

جمهورية الجزائر 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** : Systèmes des Télécommunications

**Par** : -SEFRAOUI Merouane  
-KRIFIF Larbi

### Sujet

Etude numérique comparative entre les  
technologies 4G et 5G via l'outil Atoll

Soutenu publiquement, le 28/ 09/2024 , devant le jury composé de :

M/A ABDELMALEK  
M/S.M. BAHRI  
M/A. DJEMAI

MCB  
MCB  
MCB

Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen

Président  
Examineur  
Encadreur

Année universitaire : 2023/ 2024

# Dédicace

“

*À mon cher père 'SEFRAOUI Mohammed, c'est avec une immense gratitude que je vous dédie cette réalisation.*

*Votre force, votre sagesse et votre soutien inébranlable ont été mon guide tout au long de ce voyage. Vous avez toujours cru en moi, même quand j'en doutais. Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien constant.*

*À ma chère mère 'D. Houria, je dédie cette réalisation à vous, ma source constante d'inspiration. Votre amour, votre soutien et votre foi en moi ont été le pilier de ma réussite. Vous avez toujours été là pour moi, me soutenant et me guidant à chaque étape. Merci pour votre amour inépuisable et votre encouragement constant.*

*À ma famille bien-aimée, votre amour et votre soutien ont été une source constante d'inspiration tout au long de mon parcours académique. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.*

*À mes précieux amis, merci pour votre amitié, votre soutien et vos encouragements constants. Vous avez rendu ce voyage beaucoup plus agréable.*

”

- **SEFRAOUI Merouane**

---

“

*Je dédie ce modeste travail aux personnes qui me sont les plus chères,  
À mes chers parents KRIFIF Belkacem et BENALI Rabiaa, qui m'ont  
soutenu tout au long de mon  
parcours académique avec leur patience, leur encouragement et leur  
sacrifice.*

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

*À tous mes proches, de la famille, mes amis, et tous ceux qui comptent  
pour moi et je compte pour eux, en espérant être toujours*

*À la hauteur de leurs attentes.*

”

**- KRIFIF Larbi**

# Remerciements

“

*Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadrant : M. DJEMAI Abderrezak pour m'avoir offert un cadre de travail agréable et un encadrement de qualité.*

*plus vifs remerciements vont aux membres du jury A ABDELMALEK, S.M. BAHRI pour leur intérêt pour notre recherche et leur volonté d'évaluer ce travail.*

*En fin, nous remercions tous nos enseignants du département de Télécommunication de l'université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, sans oublier de citer tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis l'école primaire jusqu'aux études universitaires.*

”

# Résumé

La technologie mobile a connu plusieurs générations depuis son apparition. La 4G et la 5G sont récemment les technologies les plus répandues. La capacité du réseau, le haut débit, la couverture, la latence et le coût sont les caractéristiques qui déterminent la préférence d'une technologie de réseau par rapport à une autre.

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, nous proposons une étude comparative numérique entre les deux réseaux via l'outil de planification Atoll (version 3.4.0).

---

**Mots clés :** 5G, MiMo, beamforming, planification, couverture, réseau cellulaire, qualité, SS-RSRP, BTS, Atoll.

---

# Abstract

Mobile technology has gone through several generations since it first appeared, with 4G and 5G being the most widespread technologies. Network capacity, broadband, coverage, latency, and cost are the characteristics that determine the preference of one network technology over another.

As part of this graduation project, we are proposing a numerical comparative study between the two networks using the Atoll planning tool (version 3.4.0).

---

**Keywords :** 5G, MiMo, beamforming, planning, coverage, cellular network, quality, SS-RSRP, BTS, Atoll.

---

# ملخص

مرت تكنولوجيا الهاتف المحمول بعدة أجيال منذ ظهورها لأول مرة. وفي الآونة الأخيرة، أصبحت تقنيتنا الجيل الرابع (4G) والجيل الخامس (5G) أكثر التقنيات انتشارًا. تُعد سعة الشبكة والنطاق العريض والتغطية ووقت الاستجابة والتكلفة هي الخصائص التي تحدد أفضل تقنية شبكة على أخرى.

في مشروع التخرج الذي بين ايدينا ، نقتح دراسة مقارنة رقمية بين الشبكتين باستخدام أداة التخطيط Atoll (الإصدار 0.4.3)

---

كلمات مفتاحية : 5G، MiMo، تشكيل الشعاع، التخطيط، التغطية، شبكة خلوية، الجودة، SS-RSRP، BTS، ATOLL.

---

# Table des matières

Dédicace .....	II
Remerciements .....	V
Résumé.....	VI
Abstract.....	VII
IIIIV .....	ملخص
Table des matières .....	X
Listes des figures .....	XIV
Listes des tableaux.....	XVI
Listes des sigles et acronymes.....	XVII
Introduction générale.....	1
<b>1 Les réseaux mobiles.....</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction .....	3
1.2 Développement des communications mobiles.....	3
1.3 Concept de base des réseaux mobiles .....	4
1.4 Concept cellulaire .....	4
1.5 Architecture de réseaux mobiles.....	5
1.6 Évolution des systèmes cellulaires .....	7
1.6.1 Première génération (1G).....	7
1.6.2 Deuxième génération (2G).....	7
1.6.3 Troisième génération (3G).....	7
1.6.4 Quatrième génération (4G) .....	8
1.6.5 Cinquième génération (5G).....	8
1.7 Tableau comparatif des réseaux mobiles.....	8
1.8 Conclusion.....	9
<b>2 entation et Description de la 4ème Génération .....</b>	<b>10</b>
2.1 Intoduction .....	10
2.2 Exigences et caractéristiques techniques du LTE .....	10
2.3 Caractéristique du LTE.....	11
2.3.1 Débits de réseau LTE.....	11
2.3.2 Allocation spectrale.....	11

2.3.2.1	Allocation spectrale au niveau mondial .....	11
2.3.2.2	Allocation spectrale au niveau régional .....	12
2.3.3	Latence .....	12
2.3.3.1	Latence du plan de contrôle .....	12
2.3.3.2	Latence du plan usager .....	12
2.3.4	Mobilité .....	12
2.3.5	Techniques de duplexage .....	13
2.3.5.1	Duplexage en fréquence FDD .....	13
2.3.5.2	Duplexage en temps TDD .....	13
2.3.6	Structure d'une trame LTE .....	13
2.3.6.1	Structure de type 1 : FDD .....	13
2.3.6.2	Structure de type 2 : TDD .....	14
2.3.7	Les ressources blocks .....	15
2.3.8	1.3.8 La modulation .....	15
2.3.9	Les techniques d'accès .....	16
2.3.10	OFDM .....	16
2.3.11	Techniques d'accès .....	17
2.3.11.1	OFDMA .....	17
2.3.11.2	SC-FDMA .....	18
2.3.12	La technologie MIMO .....	18
2.4	Architecture du réseau 4G .....	19
2.4.1	2.4.1 .....	UE
	20	
2.4.2	Réseau d'accès (l'E-UTRAN) .....	20
2.4.3	Réseau cœur (EPC) .....	20
2.4.4	Le handover .....	23
2.4.4.1	Intra-LTE handover .....	23
2.4.4.2	Inter-LTE handover .....	23
2.4.4.3	Inter-RAT handover .....	24
2.4.5	LTE-Advanced .....	24
2.4.5.1	Introduction .....	24
2.4.6	Les techniques du LTE-Advanced .....	24
2.4.6.1	L'agrégation de porteuses .....	24
2.4.7	Modulation d'amplitude en quadrature supérieure (QAM) .....	25
2.4.8	MIMO d'ordre supérieur .....	25
2.4.9	Le concept coordinated multipoints (CoMP) .....	25
2.4.10	Le support des nœuds relais .....	26
2.4.11	Limitations du réseau 4G .....	26
2.5	Conclusion .....	27
<b>3</b>	<b>Présentation et Description de la 5-ème Génération .....</b>	<b>29</b>
3.1	Introduction .....	29
3.1.1	Exigences et caractéristiques techniques du 5G .....	29
3.1.2	Caractéristiques du 5G .....	29
3.1.2.1	Débits du réseau 5G .....	29
3.1.2.2	Allocation spectrale .....	29
3.1.2.3	Latence .....	30
3.1.2.4	Efficacité spectrale cellulaire .....	30
3.1.2.5	Les techniques de duplexage .....	30

3.2	Applications .....	30
3.2.1	Réseau mobile à haut débit.....	30
3.2.2	Véhicules autonomes.....	30
3.2.3	Fabriques intelligentes.....	31
3.2.4	Villes intelligentes.....	31
3.2.5	Soins de santé intelligents.....	31
3.3	Technologies émergentes des réseaux 5G.....	32
3.3.1	Millimeter wave (mmWave).....	32
3.3.2	Massive multiple input multiple output (Massive MIMO or mMIMO).....	32
3.3.3	Ultra Dense Network (UDN).....	33
3.3.4	Architecture .....	34
3.3.4.1	Architecture générale.....	34
3.3.4.2	Architecture 5G Non-autonome (NSA).....	34
3.3.4.3	Architecture 5G Autonome (SA).....	35
3.3.5	Modes de déploiement du réseau 5G.....	35
3.3.5.1	Option Autonome (SA).....	35
3.3.5.2	Options Non Autonomes (NSA).....	35
3.3.6	Modes de déploiement du réseau 5G.....	36
3.3.6.1	Option 1.....	36
3.3.6.2	Option 2.....	37
3.3.6.3	Option 3, 3a, 3x.....	37
3.3.7	Option 4.....	38
3.3.8	Option 5.....	39
3.3.9	Option 7.....	39
3.3.10	Structure de la trame 5G .....	40
3.4	Techniques d'accès.....	41
3.5	Conclusion.....	42
<b>4</b>	<b>Simulation et Comparaison 4G vs 5G.....</b>	<b>44</b>
4.1	Introduction .....	44
4.2	Description du logiciel ATOLL.....	44
4.3	Simulation 4G .....	44
4.3.1	Création d'un projet LTE Atoll.....	44
4.3.2	Réglage des paramètres de la zone.....	45
4.3.3	L'ajout des cartes .....	46
4.3.4	Précision de la zone d'étude.....	48
4.3.5	Ajout de sites.....	49
4.3.6	Optimisation 4G .....	49
4.3.6.1	Planification automatique des cellules (ACP).....	49
4.3.7	Résultats de différentes prédictions.....	50
4.3.7.1	Niveaux de signal pour la couverture 4G.....	50
4.3.7.2	Couverture 4G par RSRP .....	51
4.3.7.3	Couverture 4G par PDSCH C/(I+N).....	52
4.3.7.4	Prédiction de la couverture 4G par débit (DL) .....	53
4.3.7.5	Couverture dans les zones de chevauchement .....	54
4.3.7.6	Simulation .....	56
4.4	Simulation 5G .....	57
4.4.1	Création d'un projet 5G Atoll .....	57
4.4.2	Ajout de sites.....	58

4.4.3	Optimisation 5G .....	59
4.4.3.1	Planification automatique des cellules (ACP).....	59
4.4.4	Résultats de différentes prédictions.....	60
4.4.4.1	Niveaux de signal pour la couverture 5G.....	60
4.4.4.2	Couverture 5G par SS-RSRP .....	61
4.4.4.3	Couverture 5G par PDSCH C/(I+N).....	62
4.4.4.4	Prédiction de la couverture 5G par débit (DL) .....	63
4.4.4.5	Couverture 5G dans les zones de chevauchement .....	64
4.4.4.6	Distribution des utilisateurs 5G .....	65
4.5	Comparaison 4G vs 5G .....	65
4.5.1	Déploiement cellulaire.....	65
4.5.2	Équipements utilisés .....	66
4.5.2.1	Bande de fréquence utilisée .....	68
4.5.2.2	Comparaison des résultats .....	69
4.6	Conclusion.....	69
	<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>70</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>72</b>

# Listes des figures

1.1	Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles.....	5
1.2	Architecture des réseaux GSM.....	6
1.3	Architecture du réseau UMTS.....	6
1.4	Représente les caractéristiques de la technologie 5GS.....	8
2.1	structure de trame FDD.....	14
2.2	structure de trame TDD.....	14
2.3	Ressources blocks.....	15
2.4	Ressources blocks.....	16
2.5	Spectre d'un signal OFDM.....	17
2.6	Allocation de sous-porteuses en OFDMA.....	17
2.7	Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO.....	19
2.8	Architecture du réseau 4G.....	20
2.9	Passerelle d'accès ou PGW.....	21
2.10	passerelles régionales ou SGW.....	21
2.11	HSS (Home Subscriber Server).....	22
2.12	Le contrôleur de mobilité MME, Mobility Management Entity.....	23
2.13	Transmission à bande passante plus large grâce à l'agrégation de porteuses.....	25
3.1	Bandes de fréquences 5G new radio.....	32
3.2	Concept MIMO massif.....	33
3.3	Exemple d'un réseau UDN.....	33
3.4	Architecture du réseau 5G.....	34
3.5	Architecture NSA pour système 5G.....	34
3.6	Architecture SA pour système 5G.....	35
3.7	Un aperçu des options de déploiement de la NSA 5G SA et 5G.....	36
3.8	Option 1 de déploiement SA 5G.....	36
3.9	Option 2 de déploiement SA 5G.....	37
3.10	Option 3 de déploiement NSA 5G.....	38
3.11	Option 4 de déploiement NSA 5G.....	38
3.12	Option 5 de déploiement SA 5G.....	39
3.13	Option 7 de déploiement SA 5G.....	40
3.14	La trame temporelle 5G-NR.....	40
3.15	Aperçu de la connectivité inter-5G entre l'EPC et le 5GC.....	42
4.1	Création d'un nouveau projet sur Atoll.....	45
4.2	Choix du système de coordonnées.....	45

4.3	Importation des données clutter classes .....	46
4.4	Importation des données altitudes .....	46
4.5	Importation des données vectors .....	47
4.6	Importer la carte d'Algérie .....	47
4.7	Wilaya de Tlemcen.....	48
4.8	Commune de Mansourah avec focus et computation de zone.....	48
4.9	Cartographie des sites.....	49
4.10	Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP .....	50
4.11	Modification de détail après optimisation .....	50
4.12	Prédiction de la couverture 4G par niveau de signal.....	51
4.13	Prédiction de la couverture 4G par RSRP.....	52
4.14	Qualité par PDSCH C/(I+N).....	53
4.15	Prédiction de la couverture 4G par débit (DL) .....	54
4.16	Prédiction de couverture 4G dans les zones de chevauchement .....	55
4.17	Histogramme de prédiction de couverture 4G dans les zones de chevauchement .	56
4.18	Distribution des utilisateurs 4G .....	57
4.19	Propriétés d'affichage de la simulation .....	57
4.20	Création d'un nouveau projet 5G sur Atoll .....	58
4.21	Cartographie des sites 5G.....	58
4.22	Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau 5G avec l'ACP .....	59
4.23	Modification de détail après optimisation 5G.....	60
4.24	Prédiction de la couverture 5G par niveau de signal .....	61
4.25	Prédiction de la couverture 5G SS-RSRP.....	62
4.26	Couverture 5G par PDSCH C/(I+N).....	63
4.27	Prédiction de la couverture 5G par débit (DL) .....	64
4.28	Prédiction de la couverture 5G dans les zones de chevauchement.....	64
4.29	Histogramme de prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement .	65
4.30	Distribution des utilisateurs 5G .....	65
4.31	Configuration de cellule LTE. ....	66
4.32	Configuration de cellule 5GNR .....	67

# Listes des tableaux

1.1	Évolution des abonnements téléphonie mobiles par opérateur .....	3
1.2	Évolution des abonnements de la téléphonie mobile par technologies .....	4
1.3	Couverture des différents réseaux mobiles en Algérie .....	4
1.4	Comparatif des réseaux mobiles .....	9
2.1	Exigences et caractéristiques techniques du LTE .....	11
2.2	Comparaison entre LTE et LTE Advanced .....	24
3.1	Comparaison du déploiement cellulaire 4G vs 5G.....	66
3.2	Équipements utilisés 4G vs 5G .....	67

# Liste des sigles et acronymes

<b>1G</b>	Première génération
<b>2G</b>	Deuxième génération
<b>3G</b>	Troisième génération
<b>3GPP</b>	Projet de Partenariat pour la Troisième Génération
<b>4G</b>	Quatrième génération
<b>5G</b>	Cinquième génération
<b>5GC</b>	Noyau 5G

## **A**

<b>ACP</b>	Automatic Cell Planning
<b>Ai</b>	Artificial Intelligence
<b>AMF</b>	Access and Mobility Management Function
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System

## **B**

<b>BS</b>	Base Station
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSS</b>	Base Station Subsystem

## **C**

<b>CDMA2000</b>	Code Division Multiple Access 2000
-----------------	------------------------------------

## **D**

<b>dB</b>	Decibel
<b>DL</b>	Downlink

## **E**

<b>EDGE</b>	Enhanced Data for GSM Evolution
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>eNB</b>	Evolved Node B
<b>EPC</b>	Enhanced Packet Core
<b>E-UTRAN</b>	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
<b>ETACS</b>	Extended Total Access Communication System

## **F**

<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>FR1</b>	Frequency Range 1
<b>FR2</b>	Frequency Range 2

## **G**

<b>gNB</b>	Next Generation Node Base Station
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications

## **H**

<b>HLR</b>	Home Location Register
<b>HSS</b>	Home Subscriber Server

### I

<b>IMT-2000</b>	International Mobile Telecommunications 2000 (ITU's standards of 3G)
<b>IMT-2020</b>	International Mobile Telecommunications (ITU's standards of 5G)
<b>IOT</b>	Internet of Things
<b>IP</b>	Internet Protocol

### L

<b>LTE</b>	Long Term Evolution
------------	---------------------

### M

<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>MU-MIMO</b>	Multi-User MIMO
<b>mmWave</b>	Millimeter-wave

### N

<b>NR</b>	New Radio
<b>NSA</b>	Non-Standalone

### O

<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
--------------	---

### P

<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel
<b>PDN/PGW</b>	Packet Data Network Gateway

### Q

<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QOS</b>	Quality-of-Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying

## **R**

**RSRP** Reference Signal Received Power

**RNC** Radio Network Controller

## **S**

**SA** Standalone Access

**SS-RSRP** Synchronization Signal Reference Signal Received Power

**SU-MIMO** Single User MIMO

## **T**

**TACS** Total Access Communication System

**TDD** Time Division Duplex

**TDMA** Time Division Multiple Access

## **U**

**UE** User Equipment

**UL** Uplink

**URLLC** Ultra-Reliable Low Latency Communication

## **W**

**W-CDMA** Wide Coding Division Multiple Access

**WRC-07** World Radiocommunication Conference 2007

# Introduction générale

## Contexte et justification

Les réseaux de téléphonie mobile sont envisagés depuis de nombreuses années, Les premiers systèmes, appelés "première génération", ont été lancés commercialement à la fin des années 1980.

la pression exercée par une plus grande capacité, une plus grande sécurité et l'itinérance les a remplacés par des solutions de "deuxième génération" et, plus récemment, de "troisième génération". aujourd'hui, la croissance du haut débit mobile a favorisé le développement du système 4G ou "quatrième génération" et la cinquième génération.

## Problématique

Le choix du type de technologie de communication à installer dans une zone géographique donnée nécessite une étude approfondie des différentes technologies de communication disponibles (1G, 2G, 3G, 4G, 5G). Il s'agit d'étudier l'adéquation du système à l'installation, ainsi que son efficacité, sa capacité, sa fiabilité et d'autres paramètres tels que la qualité de service, le débit, la latence et le coût.

Cette étude est souvent réalisée par les opérateurs de téléphonie mobile en exploitant l'outil de planification radio professionnel ATOLL.

## Objectifs

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison numérique entre les réseaux mobiles 4G et 5G en faisant une planification des deux technologies dans la région de Tlemcen en utilisant l'outil ATOLL.

## Organisation du Mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

1. Dans le chapitre initial, nous aborderons l'évolution des générations mobiles et leurs caractéristiques, tout en introduisant la norme 5G.

2. Le deuxième chapitre traite des fondements essentiels du système 4G, incluant son architecture, ses caractéristiques, ses applications et ses limitations.
3. Le troisième chapitre a pour but de discuter brièvement des caractéristiques, de l'architecture et des technologies clés les plus prometteuses pour les réseaux mobiles 5G.
4. Dans le quatrième chapitre, nous examinerons les principales différences entre la 4G et la 5G en planifiant les deux réseaux, en montrant les différentes étapes de l'installation et de la configuration d'une station de base avec l'outil ATOLL.

# Chapitre 1

## Les réseaux mobiles

### 1.1 Introduction

La technologie et la société sont dans un processus constant d'influence mutuelle. C'est particulièrement vrai pour les communications mobiles. D'une part, les communications mobiles ont le potentiel d'élargir les choix des utilisateurs et de faciliter leur vie quotidienne.

D'autre part, la recherche constante par la société d'un état complet de connectivité, de sécurité et de fiabilité conduit les communications mobiles à un développement continu et rapide. C'est cette relation étroite entre la technologie et la société qui permet aux communications mobiles d'être aujourd'hui la technologie de prédilection.

### 1.2 Développement des communications mobiles

Les communications mobiles sont actuellement les technologies les plus demandées et auxquelles on consacre le plus de ressources pour les développer au maximum de leur potentiel.

Cette capacité de la technologie mobile à atteindre un si grand nombre de personnes a rendu son évolution technologique très rapide au fil du temps. La technologie mobile est en effet un outil qui permet d'accélérer les progrès technologiques.

Pour s'en convaincre, il suffit de se reporter aux tableaux suivants, qui analysent l'évolution des abonnements à la téléphonie mobile au fil des dernières années en Algérie.

Année	2018	2019	2020	2021	2022	S1 2023
ATM « MOBI- LIS »	19 106 401	18 633 371	18 974 678	19 829 935	21 098 772	21 252 647
OTA « DJEZZY »	15 848 104	14 707 625	14 363 102	14 593 618	15 177 875	15 272 197
WTA « OORE- DOO »	12 199 759	12 084 537	12 217 893	12 592 204	12 742 119	12 390 640
Total	47 154 264	45 425 533	45 555 673	47 015 757	49 018 766	48 915 484

TAB. 1.1 : Évolution des abonnements téléphonie mobiles par opérateur [1].

Année	2018	2019	2020	2021	2022	S1 2023
GSM	10 811 663	8 514 105	6 783 111	5 235 558	4 260 261	3 770 875
3G	17 422 312	11 989 157	9 265 682	7 272 657	5 961 291	5 464 880
4G	18 920 289	24 922 271	29 506 880	34 507 542	38 797 214	39 679 729
Total	47 154 264	45 425 533	45 555 673	47 015 757	49 018 766	48 915 484

TAB. 1.2 : Évolution des abonnements de la téléphonie mobile par technologies [1].

Technologie	2018	2019	2020	2021	2022
GSM	98.04%	98.04%	98.62%	98.31%	98.49%
3G	97.45%	97.72%	98.97%	98.18%	98.07%
4G	52.84%	53.63%	76.18%	79.89%	85.87%

TAB. 1.3 : Couverture des différents réseaux mobiles en Algérie [1]

### 1.3 Concept de base des réseaux mobiles

Un réseau mobile est composé d'un réseau d'antennes-relais (ou stations de base), couvrant chacune une portion de territoire délimitée (cellule) et acheminant les communications sous forme d'ondes radio vers et depuis les terminaux des utilisateurs.

Les communications mobiles suivent le principe général de la téléphonie : relier deux utilisateurs distants en passant par l'équipement réseau d'un opérateur chargé de gérer le service. Mais à la différence du fixe, dans le réseau mobile, ce ne sont pas des fils de cuivre ou de fibre optique qui assurent la liaison finale, mais des transmissions radio. Le téléphone mobile d'un utilisateur communique par la voie des airs avec une antenne-relais, qui elle-même communique avec le commutateur centralisé de l'opérateur : un ordinateur. Celui-ci achemine la communication vers le correspondant sur le réseau fixe ou via d'autres stations de base.

Pour communiquer, un utilisateur mobile doit donc être à portée d'une antenne-relais. Celle-ci a une portée limitée, et ne couvre qu'un territoire restreint autour d'elle, appelé la « cellule » (d'où l'autre nom de « réseaux cellulaires » souvent utilisé pour désigner les réseaux mobiles). Pour couvrir un maximum de territoire et faire en sorte que les utilisateurs soient toujours en mesure de téléphoner, les opérateurs déploient des milliers de cellules, chacune d'elles étant équipée d'antennes en faisant en sorte que leurs cellules se chevauchent, de façon à ne jamais perdre le positionnement des utilisateurs.

### 1.4 Concept cellulaire

La dimension des cellules varie en fonction de divers critères tels que le type d'antennes relais employé, le lieu d'implantation (zone rurale, zone urbaine...), la densité de population, etc. La taille de la cellule est aussi restreinte par le téléphone mobile lui-même, qui doit être capable de faire la liaison en retour.

De plus, une station de base possède une capacité de transmission limitée et ne peut gérer qu'un nombre limité d'appels en même temps. C'est pourquoi, en milieu urbain, où la densité de population est élevée et le nombre de communications élevé, les cellules sont souvent nombreuses et de petite taille – à quelques centaines, voire seulement à quelques dizaines de mètres. La densité de population est beaucoup plus faible à la campagne, ce qui entraîne une taille des cellules beaucoup plus importante, pouvant parfois atteindre plusieurs kilomètres.

Il est important de souligner que la baisse de la puissance des stations de base entraîne une réduction de la couverture des cellules. La multiplication de celles-ci améliore la capacité du réseau à écouler le trafic voix ou data, mais nécessite nécessairement d'augmenter le nombre des antennes-relais, et donc du coût de mise en place du réseau.

### 1.5 Architecture de réseaux mobiles

L'architecture de base des réseaux mobiles est composée d'une partie fixe et d'une partie mobile. La partie mobile est constituée essentiellement des usagers mobiles (UM). Dans la partie fixe, on retrouve le réseau d'accès composé des stations de base et de leurs contrôleurs qui constituent des passerelles vers le réseau cœur, et le réseau cœur composé de commutateurs et/ou de routeurs. Le réseau d'accès sert d'interface entre les utilisateurs mobiles et le réseau cœur. Le réseau cœur, quant à lui, assure l'interconnexion avec le réseau d'accès et d'autres réseaux cœurs si nécessaire. Lorsque la zone à couvrir est vaste ou que le nombre d'équipements dans le réseau est élevé, un réseau de transport sert d'interface entre le réseau d'accès et le réseau cœur [1].

L'interconnexion des stations de base aux contrôleurs est effectuée suivant certains critères, et est appelée planification du réseau d'accès tandis que celle des contrôleurs aux commutateurs et des commutateurs entre eux est nommée planification du réseau cœur. Le réseau cœur intègre aussi des bases de données de localisation, à savoir une base de données nominale HLR (Home Location Register) et une base de données visiteurs VLR (Visitor Location Register) pour chaque commutateur.

