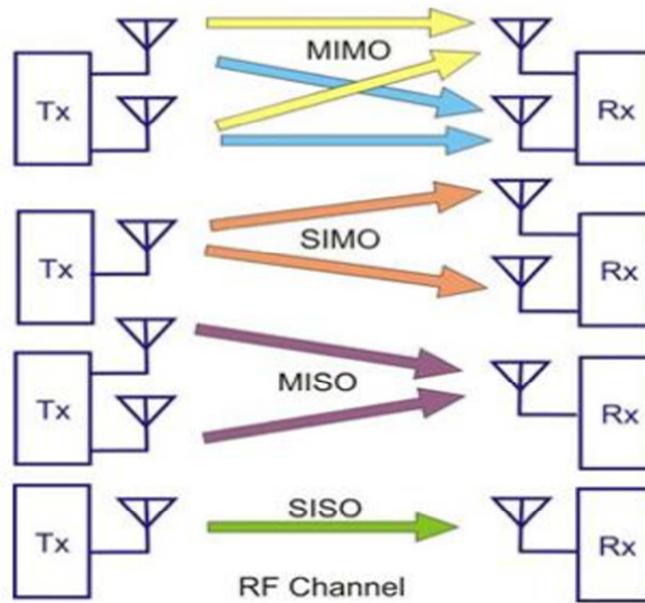


Figure III.5 : Type d'architectures MIMO [17].

### III.4.2.4 Capacité des technologies MIMO

- a) **Système SISO :** C'est l'architecture la plus simple, elle utilise une seule antenne à l'émission et une autre à la réception (*Single Input Single output*).

Pour un système SISO la capacité est donnée par la formule bien connue de Shannon:

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2) \quad \text{b/s /Hz} \tag{III.10}$$

Où  $h$  est le coefficient complexe du canal (supposé non dispersif ici). Ce coefficient peut être fixe (canal déterministe) ou aléatoire.  $\rho$  représente le SNR en réception. Si l'on déploie  $M$  antennes en réception [2,18].

- b) **Système MISO :** C'est une diversité spatiale en émission, c'est-à-dire plusieurs antennes à l'émission et une seule antenne à la réception (*Multiple Input Single Output*).

On obtient un système SIMO avec une capacité donnée par :

$$C = \log_2(1 + \rho \sum_{i=1}^M |h_i|^2) \quad \text{b/s/Hz} \tag{III.11}$$

Où  $h_i$  représente le gain pour l'antenne  $i$ . La particularité de cette équation, c'est qu'une croissance linéaire de  $M$  apporte seulement une croissance en  $\log$  de la capacité, sur un canal AWGN. Notons que ce résultat est la capacité optimale de tout système exploitant la diversité en réception.

Si tous les canaux  $h_i$  sont d'amplitude constante, nous retrouvons un résultat classique : le SNR résultant est égal au produit du SNR monovoie et du nombre d'éléments [2,18].

- c) **Système SIMO** : C'est une diversité spatiale en réception, c'est-à-dire une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (*Single Input Multiple Output*). Sa capacité est donnée par :

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right) \text{ b/s/Hz} \tag{III.12}$$

Où la division par  $N$  sert à fixer la puissance totale en émission. Nous observons dans ce cas aussi une dépendance logarithmique du nombre d'antennes  $N$ .

- d) **Système MIMO** : Si maintenant on veut profiter de la diversité en émission et en réception en même temps, on déploie  $N$  antennes en émission et  $M$  antennes en réception pour obtenir un système MIMO avec une capacité donnée par la formule:

$$C = \log_2 [\det(I_M + \frac{\rho}{N} \overrightarrow{HH})] \text{ b/s/Hz} \tag{III.13}$$

Où  $(\overline{\quad})$  représente la transposée – conjuguée et  $H$  est une matrice  $M \times N$  qui caractérise le canal. La capacité donnée augmente linéairement avec  $m = \min(M, N)$  contrairement à une croissance logarithmique du système MISO et SIMO. C'est le résultat fondamental concernant la capacité des systèmes MIMO, devenus omniprésents [2,18]. La figure III.6 illustre la capacité du système MIMO par rapport le SISO et SIMO en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

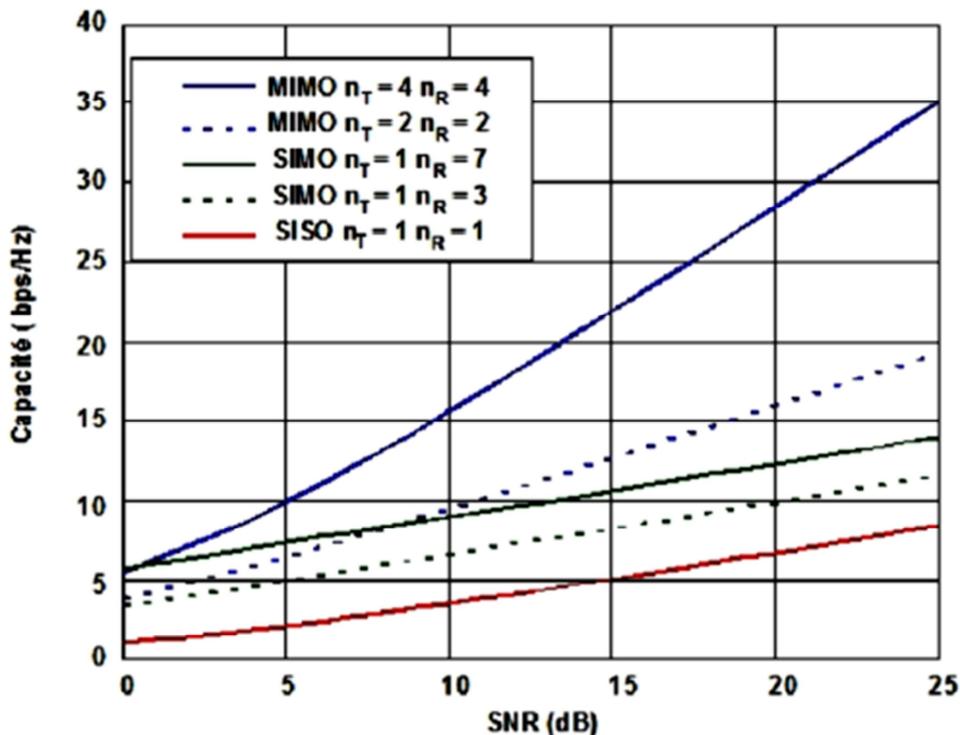


Figure III.6: Capacité des systèmes MIMO par rapport aux systèmes SISO et SIMO [18].

### III.4.3 La technique du Modulation et codage adaptatifs

La modulation et le codage adaptatifs AMC (*Adaptive Modulation & Coding*), est une approche opportuniste qui tend à adapter la technique de modulation et de codage en fonction de l'état du canal. Pour les transmissions *DownLink* en LTE, l'UE envoie le feedback de CQI (*Channel Quality Information*) vers l'eNodeB pour que cette dernière lui sélectionne un MCS (*Modulation & Coding Schema*), un schéma démodulation et de codage qui maximise l'efficacité spectrale tout en gardant le BER (taux d'erreurs par bloc) inférieur à un certain seuil.

Les types des modulations prisent en charge par LTE sont: QPSK, 16-QAM,64-QAM (Figure III.5).Les modulations (64-QAM et16-QAM) offrent des débits plus élevés et une haute efficacité spectrale [17].

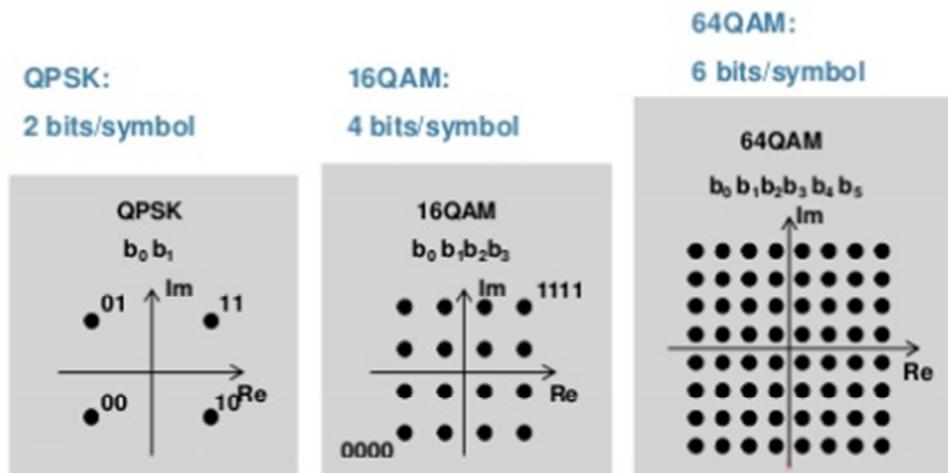


Figure III.7: Les types de modulations dans le LTE [17].

L'utilisation de la modulation adaptative (figure III.8) permet à un système sans fil de choisir la modulation d'ordre le plus élevé selon les conditions du canal. On peut voir une évaluation générale des conditions du canal requis pour différentes techniques de modulation. A mesure que l'on augmente la portée, on dégrade vers le bas aux modulations inférieures (c-à-d, BPSK), mais en tant que vous êtes dans un environnement indoor étroit tu peux utiliser des modulations d'ordre plus supérieur comme la QAM pour augmenter le débit. En outre, la modulation adaptative permet au système d'éliminer l'interférence d'évanouissement et autres.

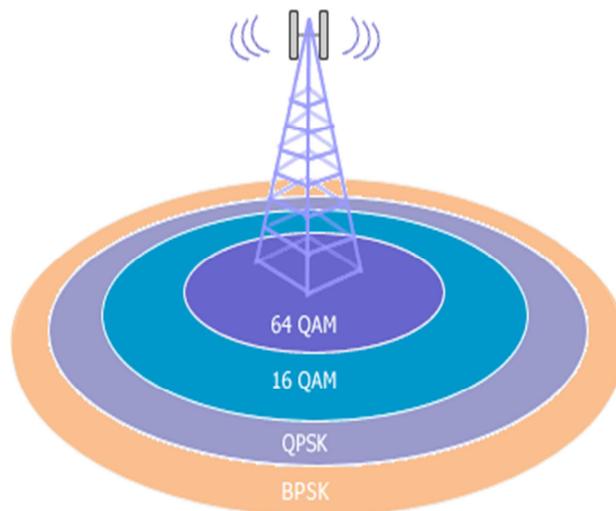


Figure III.8 : Utilisation de la modulation adaptative

### III.4.4 La technologie SON (*Self-Organizing Network*)

Dans les réseaux cellulaires 2G et 3G, de nombreux paramètres du réseau sont configurés manuellement, par exemple la planification, la mise en service... Cette configuration est efficace et fiable pour l'exploitation du réseau mais son coût est très élevé pour les opérateurs. En plus, ces interventions manuelles sont souvent sources d'erreurs et relativement lentes.

Le 3GPP a élaboré la technologie SON (*Self Organizing Networks*) dans la norme LTE dans le but de permettre une auto-configuration des équipements. Elle permet un déploiement rapide des nouvelles stations de bases dans le réseau, sans nécessiter l'intervention des spécialistes pour modifier les équipements préexistants. Améliorant ainsi la capacité et les performances du réseau tout en réduisant les coûts et les délais.

#### III.4.4.1 L'auto-configuration

L'auto-configuration a pour but de réduire les coûts de l'intervention humaine en introduisant des fonctionnalités "*plug & play*" dans les eNodeB. Elle comprend toutes les tâches nécessaires pour automatiser le déploiement et la mise en service du réseau ainsi que la configuration des paramètres.

Lors de la première mise sous tension le eNodeB doit détecter la liaison de transport et établit une connexion avec les éléments du réseau cœur, télécharger et mettre à jour la version du logiciel correspondant, configurer les paramètres initiaux, et les relations de voisinage et enfin effectuer un autotest et se mettre en mode opérationnel.

#### III.4.4.2 L'auto-optimisation

Le SON automatise les tâches en effectuant des mesures sur les équipements de réseau, il détecte les problèmes de qualité de service, identifie la cause, et prend automatiquement des mesures correctives sur la base de la statistiques de mesures de performance de l'OMC (*Operation and Maintenance Center*).

Cette optimisation autonome permet de traiter plus rapidement les problèmes et d'améliorer la capacité et les performances du réseau [17].

