

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : MOUMEN Bouchra Ayat Allah

HACHEMI Wafaa

Sujet

Etude et déploiement de réseaux 5G via l'outil de planification radio <ATOLL>

Soutenu publiquement, le 10 / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

M/ A.DJEMAI	MCA	Université de Tlemcen	Président
M/ S.M.MERIAH	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
M/ R.MERZOUGUI	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2022 / 2023

Dédicace

“

Je suis honoré et heureux de dédier ce modeste travail : À ma chère famille qui a toujours été là pour moi et m'a soutenu tout au long de mes études.

À ma mère pour son amour infini, son soutien et ses sacrifices, dont les paroles d'encouragement et les prières résonnent toujours dans mes oreilles.

À mon père, qui a été une source constante de soutien et de réconfort, ainsi que sa présence et son assistance dans les moments où j'ai toujours eu besoin de lui.

À mon frère et ma sœur Qui ont toujours été là pour me soutenir et me donner du courage dans les moments les plus difficiles de ma vie.

À mes chers amis avec qui j'ai partagé les meilleurs et les plus agréables moments tout au long de mon parcours universitaire ainsi qu'à tous mes collègues de ma classe du département des télécommunications.

Sans oublier tous ceux qui, par leur savoir et leurs actions, m'ont aidé et m'ont appris et m'ont fait ce que je suis. Et en fin À tous ceux qui me sont chers, à vous tous

Merci.

”

- Bouchra ayat allah

“

Je dédie ce projet de fin d'étude aux personnes qui me sont les plus chères :

À mes chers parents, quoi que je fasse ou dise, je ne saurais vous remercier suffisamment. Je remercie Allah de m'avoir donné des parents comme vous. Qu'Allah vous protège et vous bénisse.

À mes chers frères, pour leur soutien moral et leur encouragement.

À toute ma famille.

À toutes les personnes qui m'ont encouragé, merci d'être toujours là pour moi.

Je vous dis merci.

”

- Wafaa

Remerciements

“

Tout d'abord, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Nous souhaitons également adresser notre gratitude à notre directeur de thèse le Professeur Merzougui Rachid, pour sa direction de recherche, son attention et son suivi tout au long de ce travail, ainsi que pour sa disponibilité et son soutien.

plus vifs remerciements vont aux membres du jury pour leur intérêt pour notre recherche et leur volonté d'évaluer ce travail.

nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du département de télécommunications de l'université pour leur soutien constant et leur assistance tout au long de nos études.

Pour finir, je souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

”

Résumé

Avec l'évolution rapide de la technologie mobile, les réseaux 4G ne sont pas capables de répondre aux exigences ambitieuses des futurs réseaux sans fil, tels que la grande mobilité, la latence réduite, la fiabilité accrue, la consommation d'énergie efficace et le débit de données plus élevé à moindre coût [1]. Pour cela, l'implémentation de la solution 5G a été déployée pour pallier ces problèmes.

Cependant, plus la technologie de communication sans fil est avancée et plus l'étendue du réseau radio est grande, plus la planification de réseau radio devient complexe. En outre, la couverture et l'optimisation de la planification du réseau radio 5G doivent être soigneusement examinées avant le déploiement. Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, nous proposons d'étudier et de simuler les paramètres caractérisant la planification de réseau radio 5G (couverture, capacité, qualité de service, etc). L'outil *Atoll (version 3.4.0)* a été utilisé dans la simulation pratique de réseau 5G.

Mots clés : 5G, couverture, capacité, QoS, planification détaillée, gNB, SS-RSRP, ACP et Atoll.

Abstract

With the rapid evolution of mobile technology, 4G networks are not capable of meeting the ambitious requirements of future wireless networks, such as high mobility, reduced latency, increased reliability, efficient energy consumption, and higher data rates at lower cost [1]. For this reason, the implementation of the 5G solution has been deployed to address these problems. However, the more advanced the wireless communication technology and the larger the radio network coverage, the more complex the radio network planning becomes. In addition, coverage and optimization of 5G radio network planning must be carefully examined before deployment. In this final project, we propose to study and simulate the parameters characterizing 5G radio network planning (coverage, capacity, quality of service, etc.). the *Atoll tool (version 3.4.0)* was used in the practical simulation of the 5G network.

Keywords : 5G, coverage, capacity, QoS, detailed planning, gNB, SS-RSRP, ACP and Atoll.