Le HLR est une base de données statique qui gère les abonnés rattachés au commutateur alors que le VLR sert à localiser les abonnés en transit dans la zone contrôlée par le commutateur et est donc dynamique. La figure (FIG. 1.1) illustre l'architecture générale simplifiée des réseaux mobiles.

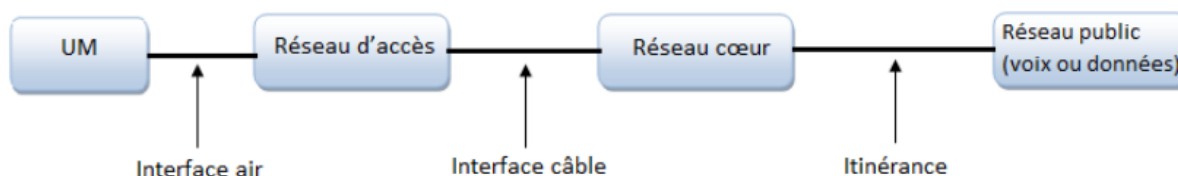


FIG. 1.1 : Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles.

Le réseau d'accès, encore appelé sous-système radio (BSS, Base Station Subsystem), qui sert d'interface entre les utilisateurs (mobiles) et le réseau (fixe). Le sous-système réseau (NSS, Network Switching Sub-System) ou réseau cœur est composé de commutateurs appelés MSC (Mobile Switching Center) qui interconnectent les BSC entre elles et avec d'autres éléments fixes du réseau. La figure (FIG. 1.2) montre l'architecture des réseaux GSM.

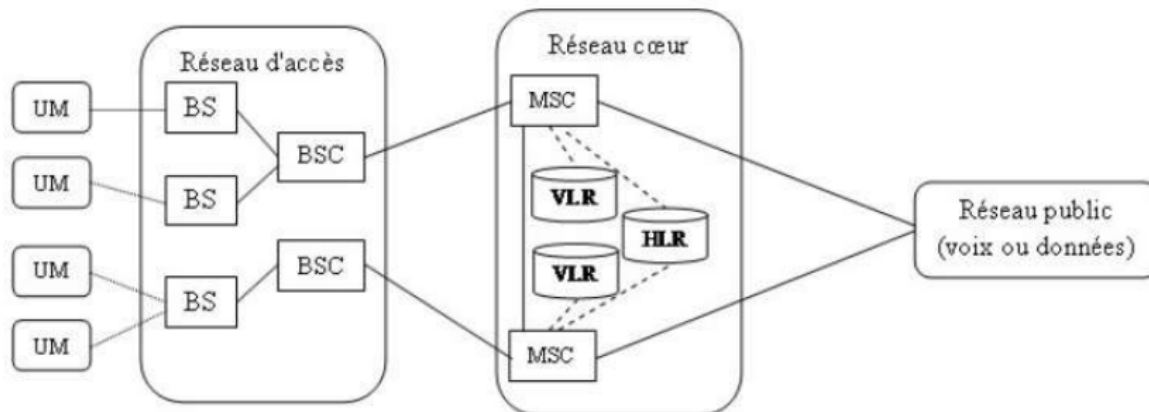


FIG. 1.2 : Architecture des réseaux GSM

Dans les réseaux UMTS, les stations de base, appelées nœuds B (Node B pour Broadband Access), sont reliées à des contrôleurs RNC (Radio Network Controller) qui gèrent les ressources radio des nœuds B qui leur sont associés. Les RNC assurent également l'acheminement du trafic du réseau d'accès vers le réseau cœur. L'ensemble des nœuds B et des RNC auquel ils sont reliés forment le sous-système radio, ou RNS (Radio Network Subsystem).

Le réseau cœur est composé de deux types de commutateurs :

- Le MSC (Mobile Switching Center), utilisé pour la transmission de circuits (voix).
- Le SGSN (Serving GPRS Support Node), pour la transmission des paquets (données).

Le MSC est relié aux passerelles GMSC (Gateway MSC) assurant la liaison avec le RTPC (Réseau Téléphonique Public Commuté), tandis que le SGSN est relié au GGSN (Gateway GPRS Support Node) qui le connecte au PDN (Public Data Network), ou réseau public de transmission de données.

La figure 1.4 montre l'architecture du réseau UMTS selon la description fournie [1].

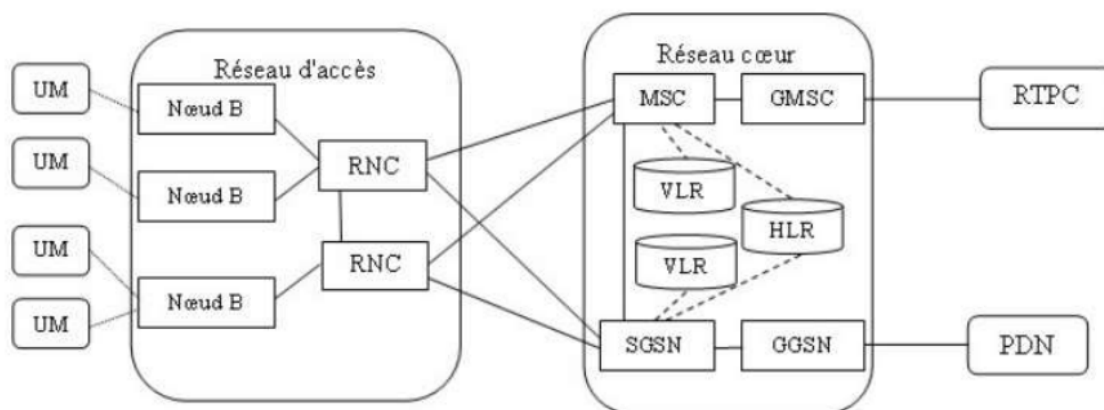


FIG. 1.3 : Architecture du réseau UMTS

### 1.6 Évolution des systèmes cellulaires

Les réseaux mobiles ont évolué au fil des années. Les premiers systèmes, appelés de "Première Génération" (1G), ont été commercialement lancés à la fin des années 1980. En raison de la demande croissante pour plus de capacité, sécurité et itinérance, ils ont été progressivement remplacés par des solutions de "deuxième génération" (2G), puis plus récemment par des systèmes de "troisième génération" (3G). Aujourd'hui, la croissance du haut débit a conduit au développement des systèmes 4G et 5G [2].

#### 1.6.1 Première génération (1G)

Les premiers systèmes mobiles utilisaient des méthodes de modulation analogiques. Ils étaient vulnérables en termes de sécurité et de capacités de données, et avaient une portée limitée à l'échelle internationale. Parmi les systèmes commerciaux notables, on trouve :

- **AMPS** : Apparue aux États-Unis en 1976, avec des limitations de sécurité initiales.
- **TACS** : Version européenne d'AMPS avec des modifications pour différentes bandes de fréquences.
- **ETACS** : Amélioration de TACS, offrant plus de canaux et de capacités.

#### 1.6.2 Deuxième génération (2G)

La 2G repose sur une technologie numérique, offrant une meilleure qualité et une plus grande capacité à moindre coût. Les standards incluent :

- **GSM** (Global System for Mobile Communications)
- **CDMA** (Code Division Multiple Access)
- **TDMA** (Time Division Multiple Access)
- **EDGE** (Enhanced Data rates for GSM Evolution)
- **GPRS** (General Packet Radio Service), une transition vers la 3G.

Les réseaux GSM utilisent principalement les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe, et 1900 MHz aux États-Unis [4].

#### 1.6.3 Troisième génération (3G)

La 3G a été conçue pour permettre des applications multimédia telles que la vidéo sur mobile et pour améliorer la qualité de service. Les standards incluent UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) utilisant le W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), offrant des débits allant de 384 kbps à 2 Mbps. Les technologies HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) et HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) ont été introduites pour améliorer la capacité et la vitesse de transfert [5].

### 1.6.4 Quatrième génération (4G)

La 4G/LTE (Long Term Evolution) est la technologie la plus récente, visant à améliorer l'efficacité spectrale, augmenter la capacité des cellules et offrir des débits élevés en mobilité. Basée sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) et le MIMO (Multiple Input Multiple Output), la 4G permet des débits jusqu'à plusieurs dizaines de Mbps, en établissant une interopérabilité entre différentes technologies et en facilitant la transition vers l'IP [2].

### 1.6.5 Cinquième génération (5G)

La technologie 5G, en cours de développement intensif, promet des débits théoriques dépassant 1 Gbps. Utilisant principalement la bande de fréquence 3.5 GHz, avec possibilité d'utilisation des bandes 700 MHz et 2100 MHz, la 5G vise à améliorer considérablement les performances réseaux pour supporter de nouvelles applications telles que l'IoT (Internet of Things) et la réalité augmentée [2].

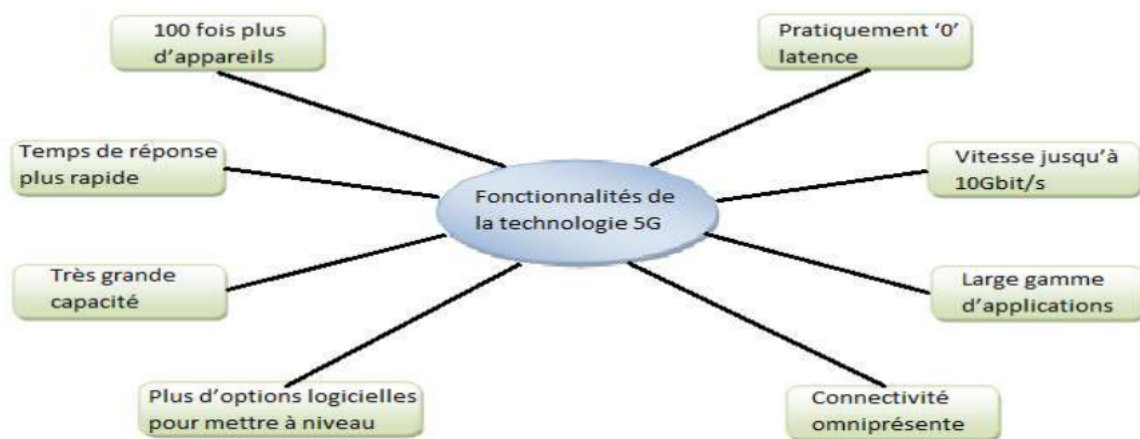


FIG. 1.4 : Représente les caractéristiques de la technologie 5GS

## 1.7 Tableau comparatif des réseaux mobiles

Voici le tableau comparatif des réseaux mobiles :

Réseaux mobiles	Années d'utilisation	Bande Passante	Fréquences utilisées	Vitesse de connexion	Caractéristiques	Technologies
1G	1980-1990	150/900 MHz	30 kHz (Analogique)	2 Kbps	Réseaux de communication sans fil	Analog cellular
2G	1990-2000	900 MHz	1.8 GHz (Digitale)	64 Kbps	Internet	Digital cellular
3G	2000-2010	100 MHz	1.6-2 GHz	144 Kbps - 2 Mbps	Internet haut débit	CDMA, UMTS, EDGE
4G	2010-2020	100 MHz	2-8 GHz	100 Mbps - 1 Gbps	Débit plus rapide, accepte tous les IP	LTE, Wi-Fi
5G	2020-...	1000 * BW par unité de surface	3-300 GHz	> 1 Gbps	mMTC, eMBB, uRLLC	WWW : World Wild Wireless Web

TAB. 1.4 : Comparatif des réseaux mobiles.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord introduit le concept de base des réseaux mobiles. Ensuite, nous avons abordé la taille des cellules et les bandes de fréquences associées. Nous avons également donné une explication succincte sur l'architecture générale des réseaux mobiles. Enfin, nous avons présenté un aperçu des différentes générations de réseaux cellulaires, à savoir la 1G, 2G, 3G, 4G et la 5G.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder les principales caractéristiques de la technologie mobile 4G, une avancée majeure qui promet des performances supérieures par rapport à ses prédécesseurs.

## Chapitre 2

# Présentation et Description de la 4<sup>ème</sup> Génération

### 2.1 Introduction

La quatrième génération n'a fait son apparition que le 23 juin 2005, grâce au mode test. La société japonaise NTT a été la première à atteindre des vitesses de transmission de paquets de 1 Gbit/s [3].

Concernant la mise en place commerciale, le réseau LTE a été mis en place en décembre 2009 dans les villes de Stockholm et Oslo grâce à l'opérateur Telia Sonera. Cette mise en place a eu une grande influence à l'échelle mondiale depuis que Samsung (Corée du Sud) a fourni les modems, tandis qu' Huawei (Chine) a créé l'infrastructure à Oslo et Ericsson (Suède) à Stockholm.

Le système qui supporte la 4G est désigné sous le nom d'Evolution à long terme (LTE), et il a subi plusieurs modifications de configuration et de fonctionnalités par rapport à la technologie précédente. L'UIT a mis en place un comité similaire à celui de la 3GPP afin de déterminer les spécifications et les exigences auxquelles un réseau doit répondre pour être qualifié de 4G.

L'IMT Advanced, le successeur d'IMT 2000, a été créé par l'UIT dans la capitale suisse en 2009 afin de définir le cadre réglementaire de cette nouvelle génération.

### 2.2 Exigences et caractéristiques techniques du LTE

Exigences LTE de l'UIT	Caractéristiques techniques LTE du 3GPP
Bande passante flexible	1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz
Efficacité spectrale plus élevée	DL : 5 (bit/s) /Hz, 3 à 4 fois supérieur à R6 HSDPA UL : 2.5 (bit/s) /Hz, 2 à 3 fois supérieur à R6 HSDPA
Débit de pointe plus élevé (@20 MHz)	DL : 100 Mbps, UL : 50 Mbps
Latence au Plan de contrôle : < 100 ms. Latence au Plan utilisateur : <10 ms.	Latence au Plan de contrôle : < 100 ms. Latence au Plan utilisateur : <10 ms.

Doit soutenir stationnaire/piéton/véhiculaire/haute vitesse.	Doit prendre en charge les véhicules à grande vitesse (> 350 km/h) pour un service d'accès à 100 kbps.
Prise en charge du Handover inter-systèmes	Prise en charge de l'interopérabilité entre le 3GPP existant et les non-3GPP
Capacité VoIP	Supprimez le domaine CS, le service CS réalisé dans le domaine PS qui peut prendre en charge plusieurs services, en particulier le service vocal (tel que VoIP).
Réduire le coût d'évolution du réseau	Supprimer BSC/RNC
Réduisez les CAPEX et les OPEX	SON (self organizing system)

TAB. 2.1 : Exigences et caractéristiques techniques du LTE

### 2.3 Caractéristique du LTE

La 4G repose entièrement sur le protocole IP, en tant que système et réseau, qui est réalisé grâce à la convergence des réseaux filaires et sans fil. Cette technologie peut être utilisée par les modems sans fil, les mobiles intelligents et d'autres appareils mobiles. Sa principale distinction par rapport aux générations précédentes réside dans les caractéristiques suivantes :

#### 2.3.1 Débits de réseau LTE :

Le flux offert à un client varie en fonction de ses conditions radio, notamment de sa position dans la cellule, des méthodes de transmission employées et de l'avantage épouvantable disponible. Les normes d'affichage courantes pour les entreprises 4G sont établies :

- 100 Mbit/s sur la liaison descendante (transfert de réception filaire vers mobile).
- 50 Mbit/s maximum sur la liaison montante.

#### 2.3.2 Allocation spectrale

##### 2.3.2.1 Allocation spectrale au niveau mondial

La WRC-07 a permis d'identifier du spectre additionnel inférieur à 1 GHz et supérieur à 2 GHz [4] :

- 450 – 470 MHz
- 790 – 960 MHz, incluant la bande que nous appellerons plus tard la bande de fréquences 800 MHz
- 1 710 – 2 025 MHz
- 2 110 – 2 200 MHz

- 2 300 – 2 400 MHz
- 2 500 – 2 690 MHz ou bande de fréquences 2,6 GHz

### 2.3.2.2 Allocation spectrale au niveau régional

Les bandes de fréquences suivantes ont également été identifiées au niveau régional [4] :

- 610 – 790 MHz pour le Bangladesh, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Nouvelle-Zélande, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les Philippines et Singapour.
- 698 – 790 MHz pour le continent américain.
- 3 400 – 3 600 MHz sans allocation globale, mais acceptée par un grand nombre de pays d'Asie, d'Océanie, d'Europe, d'Afrique, du Moyen-Orient et la Russie [4].

### 2.3.3 Latence

La capacité du cadre à répondre rapidement aux demandes des clients ou des administrations est clairement interprétée par l'inertie. Le plan de contrôle est en inactivité et le plan client est en dormance.

#### 2.3.3.1 Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour le LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager [5].

#### 2.3.3.2 Latence du plan usager

On peut décrire l'inactivité du plan client comme la période pendant laquelle un faisceau est transmis entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un concentrateur de réseau d'entrée, ou vice versa. De cette manière, l'inactivité du plan client est similaire à la période où un colis IP est transmis à l'intérieur de l'organisation d'entrée. Dans des conditions de faible charge organisationnelle et pour les petits colis IP, LTE a pour objectif d'atteindre une inactivité du forfait client inférieure à 5 ms [5].

### 2.3.4 Mobilité

La capacité à être polyvalent est essentielle pour une organisation mobile. LTE prévoit de continuer à être bénéfique pour les pays de l'UE qui se déplacent à des vitesses variées.

- Il est nécessaire d'améliorer l'E-UTRAN pour atteindre une vitesse de déplacement de 0 à 15 km/h.
- Il est recommandé de maintenir un débit polyvalent plus élevé, situé entre 15 et 120 km/h, en utilisant une exécution d'élite.
- Il est nécessaire de maintenir la portabilité sur le réseau cellulaire à des vitesses variant de 120 à 350 km/h (voire jusqu'à 500 km/h en fonction de la bande de récurrence) [5].

### 2.3.5 Techniques de duplexage

Le duplexage désigne comment les transmissions sont séparées sur la voie descendante et sur la voie montante. La voie descendante, également connue sous le nom de Downlink (DL), représente la connexion de la station de base à l'UE. La voie ascendante, également connue sous le nom de Uplink (UL), représente la transmission de l'UE vers la station de base. Deux modes de duplexage principaux sont disponibles, tous deux gérés par l'interface radio du LTE :

#### 2.3.5.1 Duplexage en fréquence FDD

Le duplexage en fréquence ou Frequency Division Duplex (FDD) : les voies montante et descendante opèrent sur deux fréquences porteuses séparées par une bande de garde.

#### 2.3.5.2 Duplexage en temps TDD

Le duplexage en temps, également appelé Time Division Duplex (TDD), consiste à utiliser la même fréquence porteuse pour les voies montante et descendante, ce qui permet de partager dans le domaine temporel. Pour la voie montante, certains temps de transmission sont réservés.

La voie descendante est réservée aux autres. Il est essentiel de prendre un moment de réflexion lors des transitions de direction de transmission, afin de permettre aux équipements de passer d'émission à réception. En LTE, la sous-trame désigne l'intervalle de temps élémentaire qui peut être consacré à l'un des sens de transmission.

### 2.3.6 Structure d'une trame LTE

La structure de la couche physique a été principalement conservée pour garantir la compatibilité entre les différentes versions de LTE.

L'utilisation de deux types de trames est caractéristique de cette structure, chacune étant adaptée à un mode de duplexage spécifique, comme nous allons le discuter ci-dessous.

#### 2.3.6.1 Structure de type 1 : FDD

En FDD, il existe dix sous-trames pour la voie ascendante et dix sous-trames pour la voie descendante, avec une période de 1 ms, respectivement. Chaque sous-trame est séparée en deux intervalles de 0.5 ms chacun [2].

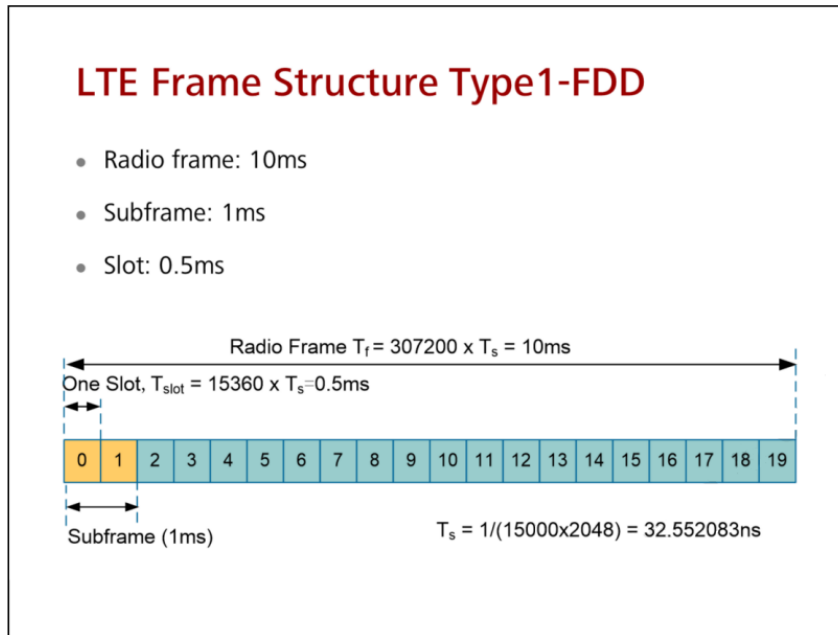


FIG. 2.1 : structure de trame FDD.

#### 2.3.6.2 Structure de type 2 : TDD

La structure de type 2 comprend également une trame de 10 ms composée de 10 sous-trames de 1 ms chacune, avec 2 intervalles de temps de 0,5 ms chacun [6].

Il est ajouté un laps de temps spécifique comprenant une période de sécurité et des symboles pilotes. L'un de ses rôles est de permettre à la partie électronique des équipements de passer du mode descendant au mode montant [3].

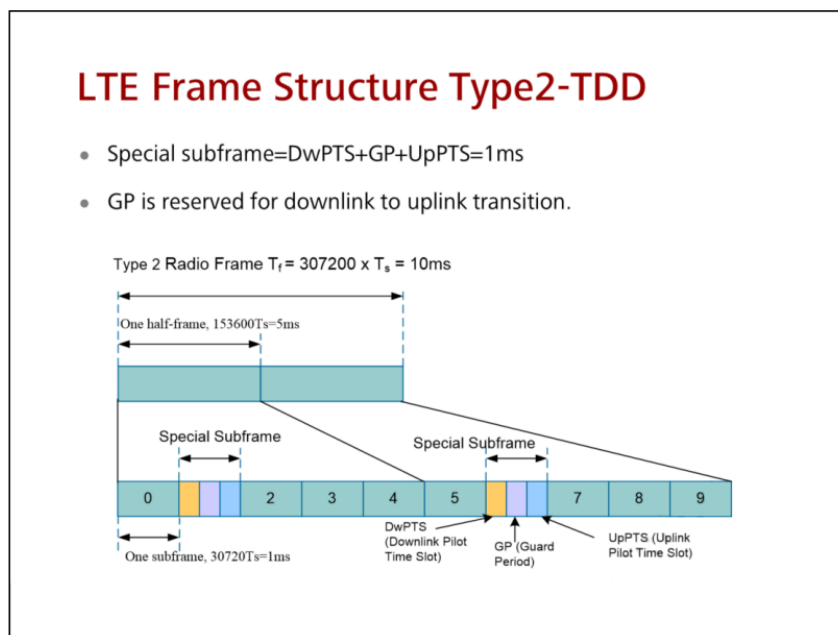


FIG. 2.2 : structure de trame TDD.

### 2.3.7 Les ressources blocks

Les sous-porteuses sont séparées en plusieurs blocs appelés "ressources blocks" lors de la transmission UL ou DL.

Grâce à cette méthode, le système peut diviser la sous-porteuse en de petites parties dans la bande passante, sans avoir à combiner les données de cette sous-porteuse avec les autres sous-porteuses.

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

Les sous-porteuses sont séparées en plusieurs blocs appelés "ressources blocks" lors de la transmission UL ou DL.

Grâce à cette méthode, le système peut diviser la sous-porteuse en de petites parties dans la bande passante, sans avoir à combiner les données de cette sous-porteuse avec les autres sous-porteuses.

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

En général, chaque composant de ressource transporte deux, quatre ou six bits de canal physique, en fonction du type de modulation utilisé. Les ressources sont regroupées en blocs, chacun s'étendant sur 0,5 ms (une seule ouverture) sur 180 kHz (12 sous-porteuses).

Les blocs de ressources sont utilisés par la station de base pour la planification basée sur la fréquence [7].

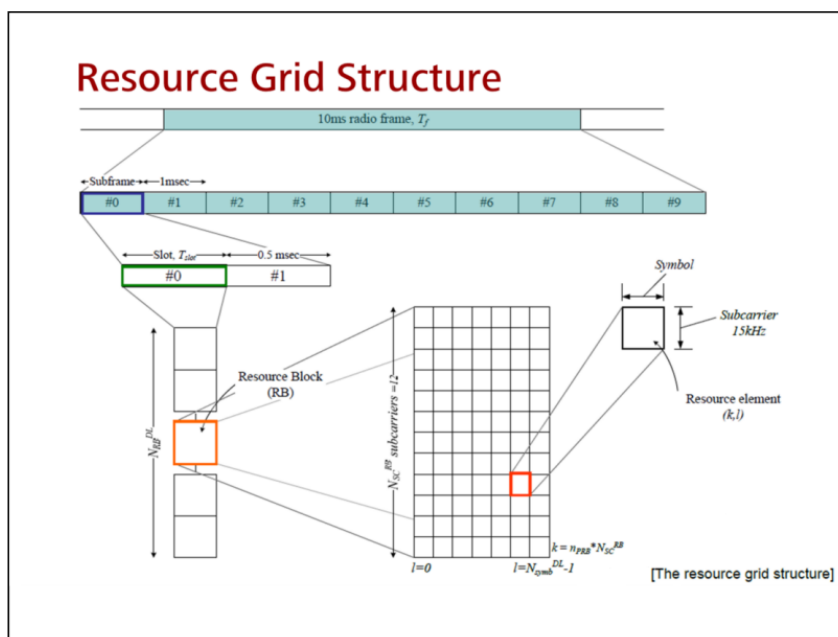
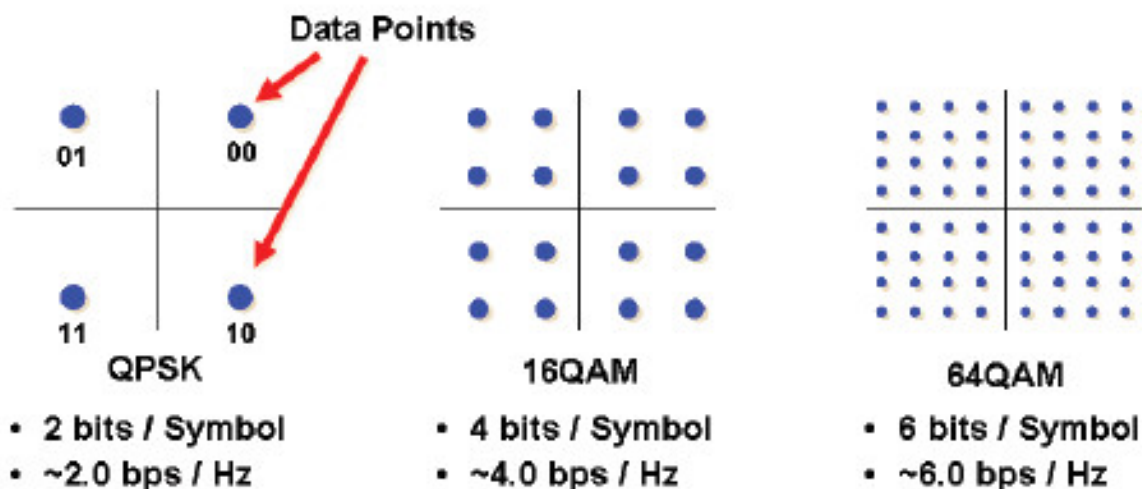


FIG. 2.3 : Ressources blocks.