### III.4.5 La technique d'agrégations de porteuses

Dans le but d'augmenter la capacité et atteindre des débits plus élevés, le besoin d'avoir une bande spectrale plus large s'avère indispensable. Dans les Releases 8 et 9, LTE supporte une largeur de bande qui s'étend jusqu'à 20 MHz.

La solution apportée dans les releases 11 et 12 est d'introduire une extension de la bande passante, du canal, jusqu'à 100MHz, tout en gardant la compatibilité avec les autres releases.

Dans le concept d'agrégation de porteuses CA (*Carrier Aggregation*), la bande de 100MHz est constituée d'un ensemble de bandes élémentaires de largeur adéquate au canal en LTE Rel-8, ces bandes sont nommées CC (*Component Carrier*), comme montre la figure III.9 [17].

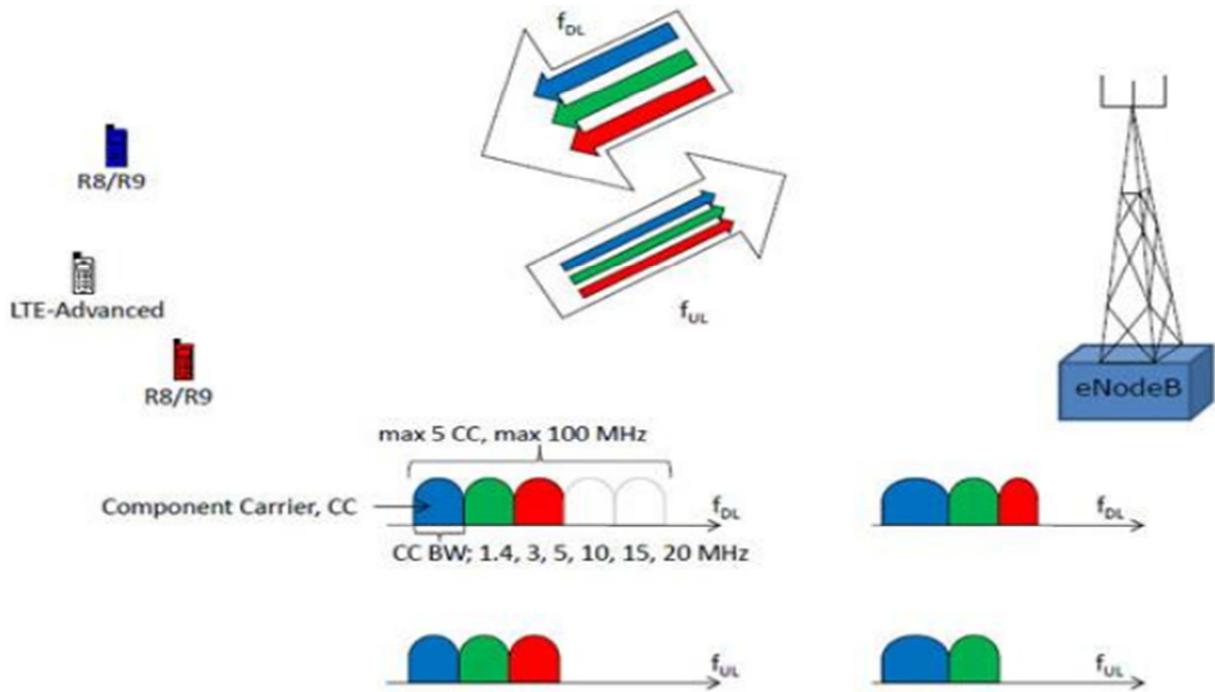


Figure III.9 : Agrégation de porteuses dans LTE[17].

### III.3.6 La technique du Coordinated Multi Point operation (CoMP)

Pour maximiser la capacité cellulaire, les mêmes ressources spectrales doivent être employées dans chaque cellule. Par conséquent, ce plan de fréquence défavorise les utilisateurs situés sur les bordures de la cellule, car il engendre une dégradation de leurs performances à cause des interférences provenant des cellules adjacentes, ce phénomène est appelé l'interférence entre cellules ICI (*Inter Cell Interference*).

La coordination entre les cellules, (*ICI Coordination*), est une solution pertinente pour ce genre de problème, dans le sens où les cellules négocient entre elles l'exploitation des ressources partagées dans un but commun, qui consiste à réduire le niveau d'interférence global dans la zone de coopération, et améliorer ainsi les performances sur les bordures de la cellule, tout en réduisant la complexité du système, essentiellement du côté UE (Figure III.10).

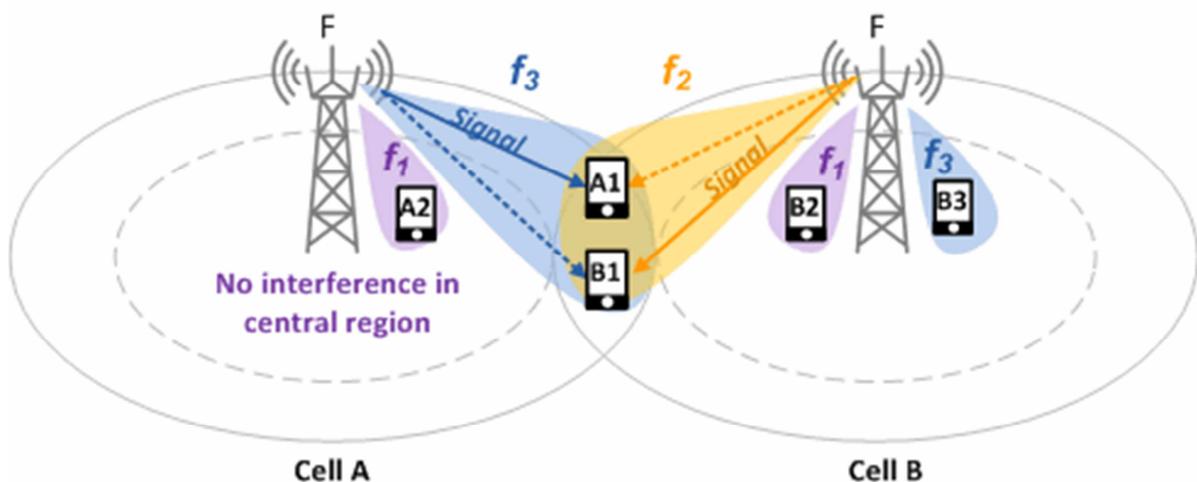


Figure III.10 : Exemple de la technique CoMP.

### III.3.7 La technologie des Réseaux Hétérogène (HetNet)

Les réseaux hétérogènes, HetNet (*Heterogeneous Network*) correspondent à une technique de déploiement multicouches c'est à dire, plusieurs techniques d'accès, plusieurs formats de cellules, plusieurs types de couverture sont mis en œuvre dans la même zone de déploiement.

L'idée est donc de déployer plusieurs formats de cellules dans la même zone (Figure III.11), pour garantir à la fois :

- ✓ Une capacité élevée: en mettant en place une couche *hotspot* composés de plusieurs cellules à tailles réduites (pico/femto) et des nœuds relais, ces derniers sont moins coûteuses, faciles à installer et elles permettent en plus d'assurer la couverture à l'intérieur des bâtiments (bureaux, maisons, etc.)
- ✓ Une bonne couverture : en utilisant une macro cellule capable d'étendre la couverture dans la zone entière. Un utilisateur peut se connecter à un réseau de type HetN et selon la technologie qui répond le plus à son besoin : ad hoc, Wifi, etc.

HetNet est constitué d'une station macro qui coopère avec plusieurs petites cellules de tailles réduites d'une façon transparente dans le but d'augmenter la capacité et la couverture [17].

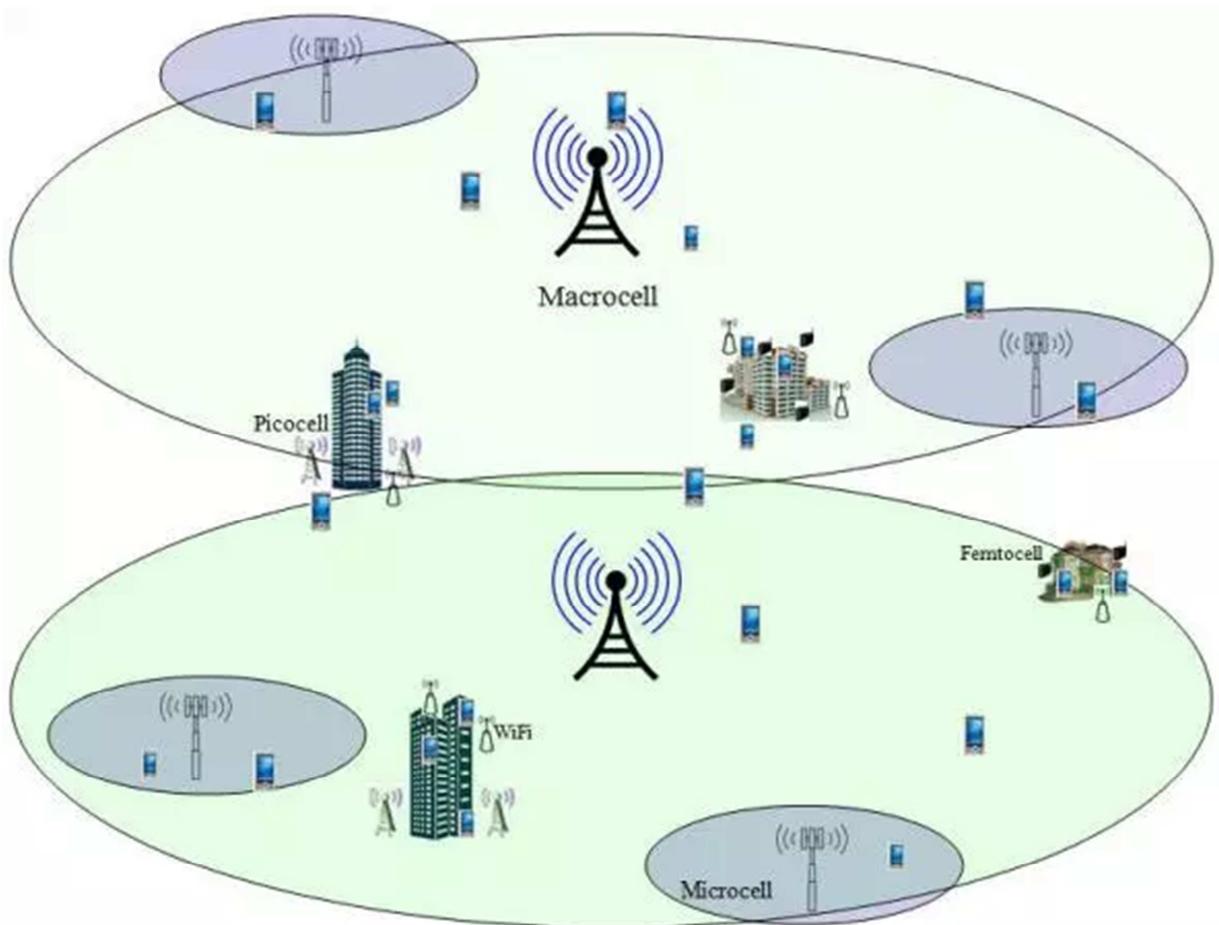


Figure III.11 : Exemple d'un HetNet avec des larges et des petites cellules.

### III.4.8 Utilisation des petites cellules

Les petites cellules sont déployées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, afin de fournir aux abonnés la couverture LTE et la capacité dont ils ont besoin, dans des zones urbaines denses ou lors d'événements populaires en plein air.

L'utilisation des petites cellules (Figure II.12) donne aux opérateurs la possibilité de renforcer la couverture et la capacité dans des zones à forte densité (les centres commerciaux, les stades et les quartiers très fréquentés...) [17].

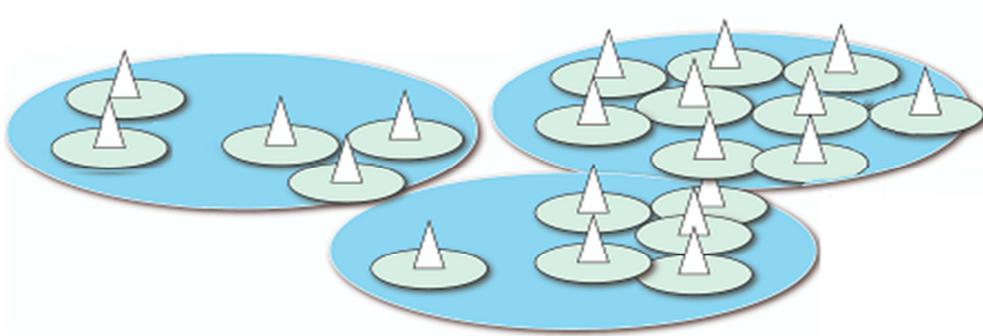


Figure III.12 : Les Petites Cellules [17].