ملخص

مع التطور السريع لتكنولوجيا الهواتف المحمولة، لا تستطيع شبكات 4G الرد على المتطلبات الطموحة للشبكات اللاسلكية المستقبلية، مثل الحركة العالية، والتأخير المنخفض، والموثوقية المعززة، والاستهلاك الفعال للطاقة، وسرعة نقل البيانات الأعلى بتكلفة أقل. لهذا السبب، تم تنفيذ حل 5G لتغطية هذه المشكلات. ومع ذلك، كلما تقدمت تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية وزادت مدى الشبكة اللاسلكية، كلما ازداد تعقيد تخطيط الشبكة اللاسلكية. بالإضافة إلى ذلك، يجب دراسة تغطية وتحسين تخطيط الشبكة اللاسلكية 5G بعناية قبل النشر. في إطار هذا العمل الختامي، نقترح دراسة ومحاكاة الصفات التي تميز تخطيط الشبكة اللاسلكية 5G (التغطية، القدرة، جودة الخدمة QoS...) تم استخدام أداة Atoll (الإصدار 3.4.0) في المحاكاة العملية لشبكة 5G.

كلمات مفتاحية :

5G، التغطية، السعة، QoS، التخطيط التفصيلي، gNB، ACP SS-RSRP، و Atoll.

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	III
Résumé	IV
Abstract	V
VI	ملخص
Liste des sigles et acronymes	XII
Introduction générale	1
1 Évolution des générations mobiles	3
1.1 Introduction	4
1.2 Historique et évolution de réseau mobile	4
1.2.1 Première génération (1G)	4
1.2.2 Deuxième génération (2G)	4
1.2.3 Troisième génération (3G)	5
1.2.4 Quatrième génération (4G)	5
1.3 Limitations de la 4G	6
1.4 Avènement de la 5G	6
1.4.1 Défis soulevés par la 5G	6
1.4.2 Présentation des services 5G	7
1.4.3 Indicateurs clés de performance (KPI)	7
1.4.4 Catégories d’usage 5G	8
1.4.5 Comparaison entre 4G et 5G	11
1.4.6 Techniques exploitées dans la 5G	12
1.5 Conclusion	16
2 Bases fondamentales du système 5G	17
2.1 Introduction	18
2.2 Modes de déploiement du réseau 5G	18
2.2.1 Options de déploiement	19
2.3 Architecture générale du réseau 5G	22
2.3.1 Équipement utilisateur	23
2.3.2 Réseau d’accès radio NG-RAN	23
2.3.3 Réseau cœur 5G	24
2.4 Etude de la couche physique	25
2.4.1 Accès multiple	25

2.4.2	Numérologie	27
2.4.3	Structure de trame temporelle	28
2.4.4	Structure de trame fréquentielle	29
2.4.5	Canaux et signaux physiques	31
2.5	Modèle de propagation	33
2.5.1	Modèle OKUMURA-HATA	33
2.5.2	Modèle COST 231-HATA	34
2.5.3	Modèle de propagation standard	34
2.6	Conclusion	35
3	Planification du réseau mobile 5G	36
3.1	Introduction	37
3.2	Planification de réseau radio	37
3.2.1	Objectif de la planification	37
3.2.2	Besoin d'un processus de planification	38
3.2.3	Processus de planification	38
3.2.4	Pré-planification	39
3.2.5	Dimensionnement de couverture	40
3.3	Planification détaillé	44
3.3.1	Présentation du logiciel de planification atoll	44
3.3.2	Environnement de travail d'Atoll	45
3.3.3	Étapes de planification	45
3.4	Conclusion	51
4	Simulation et discussion des résultats	52
4.1	Introduction	53
4.2	Optimisation	53
4.2.1	Planification automatique des cellules	53
4.3	Résultats de différentes prédictions	55
4.3.1	Niveaux de signal pour la couverture 5G	55
4.3.2	Couverture 5G par SS-RSRP	55
4.3.3	Couverture 5G par PDSCH $C/(I+N)$	56
4.3.4	Qualité de la liaison montante	57
4.3.5	Capacité 5G par débit (DL)	58
4.3.6	Couverture dans les zones de chevauchement.	58
4.4	Analyse de performance du réseau planifié	60
4.4.1	Perte de chemin en 5G en fonction de la distance	60
4.4.2	Réception 5G	60
4.5	Simulation	61
4.6	Comparaison	62
4.7	Conclusion	62
	Conclusion et perspectives	63
	Bibliographie	67
	Annexes	69
	A Définitions	70
	B Tableau Atoll	71