### 2.3.8 1.3.8 La modulation

Le LTE utilise une modulation adaptative qui fluctue en fonction de la distance entre l'abonné et l'eNodeB. Les différents niveaux de modulation utilisés pour chaque sous-porteuse sont QPSK (4QAM), 16QAM et 64QAM [8].

FIG. 2.4 : Ressources blocks.



### 2.3.9 Les techniques d'accès

Le LTE est modulé en utilisant la technologie OFDM et les technologies d'accès multiples associées, telles que l'OFDMA et le SC-FDMA.

Le codage OFDMA est une technique de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence utilisée pour la liaison descendante.

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

### 2.3.10 OFDM

L'OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) est une technique de modulation multiporteuse utilisée par la norme LTE, ce qui lui permet d'assurer une transmission plus efficace qu'une modulation monoporteuse.

Puisque l'information est transmise sur de nombreuses porteuses, elle offre une plus grande résistance aux effets des canaux sélectifs, ce qui évite sa détérioration par l'effet du canal [9].

Cette modulation consiste à diviser la bande spectrale du canal de transmission en plusieurs sous-porteuses orthogonales. Cette condition est essentielle et indispensable pour l'OFDM, car sans elle, il y aura des interférences entre les sous-porteuses qui pourraient nuire à la transmission.

Dans un premier temps, l'idée était de donner à chaque sous-porteuse une sous-bande, afin d'éviter les interférences. Cette première méthode présente un inconvénient : la bande de fréquences n'est pas exploitée de manière optimale.

Il est préférable de superposer les sous-porteuses, à condition que le spectre des autres sous-porteuses soit nul à chaque fréquence centrale, et il sera également nécessaire d'établir un écart entre les sous-porteuses.

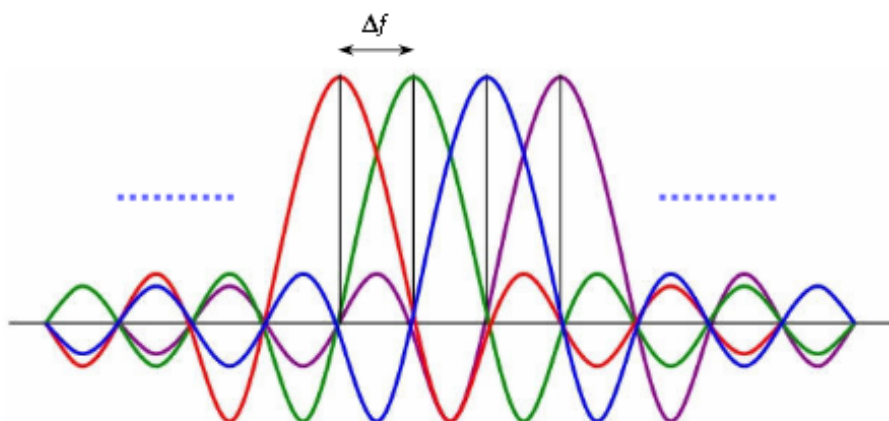


FIG. 2.5 : Spectre d'un signal OFDM.

### 2.3.11 Techniques d'accès

#### 2.3.11.1 OFDMA

L'OFDMA s'inspire de l'OFDM en utilisant le même principe de diviser la bande passante en plusieurs sous-porteuses.

L'OFDM peut servir un usager dans un intervalle de temps, par contre l'OFDMA peut servir plusieurs usagers dans un même intervalle de temps.

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre, ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long (66.7  $\mu$ s pour le LTE) ; cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radio de moyenne et longue portée.

Le symbole OFDMA est divisé en des sous-canaux logiques afin d'attribuer les ressources radio aux utilisateurs d'une manière dynamique, de supporter l'accès multiple, et pour une meilleure adaptation aux techniques avancées des antennes [5].

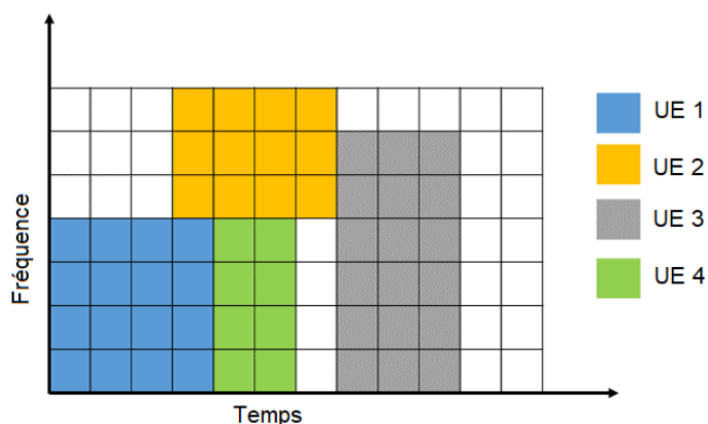


FIG. 2.6 : Allocation de sous-porteuses en OFDMA.

Pour le Downlink, on dispose de deux modes d'utilisation des subchannels :

- FUSC (Full Usage of Subchannels) : tous les subchannels sont attribués à l'émetteur. Dans ce mode, on attribue d'abord les porteuses nulles de la bande de garde et les pilotes, ensuite, on fait la partition des porteuses restantes en des subchannels, ce qui signifie qu'on a un seul ensemble de pilotes commun à toutes les porteuses du symbole.
- PUSC (Partial Usage of Subchannels) : quelques subchannels sont attribués à l'émetteur. Dans ce mode, la partition se fait de la façon suivante : d'abord, on attribue les porteuses nulles de la bande de garde, ensuite, on fait la partition des sous-porteuses restantes en des subchannels (permutation), et dans chaque subchannel on fait l'attribution des pilotes et des porteuses des données, ce qui signifie que chaque subchannel a son propre ensemble de porteuses pilotes [3].

### 2.3.11.2 SC-FDMA

La performance de ce système, principal avantage du SC-FDMA réside dans sa capacité à transmettre un signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses. En plus de l'OFDMA traditionnel, on utilise également une transformation de Fourier discrète (DFT) pour pré-coder le signal.

On utilise principalement cette méthode dans les communications entre la Terre et les satellites ainsi que dans la transmission montante des réseaux 4G LTE. Il présente un avantage en raison de son PAPR (ratio de puissance maximale à l'énergie moyenne) inférieur à celui de l'OFDMA, ce qui améliore l'efficacité énergétique et les coûts des terminaux mobiles.

Le codage SC-FDMA est principalement employé pour les liaisons uplink, notamment pour la partie radio (eUTRAN) de LTE, car il permet de réduire la consommation électrique du terminal et ainsi d'accroître l'autonomie de sa batterie.

### 2.3.12 La technologie MIMO

MIMO est une technique de communication sans fil qui utilise plusieurs antennes à la fois du côté émetteur et du côté récepteur pour envoyer et recevoir des signaux simultanément. Cela tire parti de la façon dont les signaux rebondissent et atteignent le récepteur de différentes manières. Elle divise le flux de données en flux séparés, chacun étant transmis sur une antenne différente, et le récepteur est capable de traiter ces flux séparément pour améliorer la qualité du signal global [10].

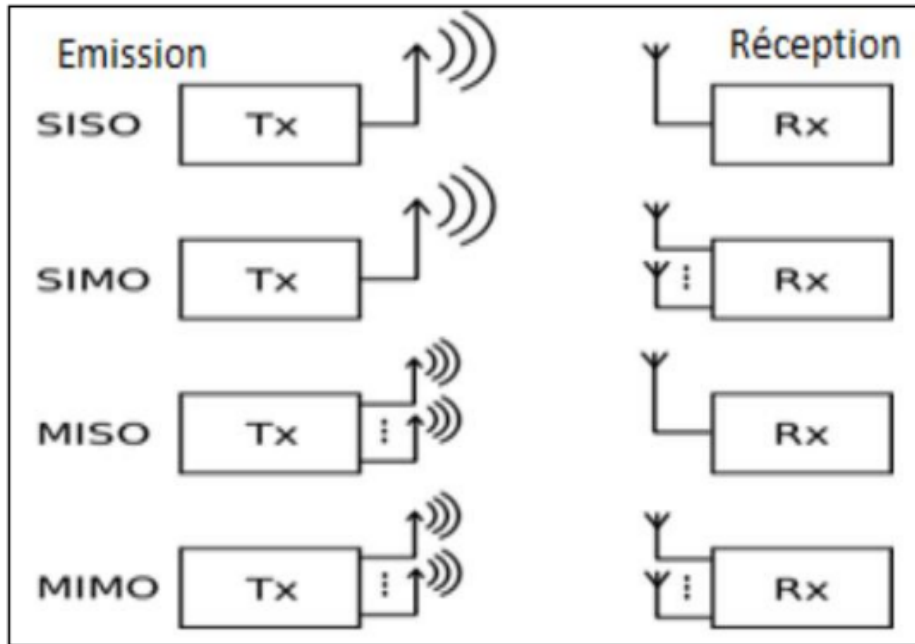


FIG. 2.7 : Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO [11].

## 2.4 Architecture du réseau 4G

L'architecture définie pour le LTE est dite architecture plate, c'est-à-dire qu'elle est constituée uniquement de stations de base. La suppression du contrôleur de stations de base au sein de l'architecture LTE s'explique notamment par la volonté de réduire la latence du système [5].

L'architecture du réseau LTE se compose de trois parties :

1. L'UE
2. Le réseau d'accès (l'E-UTRAN)
3. Le réseau cœur (EPC)

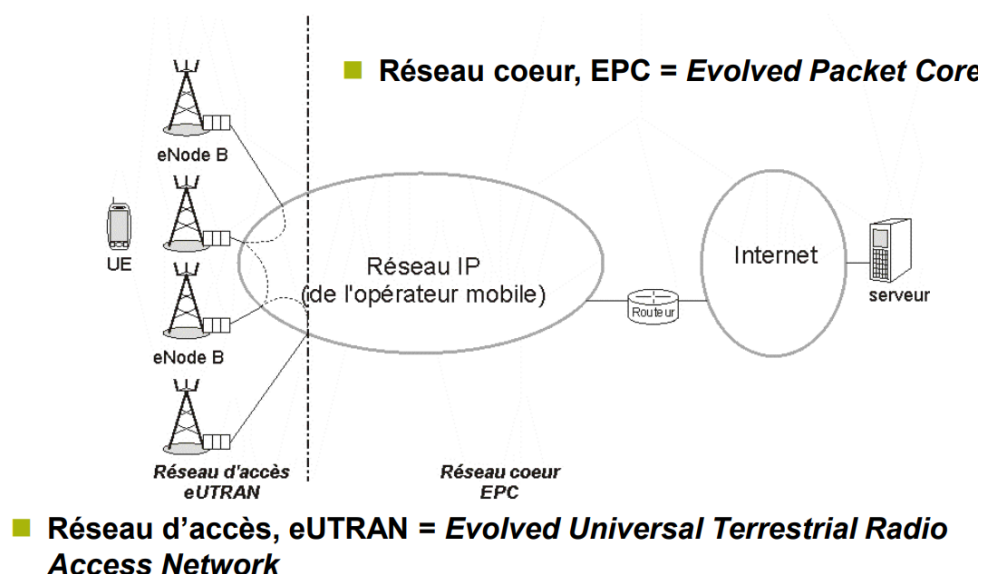


FIG. 2.8 : Architecture du réseau 4G.

### 2.4.1 UE

Les UEs sont les équipements mobiles (smartphone, tablette, laptops) compatibles au réseau 4G.

### 2.4.2 Réseau d'accès (l'E-UTRAN)

Cette partie du réseau est constituée de l'ensemble des eNode-B qui sont connectés à un même réseau IP, et peuvent connecter entre eux. Ce réseau d'accès est nommé dans la norme l'E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network).

#### 1-L'eNodeB

L'entité eNodeB est la partie visible du réseau de l'opérateur, elle est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM. L'eNodeB gère les ressources radio et l'attribution des ressources pour chaque utilisateur. Pour cela, l'entité eNodeB utilise les mesures effectuées par le mobile UE pour décider du déclenchement d'un changement de cellule en cours de session (handover). En plus de gérer la mobilité des utilisateurs en cours de session, les mesures permettent de réaliser un contrôle en puissance et d'assister l'entité eNodeB à ordonnancer les flux vers les mobiles UE.

### 2.4.3 Réseau cœur (EPC)

Le réseau cœur EPC utilise des technologies Tout-IP, c'est-à-dire se base sur les protocoles Internet. Il est constitué du :

#### 1- PDN-GW (Packet Data Network Gateway)

La P-GW a pour premier rôle d'allouer une adresse IP à l'UE. Elle permet également de mettre en application la qualité de service. Elle supporte la fonction appelée Deep Packet Inspection (en français, inspection approfondie des paquets), qui analyse les paquets du plan usager, identifie la nature des flux, applique les règles prédéfinies pour tous les clients ou par client en

fonction de l'offre souscrite. Par exemple, la P-GW peut décider de brider le débit d'un flux de type P2P en fonction de la politique de l'opérateur ou même détecter un usage soumis à la souscription d'une option tel que l'usage modem [5].

Par ailleurs, la P-GW permet de mettre en œuvre la facturation par flux de données, conformément aux règles définies par le PCRF (Policy & charging rules function : un nœud optionnel permet d'appliquer des règles de gestion évoluées sur le trafic et la facturation de l'abonné en fonction de son offre). Enfin, elle sert de point d'ancrage pour l'interfonctionnement avec d'autres technologies d'accès non 3GPP, celles que COMA2000 et WiMax [5].

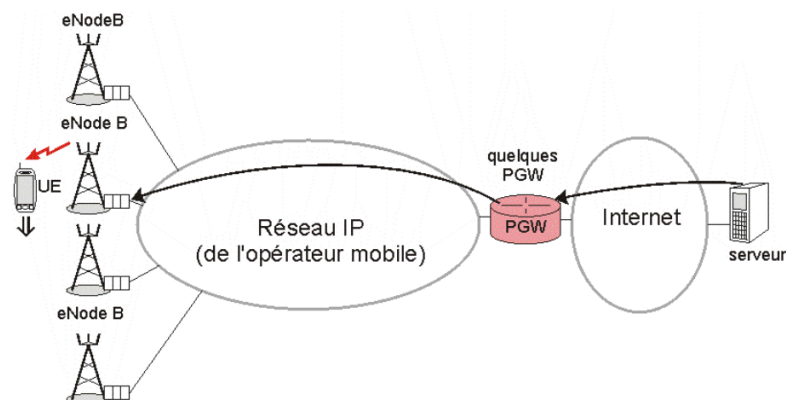


FIG. 2.9 : Passerelle d'accès ou PGW.

### 2- S-GW (Serving Gateway)

Lorsque l'UE est en mobilité entre plusieurs eNodeBs, il doit avertir le PGW de router vers un nouveau eNodeB. Ce reroutage nécessite l'échange des messages de signalisation. Pour éviter cela au niveau du PGW, le S-GW est introduit en intermédiaire. Ce dernier permet donc la collecte des données envoyées par différents eNodeBs. L'avantage est qu'en cas où l'UE se déplace dans la même zone, le S-GW gère cette mobilité.

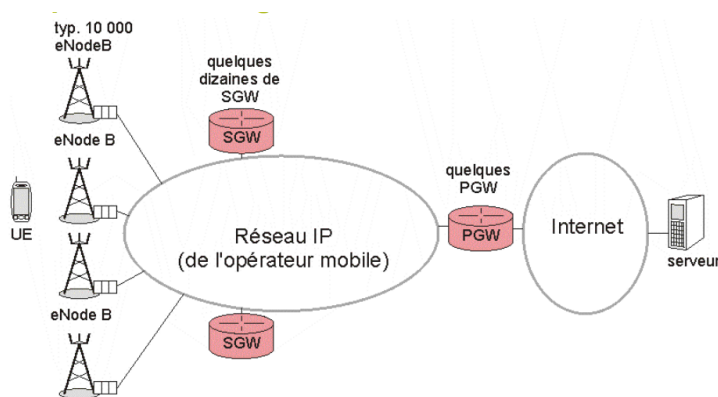


FIG. 2.10 : passerelles régionales ou SGW.

### 3- HSS (Home Subscriber Server)

L'entité HSS est une base de données assurant le stockage des données propres à chaque abonné. Les principales données stockées comprennent les identités de l'abonné, les paramètres d'authentification et le profil de service. Lors de la souscription au réseau EPS, le mobile se

voit attribuer une identité privée IMSI (International Mobile Subscriber Identity) à laquelle est associé un profil de service et une clé secrète Ki. Lors de l'attachement, l'entité MME contacte l'entité HSS pour récupérer les valeurs d'authentification calculées au niveau du HSS à partir de la clé secrète Ki. Une fois authentifiée, l'entité HSS transmet le profil de service du mobile au MME et conserve l'adresse du MME sur lequel l'abonné (IMSI) est enregistré [12].

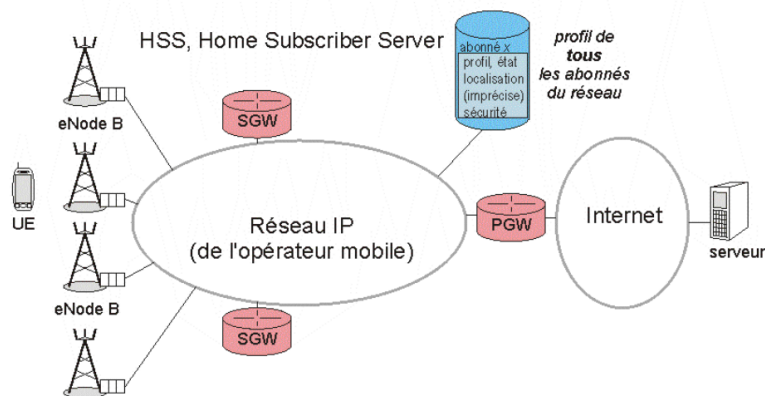


FIG. 2.11 : HSS (Home Subscriber Server)

#### 4- MME (Mobility Management Entity)

L'entité MME contrôle le droit d'accès des mobiles UE et les services accessibles pour chaque mobile UE dans le réseau de l'opérateur (PLMN Public Land Mobile Network) [12].

Le droit d'accès au réseau (Home HPLMN ou Visité VPLMN) s'effectue via la procédure d'attachement. Lors de l'attachement, l'entité MME récupère le profil et les données d'authentification du mobile stockés dans l'entité HSS (Home Subscriber Server) et procède à l'authentification du mobile. Cette procédure permet au mobile UE d'authentifier le réseau sur lequel il se connecte et au réseau d'authentifier le mobile UE [5].

Si la double authentification aboutie, l'entité MME sauvegarde le contexte du mobile UE. Le contexte contient l'abonnement du profil du mobile UE (profil récupéré auprès du HSS) ainsi qu'un ensemble d'informations sur les capacités du mobile UE, la localisation du mobile UE, son identifiant et les clés de sécurité dérivées.

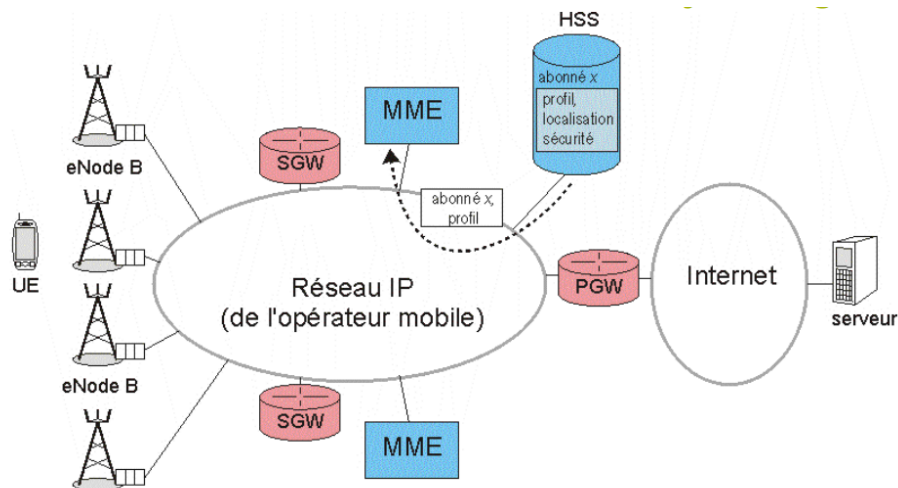


FIG. 2.12 : Le contrôleur de mobilité MME, Mobility Management Entity

## 2.4.4 Le handover

Le handover est l'ensemble des algorithmes et des procédures qui assurent la continuité de la connexion entre un UE en mobilité et le réseau, tout en étant sensible à la congestion. Il garantit une transition fluide pour assurer une communication vocale sans interruption, ce qui en fait un composant essentiel dans un système de communication mobile.

Il existe trois principaux types de handovers dans LTE :

### 2.4.4.1 Intra-LTE handover

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

**Intra-MME/SGW : Handover avec l'interface X2** Ce type de handover utilise l'interface X2 entre deux eNodeB lorsque disponible, sans intervention de l'EPC. La libération des ressources au niveau de l'eNodeB source est déclenchée par l'eNodeB cible [15].

**Intra-MME/SGW : Handover avec l'interface S1** En l'absence de l'interface X2 et lorsque les eNodeB source et cible sont sous le même MME/SGW, le transfert est réalisé via l'interface S1. Le S-eNB (eNodeB source) initie le transfert via le point de référence S1-MME, sans modification par l'EPC des décisions prises par le S-eNB [15].

### 2.4.4.2 Inter-LTE handover

Le handover se produit vers d'autres nœuds LTE.

**Inter-MME handover** Ce type de handover implique deux MME : la source et la cible, lorsque l'UE se déplace entre deux MME différents mais connectés au même SGW (Serving Gateway) [15].

**Inter-MME/SGW Handover** Similaire à l'Inter-MME, mais ici l'UE doit passer d'un MME/SGW à un autre MME/SGW, où l'eNodeB source est dans un MME/SGW et l'eNodeB cible dans un autre [15].

### 2.4.4.3 Inter-RAT handover

Ce type de handover se produit entre différentes technologies radio.

**Handover d'eUTRAN à l'UTRAN** Lors de ce handover, l'eNodeB source est connecté à la MME source et au SGW, tandis que le RNC cible est connecté au SGSN cible et au SGW cible, avec des ressources réservées dans l'UTRAN lors du transfert [15].

## 2.4.5 LTE-Advanced

### 2.4.5.1 Introduction

LTE-Advanced, abrégé LTE-A, est une évolution de la norme LTE qui vise à améliorer la capacité du réseau pour atteindre véritablement les performances 4G [20]. Il introduit plusieurs technologies et améliorations pour répondre aux demandes croissantes de débit et de qualité de service.

	<b>LTE</b>	<b>LTE Advanced</b>
<b>Bande passante prise en charge</b>	1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, et 20 MHz	1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, et 20 MHz
<b>Agrégation des porteuses</b>	Non supporté	Possibilité de combiner jusqu'à 5 fréquences porteuses
<b>Modulation d'Amplitude en quadrature (QAM)</b>	QPSK ; 16 QAM ; 64 QAM	256 QAM
<b>Configuration d'antenne MIMO</b>	MIMO 4×4 Downlink ; 2×2 Uplink	MIMO 8×8 Downlink ; 4×4 Uplink

TAB. 2.2 : Comparaison entre LTE et LTE Advanced

### 2.4.6 Les techniques du LTE-Advanced

Le LTE Advanced apporte une amélioration supplémentaire à LTE afin d'augmenter les débits de données de pointe à 1 Gbps grâce à :

#### 2.4.7 L'agrégation de porteuses

L'agrégation de porteuses est la principale distinction entre LTE et LTE Advanced, une méthode qui permet aux réseaux LTE Advanced d'accroître la bande passante totale en combinant plusieurs porteuses (canaux). L'agrégation de cinq (5) porteuses est possible avec LTE Advanced, ce qui lui permet d'offrir une bande passante de porteuse maximale de 100 MHz en combinant cinq porteuses de 20 MHz chacune.

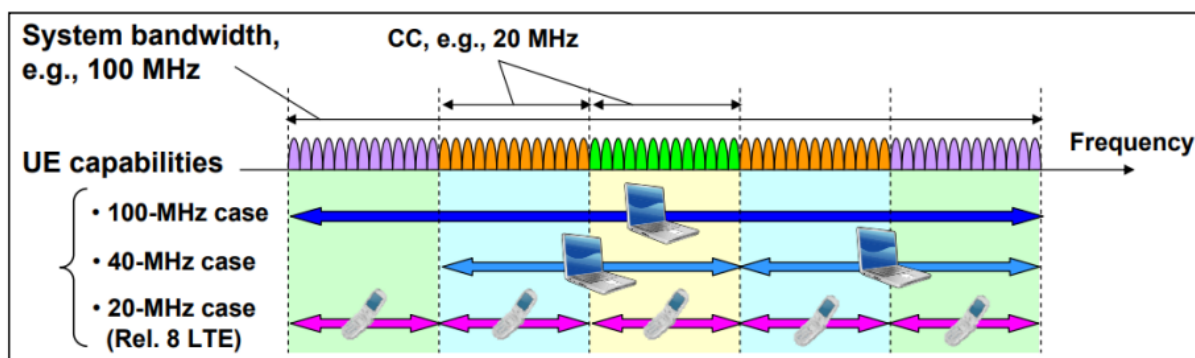


FIG. 2.13 : Transmission à bande passante plus large grâce à l'agrégation de porteuses [14].

### 2.4.8 Modulation d'amplitude en quadrature supérieure (QAM)

La technologie LTE utilise la modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK), la modulation d'amplitude en quadrature 16 (QAM) et la modulation 64 QAM. LTE Advanced utilise 256 QAM, une modulation d'ordre supérieur à la LTE d'origine, pour générer des débits binaires beaucoup plus élevés par symbole [15].