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la capacité et la qualité de service (QoS) dans le réseau LTE en présentant un calcul dimensionnel de la capacité et les différents paramètres de la QoS ainsi que ses besoins d'utilisation. Nous avons aussi cité les différentes technologies influentes sur la capacité dans les réseaux 4G/LTE à savoir la technologie MIMO, les techniques d'accès multiples, la modulation adaptative, les techniques CoMP, etc.

Nous allons consacrer le chapitre qui suit à la simulation de la capacité d'un réseau LTE dans un environnement dense urbain en analysant la technologie multi-antennes MIMO et leur influence sur la capacité et la QoS de notre réseau pour différent nombre d'utilisateurs.

---

---

## **Chapitre IV :**

Simulation de la capacité dans le réseau  
4G/LTE.

---

---

## IV.1 Introduction

La capacité dans le réseau LTE dépend de plusieurs facteurs, plusieurs paramètres, tels que la densité d'utilisateurs dans un périmètre prédéfini (cellule), le type d'antenne utilisé et plusieurs paramètres définissent le milieu de terrain. Dans ce dernier chapitre, nous allons planifier un réseau LTE et effectuer nos simulations dans un milieu dense urbain (où le nombre d'utilisateurs est élevé), nous utilisons le logiciel de planification professionnel Atoll pour tracer les courbes de la capacité.

Durant les simulations, nous allons jouer sur deux paramètres ; le nombre d'utilisateurs et l'utilisation des antennes MIMO (*Multiple-input multiple-output*) dans le but de voir leurs impacts sur la capacité cellulaire de notre réseau, tout en variant leurs valeurs de ces deux paramètres, puis observer et analyser les résultats des simulations.

## IV.2 Description du Logiciel Atoll

Atoll est un progiciel flexible et évolutif qui permet l'accompagnement du besoin d'un opérateur pendant tout le cycle de vie de l'ingénierie, il incorpore un moteur de propagation haute performance supportant les réseaux hiérarchiques, la modélisation du trafic multiservice ainsi que le plan de fréquence automatique, il permet de gérer la majorité des systèmes cellulaires : GSM/GPRS/EDGE, TDMA, UMTS/HSDPA CDMA/CDMA2000, WIMAX, WiFi et LTE/LTE-A. Enfin, après avoir déployé un réseau, Atoll permet de réaliser de multiples prédictions comme [18] :

- prédiction de la capacité de la cellule.
- Couverture par niveau de champ.
- Couverture par émetteur.
- Etude du trafic.
- Zone de recouvrement.
- Couverture par niveau de C/I.
- Débit moyen.

L'interface principale du logiciel Atoll est représentée par la figure suivante :

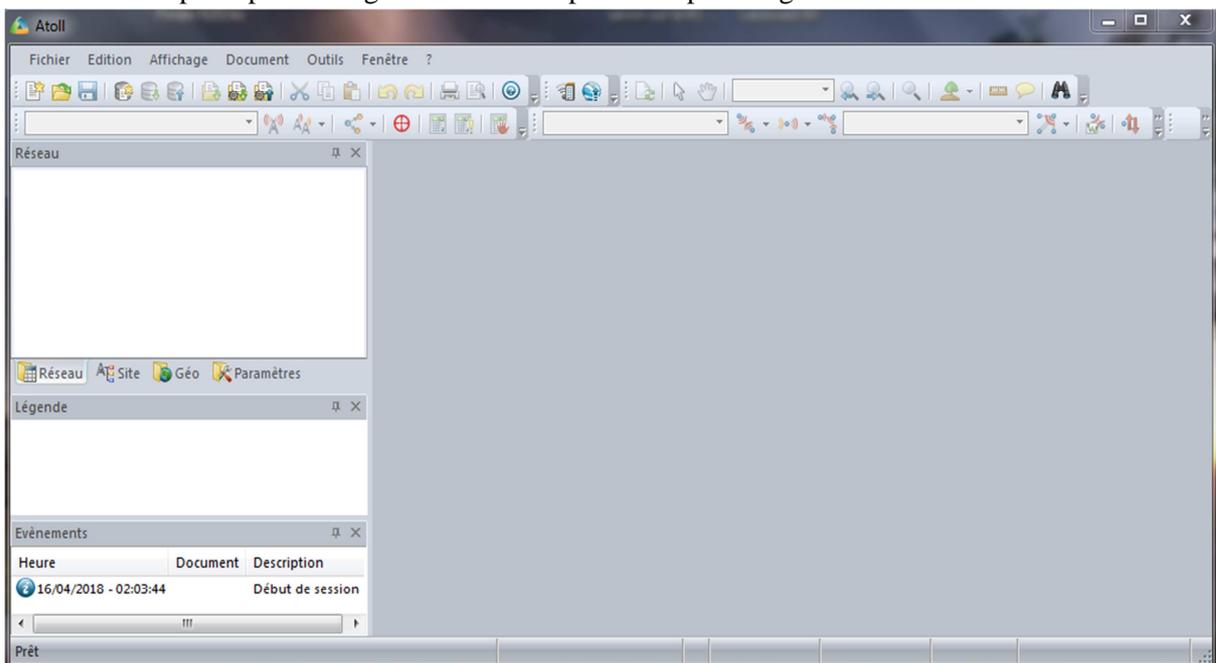


Figure IV.1 : La page principale d'Atoll.

### IV.3 Planification d'un réseau LTE

La planification du réseau est une étape primordiale, du coup elle doit être bien développée. Les étapes à suivre lors de planification sont illustrées dans la figure IV.2.



Figure IV.2 : Processus de planification.

#### IV.3.1 Pré-planification

C'est la première phase qui consiste à préparer la planification réelle du réseau, on doit collecter des informations sur la région (mode de vie, les heures d'occupation...).

Dans l'outil Atoll, la pré-planification consiste à la définition des éléments suivants:

##### a) Cartes topographiques

Il faut tout d'abord créer un nouveau projet. La figure suivante montre comment créer un nouveau projet à partir d'un document Template.

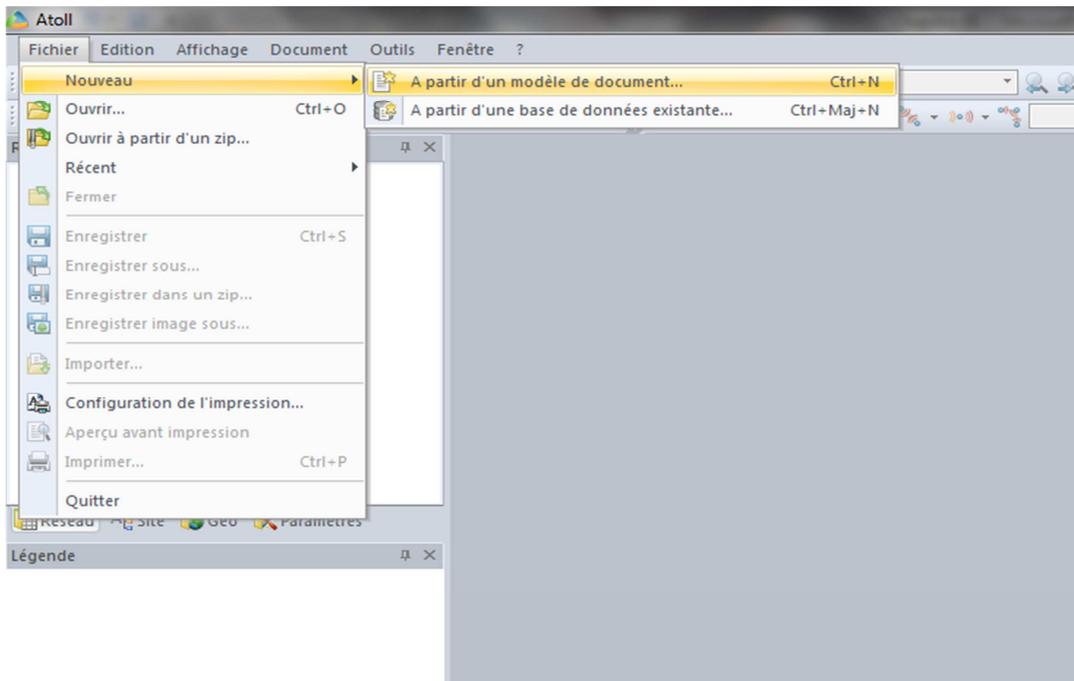


Figure IV.3 : Création d'un nouveau projet.

Après, une fenêtre s'affichera automatiquement, nous choisissons le système LTE. La figure IV.4 montre comment créer un nouveau projet à partir d'un document Template.

Ensuite, il faut régler les paramètres de la zone comme le système de coordonnées, et importer la cartographie (Map) numérique.

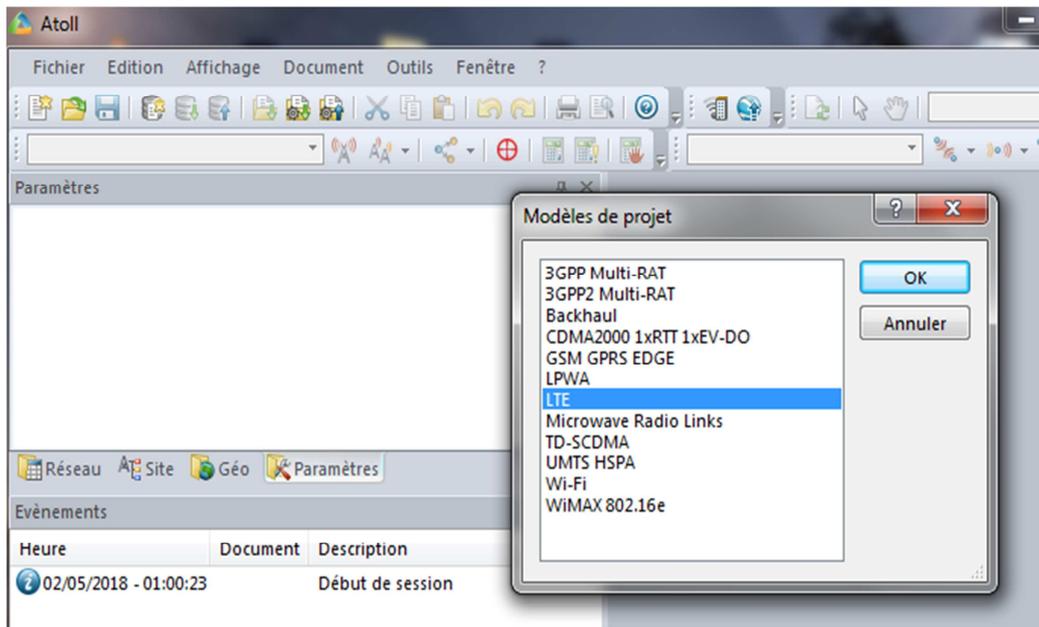


Figure IV.4 : Modèles de projet dans l'Atoll.

## b) Le système de coordonnées

Le système de coordonnées WGS84 est le système géodésique standard mondial, notamment utilisé par le système GPS ; il s'est rapidement imposé comme une référence pour la cartographie numérique.

Un système géodésique est un système de référence permettant d'exprimer les positions au voisinage de la Terre. Les deux figures IV.5 et IV.6 expliquent les étapes à suivre pour le choix du système de coordonnées convenable à notre projet.