Table des figures

1.1	Applications du réseau 5G	7
1.2	Catégories d'usages de la 5G	8
1.3	Indicateurs clés de performance pour eMBB	9
1.4	Indicateurs clés de performance pour mMTC	9
1.5	Indicateurs clés de performance pour URLLC	10
1.6	Cas d'usage de la 5G	10
1.7	Comparaisons entre 4G et la 5G	11
1.8	Techniques utilisées dans la technologie 5G	12
1.9	Spectre des ondes millimétriques	13
1.10	Illustration des antennes basées sur le Massive MIMO	13
1.11	Massive MIMO & Beamforming	14
1.12	Petites cellules	15
1.13	Technologie full duplex	15
2.1	Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA	18
2.2	Architecture NSA pour système 5G	19
2.3	Architecture SA pour système 5G	19
2.4	Option 1 de déploiement SA 5G	20
2.5	Option 2 de déploiement SA 5G	20
2.6	Option 3 de déploiement SA 5G	21
2.7	Option 4 de déploiement NSA 5G	21
2.8	Option 5 de déploiement SA 5G	22
2.9	Option 7 de déploiement SA 5G	22
2.10	Aperçu du 5GS	23
2.11	Architecture globale du réseau NG-RAN	23
2.12	Architecture du cœur 5GC	24
2.13	Allocation de sous-porteuses en OFDMA	26
2.14	Allocation de sous-porteuses en SC-FDMA	27
2.15	Structure temporelle dans les trames 5G	28
3.1	Architecture de la planification 5G.	37
3.2	Étapes de planification d'un réseau cellulaire.	38
3.3	Zone de Chetouane.	40
3.4	Calcul de Dimensionnement de couverture.	41
3.5	Bilan de Liaison 5G	42
3.6	Environnement de travail d'Atoll.	45
3.7	Création d'un nouveau projet sur Atoll.	46
3.8	Nouveau projet 5G.	46
3.9	Importer la carte d'Algérie.	47
3.10	Wilaya de Tlemcen.	47
3.11	Commune de Chetouane.	48

3.12	zone de chetouane après focus et commutation de zone.	48
3.13	Choix du système de coordonnées.	49
3.14	Cartographie des sites.	50
3.15	Cartographie des sites sur Google Earth.	50
4.1	Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP.	53
4.2	Modification de détail après optimisation.	54
4.3	Résultats après l'optimisation	54
4.4	Prédiction de la couverture 5G par niveau de signal.	55
4.5	Couverture 5G par SS-RSRP.	56
4.6	Qualité par PDSCH C/(I+N)	57
4.7	prédiction de la qualité de la liaison montante	57
4.8	Prédiction de capacité 5G (DL).	58
4.9	Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.	59
4.10	Histogramme de Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.	59
4.11	Perte de chemin 5G pour le secteur 1 du site 17.	60
4.12	Analyse ponctuelle de la SS-RSRP dans la réception 5G.	61
4.13	Distribution des utilisateurs 5G.	61
4.14	Distribution des utilisateurs 5G.	61

Liste des tableaux

1.1	Comparaisons entre les performances de la 4G	11
2.1	Numérolgies de transmission prises en charge	27
2.2	Caractéristiques de la numérolgie en 5G	28
2.3	Bandes d'exploitation pour NR dans FR1	30
2.4	Bandes d'exploitation pour NR dans FR2	31
2.5	Modulation et codage des canaux pour chaque canal	32
3.1	Paramètres de la zone.	39
3.2	Paramètres de la transmission.	43
3.3	Résumé des paramètres et du rayon de cellule.	44
3.4	Exemple de données de coordonnées utilisées pour la localisation des sites.	51
4.1	Comparaison des résultats de prédiction 5G	62

Liste des sigles et acronymes

1G	<i>First generation.</i>
2G	<i>Second generation.</i>
3G	<i>Third generation.</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project.</i>
4G	<i>Fourth generation.</i>
5G	<i>Fifth generation.</i>
5GC	<i>5G Core</i>
5GS	<i>Fifth generation System</i>

A

ACP	<i>Automatic Cell Planning.</i>
AF	<i>Application Function</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>

B

BPSK	<i>Binary Phase-Shift keying</i>
-------------	----------------------------------