### 2.4.9 MIMO d'ordre supérieur

Les réseaux LTE Advanced utilisent 8 x 8 MIMO dans la liaison descendante par rapport à 4 x 4 dans le LTE. Cela signifie que les réseaux LTE Advanced peuvent avoir huit (8) couches de communication de la station de base au téléphone mobile. Dans le sens de la liaison montante, du téléphone à la station de base, les réseaux LTE Advanced utilisent une configuration MIMO de 4 x 4, ce qui est supérieur au 2 x 2 utilisés par le LTE d'origine [16].

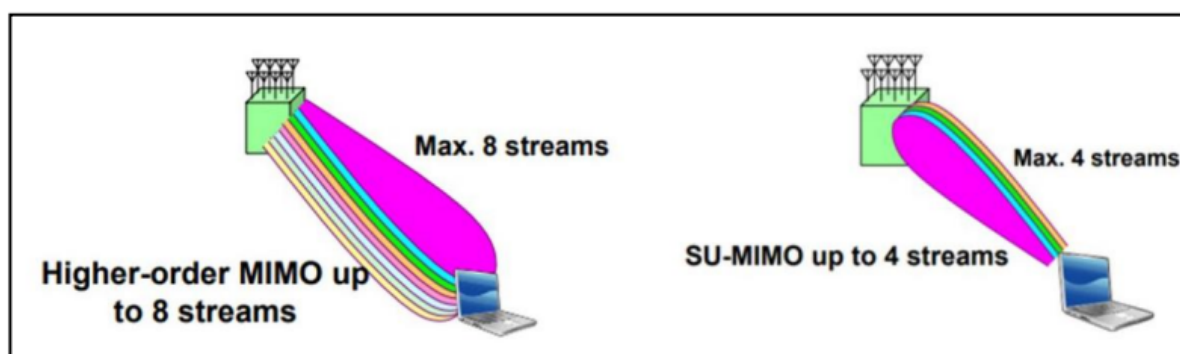


FIG. 2.14 : Techniques MIMO améliorées dans downlink et uplink [14].

### 2.4.10 Le concept coordinated multipoints (CoMP)

C'est une technique DL/UL pour transformer les interférences intercellules en signal utile, améliorer la capacité du système et le débit des utilisateurs aux frontières de la cellule où les performances peuvent être dégradées. Cette technique offre une coordination entre un certain nombre d'eNBs géographiquement séparé. De cette manière, un UE au niveau du bord d'une cellule est capable d'être desservi par deux ou plusieurs eNBs pour améliorer les signaux de

réception et de transmission et augmenter le débit, particulièrement dans des conditions de bord de la cellule [14].

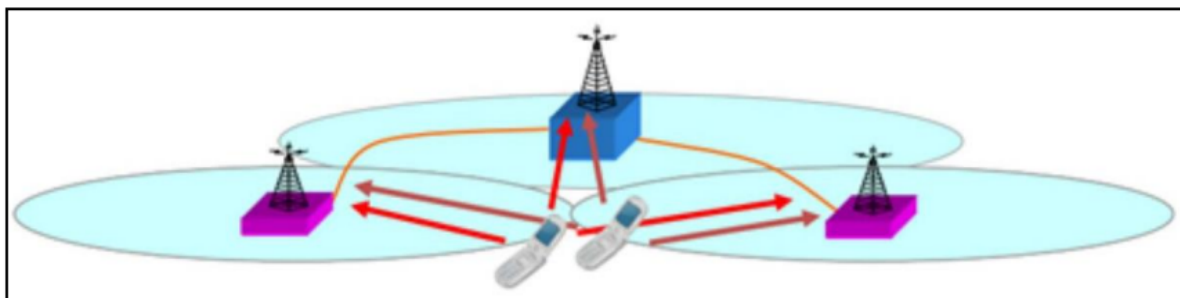


FIG. 2.15 : Schéma de réception CoMP en liaison montante [14].

### 2.4.11 Le support des nœuds relais

Dans le LTE-Advanced, la possibilité de la planification efficace des réseaux hétérogènes (heterogeneous network), c'est-à-dire un mélange de grandes et petites cellules, est augmentée par l'introduction des nœuds de relais (RNs). Les nœuds de relais sont des stations de base de faible puissance qui fournissent des capacités augmentées aux bords de cellules et aux secteurs éloignés en l'absence de raccordement de fibre. Le nœud relais est connecté à l'eNB donneur (DeNB) via une interface radio,  $U_n$ , qui est une modification de l'interface aérienne E-UTRAN  $U_u$ . Ainsi, dans la cellule distributrice, les ressources radio sont partagées entre les UE desservies directement par le DeNB et les nœuds relais. Lorsque  $U_u$  et  $U_n$  utilisent différentes fréquences, le nœud relais est appelé RN de type 1a. Pour le RN de type 1,  $U_u$  et  $U_n$  utilisent les mêmes fréquences. Dans ce dernier cas, il existe un risque élevé d'auto-interférence dans le nœud de relais, lors de la réception sur  $U_u$  et de la transmission sur  $U_n$  en même temps (ou vice versa). Cela peut être évité en partageant le temps entre  $U_u$  et  $U_n$ , ou en ayant différents emplacements de l'émetteur et du récepteur. Le RN supportera dans une large mesure les mêmes fonctionnalités que l'eNB, cependant, le DeNB sera responsable de la sélection des MME [16].

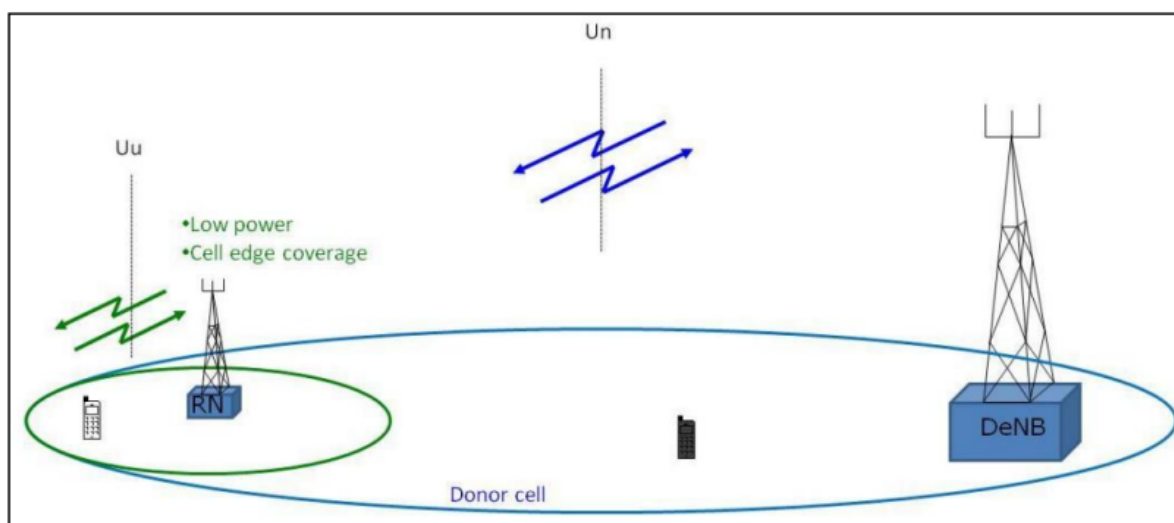


FIG. 2.16 : Exemple d'un nœud relais [16].

### 2.5 Limitations du réseau 4G

Les réseaux 4G présentent des contraintes qui impactent la qualité du service. Il sera nécessaire de corriger ces limites à mesure que nous progressons vers l'adoption des réseaux 5G, qui proposent des améliorations plus significatives en termes de vitesse, de capacité et de fiabilité. Les principales raisons qui expliquent pourquoi les performances en 4G sont limitées sont les suivantes :

#### Haute consommation d'énergie

Les réseaux 4G nécessitent une consommation de batterie supérieure à celle des technologies de réseau précédentes telles que 2G et 3G. Effectivement, les réseaux 4G requièrent une consommation d'énergie accrue afin de maintenir une connexion stable et un transfert de données à grande vitesse.

#### Couverture limitée

La couverture des réseaux 4G est limitée, et même dans les zones où ils sont disponibles, la couverture peut ne pas être homogène. Les obstacles comme les constructions et les arbres peuvent altérer les signaux et diminuer la vitesse de l'échange des données.

#### Brouillage des signaux

Les signaux 4G sont susceptibles de subir des perturbations provenant de différentes sources telles que les grandes constructions, les éléments naturels et d'autres appareils électroniques. La présence de cette interférence peut causer des délais de transfert de données et des difficultés de connectivité.

#### Capacité limitée

La capacité de réseau des réseaux 4G est restreinte, ce qui peut causer une congestion du réseau, notamment pendant les heures de pointe. Cela peut entraîner une diminution des vitesses de transfert de données et une augmentation des connexions abandonnées.

#### Le coût

La technologie 4G est relativement coûteuse à mettre en œuvre et à maintenir, et ce coût est souvent répercuté au consommateur par des frais d'abonnement élevés.

#### Problèmes de sécurité

L'augmentation de l'utilisation des appareils mobiles et d'Internet a entraîné une préoccupation majeure quant à la sécurité des réseaux 4G. Les individus malveillants ont la capacité d'exploiter les faiblesses du réseau afin de dérober des informations personnelles ou de mener des attaques informatiques.

### Soutien limité de l'IOT

Malgré leur capacité limitée, les réseaux 4G peuvent accueillir l'Internet des objets (IdO), mais ils ne pourraient pas accueillir le nombre élevé d'appareils qui devraient se connecter à Internet à l'avenir.

## 2.6 Conclusion

La 4G commence à montrer ses limites face à la croissance actuelle de l'utilisation, précisément au moment où les nouvelles technologies sont sur le point d'imposer de nouvelles exigences considérables aux réseaux. En fait, le succès de nouvelles technologies telles que les appareils de l'internet des objets (IoT), les applications d'intelligence artificielle basées sur le web et les véhicules et machines autonomes repose sur la disponibilité d'un réseau 5G robuste et performant, avec ses vitesses accrues, ses temps de latence réduits et sa plus grande capacité. Les technologies qui fourniront la prochaine génération de services en nuage et d'expériences connectées, telles que la réalité augmentée et virtuelle, auront besoin des performances et de l'architecture flexible de la 5G pour atteindre leur plein potentiel.

Dans le prochain chapitre, nous allons aborder les principales caractéristiques de la technologie mobile 5G.

## Chapitre 3

# Présentation et Description de la 5-ème Génération

### 3.1 Introduction

Le monde d'aujourd'hui veut atteindre un état d'intelligence et de connectivité totales. L'augmentation continue et rapide du nombre d'appareils et du trafic rend les réseaux 4G incapables de répondre à ce désir. Cette situation a conduit à l'introduction des réseaux 5G en tant que solution. Le 14 juillet 2020, le Secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-R) a officiellement approuvé la technologie 5G (3GPP), y compris l'Internet des objets à bande étroite (NB-IoT), en tant que Télécommunications mobiles internationales-2020 (IMT-2020).

#### 3.1.1 Exigences et caractéristiques techniques du 5G

#### 3.1.2 Caractéristiques du 5G

La technologie 5G donne accès à des débits dépassant largement ceux de la précédente génération 4G, avec des temps de latence très courts et une haute fiabilité, tout en augmentant la capacité du réseau par surface couverte.

##### 3.1.2.1 Débits du réseau 5G

Les débits du réseau 5G sont supérieurs à ceux obtenus avec la 4G, ce qui représente une avancée technologique considérable. Le très haut débit offre une expérience améliorée lors du visionnage de vidéos, des jeux en ligne et du divertissement en ligne. Selon l'Arcep, les débits théoriques maximums descendant et ascendant de la 5G sont établis à 20 et 10 Gbit/s respectivement. Dans la réalité, en optant pour la 5G, il est nécessaire de prévoir des débits de 1 Gbit/s en réception et 250 Mbit/s en émission. Les débits 5G révolutionnent également les réalités virtuelles et augmentées.

##### 3.1.2.2 Allocation spectrale

La principale caractéristique de la 5G réside dans la répartition du spectre de fréquence en trois plages :

- La fréquence 1 (FR1) s'étend de 410 MHz à 7 125 MHz.
- La fréquence 2 (FR2) s'étend de 24.25 GHz à 52.6 GHz.
- La fréquence 3 (FR3) s'étend de 52.6 GHz à 116 GHz.

### 3.1.2.3 Latence

La latence est de 4 ms en eMBB et de 0.5 ms en URLLC [17].

### 3.1.2.4 Efficacité spectrale cellulaire

L'efficacité spectrale est de 15 bps/Hz en UL et de 30 bps/Hz en DL [17].

### 3.1.2.5 Les techniques de duplexage

Le duplex à répartition de fréquence (FDD) est supporté par la 5G pour les bandes de fréquences basses et le duplex à répartition temporelle (TDD) pour les bandes de fréquences élevées, à moins de semi-duplex ou duplex intégral.

Si un fonctionnement TDD est utilisé, une seule fréquence porteuse est employée pour la liaison descendante séparée et les transmissions en liaison montante. NR utilise une technique de TDD dynamique où une fente peut être ajustée de manière dynamique vers le haut ou vers le bas d'après la décision de l'ordonnanceur.

Les dispositifs TDD offrent une période de pause où ni les transmissions descendantes ni montantes ne se produisent, ce qui permet de changer la direction de transmission et d'éviter les perturbations à la station de base [18].

Par ailleurs, dans le cas des opérations FDD, des transmissions en liaison montante et descendante se déroulent en même temps, mais avec des fréquences porteuses différentes.

Un mode demi-duplex est également envisageable, où les transmissions sont séparées en fréquence et en temps.

## 3.2 Applications

### 3.2.1 Réseau mobile à haut débit

Le réseau mobile 5G fournira une expérience mobile extrêmement rapide avec des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 10 à 20 Gbps. Ceci est comparable à une connexion Internet via fibre optique, mais sans fil.

### 3.2.2 Véhicules autonomes

Des taxis aux drones et au-delà, la technologie 5G sous-tend la plupart des capacités de la prochaine génération dans les véhicules autonomes. Jusqu'à l'arrivée de la norme cellulaire 5G, les véhicules entièrement autonomes étaient un peu un rêve en raison des limitations de la transmission de données de la technologie 3G et 4G.

Maintenant, les vitesses de connexion rapide à la foudre de la 5G ont rendu les systèmes de transport pour les voitures, les trains et bien d'autres beaucoup plus rapides que les générations précédentes, transformant la façon dont les systèmes et les appareils se connectent, communiquent et collaborent.

### 3.2.3 Fabriques intelligentes

La 5G, avec l'IA et la ML, est prête à aider les usines à devenir non seulement plus intelligentes, mais aussi plus automatisées, efficaces et résilientes. Aujourd'hui, de nombreuses tâches quotidiennes, mais nécessaires associées à la réparation et à l'optimisation de l'équipement, sont transférées aux machines grâce à la connectivité 5G associée aux capacités d'IA et de ML. C'est un domaine dans lequel on s'attend à ce que la 5G soit très perturbante, affectant tout, de l'économie de carburant à la conception des cycles de vie des équipements et de la façon dont les marchandises arrivent à nos maisons.

Par exemple, sur un étage d'usine occupé, des drones et des caméras connectés à des appareils intelligents utilisant l'IoT peuvent aider à localiser et à transporter quelque chose plus efficacement que par le passé et à prévenir le vol.

Non seulement, cela est meilleur pour l'environnement et les consommateurs, mais il libère également les employés de consacrer leur temps et leur énergie à des tâches plus adaptées à leurs compétences.

### 3.2.4 Villes intelligentes

L'idée d'un environnement urbain hyper-connecté qui utilise les vitesses du réseau 5G pour stimuler l'innovation dans des domaines tels que l'application de la loi, l'élimination des déchets et l'atténuation des catastrophes devient rapidement une réalité.

Certaines villes utilisent déjà des capteurs 5G pour suivre les modèles de trafic en temps réel et ajuster les signaux, ce qui aide à guider le flux de trafic, à minimiser les embouteillages et à améliorer la qualité de l'air.

Dans un autre exemple, les réseaux électriques 5G surveillent l'offre et la demande dans des zones fortement peuplées et déploient des applications d'IA et de ML pour « apprendre » à quel moment l'énergie est en demande élevée ou faible.

Il a été démontré que ce processus a un impact significatif sur la conservation de l'énergie et les déchets, réduisant potentiellement les émissions de carbone et aidant les villes à atteindre leurs objectifs de durabilité.

### 3.2.5 Soins de santé intelligents

Les hôpitaux, les médecins et l'industrie de la santé dans son ensemble bénéficient déjà de la vitesse et de la fiabilité des réseaux 5G tous les jours. Un exemple est le domaine de la chirurgie à distance qui utilise la robotique et un flux en direct haute définition connecté à Internet via un réseau 5G.

L'autre est le domaine de la santé mobile, où la 5G donne aux professionnels de santé sur le terrain un accès rapide aux données des patients et à l'historique médical, leur permettant de prendre des décisions plus intelligentes, plus rapides et potentiellement de sauver des vies.

### 3.3 Technologies émergentes des réseaux 5G

#### 3.3.1 Millimeter wave (mmWave)

La nouvelle radiofréquence 5G (5G NR) ou millimeter wave est l'une des technologies essentielles pour les réseaux mobiles 5G en raison de sa capacité à atteindre les débits élevés nécessaires pour la cinquième génération de réseaux mobiles. La technologie de pointe pour la couche physique offre un large éventail de fréquences radio allant de 30 à 300 GHz [19].

Toutefois, il est prévu que les bandes de fréquences allant de 24 GHz à 100 GHz soient utilisées en premier lieu pour la 5G. Les antennes intelligentes directionnelles utilisées dans la technologie mmWave sont des dispositifs qui peuvent éviter les effets de propagation et atteindre des spectres de haute fréquence [20].

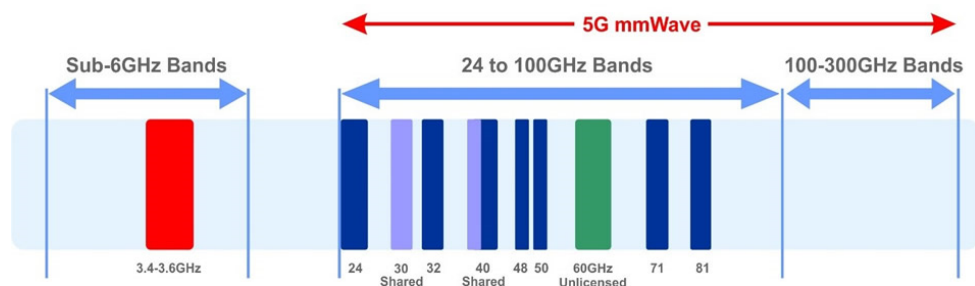


FIG. 3.1 : Bandes de fréquences 5G new radio

#### 3.3.2 Massive multiple input multiple output (Massive MIMO or mMIMO)

L'industrie, dans le but d'améliorer l'efficacité et la capacité de la communication sans fil, a étudié en profondeur le Massif MIMO pour le futur réseau 5G.

Ce terme désigne un réseau d'antennes comprenant plusieurs dizaines ou centaines d'antennes. On peut définir le MIMO massif comme une variante du beamforming ou du MU-MIMO amélioré qui permet de connecter plusieurs dispositifs [21].

L'objectif est de mettre en place des stations de base qui communiquent en même temps avec un grand nombre d'utilisateurs sur la même fréquence.

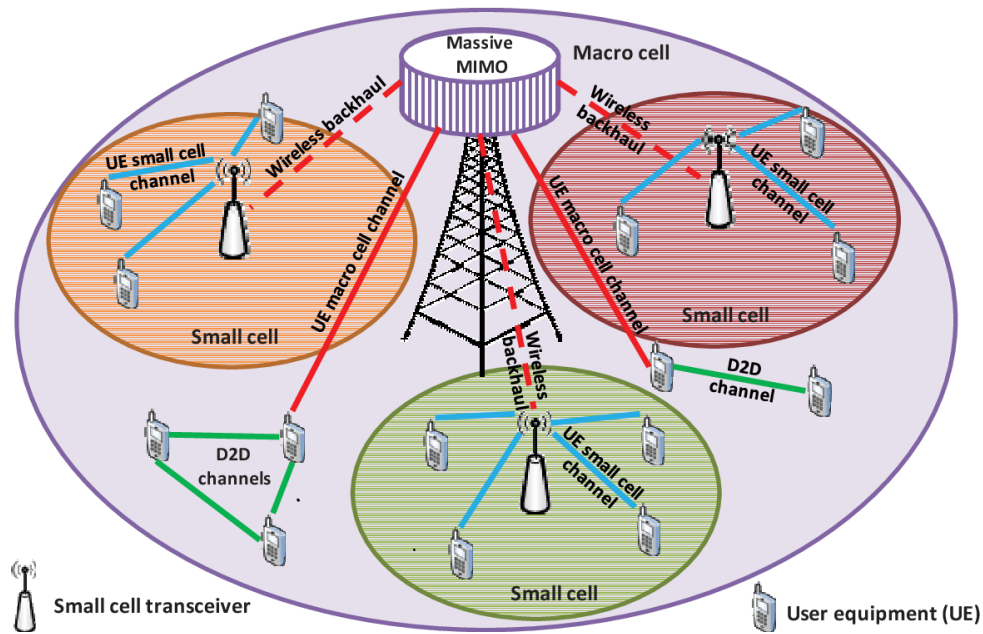


FIG. 3.2 : Concept MIMO massif.

### 3.3.3 Ultra Dense Network (UDN)

Un UDN est un réseau dont la densité de ressources radio est beaucoup plus élevée que celle des réseaux traditionnels [22].

Les raisons pour lesquelles les réseaux ultra-denses sont choisis sont que la diffusion de la technologie mmWave ne peut pas dépasser 100 mètres en raison de la détérioration de la propagation en mmWave [23]. En outre, les stations de base (BS) équipées d'antennes mMIMO requièrent une quantité d'énergie considérable pour fournir un service à tous les utilisateurs à l'intérieur de la macrocellule [24]. En conséquence, les réseaux mobiles 5G sont parfaitement adaptés aux réseaux de petites cellules. Il est prévu que la densité des stations de base 5G augmente considérablement jusqu'à 40 ou 50 BS/Km<sup>2</sup> [24].

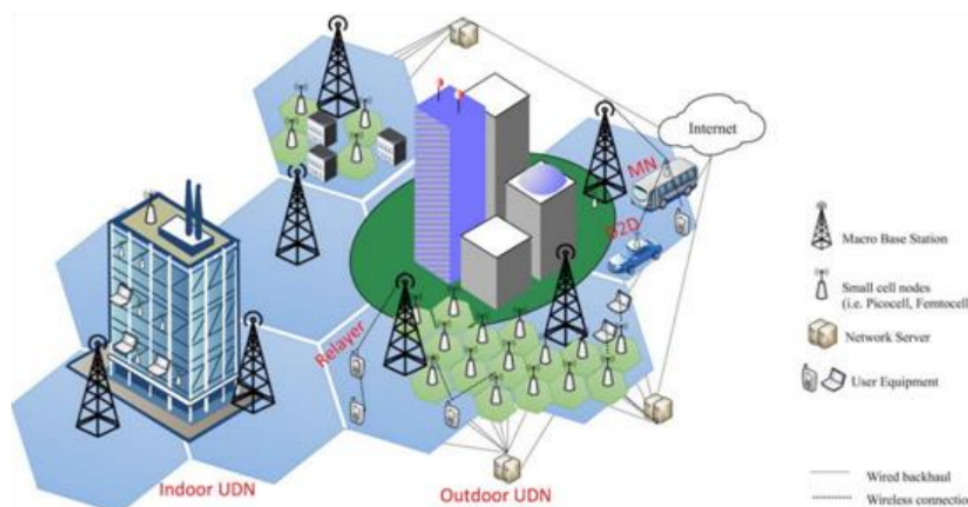


FIG. 3.3 : Exemple d'un réseau UDN [25].

### 3.3.4 Architecture

#### 3.3.4.1 Architecture générale

L'architecture 5G est basée sur trois entités principales : le réseau d'accès radio (NG-RAN), le cœur de réseau (5GC) et l'équipement utilisateur (UE).



FIG. 3.4 : Architecture du réseau 5G.

#### 3.3.4.2 Architecture 5G Non-autonome (NSA)

La 5G NSA implique l'utilisation continue du cœur de réseau 4G LTE de l'opérateur tout en ajoutant progressivement des antennes 5G. Cela permet notamment l'utilisation de hautes fréquences en 5G NR. Dans cette catégorie d'architecture, la station de base NR (gNB) se connecte à la station de base LTE (eNB). Cette approche est généralement moins coûteuse que l'architecture autonome (SA).

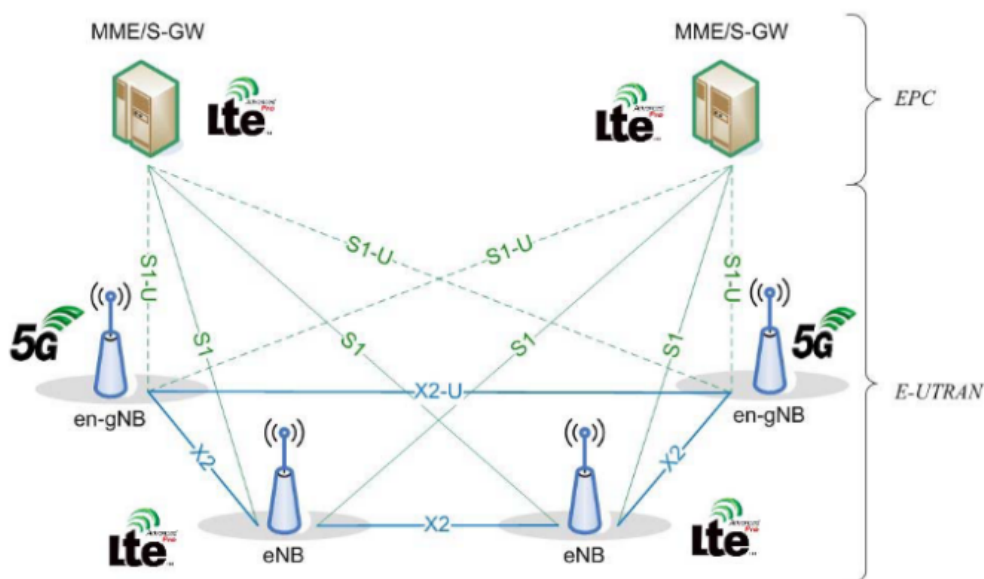


FIG. 3.5 : Architecture NSA pour système 5G [26].

### 3.3.4.3 Architecture 5G Autonome (SA)

La 5G SA, ou 5G Standalone, représente l'idéal du déploiement de la 5G, où un appareil peut utiliser les technologies 5G sur les basses et les hautes fréquences, avec un cœur de réseau entièrement migré vers la 5G NR. Dans cette configuration, l'appareil ne dépend plus des technologies de la 4G LTE. Toutefois, cette transition exige des investissements beaucoup plus importants et ne sera donc disponible qu'à long terme.