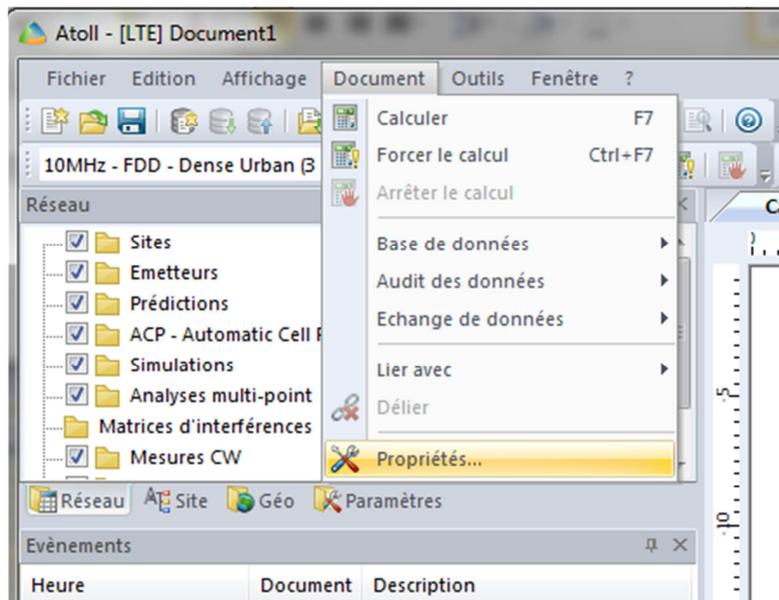


Figure IV.5 : Choix du système de coordonnées.

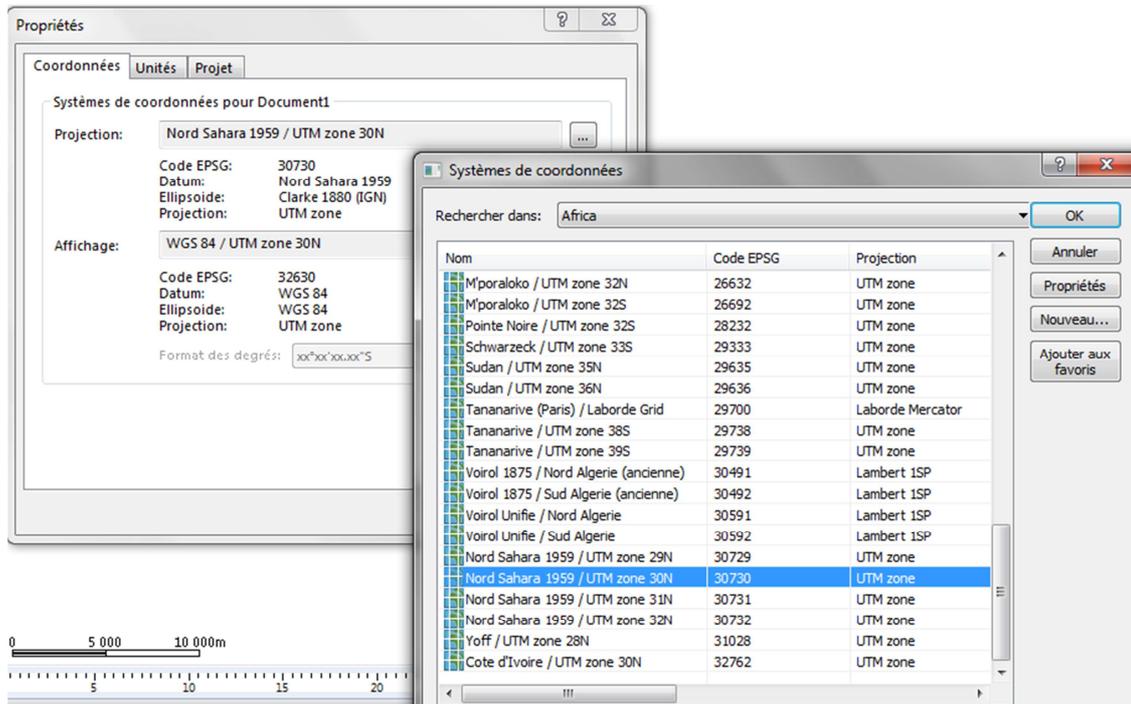


Figure IV.6 : Liste des systèmes de coordonnées.

### c) Importer la Map numériques

Le profil de Map du trafic basé sur l'environnement utilisateur ne doit être utilisé que pour une précision sur le trafic, qui est du même niveau que l'encombrement statistique disponible dans un projet. Avant de commencer le calcul, il est nécessaire d'importer la Map numérique sur laquelle on va planifier la zone désirée.

Tous d'abord, on extrait les fichiers Atoll déjà existant qu'on a besoin pour notre projet LTE à l'aide de «**Importer...**» dans l'onglet «**Fichier**». Ensuite, nous allons importer la carte de la ville d'Oran (Carte avec : Clutter Classes, ClutterHeight, Vector, Ortho...) comme illustre la figure IV.7.

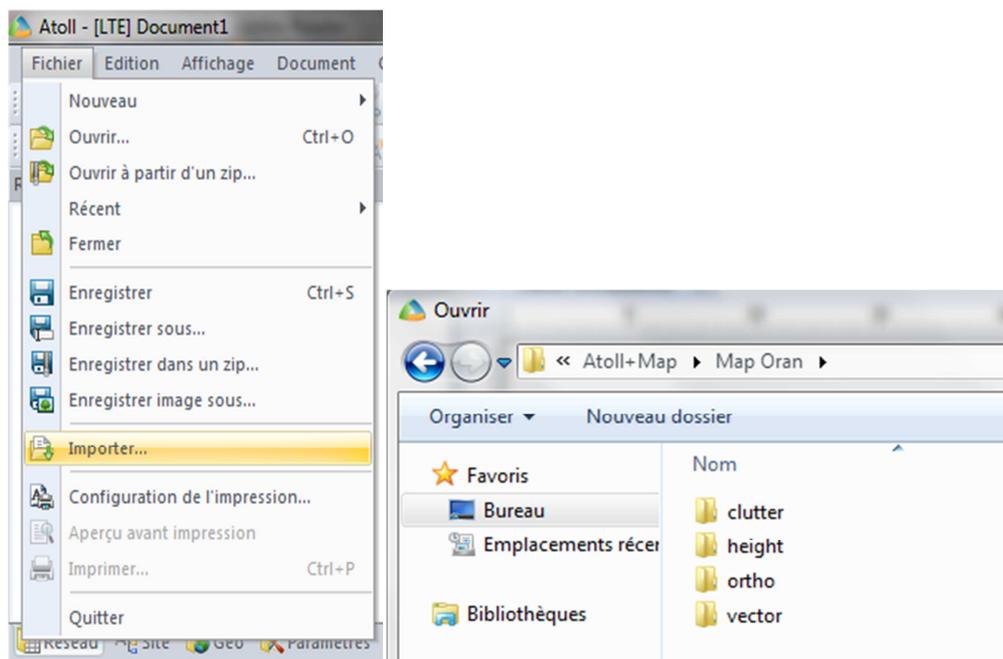


Figure IV.7 : Importation de la carte numérique.

- **Clutter:** c'est le fichier image représentant la nature du relief dans la région sur laquelle nous allons déployer notre réseau. Elle permet de classer les surfaces selon leurs caractéristiques en : Open, Sea, inland\_water, park, industrial, etc.
- **Heights:** C'est un dossier d'altitudes qui permet de donner l'élévation par rapport au niveau de la mer. Il sera utilisé lors du calcul du niveau de signal en tenant compte aussi de l'élévation des bâtiments dans la zone.
- **Ortho:** C'est un fichier ou un tableau précisant la distribution des bâtiments sur la carte de la zone en spécifiant la surface qu'ils occupent sur cette zone.
- **Vector:** contient des fichiers pour tracer les différents chemins (les route principal et secondaire, les rue, les aéroports, l'autoroute, chemin de fer).

Ces quatre entrées nous aident à préciser la zone géographique et l'environnement sur lesquels nous allons travailler. Nous précisons ici, que nous avons trouvé beaucoup des difficultés pour acquis ces fichiers due à leurs importance et confidentialité.

Lorsque vous importez un fichier vectoriel, par exemple, des routes (principale et secondaire, autoroute, chemin de fer, Tramway, etc.), Atoll ajoute le fichier sous la forme d'une nouvelle couche vectorielle contenant tous les objets vectoriels dans le fichier. Les données des objets vectoriels peuvent être gérées dans la table des couches vectorielles.

#### d) La zone géographique à planifier

Après avoir extraire les fichiers, on obtient la Map de notre zone géographique donnée par la figure ci-dessous, avec la légende de la surface selon ses caractéristiques.

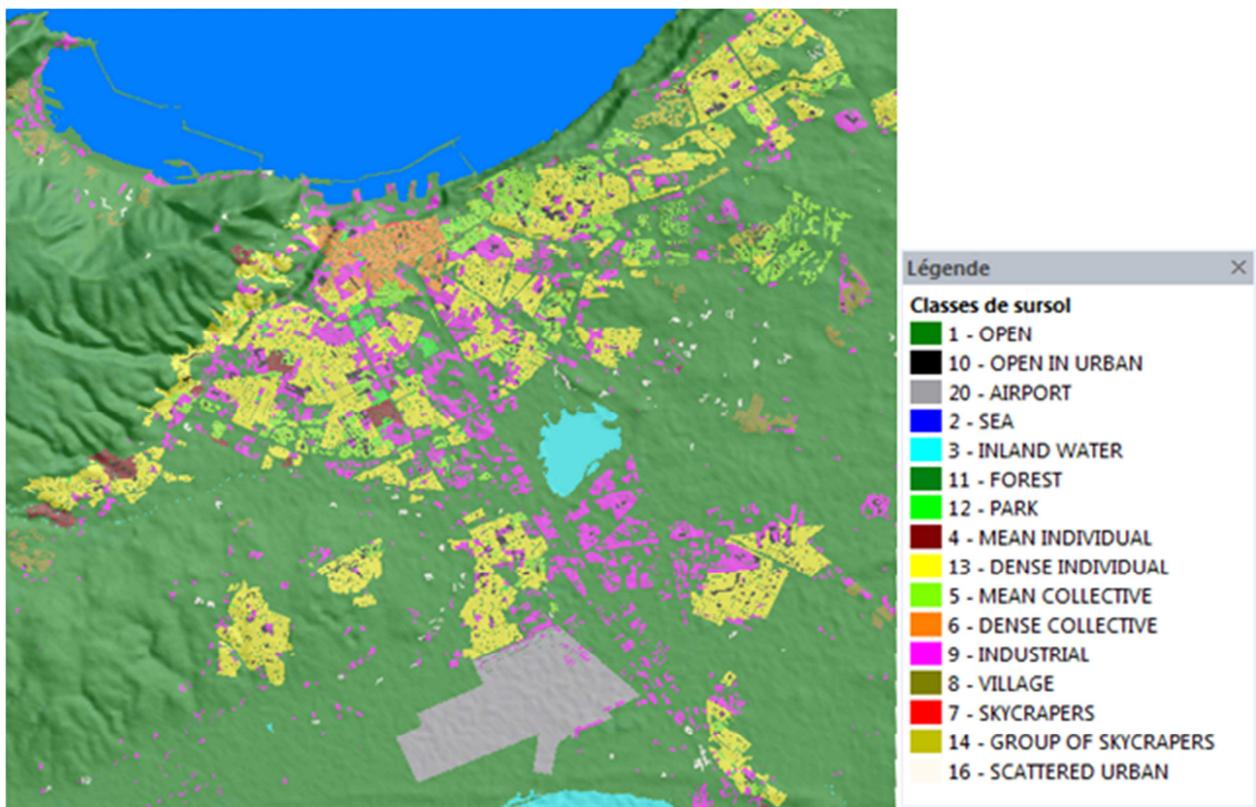
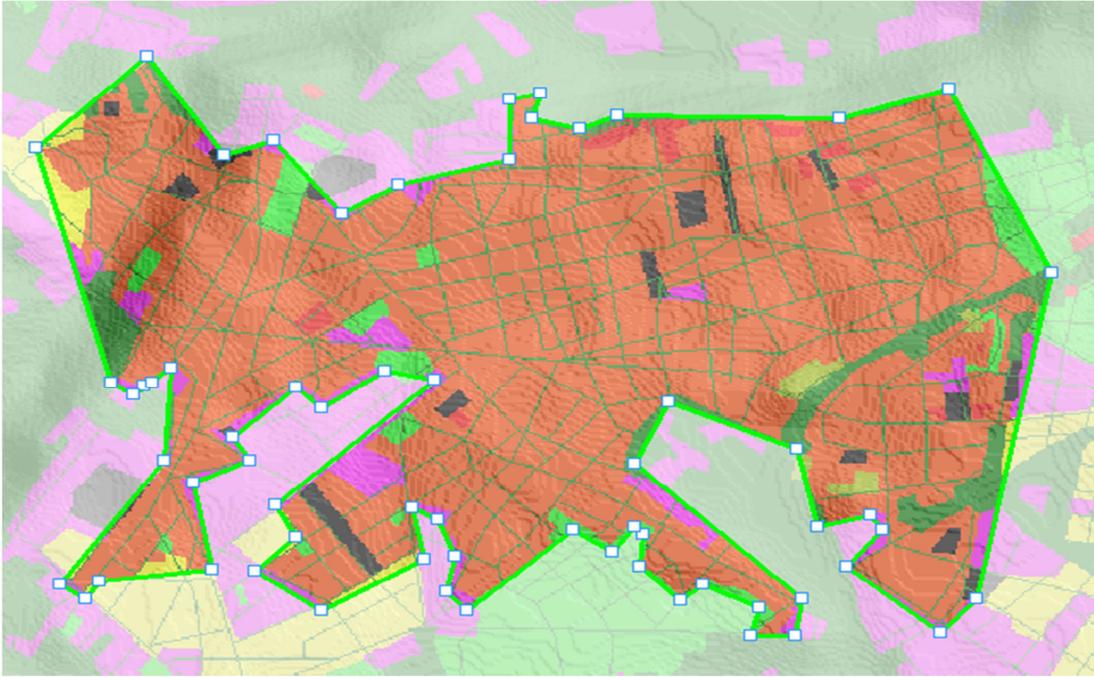


Figure IV.8 : Map Atoll de la ville d'Oran.