C

CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CSI	<i>Channel-State Information</i>
CSI-RS	<i>CSI Reference Signals</i>
CUPS	<i>Control and User Plane Separation</i>
CU	<i>Control Unit</i>

D

DL	<i>Downlink</i>
DM-RS	<i>Demodulation Reference Signal</i>

E

E-UTRA	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>
EDGE	<i>Enhanced Data for GSM Evolution</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiation Power</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband.</i>
EN-DC	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access-New Radio</i>
En-gNB	<i>gNodeB end-to-end</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
ETACS	<i>Extended Total Access Communication System.</i>

F

FDMA	<i>frequency division multiple access.</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FR1	<i>Frequency Range 1</i>
FR2	<i>Frequency Range 2</i>

G

gNB	<i>Nexte Generation Node Base Station</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications.</i>

H

H+	<i>Symbolise le HSPA+</i>
HSPA	<i>High Altitude Platform Systems</i>

I

IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IOT	<i>Internet Over Thing</i>
IP	<i>Internet protocol</i>

L

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

M

MAC	<i>Radio Link Control</i>
MAPL	<i>Maximum Allowable PathLoss</i>
MHZ	<i>Mega Hertz</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MMS	<i>Multimedia Message Service</i>
mMTC	<i>massive Machine Type Communication</i>
MN	<i>Master Node</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User MIMO</i>

N

NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NF	<i>Network Function</i>
NFs	<i>Network Functions</i>
Ng-eNB	<i>Next generation NodeB</i>
NRF	<i>Network Repository Function</i>
NSA	<i>Non-Standalone Access</i>
NSSF	<i>Network Slice Selection Function</i>

O

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

P

PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
PDCCH	Physical Downlink Control Channel.
PDCP	<i>Service Data Adaption Protocol</i>
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHY	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PRACH	<i>Physical Random-Access Channel</i>
PT-RS	<i>Phase Tracking Reference Signal</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>

Q

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

R

RAN	<i>Radio Access Network</i>
Rel	<i>Relais</i>
RLB	<i>The Radio Link Budget</i>
RLC	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>

S

SA	<i>Standalone Access</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier- Frequency Division Multi-Access</i>
SDAP	<i>Physical Layer</i>
SDL	<i>Supplimentary Downlink</i>
SDN	<i>Software-Defined Networking</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SRS	<i>Sounding Reference Signal</i>
SS-RSRP	<i>Synchronization Signal Reference Signal Received Power</i>
SUL	<i>Supplimentary Upnlink</i>
SU-MIMO	<i>Single User MIMO</i>

T

TACS *Total Access Communication System*

TDD *Time Division Multiplexing*

TDMA *Time Division Multiple Access*

TRS *Tracking Reference Signals*

U

UDM *Unified Data Management*

UE *User Equipment*

UIT *International Telecommunications Union*

UL *Uplink*

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

UPF *User Plan Function*

UP *User Plane*

URLLC *Ultra-Reliable Low Latency Communication*

W

W-CDMA *Wide Coding Division Multiple Access*

WiFi *Wireless Fidelity*

WIMAX *Wideband Interoperability for Microwave Access*

Introduction générale

Contexte

La technologie des télécommunications est en constante évolution avec l'arrivée de la nouvelle norme 5G qui vise à répondre aux besoins croissants des utilisateurs et aux nouveaux services. La 5G offre des performances supérieures en termes de débit, de latence et de connectivité, avec des applications potentielles dans divers secteurs tels que les transports, la santé et l'industrie. Pour soutenir ces applications, la technologie 5G exploite les fonctionnalités du *massive MIMO*, du *beamforming* et de l'utilisation de *mm Wave*. Cette technologie présente de nombreux avantages tels que la grande vitesse et la bande passante élevée, la réduction de la latence et l'amélioration de la flexibilité des services sans fil. La 5G a le potentiel d'élargir considérablement la façon dont les données sont déplacées et d'ouvrir de nouveaux cas d'utilisation et applications dans divers secteurs [2].

Problématique

L'évolution de la communication mobile nécessite une étude approfondie de la technologie 5G, notamment en ce qui concerne la planification du réseau d'accès radio. Le problème réside dans l'installation et la configuration idéale, fiable et efficace d'une station de base 5G NR tout en exploitant l'outil de planification radio professionnel *ATOLL* pour les opérateurs mobiles.