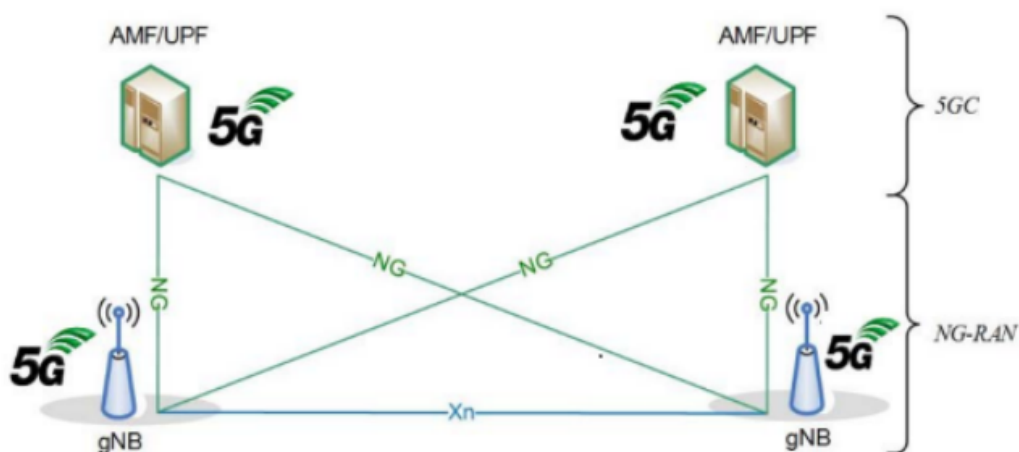


FIG. 3.6 : Architecture SA pour système 5G [27].

### 3.3.5 Modes de déploiement du réseau 5G

L'architecture 3GPP pour la 5G offre de nombreuses options de connectivité, offrant ainsi différentes possibilités de déploiement pour un opérateur. Par exemple, un équipement utilisateur (UE) peut se connecter au réseau en utilisant l'accès LTE et/ou l'accès 5G New Radio (NR), qui peut être connecté soit au noyau de paquets évolué (EPC), soit au réseau 5G Core (5GC). Bien que la terminologie des options provienne de la phase d'étude 5G de la version 3GPP 15, elle n'est pas explicitement utilisée dans les spécifications 3GPP. Les options de déploiement sont principalement regroupées en deux catégories [28].

#### 3.3.5.1 Option Autonome (SA)

Dans l'option autonome (SA), il n'y a qu'un seul réseau d'accès indépendant (LTE ou 5G NR) qui est connecté soit à l'EPC, soit au 5GC.

#### 3.3.5.2 Options Non Autonomes (NSA)

Dans les options non autonomes (NSA), les technologies d'accès radio LTE et 5G NR sont présentes, et l'un des réseaux d'accès aide l'autre à se connecter soit à un CPE, soit à un 5GC.

Dans chacune de ces catégories (SA et NSA), plusieurs options de configuration de déploiement sont disponibles.

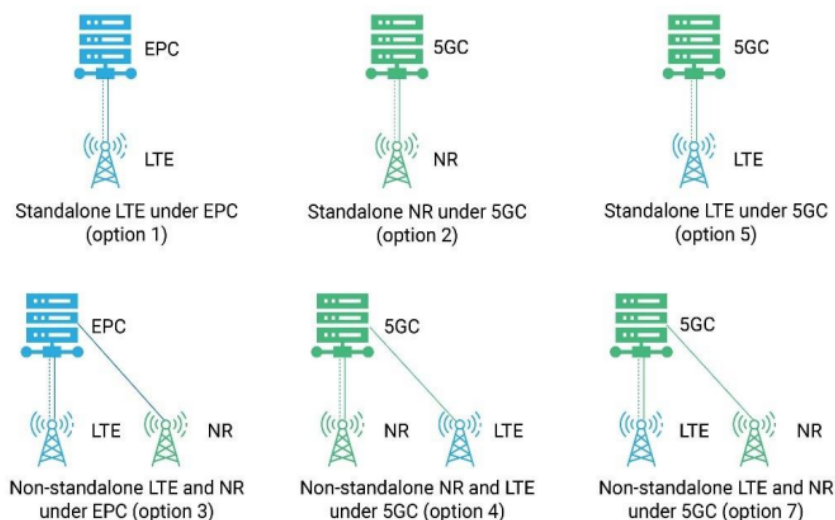


FIG. 3.7 : Un aperçu des options de déploiement de la NSA 5G SA et 5G [29].

### 3.3.6 Modes de déploiement du réseau 5G.

#### 3.3.6.1 Option 1

La première option est un déploiement autonome (SA) et correspond aux déploiements 4G (LTE+EPC) en cours. Autrement dit, il s'agit de la mise en place héritée de la radio LTE connectée à l'EPC et ne concerne aucune connexion avec la 5G. La majorité des acteurs du marché du monde entier seraient désormais en mesure de gérer leurs réseaux en utilisant cette méthode de déploiement.

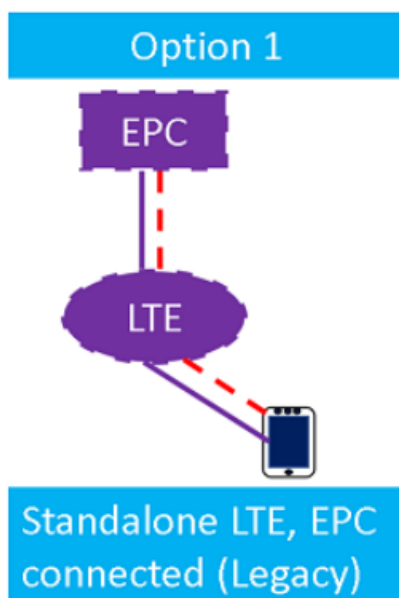


FIG. 3.8 : Option 1 de déploiement SA 5G.

### 3.3.6.2 Option 2

L'alternative 2 est aussi une alternative autonome (AA) et correspond à un accès 5G NR installé dans le réseau et connecté au 5GC. Cette alternative est idéale pour un nouvel acteur dans l'entreprise de fournisseurs de services de communication (CSP), où l'opérateur n'a pas encore de société.

Si un opérateur déploie déjà un système LTE ou même s'il souhaite offrir un service 5G sans inter-travail 4G, cela peut être une option intéressante pour le déploiement complet de la 5G.

L'opérateur peut utiliser ce genre d'option de déploiement pour mettre en place tous les types de cas d'utilisation tels que mMTC, eMBB et URLLC, à condition qu'il dispose du spectre approprié pour chaque type de service.

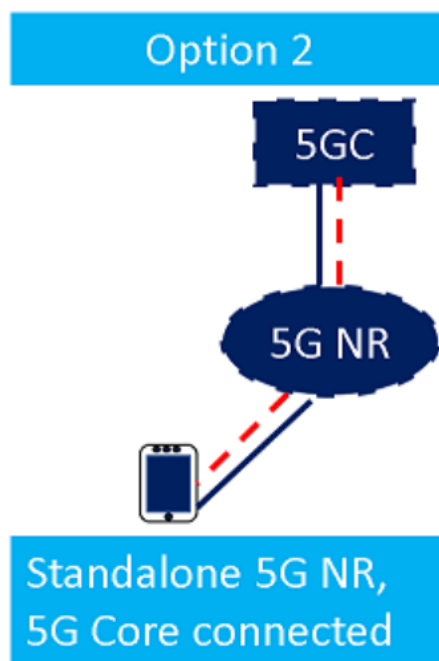


FIG. 3.9 : Option 2 de déploiement SA 5G

### 3.3.6.3 Option 3, 3a, 3x

Un déploiement non autonome (NSA) est proposé dans l'option 3, où les réseaux d'accès radio LTE et 5G NR sont présents, mais sont uniquement contrôlés par le noyau EPC connecté à l'accès LTE. Dans cette configuration, l'accès LTE sert de base de signalisation pour le plan de commande.

Pour la 5G NR, il est possible de fournir le trafic de données utilisateur (User Plane) vers l'UE en utilisant LTE et la 5G NR. La signalisation EPC existante, c'est-à-dire S1-U et S1-C, sera utilisée comme signalisation réseau de base. La distinction entre l'option 3 et l'option 3a réside dans le fait que, dans l'option 3, les informations du plan utilisateur sont transmises à la 5G NR via le LTE RAN, tandis que, dans l'option 3a, les informations du plan utilisateur proviennent directement de l'EPC à la 5G NR.

L'avantage de cette option implique que les charges de données ne peuvent pas être partagées sur un seul porteur de 4G et 5G.

Autrement dit, le LTE RAT sera responsable du traitement d'une partie des données 4G (comme VoLTE), tandis que les stations de base 5G NR ne seront responsables que des cas d'utilisation 4G. Il serait complexe de mettre en place cette option si vous ne disposez pas d'une couverture 5G NR à l'échelle mondiale.

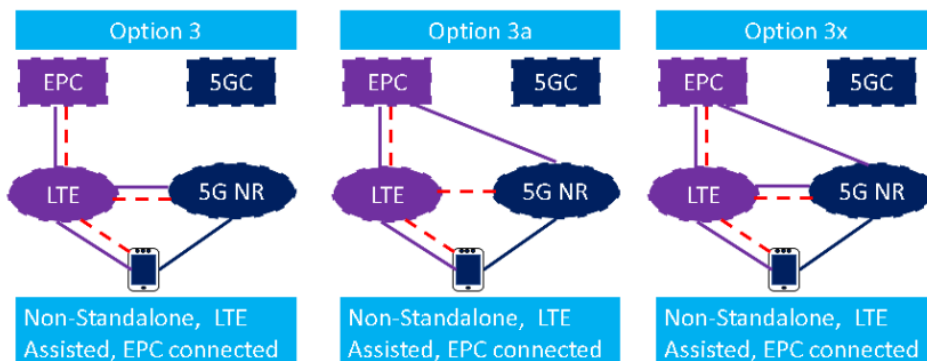


FIG. 3.10 : Option 3 de déploiement NSA 5G [29].

#### 3.3.7 Option 4

Dans cette option de déploiement en mode NSA, les technologies d'accès radio LTE et 5G sont déployées conjointement et contrôlées via le 5GC.

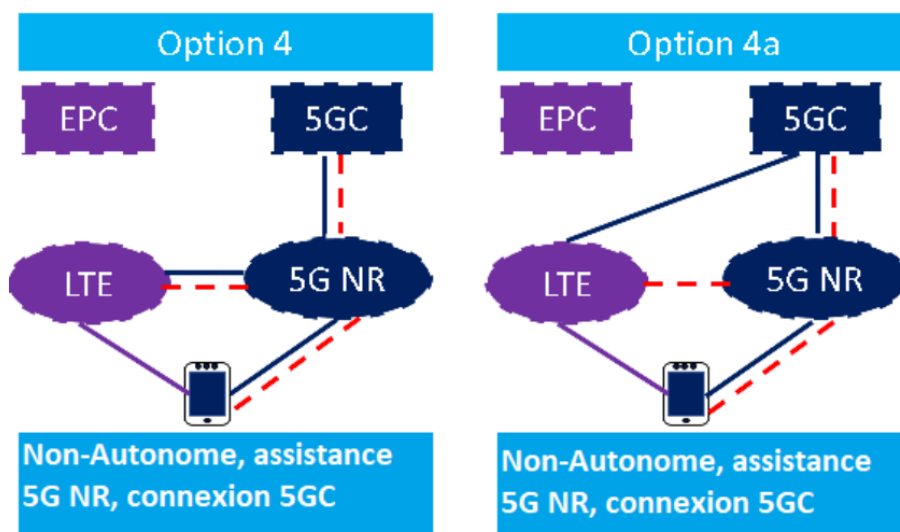


FIG. 3.11 : Option 4 de déploiement NSA 5G [29].

Dans cette option de déploiement, la signalisation de contrôle du LTE RAN est routée vers le 5GC via la 5G. La seule différence entre l'option 4 et 4a (Fig. 3.11) est que dans l'option 4, les connexions de plan utilisateur LTE passent par la 5G, tandis que dans l'option 4a, le trafic de plan utilisateur est directement envoyé du 5GC au LTE RAN.

### 3.3.8 Option 5

L'option 5 est un déploiement SA où nous avons un réseau d'accès radio LTE autonome connecté à 5GC (Fig. 3.12). Dans ce cas, le LTE doit être un réseau d'accès radio LTE évolué (eLTE) qui comprend la nouvelle signalisation 5GC.

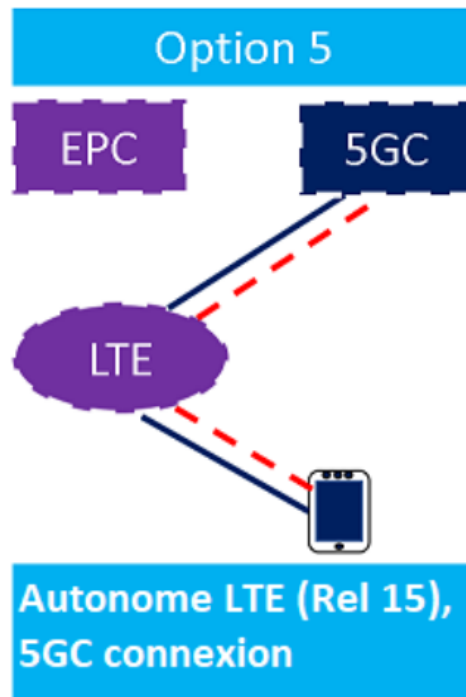


FIG. 3.12 : Option 5 de déploiement SA 5G [30].

Cette option semble peu probable d'être adoptée par un opérateur de réseau, car la plupart des avantages de la 5G proviennent de la migration vers un réseau d'accès 5G.

### 3.3.9 Option 7

Les options 7, 7a et 7x sont des déploiements NSA de la 5G, qui utilisent la nouvelle génération de cœur de réseau (5GC) avec un mélange de radios LTE et 5G. La différence entre ces options réside dans la manière de transférer les données utilisateur à l'UE.

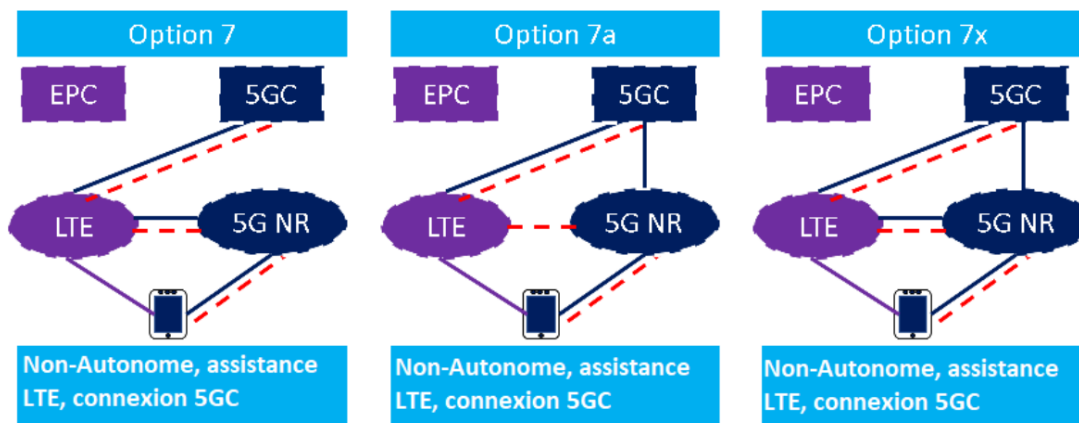


FIG. 3.13 : Option 7 de déploiement SA 5G [30].

**Note**

L'option de déploiement 6 a été retirée des options proposées (Fig. 3.13) et n'est pas mentionnée dans la spécification 3GPP Rel 15. Donc, les appareils 5G ne peuvent pas prendre en charge cette option de déploiement.

**3.3.10 Structure de la trame 5G**

Une trame 5G est définie comme étant d'une durée de 10 ms, divisée en 10 sous-trames d'une durée de 1 ms chacune. Par la suite, chaque sous-trame est séparée en emplacements, comme illustré dans la Figure 3.14.

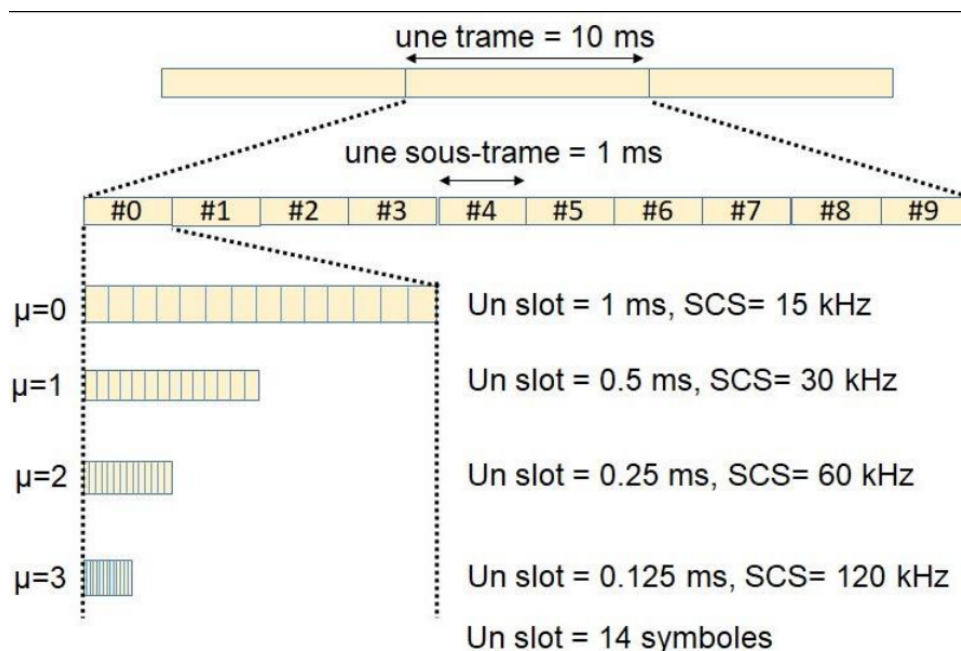


FIG. 3.14 : La trame temporelle 5G-NR

L'espacement entre les sous-porteuses (SCS) influence le nombre de slots par sous-trame, ce qui nous rappelle à la fin de la numérologie.

Il s'agit de la configuration des paramètres de forme d'onde, et les diverses numérolgies sont perçues comme des sous-trames basées sur OFDM qui ont des paramètres variés tels que l'espacement des sous-porteuses, la durée du symbole et la taille du préfixe cyclique respectivement.

### 3.4 Techniques d'accès

On définit une trame 5G comme ayant une durée de 10 ms. Elle est divisée en 10 sous-trames d'une durée de 1 ms chacune. Par la suite, chaque sous-trame est séparée en emplacements, comme illustré dans la Fig. II.8 [33]. Dans le réseau 5G NR, la version spécifique d'OFDM utilisée pour la liaison descendante est le préfixe cyclique OFDM (CP-OFDM) [33]. Le DFT-S-OFDM, également connu sous le nom de SC-FDMA, est employé pour la connexion ascendante [33].

Il est essentiel de déplacer les porteuses afin de maintenir l'orthogonalité des porteuses. Ainsi, la 5G NR implique l'utilisation d'un espacement souple entre les sous-porteuses afin de prendre en charge de manière adéquate les diverses bandes de fréquence et modèles de déploiement de la 5G.

### Modulation QAM

La modulation d'amplitude en quadrature permet d'augmenter le débit de données en utilisant des ordres de modulation élevés. Les formats de modulation d'amplitude en quadrature utilisés dans la 5G incluent 16QAM, 64QAM et 256QAM [34]. L'utilisation de 256 QAM se limite à la qualité de la liaison et diminue à 64 QAM, puis 16 QAM, à mesure que la liaison se détériore. Ainsi, il y a un équilibre entre la vitesse de transmission des données et la résistance au bruit.

## II.9 Le handover

Pour des raisons telles que l'équilibrage de charge, les conditions radio modifiées ou le déplacement de l'utilisateur, il peut être nécessaire de procéder à un handover dans les réseaux 5G. En d'autres termes, lorsque le réseau actuel de l'UE ne peut plus le fournir ou lorsqu'un réseau plus adapté est identifié, le réseau de service initiera le processus de transfert de l'appareil. Cette situation peut survenir, par exemple, lorsque l'utilisateur se déplace ou lorsque plusieurs appareils sont connectés en même temps au même réseau.

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

Ce type de handover est basé sur l'interface Xn qui relie deux RANs. Cette interface définit les protocoles de handover pour les réseaux 5G, permettant la transition transparente d'un UE entre différents réseaux d'accès radio (RAN) au sein du même système de réseau 5G. L'interface peut être utilisée pour la livraison de messages pendant les handovers inter-RAN, dans lesquels le réseau central et son AMF restent inchangés [35].

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

Pour un handover, les deux RAN ne communiquent pas directement comme dans la variation basée sur Xn lorsqu'ils utilisent l'interface N2. Plutôt que cela, toutes les communications sont transmises par le 5GC ou l'UE. Il est possible d'utiliser un handover basé sur N2 lorsque le réseau source et le réseau cible ne sont pas connectés directement, ou lorsque le handover basé sur Xn a déjà échoué. De plus, contrairement à l'autre variation, il peut également inclure un changement AMF dans le réseau cœur, qui transfère les capacités de sécurité de l'UE à un nouvel AMF [35].

### II.9.3 Inter-5G handovers

Pour garantir une compatibilité rétroactive avec l'infrastructure 4G/LTE, la spécification 5G établit les modes de transfert d'un UE entre l'EPC du réseau 4G et le 5GC. Selon les capacités d'une UE, il est possible de réaliser l'interopérabilité entre les deux réseaux par enregistrement simple ou double. Un dispositif enregistré en mode double (dual registration mode) gère en même temps deux contextes de sécurité distincts, l'un pour chaque système. Cela facilite le transfert entre les deux réseaux, mais demande davantage de stockage de données du côté de l'UE. De la même manière, en mode d'enregistrement basique, l'appareil ne garde que le suivi d'un contexte de sécurité, mais doit effectuer un transfert complet et la procédure d'enregistrement lors de la transition entre les différents réseaux. Compte tenu de la disponibilité des interfaces réseau, il y a diverses variations de la procédure, similaire aux transferts intra-5G abordés précédemment. Comme pour le transfert N2, il n'existe pas de voie directe de communication entre la source et le réseau cible. Au lieu de cela, une connectivité indirecte peut être fournie via l'interface réseau N26 en option entre l'AMF du 5GC et l'entité de gestion de la mobilité (MME) de l'EPC [35].

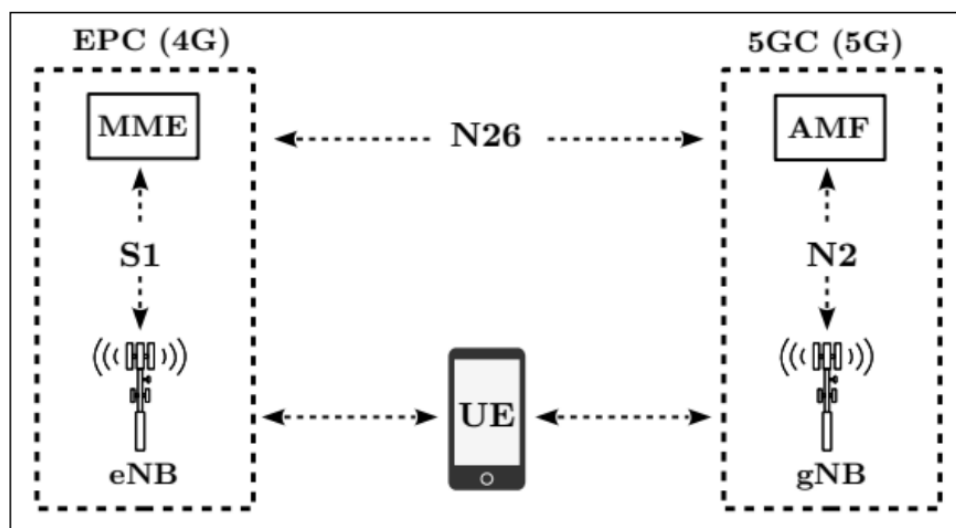


FIG. 3.15 : Aperçu de la connectivité inter-5G entre l'EPC et le 5GC **source35**

## 3.5 Conclusion

Comme mentionné précédemment, l'objectif principal de la 5G est de résoudre les problèmes de saturation de la 4G en milieu urbain et de favoriser la transition numérique de l'industrie et des services.

Elle repose sur diverses méthodes essentielles qui favorisent l'amélioration de la connectivité et de la fiabilité, l'augmentation des débits des transferts d'information et la diminution du temps de latence. Par la suite, Nous aborderons la partie pratique de ce document, où nous allons faire une comparaison entre les technologies mobiles 4G et 5G, en utilisant l'outil de planification Atoll, soulignant les principales disparités entre les deux.

# Chapitre 4

## Simulation et Comparaison 4G vs 5G

### 4.1 Introduction

La planification des réseaux mobiles est une étape d'importance capitale pour le succès d'un opérateur. Cette étape consiste à déterminer le nombre optimal de sites, leur emplacement idéal et la configuration initiale nécessaire pour répondre à la demande des utilisateurs en termes de débit, de qualité de service et de disponibilité du réseau.

Dans ce chapitre, nous allons faire une simulation des réseaux 4G et 5G sous l'outil radio Atoll, suivie par une comparaison.

### 4.2 Description du logiciel ATOLL

Atoll est un outil de dimensionnement et de planification des réseaux cellulaires qui peut être utilisé tout au long du cycle de vie des réseaux (du design à l'expansion et l'optimisation). Le logiciel exploite différentes données en entrée, il permet de choisir le type de réseau à dimensionner (GSM, UMTS, LTE ou 5G) et paramètre différemment en fonction de la technologie choisie. Ainsi, on peut définir le modèle de propagation, le type d'antenne et les caractéristiques des sites. Enfin, après avoir planifié le réseau, l'outil ATOLL permet de réaliser de multiples prédictions, par exemple :

- Couverture par niveau de champ
- Couverture par émetteur
- Prédiction de la capacité de la cellule

### 4.3 Simulation 4G

#### 4.3.1 Création d'un projet LTE Atoll

Lorsqu'on ouvre un nouveau projet sur Atoll, on choisit le type du projet (Fig. 4.1).