Ensuite, nous choisissons une zone dense urbaine pour la planification du réseau LTE (4G). Après, on fait une localisation de la zone d'intérêt (zone de simulation) à l'aide d'une clique sur l'onglet *Coverage Export Zone*, et on fait un contour complet. La figure suivante présente un aperçu de la zone à planifier qui couvre une surface de 2.35 km<sup>2</sup>.



**Figure IV.9 :** Focus de la zone à planifier.

### IV.3.2 Planification

Suite à la première phase «pré-planification», on passe à la deuxième phase «planification», qui sert à trouver les meilleurs emplacements pour les eNodeBs, dont le but d'avoir une bonne couverture.

Dans Atoll, la sortie de la phase de planification est la couverture finale détaillée et le plan de capacité et du débit.

#### IV.3.2.1 Paramètres de simulation pour la planification d'un réseau LTE

Puisque on a choisi de réaliser cette simulation dans un milieu dense urbain, on doit respecter les différents paramètres qui conviennent aux caractéristiques de ce milieu, ces paramètres sont :

- Modèle de propagation : **Okumura-Hata.**
- Fréquence centrale : **2110 Mhz.**
- Mode de duplexage : **FDD.**
- Bande passante : **20Mhz [2100-2120]Mhz.**
- Puissance maximal de la BTS (eNode-B) : **43 dBm.**
- Configuration de l'antenne :
  - Fabricant : **Kathrein.**
  - Gain : **18 dBi.**
  - Largeur du faisceau : **65deg.**
  - Inclination : **4°.**
  - Fréquence Min, Max : **(1920,2170) Mhz.**

### IV.3.2.2 Création des sites (eNodeB)

Dans Atoll, un site est défini comme un point géographique où nous devons ajouter des émetteurs et des cellules par la suite.

D'abord, nous avons placé 4 stations eNodeB LTE Tri-sectorisées dans la zone à planifier (figure IV.10) d'une manière d'avoir une meilleure couverture.



Figure IV.10 : Emplacement des sites sur la Map.

Une fois les eNodeB sont installées, l'étape suivante consiste à la configuration de ces sites. Sur chaque secteur, on configure des paramètres d'antennes ; tels que la bande de fréquence, la puissance de l'antenne...etc. (Figure IV.11).

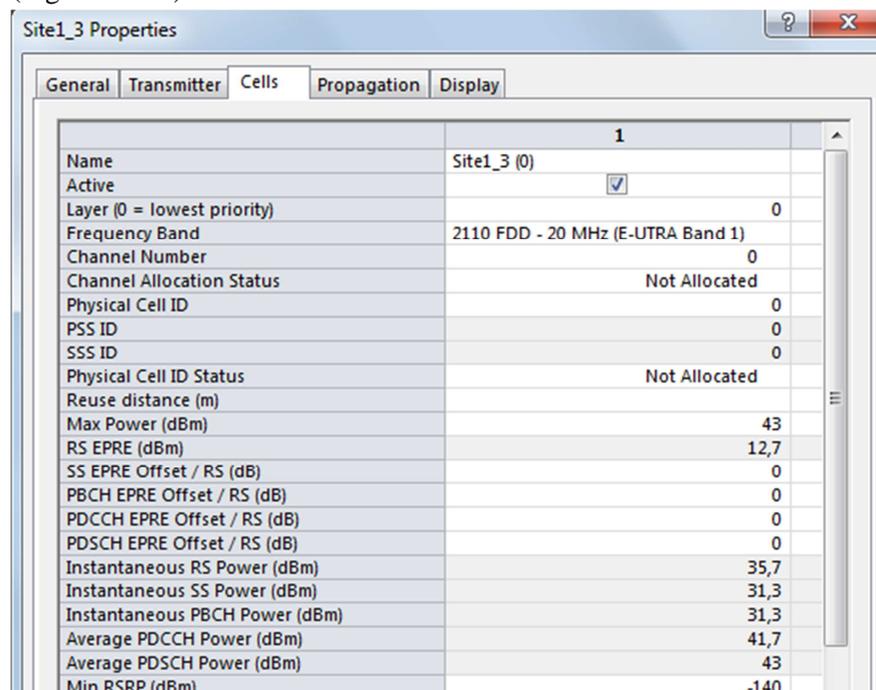


Figure IV.11 : Configuration d'antennes des eNodeB.

### IV.3.3 Poste-Planification

Cette phase suit l'installation du site, qui a pour but d'assurer un fonctionnement optimal du réseau, elle consiste à faire des réglages de paramètres pour corriger les erreurs qui auraient pu survenir lors de l'installation et aussi faire des *Test Drive* qui est une méthode d'essai pour vérifier la fonctionnalité du réseau soit en couverture, en capacité et en exigences de qualité.

#### IV.3.3.1 Etude des prédictions du réseau LTE :

Atoll permet de réaliser de multiples prédictions :

- Couverture par niveau de champ,
- Couverture par émetteur et étude du trafic,
- Zone de recouvrement
- Couverture par niveau de C/I ... etc.

Et selon les besoins :

- Type de zone,
- Type d'antenne et type de services (Débit).

##### a) Prédiction de la couverture par niveau de signal (DL) :

La prédiction au niveau de signal (DL) en *Downlink*(Figure IV.12) montre la couverture assurée par le réseau 4G/LTE de chaque eNodeB de la région, de laquelle fait partie notre site congestionné avec des dégradations de couleur qui représentent différents niveaux de signal.



Figure IV.12 : Prédiction de la couverture par niveau de signal du réseau LTE.

Cette simulation présente la couverture par niveau de réception du signal conformément à une palette de couleur et les zones colorées en rose montrent un niveau de signal très élevé ( $\geq -70$  dBm) autour de chaque eNodeB et presque partout dans la zone à couvrir.

### b) Prédiction de la couverture par débit (DL) :

Cette prédiction permet de calculer le débit offert maximal par le réseau 4G/LTE présenté selon les dégradations de couleur (Figure IV.13).

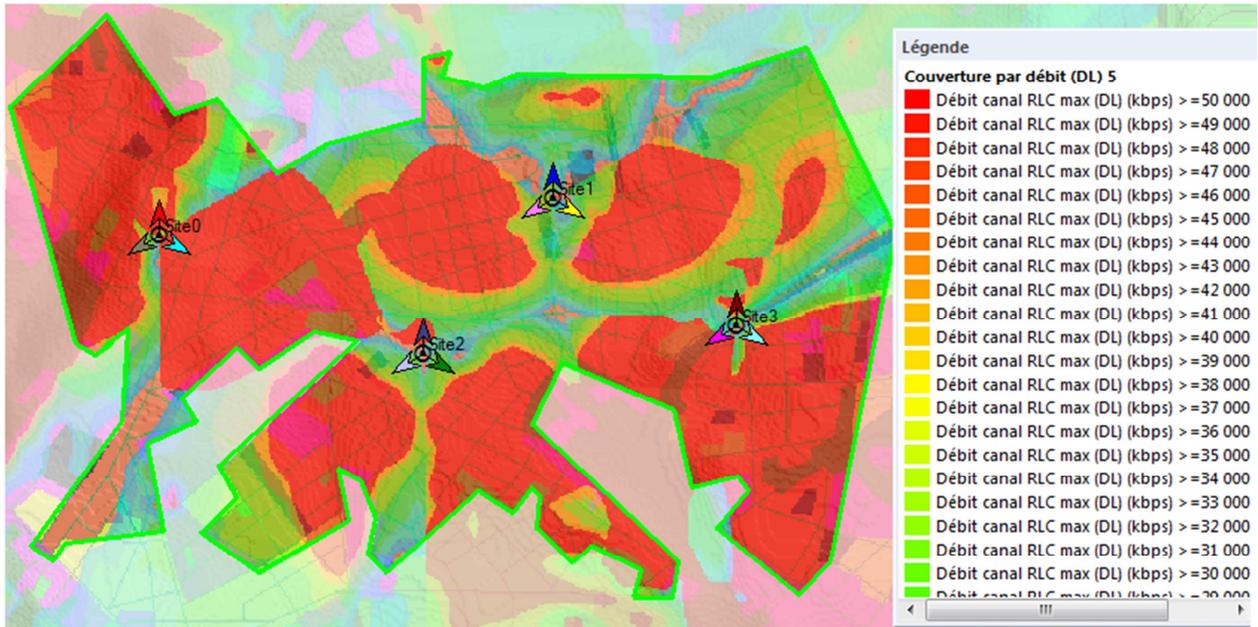


Figure IV.13 : Prédiction de la couverture par débit.

D'après les résultats de simulation de la prédiction de la couverture par débit, une très grande partie de la zone de couverture garantit un débit maximal (surfaces en rouge).

### c) Prédiction de la couverture par indicateur de qualité (DL) :

Cette prédiction permet de calculer le BLER (*Block Error Rate*) qui s'agit de taux d'erreur de bloc dans les réseaux LTE, présenté selon les dégradations de couleurs (Figure IV.14). Il est clair que le taux d'erreur de bloc dans la totalité de la zone ne dépasse pas 5 % ( $0 \leq \text{BLER} < 0,05$  pour le couleur en bleu).

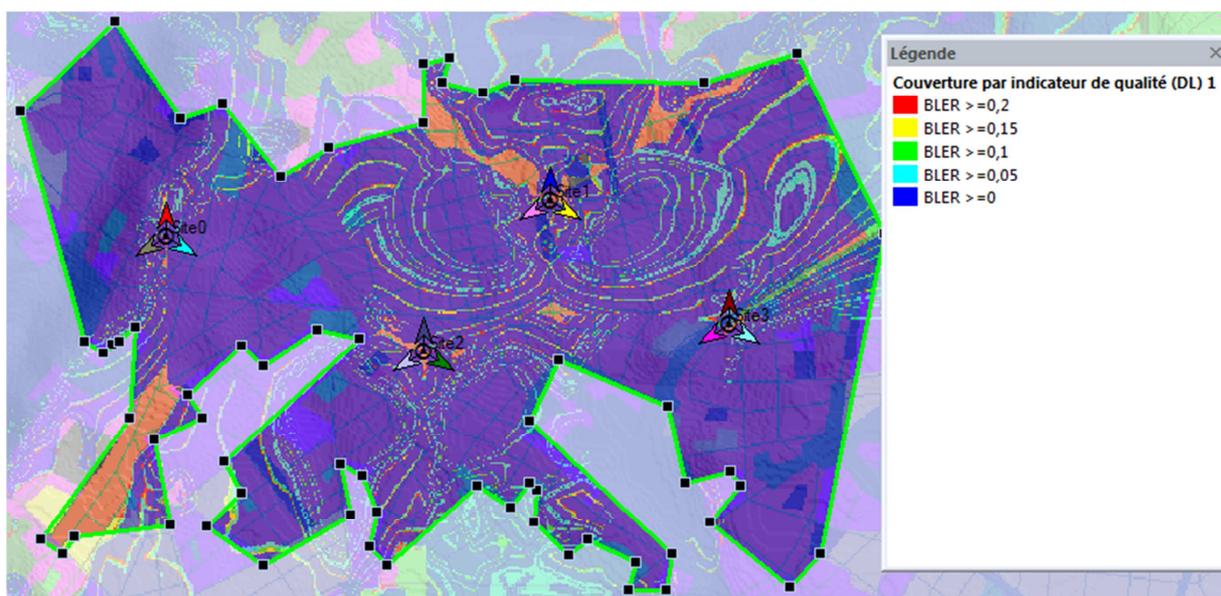


Figure IV.14 : Prédiction de la couverture par indicateur de qualité.