Objectifs

L'objectif de cette étude est de planifier la technologie 5G dans la région de *Chetouane (Tlemcen)* en utilisant l'outil *ATOLL*. Ce projet vise à démontrer le potentiel de la 5G par rapport aux générations précédentes en termes de services offerts, de débits, de qualité et de fiabilité.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à l'évolution des générations mobiles et leurs caractéristiques, tout en présentant la norme 5G.

Le deuxième chapitre présente les bases fondamentales du système 5G, y compris son architecture, son mode de fonctionnement et la couche physique en détail.

Dans le troisième chapitre, nous nous focalisons sur la planification du réseau mobile 5G, en montrant les différentes étapes de l'installation et la configuration d'une station de base 5G sous l'outil *ATOLL*.

Le dernier chapitre expose les résultats de la simulation obtenue. Nous discutons les performances de la technologie 5G NR en termes de qualité, de capacité et de débits. Enfin, la conclusion générale et les perspectives de ce travail sont présentées, avec deux annexes liées aux différentes parties du document.

Chapitre 1

Évolution des générations mobiles

1.1 Introduction

Un réseau téléphonique est un réseau de communications électroniques utilisé pour mettre des services téléphoniques à la disposition du public. Il permet la transmission entre les points de terminaison du réseau : parole, vidéo, texte...

Le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé depuis leur apparition, plusieurs générations sont nées à partir de la première génération (1G) qui consistait en des transmissions analogiques. Plusieurs générations de réseaux cellulaires ont suivi, à savoir la 2G (GSM, GPRS, EDGE) qui a marqué le passage de l'analogique au numérique. La 3G (UMTS/HSPA/HSPA+) est la première norme permettant l'échange simultané de la voix et des données avec une vitesse suffisante pour répondre aux besoins des applications multimédia légères. La 4G LTE est caractérisée par sa grande vitesse, et bientôt la 5G qui n'est pas encore mise en œuvre en Algérie. Dans ce chapitre, nous allons présenter toutes les générations de réseaux cellulaires et plus précisément la 5G.

1.2 Historique et évolution de réseau mobile

Au cours des 40 dernières années, le monde a connu cinq générations de communication mobile :

1.2.1 Première génération (1G)

La première génération de réseaux cellulaires (1G) est une technologie de téléphonie mobile analogique développée dans les années **1980** [3]. Les systèmes 1G utilisaient des signaux analogiques pour la communication sans fil et ont été remplacés progressivement par des systèmes de deuxième génération (2G) basés sur la technologie numérique.

Les principaux systèmes 1G sont les suivants :

- **AMPS** : lancé aux États-Unis, est un réseau analogique basé sur la technologie FDMA
- **TACS** : c'est la version européenne d'AMPS. Il a été développé pour utiliser la bande de fréquence de **900 MHz** et a été largement utilisé au *Royaume-Uni*, en *Europe continentale*, à *Hong Kong* et au *Japon*. Comme AMPS, TACS utilisait également la technologie FDMA.
- **ETACS** : est une version améliorée de TACS développée au *Royaume-Uni*. Il utilisait un plus grand nombre de canaux de communication.

Les systèmes de première génération (1G) présentaient des limites en termes de capacité, de qualité de voix et de sécurité, et étaient également sujets aux interférences.

Par conséquent, ils ont été remplacés par des systèmes de deuxième génération (2G) basés sur la technologie numérique, offrant ainsi une qualité vocale améliorée et une capacité accrue.

1.2.2 Deuxième génération (2G)

Le système mobile 2G a été développé dans les années **1990**, utilisant le concept de modulation numérique, et a été lancé grâce à la technologie GSM.

La 2G prend également en charge davantage de bandes de fréquences. Avant l'avènement de la 3G, deux générations intermédiaires de la 2G ont été développées : la 2,5 G et la 2,75 G, représentées respectivement par les technologies GPRS et EDGE.

Les principales caractéristiques du système 2G sont les suivantes :

- **Bande de fréquence** : Le standard GSM utilise les bandes de fréquence de **900 MHz** et de **1800 MHz** en *Europe* [4].
- **Technique d'accès** : Les réseaux 2G utilisent la technique d'accès TDMA, qui se base sur une technique de découpage temporel des canaux de communication, afin d'augmenter le volume de données transmises simultanément [5].
- **Débit** : Grâce aux réseaux 2G, il est possible de transmettre de la voix ainsi que des données numériques de faible volume, notamment des messages textes (SMS) ou encore des messages multimédias (MMS). La norme GSM permet un débit maximal de **9,6 Kbps** [6].