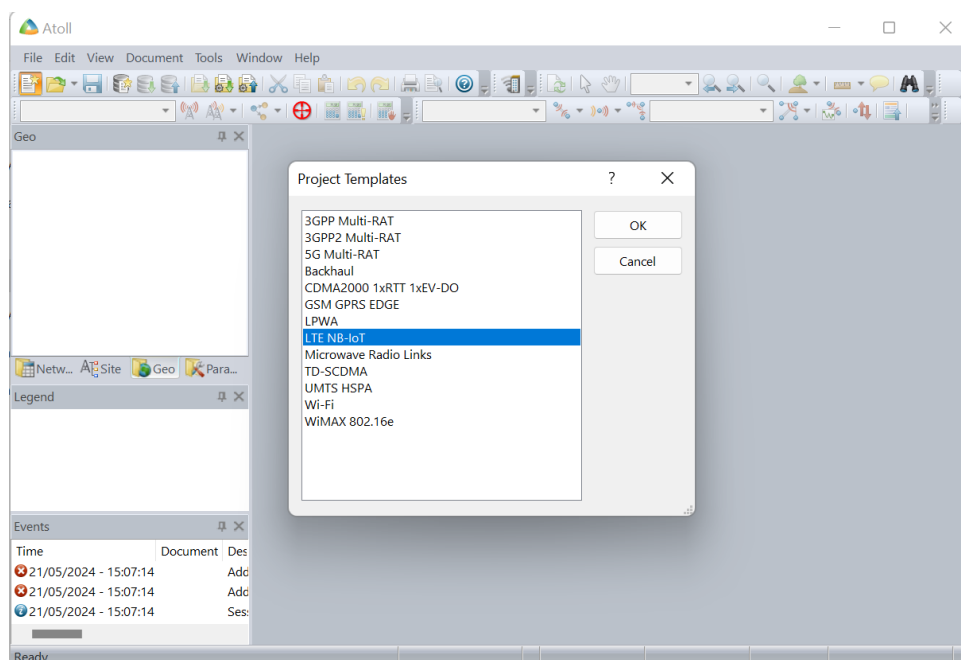


FIG. 4.1 : Création d'un nouveau projet sur Atoll.

### 4.3.2 Réglage des paramètres de la zone

Pour régler les paramètres de la zone, il faut suivre les étapes suivantes : Sélectionnez — Document — Propriétés (Fig. 4.2).

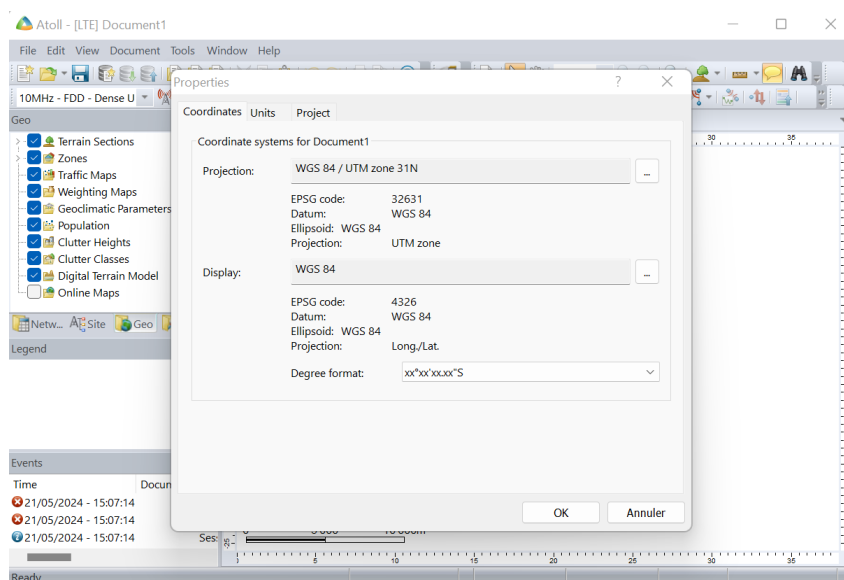


FIG. 4.2 : Choix du système de coordonnées.

- **Projection** : WGS 84 / UTM zone 31N
- **Affichage** : WGS 84 (c'est la projection UTM sur le système géodésique WGS 84)
- **Format des degrés** : xx°xx'xx.xx"S (indique le format de latitude et de longitude des sites)

### 4.3.3 L'ajout des cartes

Pour ajouter la carte de l'Algérie, on suit les étapes suivantes : Sélectionner Géo — importer — sélectionner le fichier de la carte — clutter — clutter classes (Fig. 4.3).

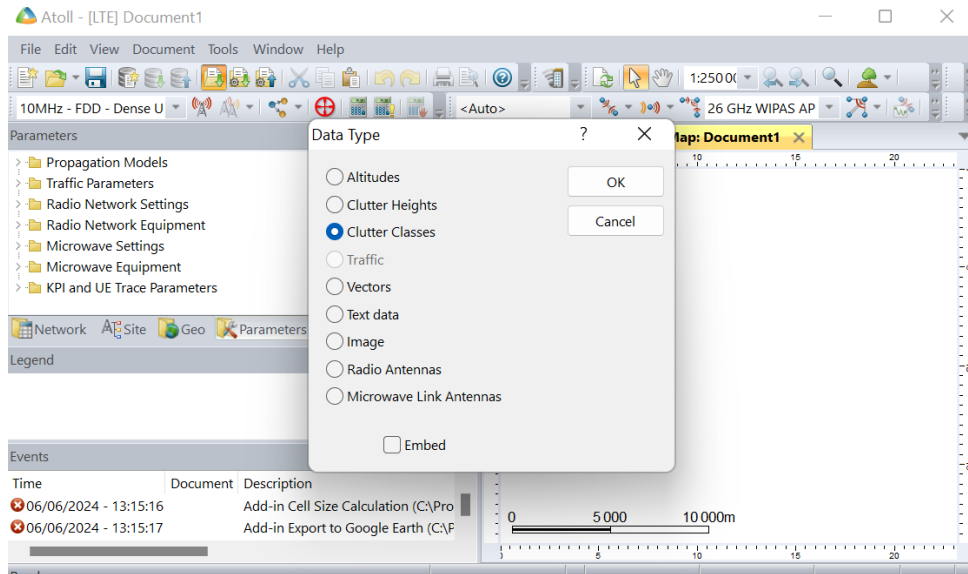


FIG. 4.3 : Importation des données clutter classes.

Sélectionner Géo — importer — sélectionner le fichier de la carte — heights — altitude (Fig. 4.4).

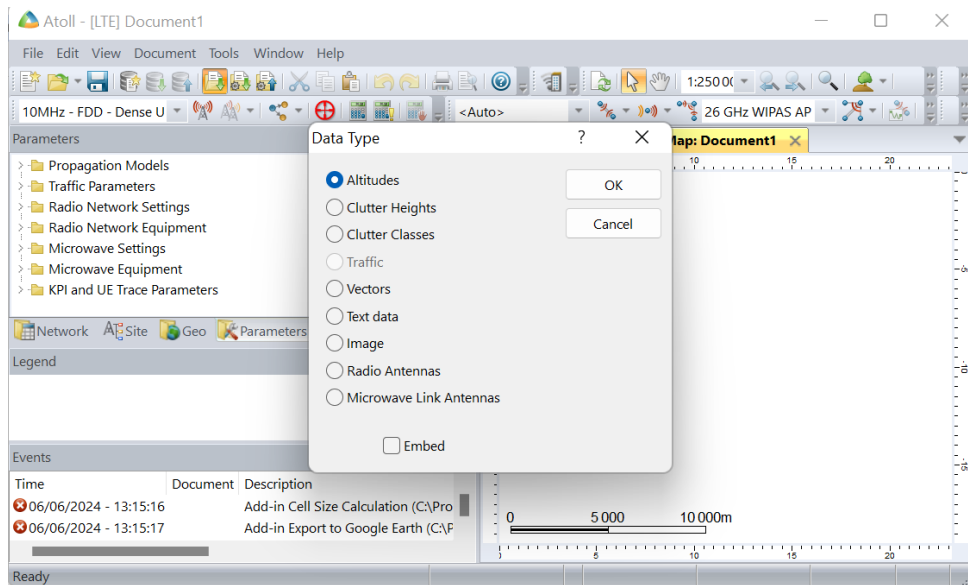


FIG. 4.4 : Importation des données altitudes.

Sélectionner Géo — importer — sélectionner le fichier de la carte — vectors — vecteurs — importer (Fig. 4.5).

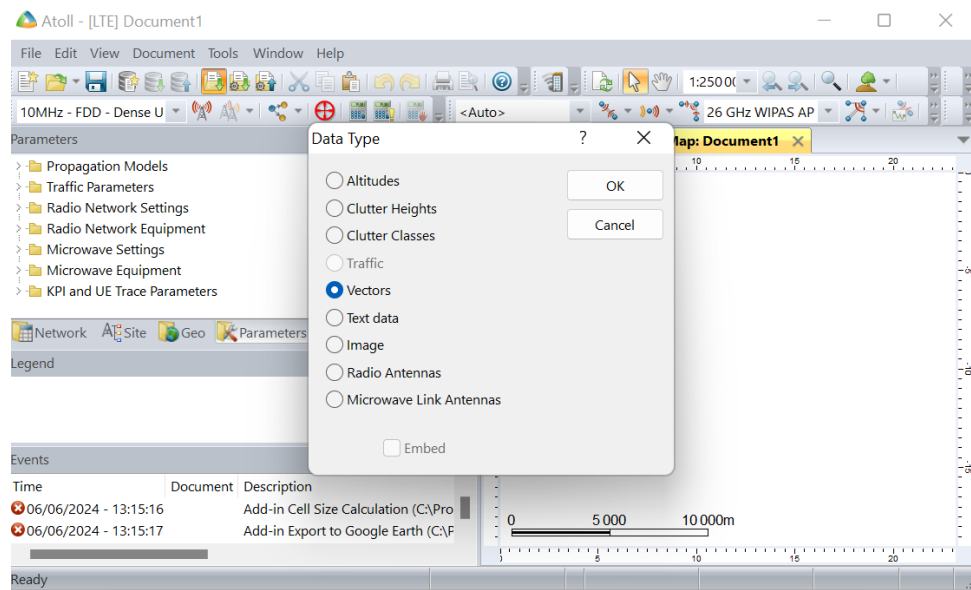


FIG. 4.5 : Importation des données vectors

Sélectionner Géo — importer — sélectionner le fichier de la carte — wilaya — WILAYA.shp — importer. Sélectionner Géo — importer — sélectionner le fichier de la carte — COMGEOAREA -> COMGEOAREA.shp — WILAYA.shp — importer.

Après, la carte d'Algérie sera affichée comme le montre la figure suivante (Fig. 4.6).

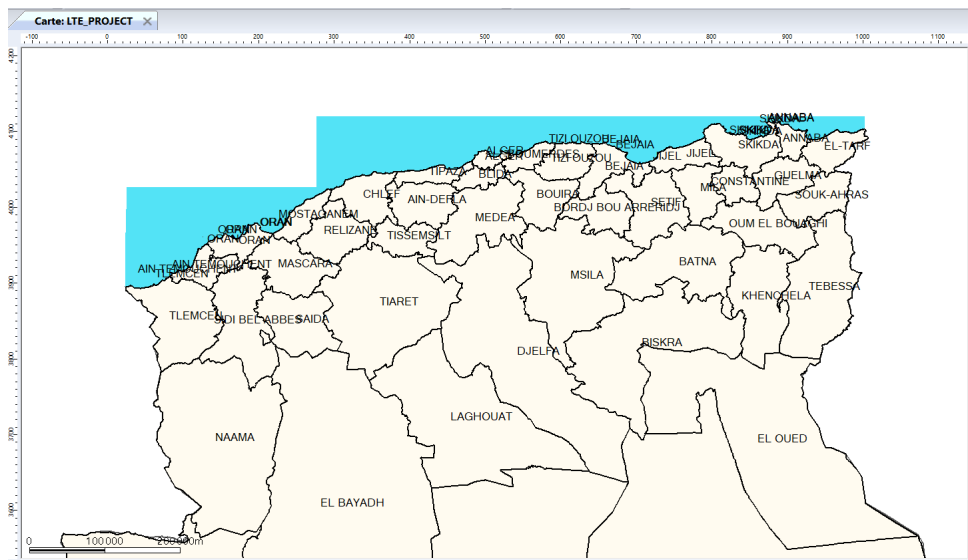


FIG. 4.6 : Importer la carte d'Algérie

### 4.3.4 Précision de la zone d'étude

Nous appliquons un zoom sur la Wilaya de Tlemcen (Fig. 4.7) et nous précisons la commune de Mansourah (Fig. 4.8).

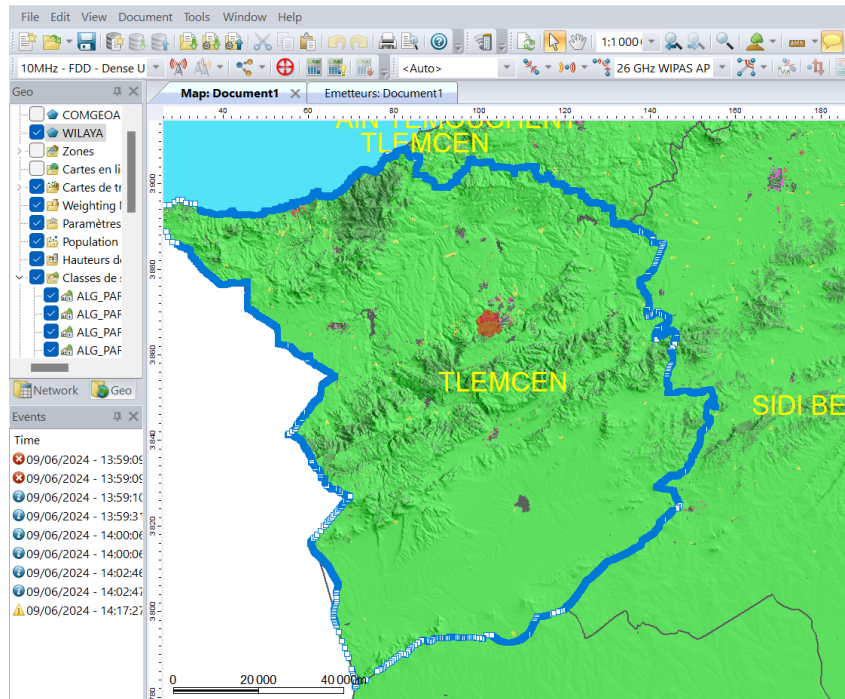


FIG. 4.7 : Wilaya de Tlemcen

Pour assurer une couverture totale de 25,385 km<sup>2</sup> tout en maintenant une bonne qualité de service, la zone est délimitée par une Computation zone en rouge, qui détermine la zone où ATOLL prend en compte les émetteurs actifs. Et une focus zone en vert qui est la zone exacte où ATOLL génère ses rapports et statistiques (Fig. 4.8).

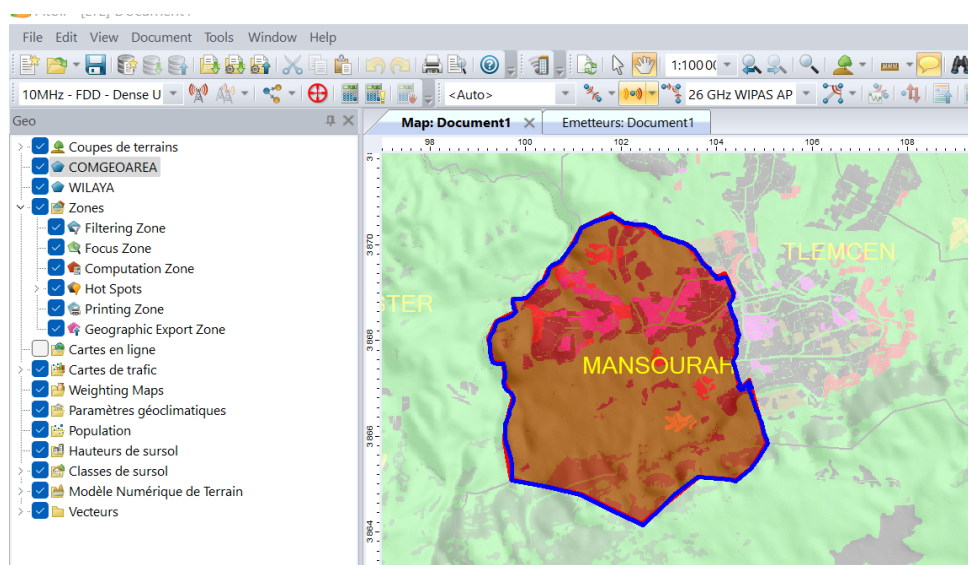


FIG. 4.8 : Commune de Mansourah avec focus et computation de zone

### 4.3.5 Ajout de sites

D'après l'opérateur DJEZZY, nous avons ajouté 6 nouveaux sites (Fig. 4.9) à notre réseau.

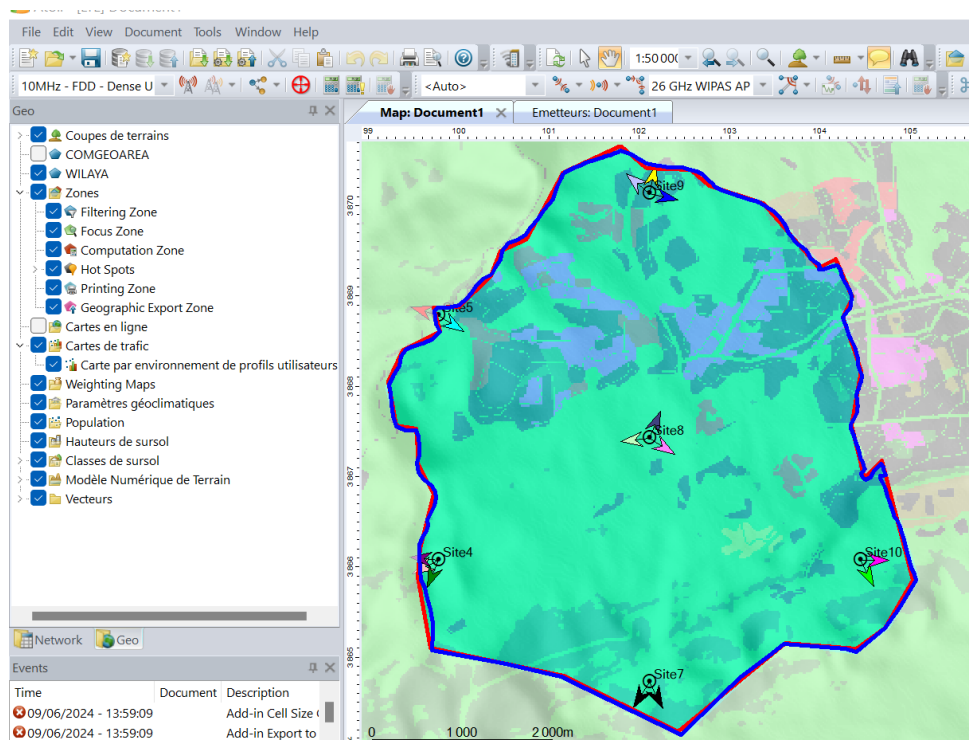


FIG. 4.9 : Cartographie des sites

### 4.3.6 Optimisation 4G

#### 4.3.6.1 Planification automatique des cellules (ACP)

L'outil de module Atoll ACP permet aux ingénieurs de radio qui conçoivent des réseaux de calculer automatiquement les réglages de réseau optimaux en termes de couverture et de qualité du réseau. ACP peut supprimer des sites ou des secteurs inutiles ou sélectionner des sites candidats qui peuvent être ajoutés pour optimiser le réseau. L'ACP peut également être utilisé dans les projets de multi-RAT et de co-planification où les réseaux utilisant différentes technologies d'accès radio doivent être pris en compte lors du calcul des paramètres de réseau optimaux (Fig. 4.10).

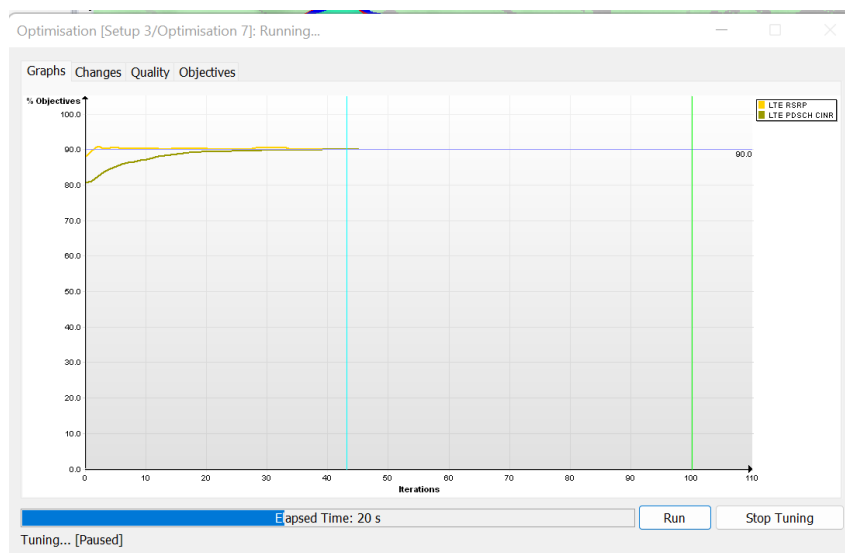


FIG. 4.10 : Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP

En appuyant sur 'Commit' (Fig. 4.11), certains paramètres seront modifiés et donc les sites seront optimisés.

Cell/Tx Name	Max Power (dBm)			Antenna Pattern		Azimuth (°)			Mechanical Tilt (°)			Antenna Height			
	Us	Initial	Final	Us	Initial	Final	Us	Initial	Final	Us	Initial	Final	Us	Initial	
Site10_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	90	110	<input checked="" type="checkbox"/>	0	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site10_1(1)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	90	110	<input checked="" type="checkbox"/>	0	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site10_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	90	80	<input checked="" type="checkbox"/>	5	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site10_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	155	145	<input checked="" type="checkbox"/>	5	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site4_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input type="checkbox"/>	275	275	<input checked="" type="checkbox"/>	5	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site4_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	200	220	<input checked="" type="checkbox"/>	2	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site4_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	245	255	<input type="checkbox"/>	4	4	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site5_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	285	300	<input type="checkbox"/>	5	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site5_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input type="checkbox"/>	120	120	<input checked="" type="checkbox"/>	5	3	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site5_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	285	285	<input checked="" type="checkbox"/>	5	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site7_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	210	195	<input type="checkbox"/>	5	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site7_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	155	160	<input type="checkbox"/>	0	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site7_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	210	215	<input type="checkbox"/>	5	5	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site8_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	20	0	<input checked="" type="checkbox"/>	8	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site8_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	120	100	<input type="checkbox"/>	0	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site8_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	265	245	<input type="checkbox"/>	0	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site9_1(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input type="checkbox"/>	10	10	<input type="checkbox"/>	0	0	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site9_2(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input type="checkbox"/>	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	0	2	<input type="checkbox"/>	15.00	15
Site9_3(0)	<input type="checkbox"/>	50.00	50.00	<input checked="" type="checkbox"/>	65deg 18dBi	65deg 18dBi	<input checked="" type="checkbox"/>	310	330	<input checked="" type="checkbox"/>	10	3	<input type="checkbox"/>	15.00	15

FIG. 4.11 : Modification de détail après optimisation

### 4.3.7 Résultats de différentes prédictions

#### 4.3.7.1 Niveaux de signal pour la couverture 4G

La couverture réseau désigne la zone entourant la station de base/site cellulaire. Elle permet aux utilisateurs d'envoyer des demandes de service et de se connecter au site pour la réception. Le rayon de la cellule est déterminé par la distance maximale entre l'utilisateur et le site cellulaire qui

permet une communication sans interruption. La prédiction de couverture se base sur l'intensité du signal du transmetteur qui permet d'estimer les zones de couverture. Les niveaux de signal dans une cellule correspondent à la force du signal du meilleur serveur dans la zone étudiée. Les résultats de la prédiction de couverture montrent que la zone cible est couverte par un signal fort de -65,9 dBm. Les simulations indiquent que cette prédiction offre une couverture adéquate (Fig. 4.12).

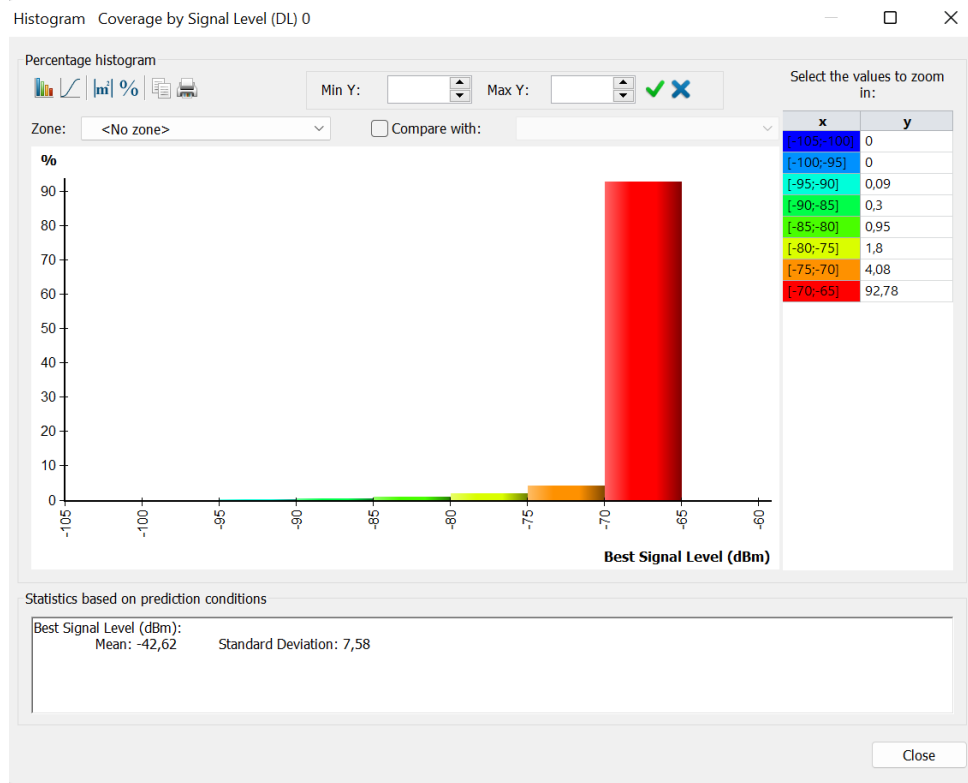


FIG. 4.12 : Prédiction de la couverture 4G par niveau de signal

Le résultat statistique présenté dans l'histogramme (Fig. 4.12) montre que dans l'intervalle [-70;-65] la couverture continue d'augmenter à 92%. Ces résultats sont encourageants, car ils démontrent que la majorité des zones étudiées bénéficient d'une couverture solide et d'une connectivité fiable.

### 4.3.7.2 Couverture 4G par RSRP

RSRP est la mesure la plus basique réalisée par l'UE, permettant d'obtenir une valeur moyenne de la puissance reçue du signal de référence (RS) émise par la station de base. La mesure s'exprime en Watt ou en dBm. La valeur est comprise entre -140 dBm et -44 dBm par pas de 1 dB (Fig. 4.13).