Un BLER faible est traduit par une meilleure qualité de signal ainsi que l'absence des interférences non acceptable, par conséquent le taux de retransmission sera faible ce qui va augmenter le débit de transfert des données et par suite l'amélioration de la Qualité de service (QoS).

### IV.3.4 Optimisation

L'optimisation du réseau est la phase finale qui permet de vérifier la satisfaction des clients et résoudre leurs plaintes...

## IV.4 Impacte de l'augmentation du nombre d'utilisateurs sur la capacité

Ces simulations consistent à étudier l'impact de l'augmentation du nombre d'utilisateur sur la capacité effective de la cellule dans un milieu dense urbain dans le sens descendant (DL) seulement, premièrement en cas d'un nombre réduit à 10 utilisateurs par cellules, ensuite 50 utilisateurs par cellules, et enfin 100 utilisateurs par cellule. En comparant les résultats des différents cas de densité des utilisateurs.

### IV.4.1 Cas de 10 utilisateurs

La première simulation teste la capacité de la cellule avec 10 utilisateurs, qui ont une vitesse de déplacement de 5 Km/h, qui utilisent le service voix sur IP (VoIP) et qui ont un terminal mobile simple avec une seule antenne en émission et en réception (SISO). La figure IV.15 présente la DCF (Fonction de Distribution Cumulative) obtenu dans le cas de 10 utilisateurs par cellule.

Le graphe généré par l'outil Atoll présente la DCF de la capacité, qui représente la probabilité en pourcentage des utilisateurs en fonction de la capacité de la cellule de l'eNodeB du réseau LTE.

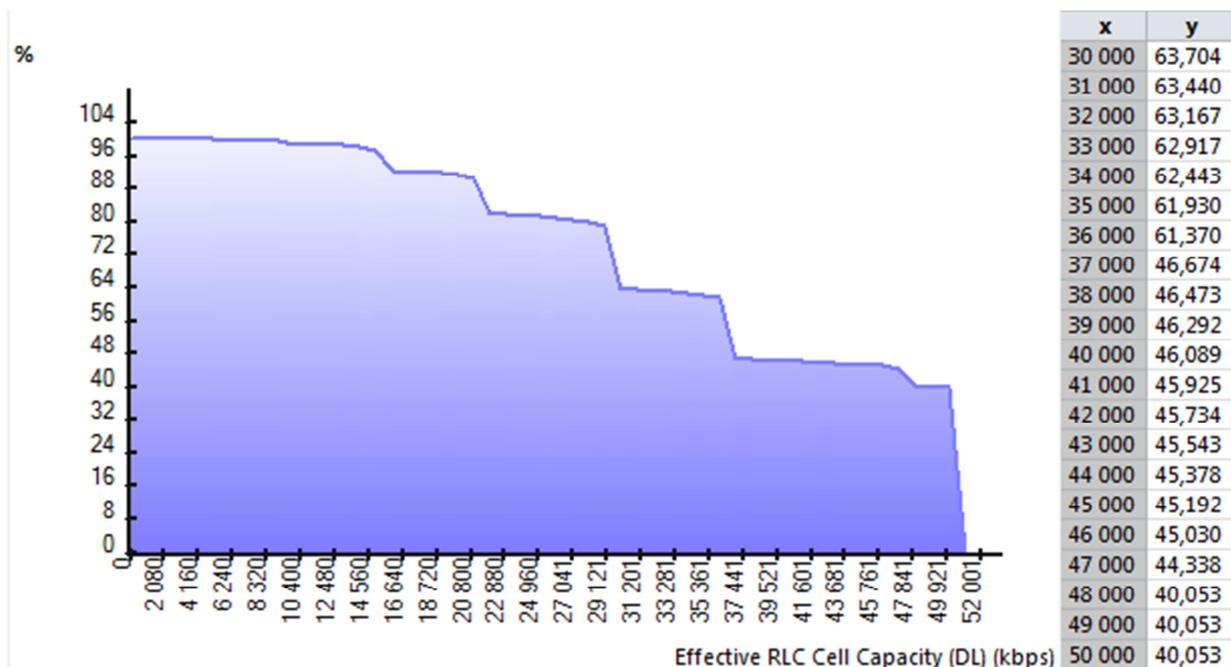
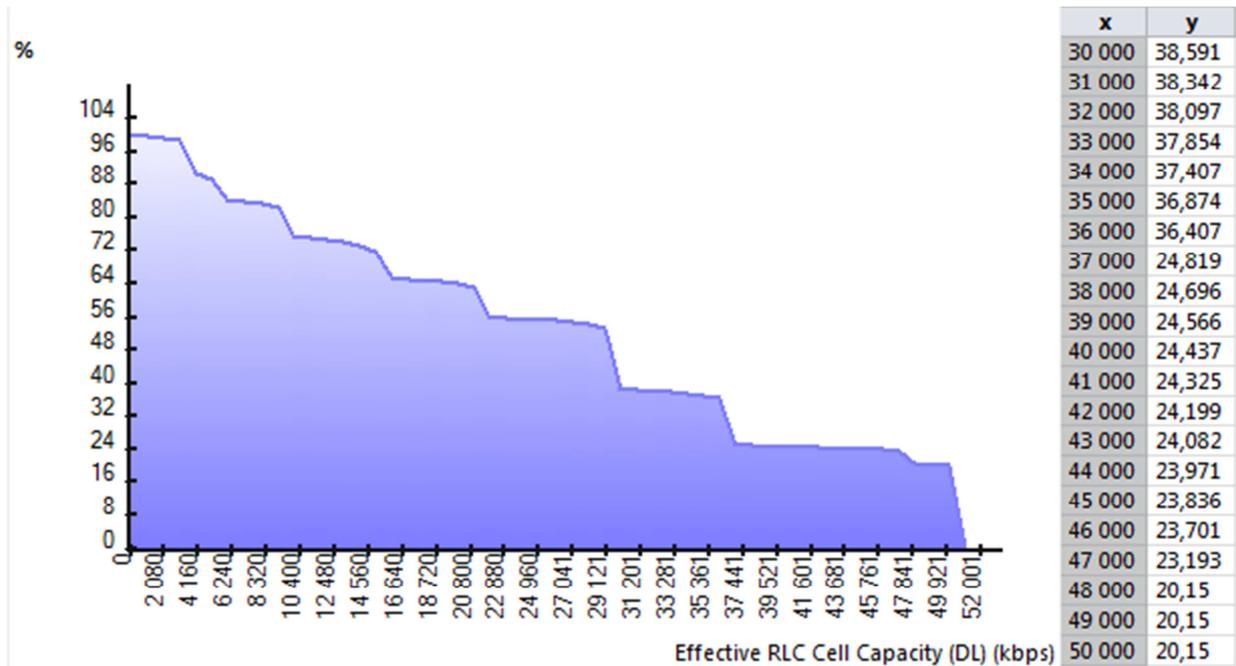


Figure IV.15 : La DCF de la capacité effective de la cellule : cas 10 utilisateurs/cellule.

La DCF obtenu indique que la probabilité d'avoir une capacité maximale de 50Mbit/s est de 40.05 %. En d'autre façon, on dit que 40% d'utilisateurs de notre réseau LTE ont une capacité maximale de 50 Mbit/s.

#### IV.4.2 Cas de 50 utilisateurs

Dans la deuxième simulation, on va augmenter le nombre d'utilisateurs à 50 utilisateurs par cellule, tout en gardant les mêmes conditions de la simulation (vitesse de déplacement, le type de service ;VoIP et le type de terminal mobile). Les résultats obtenus sont représentées dans la figure IV.16.



**Figure IV.16 :** La DCF de la capacité effective de la cellule : cas de 50 utilisateurs/cellule.

Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs de 10 à 50 utilisateurs, la probabilité d'avoir une capacité maximale de 50Mbit/s a régressé au pourcentage de 20,15% et cela dû à l'augmentation de la densité d'utilisateurs et leurs distances avec l'eNodeB.

#### IV.4.3 Cas de 100 utilisateurs

Dans la dernière simulation, on va augmenter le nombre d'utilisateurs à 100 utilisateurs par cellule, tout en gardant les mêmes conditions des simulations précédentes. Le résultat obtenu est représentée dans la figure IV.17.

Il est visible que plus en plus on augmente le nombre d'utilisateurs par cellule, les probabilités d'avoir une capacité maximale diminuent. En comparaison avec les résultats de la DCF obtenus de la cellule avec 10 utilisateurs (Figure IV.15) et la DCF de la cellule avec 50 utilisateurs (Figure IV.16), la probabilité d'avoir une capacité maximale est presque nulle (01.55 %).

Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs à 100, la capacité de la cellule a fortement diminué et devient limité. En effet, les probabilités d'avoir des capacités plus de 18 Mbits/s est trop faible et qui ne dépassent pas le 8%.

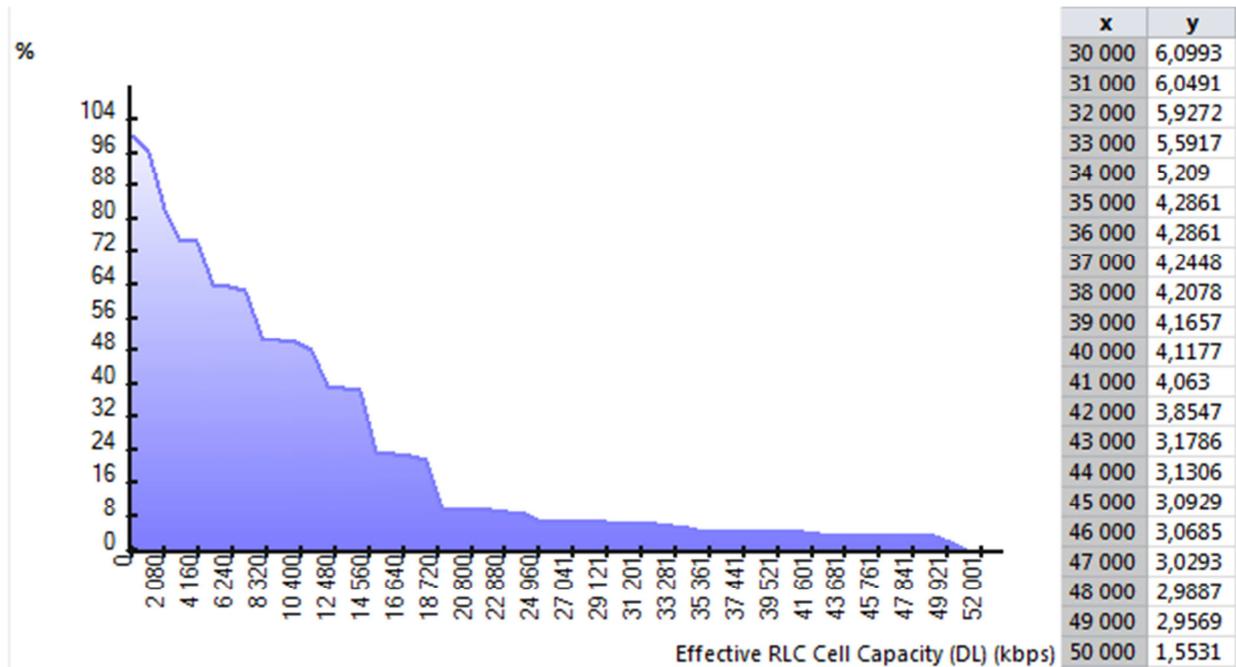


Figure IV.17 : La DCF de la capacité effective de la cellule : cas de 100 utilisateurs/cellule.

## IV.5 Impacte de l'utilisation des systèmes MIMO sur la capacité

Ces simulations ont pour but, voir l'impact de l'utilisation des systèmes MIMO sur la capacité du réseau LTE et comparer les résultats obtenus avec les résultats précédents (cas SISO) tout en gardant les mêmes conditions des simulations précédentes (type de service, vitesse de déplacement) pour les trois cas de densité d'utilisateurs (10, 50 et 100 utilisateurs par cellule).

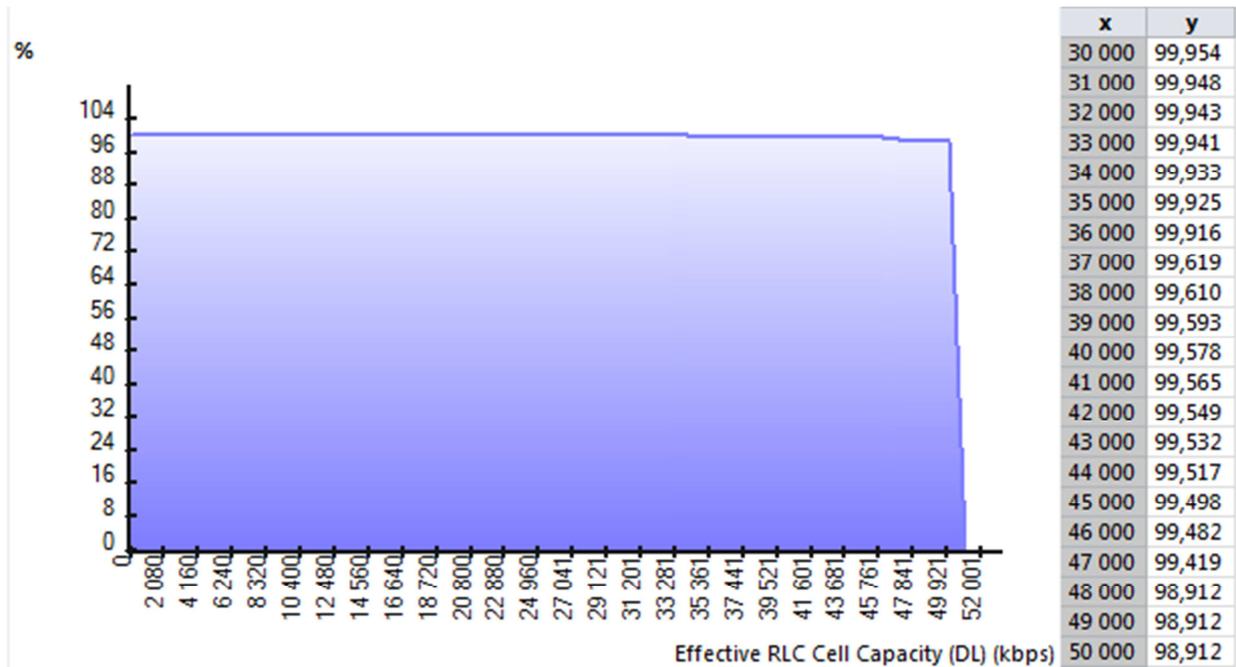
Dans les simulations précédentes, les utilisateurs avaient des terminaux mobiles simples avec une seule antenne en émission et en réception. Dans ces simulations, et toujours dans le sens descendant seulement (DL), les utilisateurs auront des terminaux MIMO avec deux antennes d'émission et de réception, tandis que les eNodeB auront 4 antennes d'émission MIMO. Donc un système de transmission MIMO 4x2, afin d'augmenter la capacité des cellules de notre réseau LTE dans le milieu dense urbain.

### IV.5.1 Cas de 10 utilisateurs

Dans le but de voir l'impact des systèmes MIMO sur la capacité cellulaire, cette trace la CDF de la capacité de la cellule avec 10 utilisateurs, qui ont une vitesse de déplacement de 5 Km/h, qui utilisent le service voix sur IP (VoIP) avec une configuration multi-antennaires MIMO 4x2.

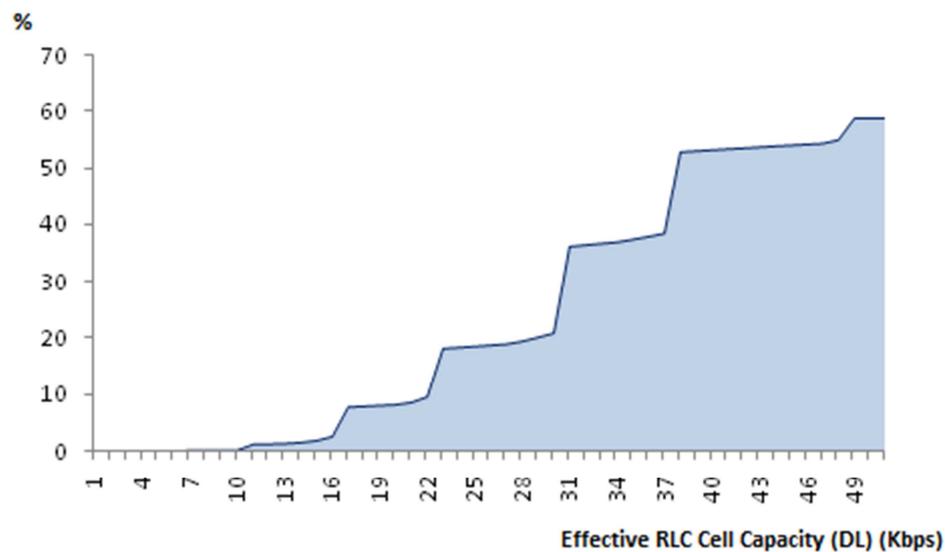
D'après le résultat obtenu, représenté sur la figure IV.18, nous observons que la probabilité a beaucoup progressée et elle tend vers les 100%. En effet, l'utilisation des systèmes MIMO (4x2) a permis à plus de 98.91 % d'utilisateurs d'avoir une capacité effective maximale de 50 Mbits/s.

La mise en place de la technologie MIMO permet au système utilisé d'atteindre des capacités importantes et cela sans changer la largeur de la bande alloué au signal ni sa puissance d'émission. De plus, le fait d'utiliser plus d'une antenne des deux côtés du système permet d'apporter de la diversité. Concrètement, plusieurs répliques de la même information sont transmises sur plusieurs canaux ayant des puissances comparables et des évanouissements indépendants, et donc, il est fort probable qu'au moins un, ou plus, des signaux reçus ne soit pas atténué à un moment donné, rendant possible une transmission de bonne qualité. Cela a pour conséquence l'amélioration la capacité du réseau LTE.



**Figure IV.18 :** La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4X2) : cas de 10 utilisateurs.

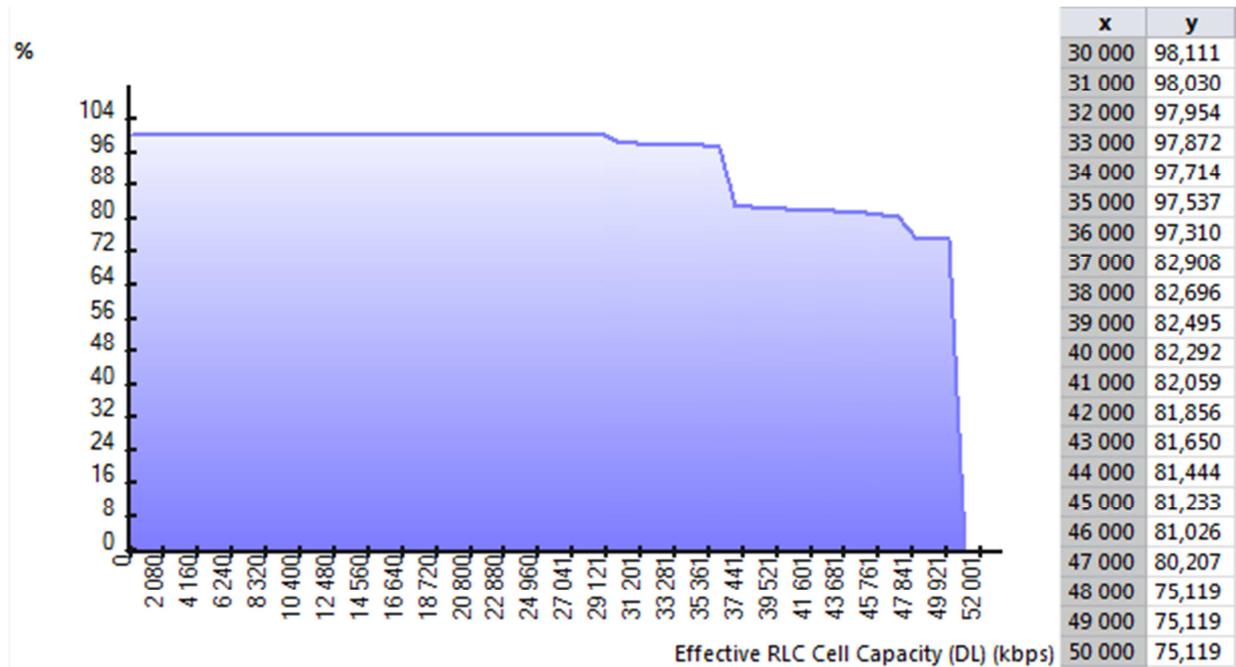
Nous représentons, sur la figure IV.19, le gain de nombre d'utilisateurs en pourcentage d'un système MIMO 4x2 par rapport aux systèmes SISO utilisés précédemment (cas de 10 utilisateurs par cellule). Nous observons que le gain en pourcentage d'utilisateurs est significatif. En effet, nous avons un gain maximal de 58% pour une capacité de 50 Mbits/s.



**Figure IV.19 :** Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 10 utilisateurs.

#### IV.5.2 Cas de 50 utilisateurs

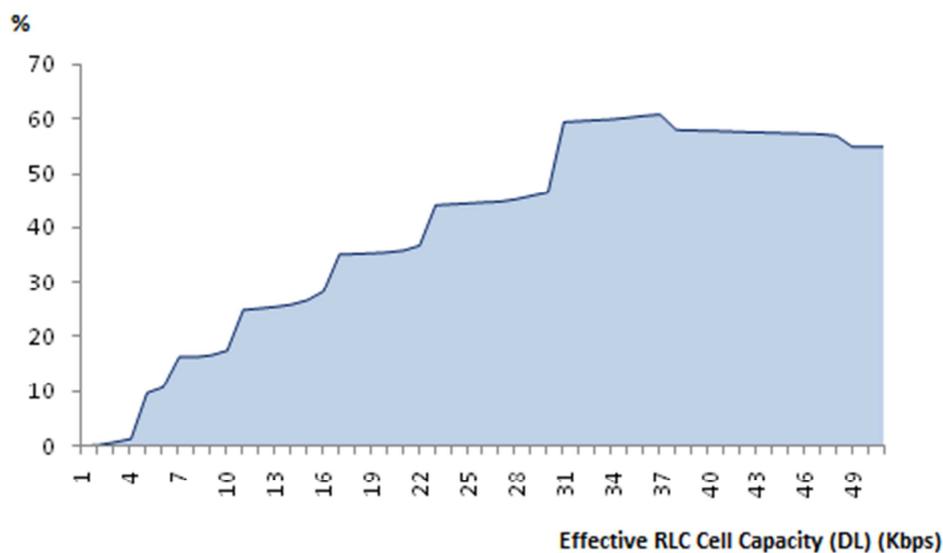
La figure ci-dessous représente la DCF de la capacité obtenue dans le cas de 50 utilisateurs par cellule avec l'utilisation de système MIMO 4x2.



**Figure IV.20 :** La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4X2) : cas de 50 utilisateurs.

Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs de 10 à 50 utilisateurs, la probabilité d'avoir une capacité effective maximale de 50Mbits/s a régressé à 75%. D'autre part en comparant ce résultat avec celui de 50 utilisateurs utilisant des systèmes SISO, nous remarquons que le pourcentage en nombre d'utilisateurs pouvant avoir une capacité de 50 Mbits/s a beaucoup amélioré de 20% vers 75%.