FIG. 4.13 : Prédiction de la couverture 4G par RSRP

Les résultats de mesures RSRP peuvent être classés en trois gammes :

- Pour RSRP supérieur à -75 dBm, la QoS est excellente.
- Entre -75 dBm et -95 dBm, une légère dégradation de la qualité de service est enregistrée (par exemple, le débit diminuera de 30-50 % si RSRP descend de -75 dBm à -95 dBm).
- Au-dessous de -95 dBm, la QoS devient inacceptable et le débit tend vers zéro à environ -108 dBm jusqu'à -100 dBm.

### 4.3.7.3 Couverture 4G par PDSCH C/(I+N)

On remarque d'après l'histogramme que les pourcentages de meilleure, bonne et faible qualité de signal sont respectivement 6 %, 84,9 % et 11,4 % (Fig. 4.14).

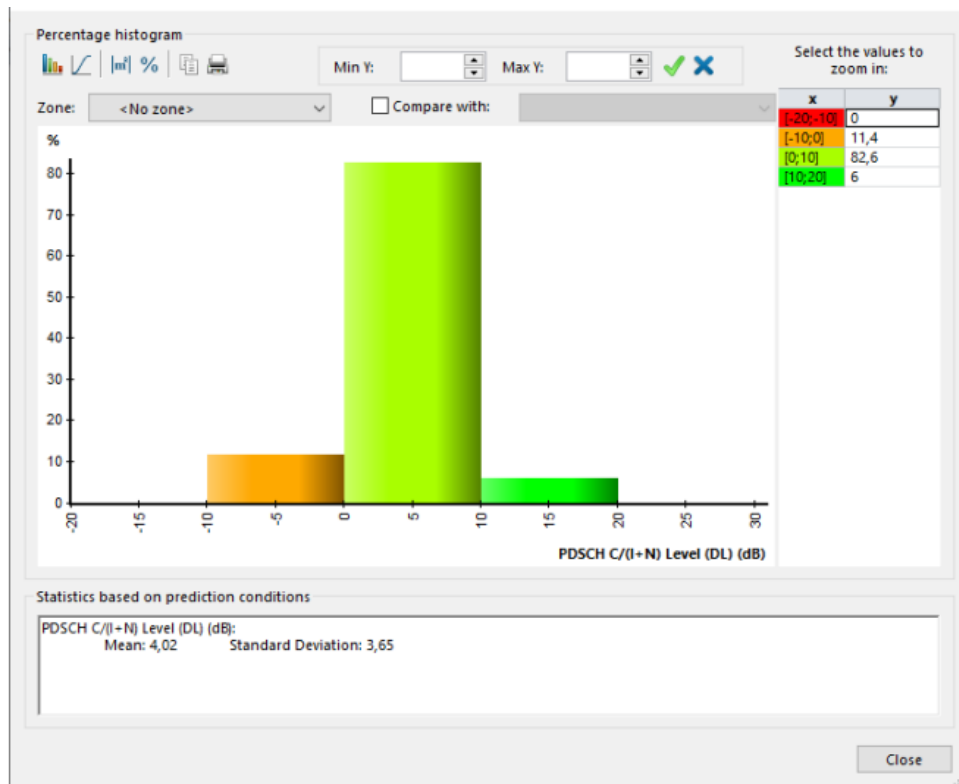


FIG. 4.14 : Qualité par PDSCH C/(I+N)

#### 4.3.7.4 Prédiction de la couverture 4G par débit (DL)

La prédiction de la couverture 4G par débit pour les liaisons descendantes est essentielle pour évaluer les performances des réseaux de communication sans fil (Fig. 4.15).

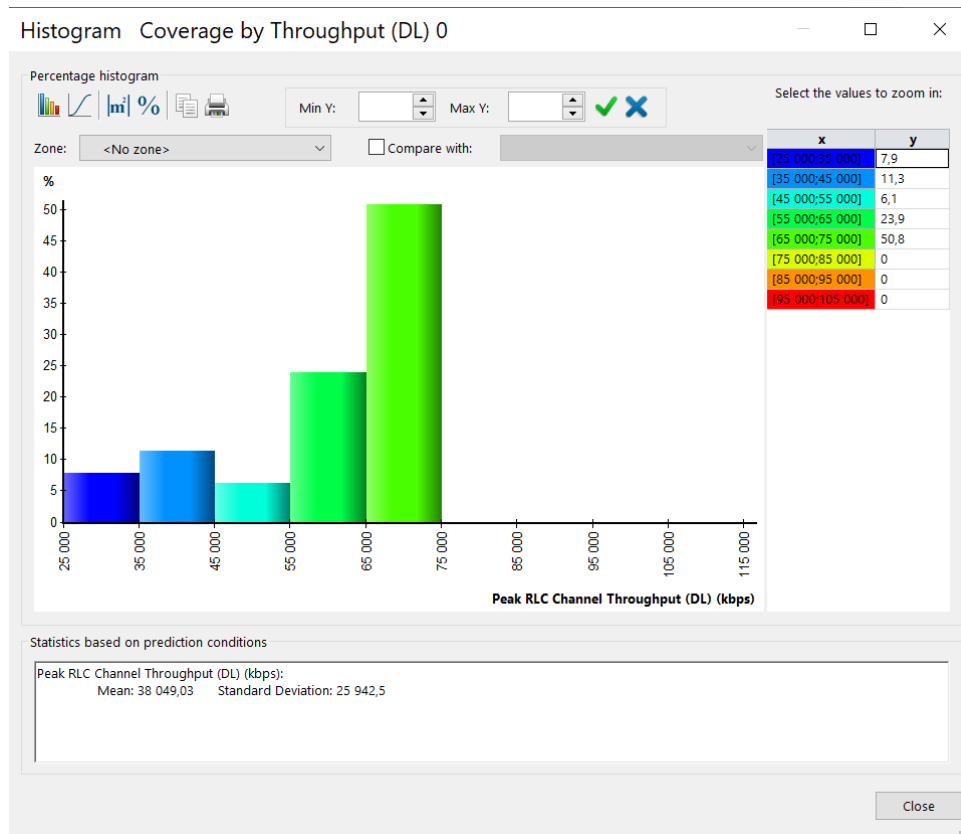


FIG. 4.15 : Prédiction de la couverture 4G par débit (DL)

La figure (Fig. 4.15) illustre la prédiction de la couverture 4G en termes de débit descendant. On peut observer une vaste zone offrant un débit élevé pouvant atteindre jusqu'à 75 Mbps. 80 % de la zone est couverte par un débit variant de 45 Mbps à 75 Mbps.

#### 4.3.7.5 Couverture dans les zones de chevauchement

Les zones de chevauchement sont des zones couvertes par le signal d'au moins deux émetteurs. Le résultat de la simulation nous donne une carte de recouvrement qui nous permet de distinguer les zones où le mobile sera couvert par un ou plusieurs émetteurs. Autrement dit, ces zones correspondent à l'endroit où s'effectuent les handovers (Fig. 4.16).

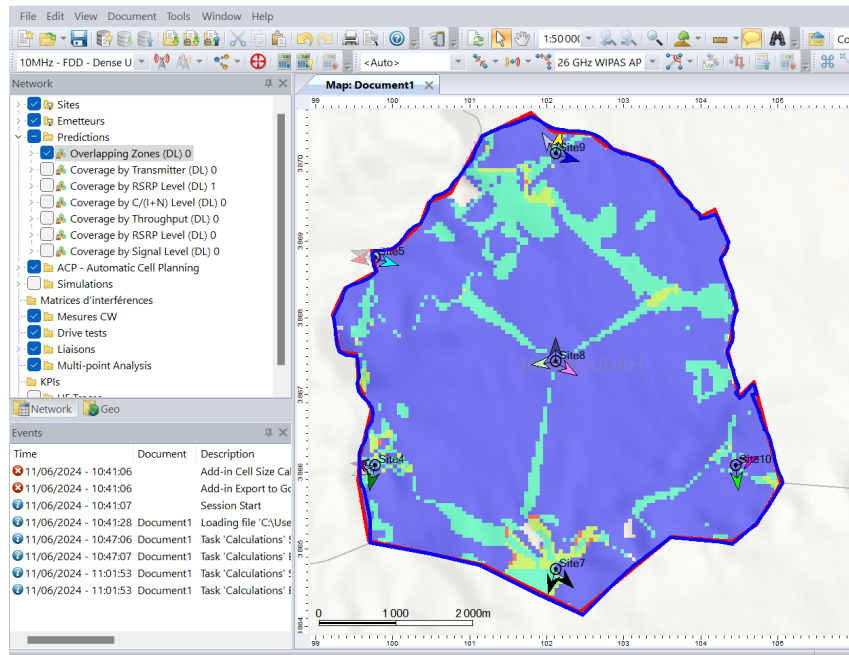


FIG. 4.16 : Prédiction de couverture 4G dans les zones de chevauchement

Selon les illustrations : Fig. 4.16 et Fig. 4.17, une proportion plus importante de la zone cible est couverte par un ou deux serveurs, ce qui indique une amélioration des performances lorsqu'elle est couverte par plus de deux serveurs.

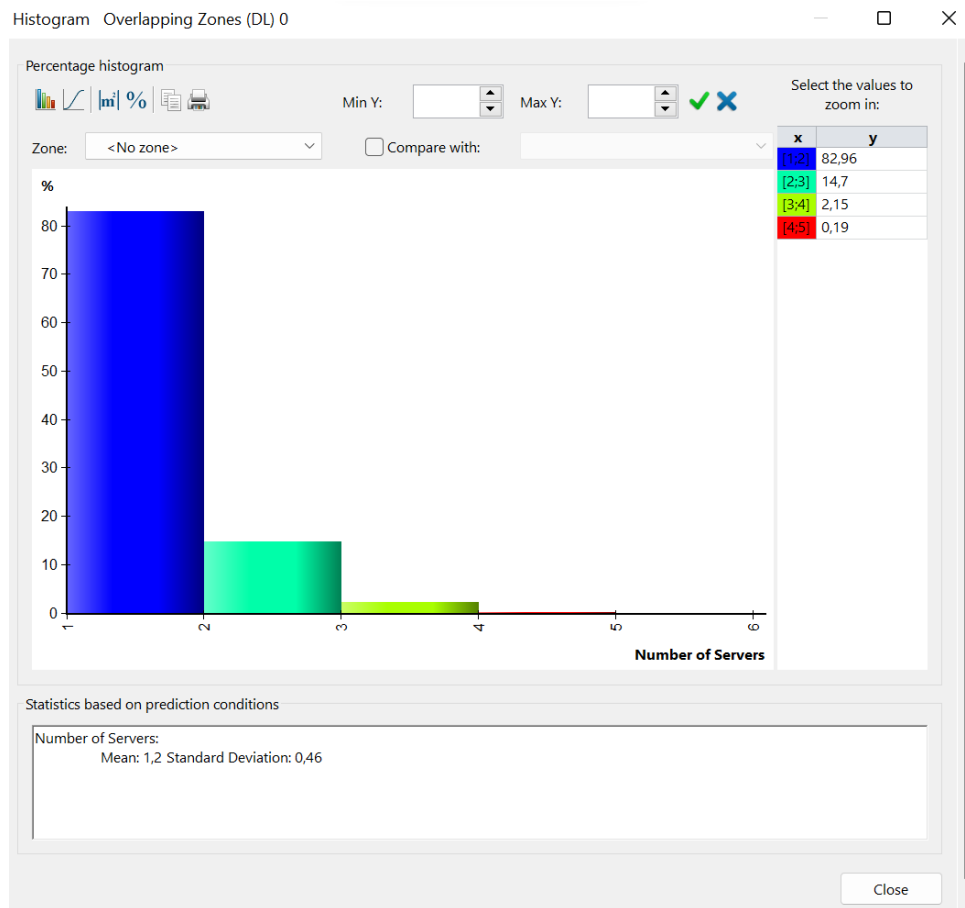


FIG. 4.17 : Histogramme de prédiction de couverture 4G dans les zones de chevauchement

### 4.3.7.6 Simulation

La figure (Fig. 4.18) montre la répartition de la mobilité des équipements utilisateurs en fonction du service utilisé, à savoir la large bande, l'internet, l'appel vidéo et l'appel vocal.

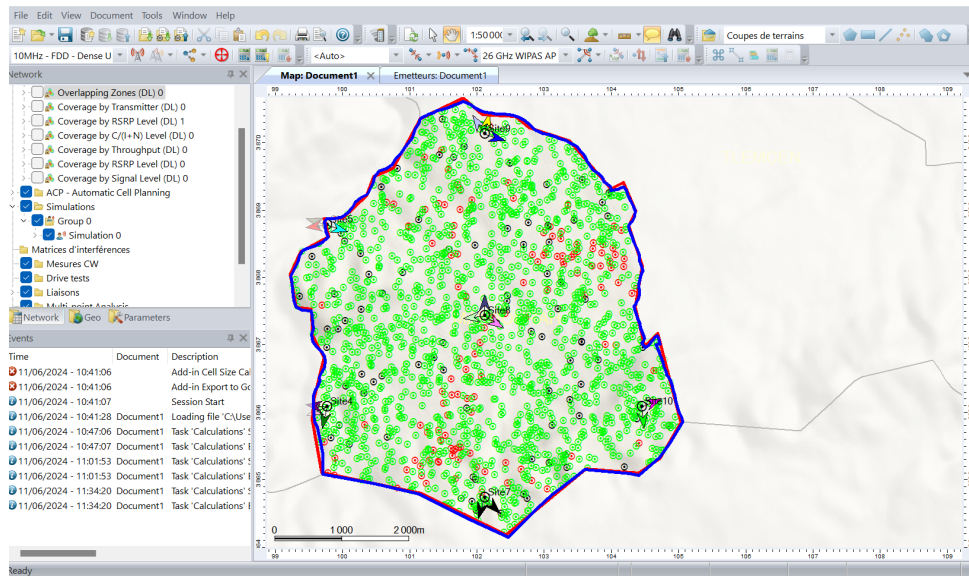


FIG. 4.18 : Distribution des utilisateurs 4G

La figure (Fig. 4.19) représente l'état de l'abonné avec le site. Si l'abonné est connecté, il est représenté en vert, sinon il est représenté en rouge.

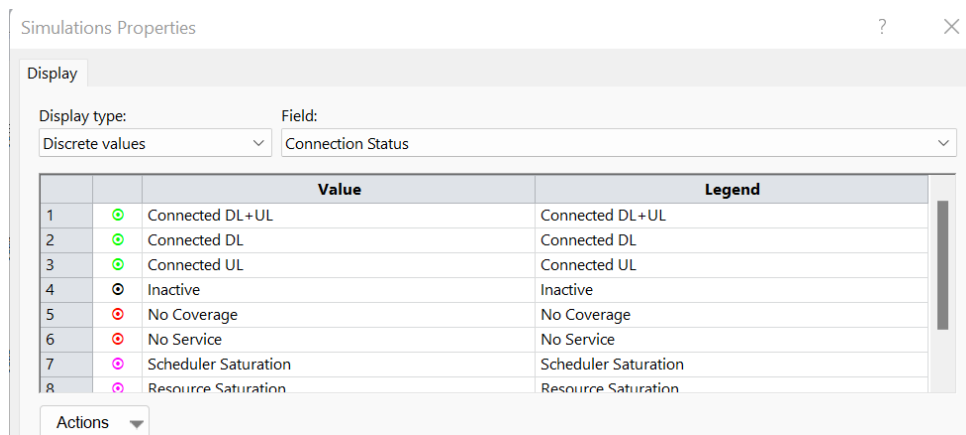


FIG. 4.19 : Propriétés d'affichage de la simulation

## 4.4 Simulation 5G

### 4.4.1 Création d'un projet 5G Atoll

Lorsqu'on ouvre un nouveau projet sur Atoll, on choisit le type du projet (Fig. 4.20).

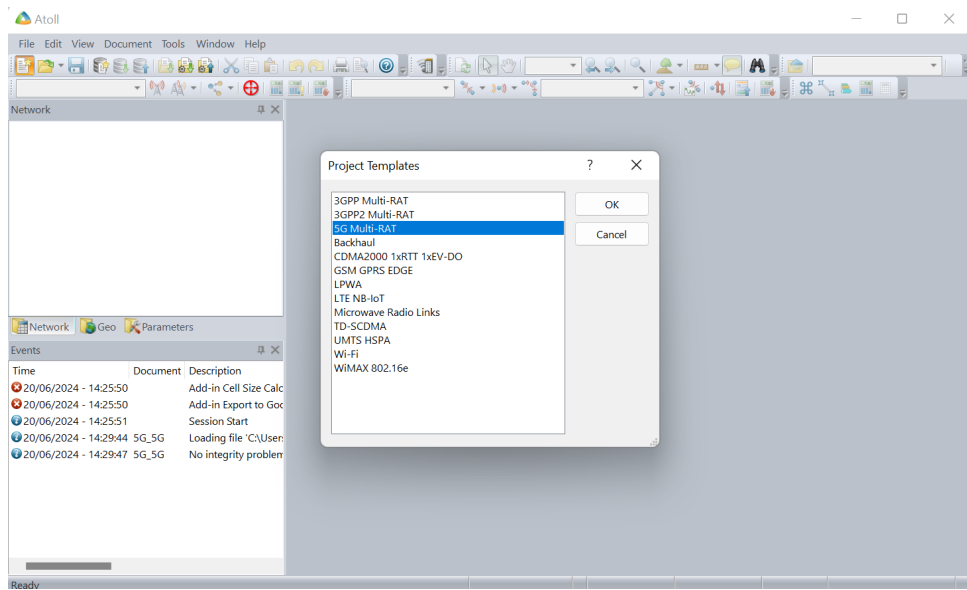


FIG. 4.20 : Création d'un nouveau projet 5G sur Atoll

Après avoir créé le projet 5G, suivez les mêmes étapes que précédemment en 4G (Fig. 4.8).

### 4.4.2 Ajout de sites

Pour distribuer les sites sur la région, on utilise une autre version Atoll 3.3. En donnant le rayon de cellule, l'Atoll distribue automatiquement les sites en utilisant l'outil schéma hexagonal (Fig. 4.21).

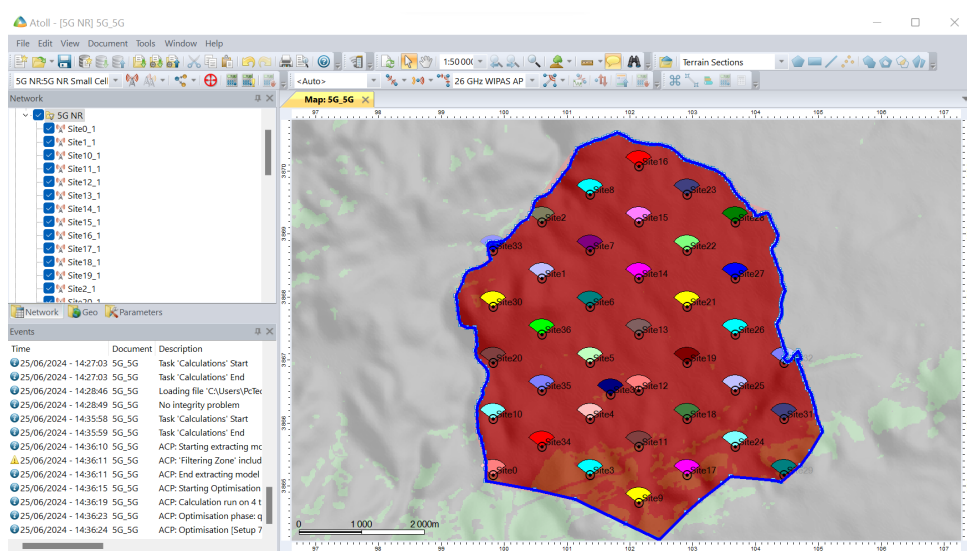


FIG. 4.21 : Cartographie des sites 5G

### 4.4.3 Optimisation 5G

#### 4.4.3.1 Planification automatique des cellules (ACP)

L'optimisation de la couverture et de la capacité du réseau 5G est réalisée avec l'ACP, comme illustré à la figure (Fig. 4.22).

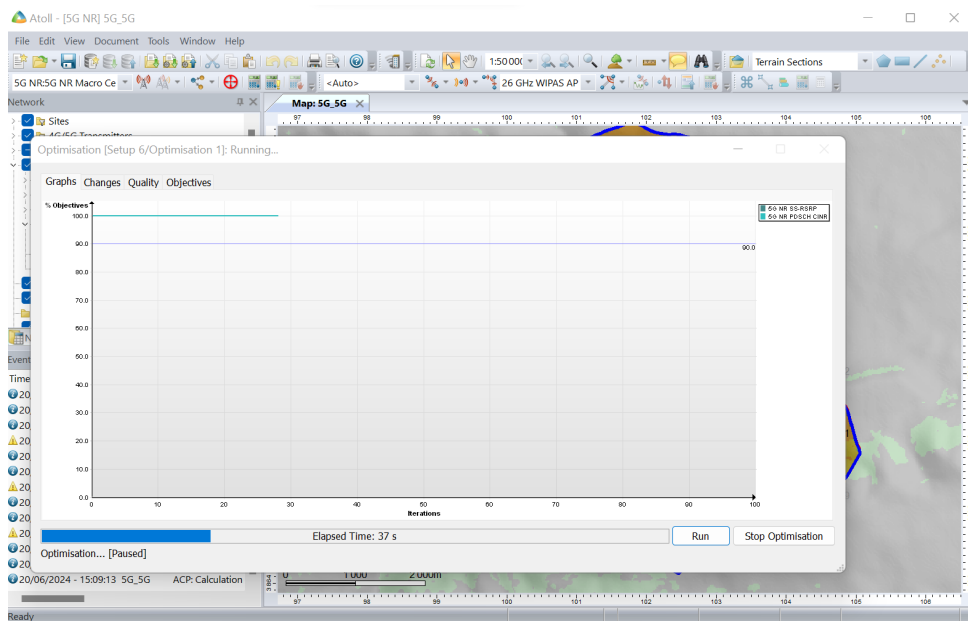


FIG. 4.22 : Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau 5G avec l'ACP

En appuyant sur 'Commit' (Fig. 4.23), certains paramètres seront modifiés et les sites seront optimisés.

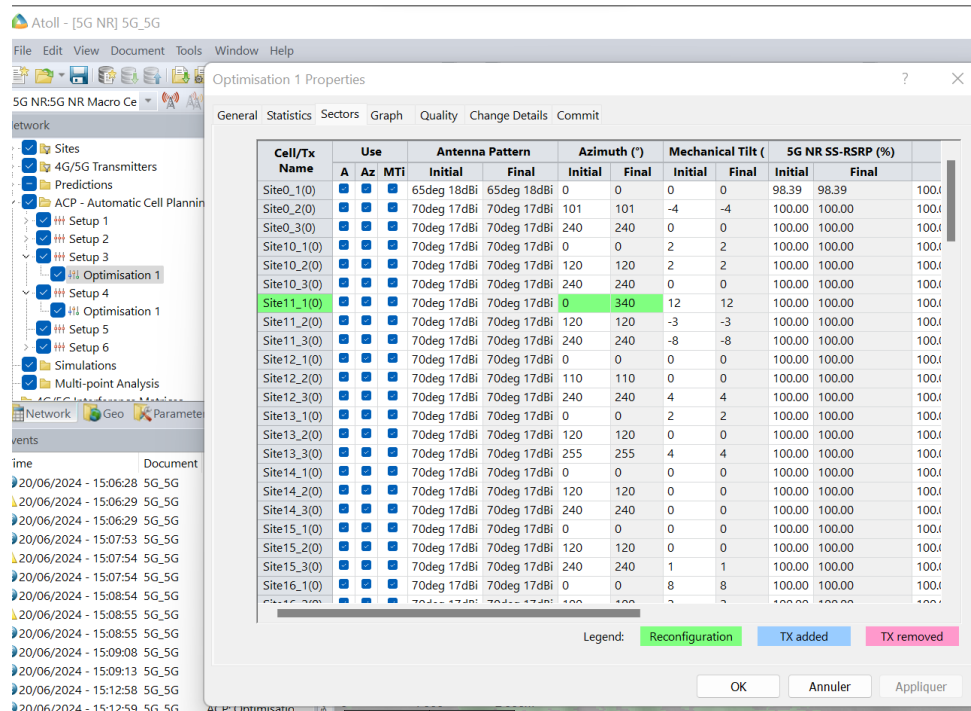


FIG. 4.23 : Modification de détail après optimisation 5G

### 4.4.4 Résultats de différentes prédictions

#### 4.4.4.1 Niveaux de signal pour la couverture 5G

Le résultat statistique présenté dans l'histogramme (Fig. 4.24) montre que dans l'intervalle  $[-70 ; -65]$  la couverture continue d'augmenter à 82%. Ces résultats sont encourageants, car ils démontrent que la majorité des zones étudiées bénéficient d'une couverture solide et d'une connectivité fiable.

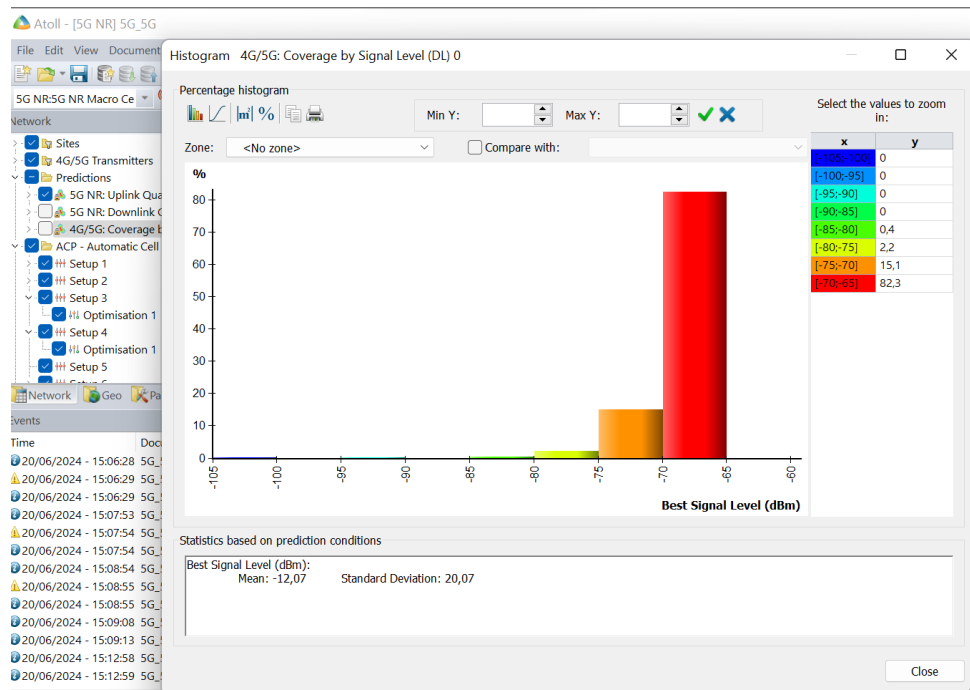


FIG. 4.24 : Prédiction de la couverture 5G par niveau de signal

### 4.4.4.2 Couverture 5G par SS-RSRP

La spécification 3GPP pour le SS-RSRP stipule que l'estimation de la couverture dépend des résultats de simulation et qu'un SS-RSRP  $-90$  dBm est considéré comme une condition RF excellente, entre  $-100$  dBm et  $-90$  dBm comme une condition RF bonne, entre  $-100$  dBm et  $-110$  dBm comme une condition RF moyenne de la cellule, et entre  $-110$  dBm et  $-125$  dBm comme une condition RF à la limite de la cellule.

Les résultats de simulation 5G montrent que la zone cible est couverte par un SS-RSRP de  $-67,36$  dBm (Fig. 4.25). Le SS-RSRP est utilisé pour la sélection et la re-sélection de cellules, le contrôle de puissance, les procédures de mobilité et la gestion de faisceaux [38]. Le résultat de simulation SS-RSRP  $-67,36$  dBm montre que la zone cible est effectivement couverte par un signal de qualité élevée.

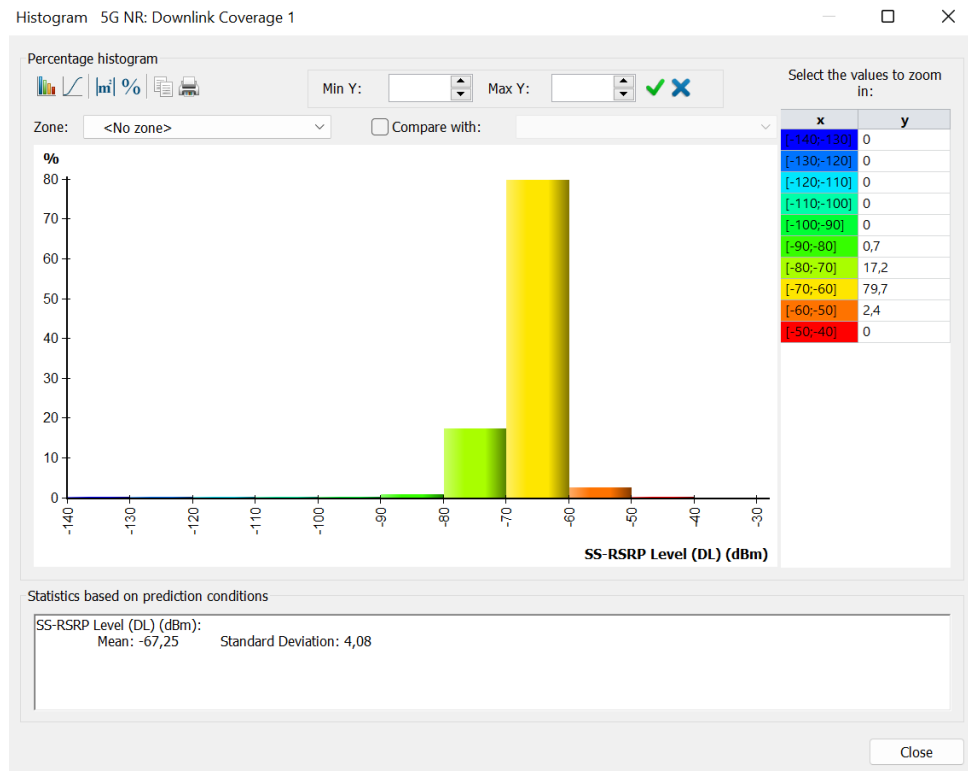


FIG. 4.25 : Prédiction de la couverture 5G SS-RSRP

### 4.4.4.3 Couverture 5G par PDSCH C/(I+N)

On remarque d'après l'histogramme des pourcentages que la meilleure qualité de signal, la bonne qualité de signal et la faible qualité de signal sont respectivement de 4,5%, 80% et 15% (Fig. 4.26).



FIG. 4.26 : Couverture 5G par PDSCH C/(I+N)

#### 4.4.4.4 Prédiction de la couverture 5G par débit (DL)

La figure (Fig. 4.27) illustre la prédiction de la couverture 5G en termes de débit descendant. On peut observer que la valeur de débit varie de 300 Mbps jusqu'à 2 Gbps. 72% de la zone offre un débit variant de 500 Mbps jusqu'à 1 Gbps.

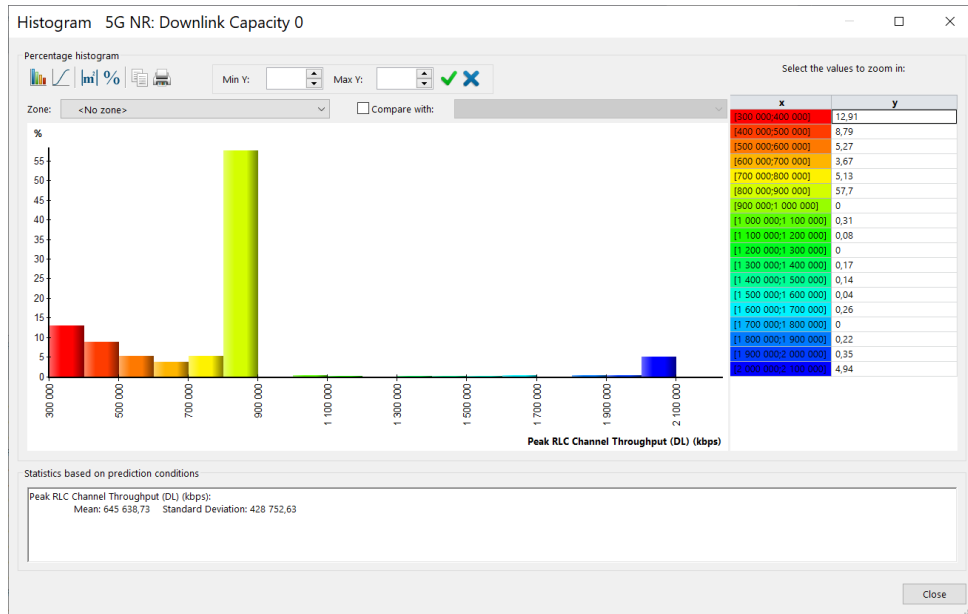


FIG. 4.27 : Prédiction de la couverture 5G par débit (DL)

### 4.4.4.5 Couverture 5G dans les zones de chevauchement

Comme nous pouvons le constater sur les figures 4.28 et 4.29, un pourcentage élevé de la zone cible est couvert par un ou deux serveurs, montrant une amélioration des performances lorsqu'elle est couverte par plus de deux serveurs.

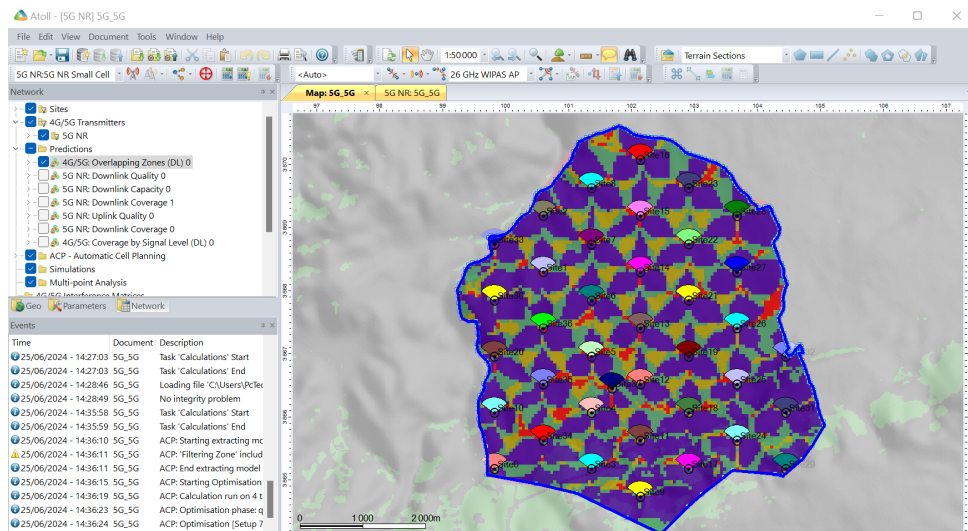


FIG. 4.28 : Prédiction de la couverture 5G dans les zones de chevauchement

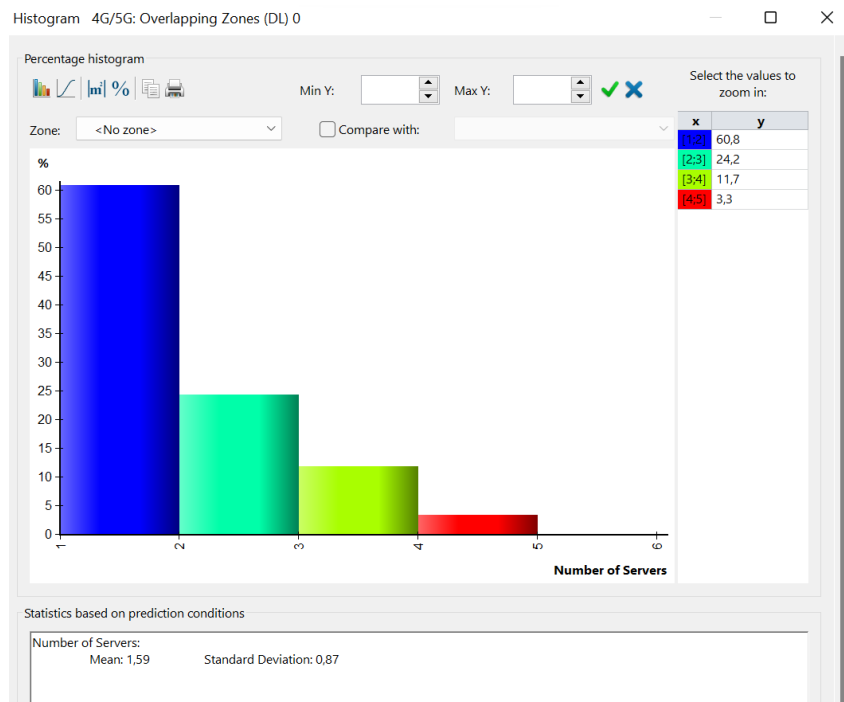


FIG. 4.29 : Histogramme de prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement

### 4.4.4.6 Distribution des utilisateurs 5G

La figure 4.32 montre la répartition de la mobilité des équipements utilisateurs en fonction du service utilisé, à savoir la large bande, l'internet, l'appel vidéo et l'appel vocal.

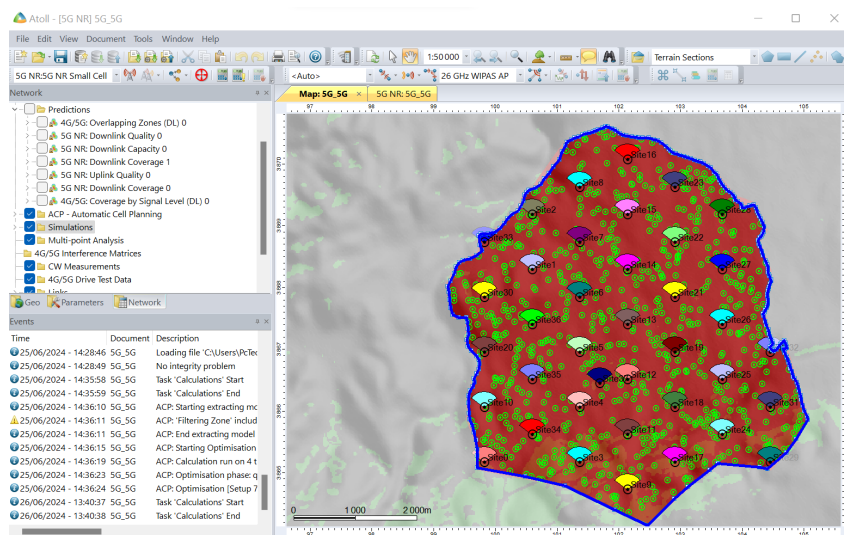


FIG. 4.30 : Distribution des utilisateurs 5G

## 4.5 Comparaison 4G vs 5G

### 4.5.1 Déploiement cellulaire

	LTE	5G NR
Nombre de sites	6	38
Rayon de cellule	900 m	300 m
Type de cellule	Macro cellule	Micro cellule

TAB. 4.1 : Comparaison du déploiement cellulaire 4G vs 5G

Le réseaux 4G était déployé sur des macro cellules ( FIG. 4.9 ) dans notre cas nous avons utilisé 7 sites dont rayon de cellule égal à 900 m.

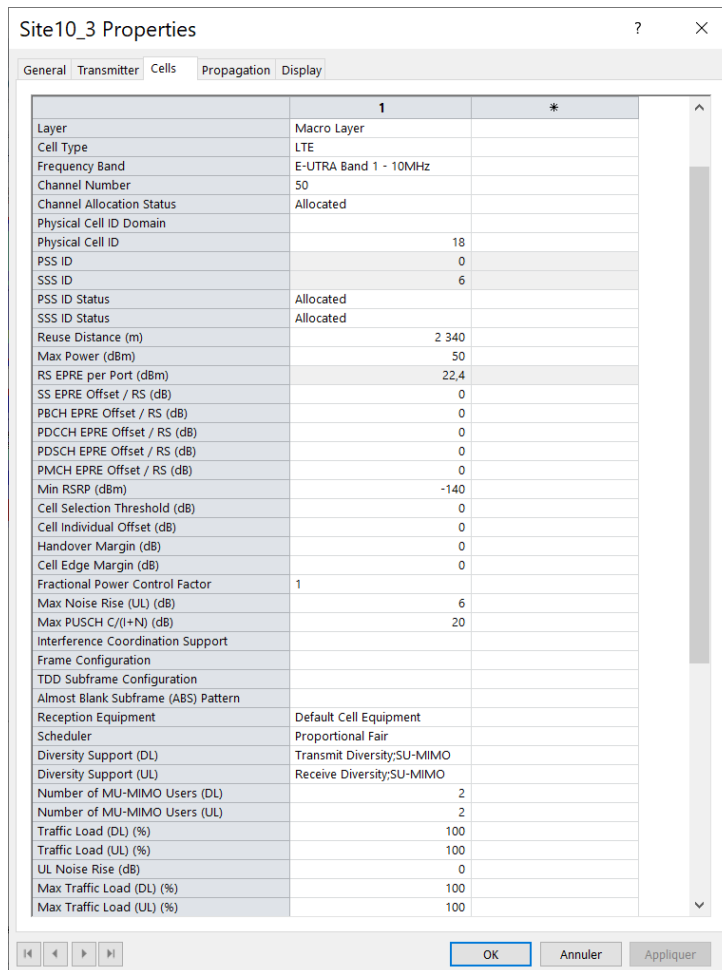


FIG. 4.31 : Configuration de cellule LTE.

Le réseaux 5G était déployé sur des micro cellules (FIG. 4.21) dans notre cas nous avons 38 sites dont rayon de cellule égal à 300 m.

5G NR Small Cell Properties

General Transmitter Cell

RAT: 5G NR

Layer	Small Cell Layer
Carrier	400 MHz - NR-ARFCN 2057499
Physical Cell ID	0
Cell Type	PCell
Cell Edge Margin (dB)	
Cell Individual Offset (dB)	0
Cell Selection Threshold (dB)	20
Diversity Support (DL)	Transmit Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO
Additional DL Noise Rise (dB)	0
Traffic Load (DL) (%)	100
Max Traffic Load (DL) (%)	100
Radio Equipment	5G NR Radio Equipment
Handover Margin (dB)	4
Max number of 4G/5G neighbours	16
Max number of inter-technology neighbours	16
Max Number of Users	
Max Power (dBm)	43
Min SS-RSRP (dBm)	-140
PBCH EPRE Offset / SSS (dB)	0
PDCCH EPRE Offset / SSS (dB)	0
PDCCH Overhead (OFDM Symbols)	1
PDSCH EPRE Offset / SSS (dB)	0
PRACH Preamble Format [Max Cell Radius]	
Physical Cell ID Domain	
PRACH RSI Domain	
Number of Required PRACH RSI	1
PSS EPRE Offset / SSS (dB)	3
Reuse Distance (m)	
SSS EPRE (dBm)	5
Scheduler	Proportional Fair
SS/PBCH Numerology	3 (120 kHz)
SS/PBCH Periodicity	10 ms
SS/PBCH OFDM Symbols	{4,8,16,20}+28n [Lmax=64]
Diversity Support (UL)	Receive Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO
Additional UL Noise Rise (dB)	0
Traffic Load (UL) (%)	100
Max Traffic Load (UL) (%)	100
UL Noise Rise (dB)	0
Traffic Numerology	3 (120 kHz)
TDD DL OFDM Symbols (%)	50

OK Annuler Appliquer

FIG. 4.32 : Configuration de cellule 5G NR.

### 4.5.2 Équipements utilisés

	LTE	5G NR
Station de base	eNodeB	gNodeB
Antenne	100° 14dBi 0Tilt Trisectorielle	Omni 11dBi 0Tilt 1800MHz

TAB. 4.2 : Équipements utilisés 4G vs 5G

Le réseau 4G utilise des antennes trisectorielles à une hauteur de 30 m. Une antenne trisectorielle est conçue pour couvrir trois secteurs distincts, généralement à 120 degrés chacun. Chaque secteur est dirigé vers une zone spécifique, permettant de concentrer la puissance du signal dans ces directions. Elles sont idéales pour les zones densément peuplées où une couverture ciblée est nécessaire.

Pour le réseau 5G, nous avons utilisé des antennes omnidirectionnelles à une hauteur de 7 m. Une antenne omnidirectionnelle émet et reçoit des signaux dans toutes les directions, formant un motif de rayonnement en forme de sphère. Elles sont courantes pour les réseaux Wi-Fi domestiques, les réseaux sans fil d'entreprise et les réseaux de communication à courte portée.

L'installation de ces antennes à une hauteur de 7 m facilite la mise en place du réseau et en réduit le coût. En effet, à cette hauteur, les antennes peuvent être installées sur des bâtiments, éliminant ainsi la nécessité d'installer des tours de grande taille.

#### 4.5.2.1 Bande de fréquence utilisée

	LTE	5G NR
Bande de fréquence utilisée	E-UTRA Band 1 - 10MHz	N257

TAB. 4.3 : Bande de fréquence utilisée 4G vs 5G

## 4.6 Comparaison des résultats

	LTE	5G NR
Débit	45 Mbps à 75 Mbps (Fig. 4.15)	300 Mbps à 2 Gbps (Fig. 4.27)
Couverture optimale par niveau de signal	92% (Fig. 4.12)	82% (Fig. 4.24)
Couverture optimale RSRP	99,2% (Fig. 4.13)	79,7% (Fig. 4.25)
Couverture par PDSCH C/(I+N)	82,6% (Fig. 4.14)	80% (Fig. 4.26)
Histogramme de Prédiction de couverture dans les zones de chevauchement	82,96% (Fig. 4.16)	60,8% (Fig. 4.28)

TAB. 4.4 : Comparaison des résultats de simulation 4G vs 5G

Les résultats obtenus par les deux réseaux sont satisfaisants, avec des valeurs cohérentes pour la couverture par niveau de signal, la couverture par RSRP, la couverture par PDSCH  $C/(I+N)$  et la couverture dans les zones de chevauchement.

Le débit entre les deux réseaux est considérablement différent, avec un débit maximal de 75 Mbps pour le réseau 4G et jusqu'à 2 Gbps pour le réseau 5G.

### 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploité les outils de planification automatique de cellules pour optimiser la couverture des deux réseaux 4G et 5G. Nous avons discuté des résultats de simulation, notamment la prédiction des niveaux de signal, la couverture 4G par RSRP, la couverture 4G par PDSCH  $C/(I+N)$ , la couverture 4G par débit (DL) et la couverture dans les zones de chevauchement.

En conclusion, cette étude a fourni des résultats utiles pour la comparaison des deux réseaux qui dépassent les réseaux de cinquième génération par rapport à la quatrième en termes de facilité de publication, de faible coût et de haute qualité de service.

# Conclusion et perspectives

### Conclusion générale

Le travail de ce mémoire a pour objectif la comparaison numérique entre les technologies 5G et 4G tout en planifiant nos réseaux séparément sur la région de Mansourah au niveau de la wilaya de Tlemcen. Ce projet nous a permis d'acquérir beaucoup de connaissances et des bases sur les technologies 4G et 5G et leurs déploiements, Aussi beaucoup de connaissances sur l'outil de planification radio ATOLL.

Le premier chapitre a traité de l'évolution des générations mobiles et de leurs caractéristiques, tout en présentant brièvement la norme 4G et 5G. Dans le chapitre 2, nous avons examiné les bases essentielles du système 4G, y compris son architecture, ses caractéristiques, ses applications et ses limites.

L'objectif du troisième chapitre était d'aborder Les fondements de la technologie 5G incluant les méthodes de déploiement NSA et SA , ses architectures et ses applications dans les secteurs de l'IoT et de l'IA.

Notre analyse a porté sur l'évolution de la 5G afin de répondre aux exigences de la prochaine génération d'appareils mobiles, en proposant des vitesses plus rapides, une latence réduite et une capacité réseau plus élevée.

Le chapitre 4, est le chapitre le plus important dans cette étude ou nous avons étudié les principales disparités entre la 4G et la 5G. En étudiant les étapes de la planification des réseaux 4G et 5G et de la configuration d'une station de base à l'aide de l'outil ATOLL.

En résumé, cette étude a montré que la technologie 5G est supérieure aux technologies de réseau précédentes en termes de latence , de débit, de capacité et d'efficacité spectrale ce qui en fait une option privilégiée pour répondre aux aspirations de l'humanité à créer un monde intelligent et entièrement connecté.

Pour des prochaines études et recherches, il peut être considéré l'étude de :

- L'aster propagation model
- Les caractéristiques des antennes beamformer et massive mimo
- Les ondes millimétriques (millimeter waves)
- Comment l'utilisation de beamforming et MIMO peut aider à réduire la perte de chemin et le problème de blocage et d'interférence.

# Références bibliographiques

- [1] d. E. e. d. l. P. MINISTÈRE DE LA POSTE ET DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DIRECTION DES STATISTIQUES, *Rapport sur les indicateurs des services télécommunications/1er semestre*, Report, 2024.
- [2] HUAWEI, “HCIA-LTE Training Material V1.0”, 2024.
- [3] SILICON.FR. “Mobile : NTT DoCoMo bat tous les records de vitesse Mobile”. Accès 18/03/2024. (juin 2005).
- [4] “Regional Forum for ARAB Region : IMTSystems Technology, Evolution and Implementation”, Tunis, Tunisia, 2013.
- [5] Y. BOUGUEN, E. HARDOUIN et F. X. WOLFF, *LTE et les réseaux 4G*. Groupe Eyrolles, 2012.
- [6] “Étude des mécanismes de gestion de congestion dans la EUTRAN pour les applications M2M IoT (cas d’étude PRACH)”, Thesis, 2024.
- [7] “Implementation of OpenAirInterface-based real-world channel measurement for evaluating wireless transmission algorithms”, *Journal Name*, 2024.
- [8] P. AGARWAL et J. PRUTHI, “Impact of Modulation Schemes on LTE”, *Journal Name*, 2024.
- [9] G. G. LEMA, “LTE quality of service enhancement under OFDM modulation techniques”, thèse de doct., University of Luxembourg, 2024.
- [10] J. R. HAMPTON, *Introduction to MIMO Communications*. Cambridge University Press, 2014.
- [11] “Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM) ; Universal Mobile”. (2024).
- [12] F. LAUNAY. “cours en ligne IUT”. Université de Poitiers France, HSS. (2024).
- [13] 3GLTEINFO. “LTE Handover Overview”. Accessed : 13 May 2023. (nov. 2012).
- [14] T. NAKAMURA. “Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and beyond (LTE-Advanced)”. (oct. 2009).
- [15] COMMSBRIEF. “LTE vs LTE Advanced : Is 4G LTE different from LTE Advanced ?” Accessed : 13 May 2023. (déc. 2020).
- [16] J. WANNSTROM. “LTE-Advanced, for 3GPP”. (mai 2012).
- [17] “5G ; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 14.3.0 Release 14)”, ETSI. (oct. 2017).
- [18] Y. BOUGUEN, E. HARDOUIN et F. X. WOLFF, *LTE et les réseaux 4G*. Groupe Eyrolles, 2012.
- [19] L. Z. et AL., “A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks”, *IEEE Access*, t. 7, p. 117 460-117 504, 2019.

- [20] M. G. et AL., “A tutorial on beam management for 3GPP NR at mmWave frequencies”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, t. 21, n° 1, 2018.
- [21] C. BUEY, “Design and measurement of multi-antenna systems toward future 5G technologies”, Thesis, Université Côte d’Azur, 2018.
- [22] G. CHOPRA, R. K. JHA et S. JAIN, “A survey on ultra-dense network and emerging technologies : Security challenges and possible solutions”, *Journal of Network and Computer Applications*, t. 95, p. 54-78, 2017.
- [23] S. SORIANO. “LES ENJEUX DE LA 5G”, ARCEP. (2017).
- [24] W. YU, H. XU, H. ZHANG, D. GRIFFITH et N. GOLMIE, “Ultra-Dense Networks : Survey of State of the Art and Future Directions”, in *2016 25th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Waikoloa, HI, USA, 2016, p. 1-10.
- [25] K. KABORE et J. L. PEREIRA, “Etude de Passage de la 4G vers la 5G”, *Revue Scientifique et Technique de l’Ingénieur*, t. 22, n° 1, p. 25-34, 2021.
- [26] M. K. AMEUR et M. S. H. FSB, “Etude des scénarios de clustering des réseaux 4G de TT pour la migration vers une architecture 5G Cloud-RAN”, 2021.
- [27] P. GUPTA. “5G deployment options”. (2024).
- [28] “Déploiement 5G SA vs 5G NSA : quelles sont les différences”. (2024).
- [29] I. SALHANE et M. RIFI, “La technologie 5G pour les objets connectés”, 2021.
- [30] F. LAUNAY, *NG-RAN et 5G-NR : L’accès radio 5G et l’interface radioélectrique*. 2021.
- [31] “Spécifications Détaillées Des Interfaces Radioélectriques De La Composante Satellite Des Télécommunications Mobiles Internationales-2000 (IMT-2000)”, Union Internationale Des Télécommunications. (2014).
- [32] P. B. et AL., “Modulation formats and waveforms for 5G networks : Who will be the heir of OFDM?”, *IEEE Signal Processing Magazine*, t. 31, n° 6, p. 80-93, nov. 2014.
- [33] A. PELTONEN, R. SASSE et D. BASIN, “A comprehensive formal analysis of 5G handover”, in *Proceedings of the 14th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, 2021.
- [34] “The ACP Module and Atoll”, 2024.