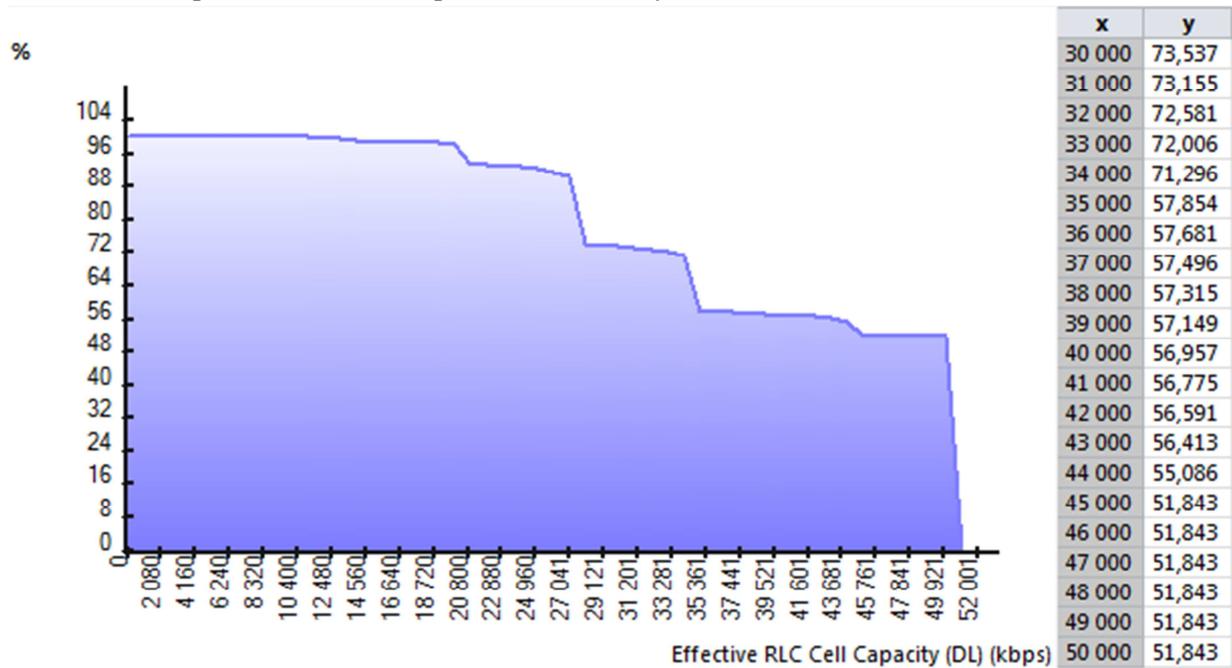
On peut voir sur la figure IV.21, un gain assez considérable de notre approche lorsqu'on implémente les systèmes MIMO dans notre réseau. On constate que les performances de ces systèmes sont meilleures par rapport à celles SISO. En résultat, pour une capacité de 36Mbits/s, un maximum de gain en nombre d'utilisateurs est obtenu de 61% et un gain de 54% pour une capacité maximale de 50 Kbits/s, ce qui représente plus que le double de capacité effective maximale de la cellule.



**Figure IV.21 :** Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 50 utilisateurs.

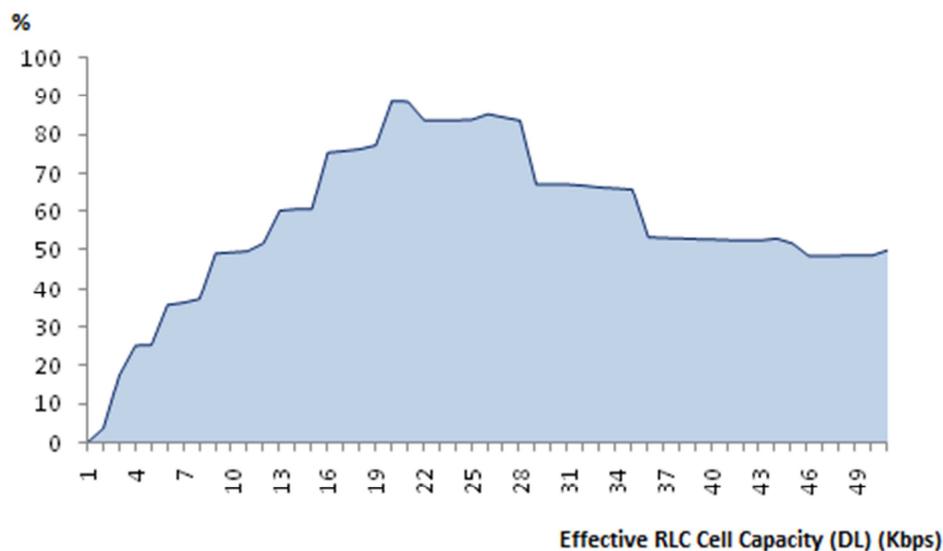
### IV.5.3 Cas de 100 utilisateurs

Dans notre dernier cas, la figure suivante représente la DCF de la capacité effective maximale pour 100 utilisateurs par cellule avec l'implémentation des systèmes MIMO 4x2.



**Figure IV.22 :** La DCF de la capacité effective de la cellule avec un système MIMO (4x2) : cas de 100 utilisateurs.

Il est bien visible que plus on augmente le nombre d'utilisateurs, les probabilités d'avoir une capacité maximale diminuent. Tandis que, l'utilisation des systèmes MIMO (4x2) a fait augmenter ces probabilités. Notre observation confirme qu'on a pu dépasser les 50% pour une capacité effective maximale de 50Mbits/s, contrairement au cas SISO où la probabilité d'avoir cette capacité était presque nulle (environ 01.55 %).



**Figure IV.21 :** Gain en nombre d'utilisateurs : cas de 100 utilisateurs.

Le figure IV.23 montre une valeur maximale du gain en nombre d'utilisateur est de 88% pour un débit de 19 Mbits/s ou on a pu profiter de la diversité en émission et en réception des systèmes MIMO. Le gain de diversité permet d'augmenter de pourcentage d'utilisateurs admettent une capacité effective maximale de 49 %.

## IV.6 Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre, nous avons évoqué toutes les étapes de planification d'un réseau LTE dans un milieu dense urbain. Ainsi, nous avons exposé des aperçus d'écran qui témoignent les différentes étapes de planification réalisées sous l'outil de planification et d'optimisation Atoll. Enfin, une partie d'étude de la capacité a été réalisé tout en analysant l'impact de l'augmentation du nombre d'utilisateurs et l'utilisation des systèmes MIMO sur ses performances.

# Conclusion générale

---

Notre projet a comme objectif, l'étude de la capacité du réseau LTE (*Long Term Evolution*) connu par la 4G (le nom commercial), pour but d'améliorer cette dernière, les lignes qui vont suivre en dessous vont servir de résumé de cette amélioration.

La capacité est connue par son aspect quantitatif, mais elle n'est pas limitée juste à cet aspect-là, d'où interviennent nos études pour montrer que la capacité dépend d'autres paramètres, comme la densité dans un périmètre prédéfini (c'est ce qu'on appelle une cellule) et le type d'antennes tel que la technologie MIMO...

Pour le faire, Nous avons commencé par des généralités sur les réseaux cellulaires et les étapes majeures du développement des réseaux mobiles, de leurs premiers pas à leurs dernières évolutions. En deuxième partie on a fait une étude générale du réseau LTE, son architecture, ses caractéristiques, les spécifications de sa couche physique. La troisième partie a été consacrée pour une étude approfondie sur la capacité et la qualité de service de réseau 4G/LTE ainsi que les différentes technologies qui vont contribuer à l'augmentation de la capacité de ce dernier.

Finalement, et afin de vérifier notre hypothèse, nous avons faits des simulations à l'aide du logiciel professionnel de planification et d'optimisation des réseaux cellulaires 'Atoll'. Pour faire simple, nous avons simulé un réseau LTE dans un milieu dense urbain, tout en variant le nombre d'utilisateurs d'une manière croissante en premier lieu, puis l'utilisation des antennes MIMO en deuxième lieu, pour un but d'observer et analyser l'impact de ses variantes sur la capacité effective maximale des cellules LTE.

Effectivement les résultats ont bien vérifié notre hypothèse, nous sommes arrivées au aboutissement suivant : « la capacité des cellules diminue avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs dans le milieu dense urbain, et elle augmente avec l'utilisation des antennes MIMO dans les deux côtés d'émission et réception (eNodeB et terminal mobile), mais elle reste bien bornée parce que LTE a promis une capacité élevée à 400 utilisateurs par cellule pour une bande passante de 20 Mhz et nombre d'antennes MIMO d'eNodeB de 8x8.

nous devons admettre que nous sommes satisfaits de ce projet, qui nous a donc permis d'avantage de comprendre et mettre en pratique nos connaissances acquises lors cette formation de Master en Réseaux et Télécommunications (RT) et cela fait partie d'un travail d'ingénierie en

télécom chez les opérateurs téléphoniques, nous avons essayé de comprendre le fonctionnement du logiciel Atoll qui est utilisé chez les différents opérateurs.

Nous sommes par ailleurs convaincus que le travail élaboré n'est qu'une étape primaire aussi bien pour une carrière professionnelle que pour des études plus approfondies.

# Bibliographie

---

- [1]. Mohamed Moussaoui, « Réseau UMTS et ses évolutions : UMTS/HSxPA/3LTE », Engineering school. La première Ecole de Printemps sur "Réseaux sans Fils et Technologies Emergentes". pp.76, 16 Mars 2010. Marrakech, 2011.
- [2]. Bouchentouf Hadjer, Boudghene Stambouli Riyad, « Etude des performances des réseaux 4G (LTE) », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Option : RMS, Université de Tlemcen, Juin 2013.
- [3]. Andres Perez, « Architecture des réseaux de mobile », édition LA VOISIER, 2011, ISBN : 978-2-7462-3262-3279-2.
- [4]. Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, Sami Tabbane, « Réseaux GSM », 5<sup>ème</sup> édition, revue et augmenté. ISBN : 2-7462-0153-4, Septembre 2000.
- [5]. Yannick Bourguen, Eric Hardouin, François-Xavier Wolff, « LTE et les réseaux 4G », édition : groupe Eyrolles (Dunod), ISBN : 978-2-212-12990-8, 2012.
- [6]. Claude Servin, « Réseaux et Télécoms », 4<sup>ème</sup> édition, Dunod, ISBN : 978-2-10-059258-6, Mars 2013.
- [7]. Javier Sanchez and Mamadou Thioune, « UMTS : services, architecture et WCDMA », 1<sup>ère</sup> édition : Hermès - Lavoisier, EAN13 : 9782746203358, Janvier 2001.
- [8]. Harri Holma, Antti Toskala, « UMTS, les réseaux de 3<sup>ème</sup> génération », 2<sup>ème</sup> édition OEM, Collection Pro Micro, ISBN : 978-2-7464-0370-3, Août 2011.
- [9]. Khalil Ibrahimi, « Gestion des ressources des réseaux mobiles de nouvelle génération par rapport à la mobilité des utilisateurs », Thèse de Docteur en Sciences de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse France & Université Mohammed V-Agdal Rabat – Maroc, 2009.
- [10]. Hammamdji Sami et Seba Nasreddine-Reda « Optimisation Radio de la 3<sup>ème</sup> Génération de la Téléphonie Mobile », Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Signal et Communications, Université de Boumerdes, 2016.
- [11]. Merah Hocine, « Conception d'un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles de base de la technologie MC-CDMA » Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de Magister en Electronique, option : Communication, Université de Sétif, Septembre 2012.
- [12]. Arcep, « Les enjeux de la 5G », Communiqué de l'autorité des régulations de communication électroniques et des postes, Mars 2017.

- [13]. Amazit Abdelghani, « *Impact des interférences de la couche physique sur la couche mac dans la technologie LTE* » Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en mathématiques et informatique appliquées, 102P, Juin févr. 2011.
- [14]. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, « *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB* », Edition Wiley, IEEE Press, 1 Edition, November 2010.
- [15]. Hanen Hrizi, Salma Saidane, « *Dimensionnement des Réseaux Radio 3G et 4G* », Projet de fin d'études pour l'obtention de diplôme Licence Appliquée en Sciences et technologies de l'Information et de la Communication, Option RST, Tunisie Telecom, Juin 2013.
- [16]. BETAOUAF Djezila, BOUMECHERA Wissem, « *Développement d'un Outil de Dimensionnement et de Planification d'un Réseau 4G-LTE* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Option : RMST, Université de Tlemcen, Mai 2015.
- [17]. Zubeiri Iman, « *Etude de la capacité des réseaux LTE* », Projet fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master Science et Technique Systèmes Intelligents et Réseaux, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des sciences et techniques Fès, Juin 2014.
- [18]. Bendimerad Fethi Tarik, « *MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil* », Rapport général de Projet National de Recherche, Université de Tlemcen, Organisme pilote CERIST, Novembre 2013.
- [19]. Forsk, « *Atoll : Radio Planning and Optimization Software* », <http://www.forsk.com/>