1.2.3 Troisième génération (3G)

En **2000**, la troisième génération de systèmes de communication mobile sans fil a été introduite, offrant des services avancés par rapport à la 1G et 2G [7]. La norme de la 3G utilise une vitesse allant jusqu'à **2 Mbps**, offrant des services de données tels que l'accès à la télévision/vidéo, la navigation sur Internet, le courrier électronique, la vidéo conférence, la radiomessagerie, etc. Plus tard, des versions améliorées de la 3G ont été introduites, notamment la 3,5 G et la 3,75 G [8], qui offrent des débits de données encore plus élevés.

Les caractéristiques de ces versions améliorées sont les suivantes :

- **Bande de fréquence** : La bande de fréquence utilisée pour les réseaux 3G se situe généralement entre **1885-2025 MHz** et **2110-2200 MHz**, ce qui diffère des bandes utilisées pour les réseaux 2G.
- **Technique d'accès** : La technique d'accès utilisée pour les réseaux 3G est le W-CDMA qui permet d'attribuer un code unique à chaque utilisateur pour partager la même bande de fréquence. Cette technique est également appelée étalement de spectre, qui permet d'augmenter la capacité de transmission des données et la qualité de la voix pour plusieurs utilisateurs simultanément [9].
- **Débit** : les réseaux de troisième génération (3G) offrent des débits de données plus élevés que les réseaux précédents, allant de **384 Kbps** à **2 Mbps**.

1.2.4 Quatrième génération (4G)

La 4G est une technologie de réseau sans fil introduite en **2010**, développée dans le but d'offrir des performances supérieures à celles des générations précédentes. Elle vise à fournir des services voix et données haut débit, de grande capacité, sécurisés et à moindre coût.

Les améliorations clés apportées par la 4G sont les suivantes :

- **Bande de fréquence** : Les réseaux LTE utilisent une bande de fréquence de **800 MHz**, **1800 MHz** et **2600 MHz**, ce qui leur permet d'offrir des vitesses plus élevées et une meilleure couverture.
- **Technique d'accès** : La 4G utilise la technologie OFDMA en liaison descendante et SC-FDMA en liaison montante, qui permet de transmettre des données simultanément à plusieurs utilisateurs et d'optimiser l'utilisation du spectre.
- **Débit** : La 4G est conçue pour offrir des débits plus élevés, avec des objectifs de **100 Mbps** en liaison descendante et jusqu'à **75 Mbps** en liaison montante.

- **Mobilité** : La 4G est optimisée pour une mobilité allant jusqu'à **350 km/h**, ce qui permet aux utilisateurs de rester connectés même en mouvement à grande vitesse.
- **Latence** : La 4G offre une latence de transfert de données faible, avec moins de **5 ms** de latence pour les petits paquets *IP* lorsque les conditions sont optimales. Cela permet une expérience utilisateur plus fluide et réactive [10].

1.3 Limitations de la 4G

Le monde est en train de devenir de plus en plus numérique et connecté, avec l'émergence de nouvelles technologies telles que la réalité mixte, l'imagerie haute résolution, les véhicules autonomes, l'Internet des objets, et bien plus encore [11]. Cela génère une quantité croissante de données, ce qui nécessite la mise en place de nouveaux systèmes de communication dans divers domaines tels que la santé, les transports, le climat, etc. Pour répondre à cette augmentation des données, des progrès significatifs doivent être réalisés dans les systèmes de télécommunications mobiles.

La 4G a amélioré plusieurs paramètres tels que le débit et la bande passante par rapport aux anciennes générations de réseaux mobiles. Elle permet une navigation internet rapide et fiable via des smartphones, des tablettes ou des ordinateurs portables. Cependant, la 4G ne peut pas répondre aux exigences de certains scénarios spéciaux avec une densité de trafic élevée, un grand nombre de connexions et une mobilité élevée.

C'est pourquoi l'industrie du téléphone mobile a choisi de développer le réseau de cinquième génération (5G) pour résoudre les problèmes rencontrés par la 4G. Dans ce projet de fin d'étude, nous proposons de déployer et de simuler les services de la 5G sous Atoll afin de satisfaire les besoins des utilisateurs.

1.4 Avènement de la 5G

La 5G est la nouvelle technologie d'accès radio développée par le 3GPP en **2020** et conçue pour être la nouvelle norme de l'interface radio. Elle vise à réduire la latence, augmenter le débit de données, gérer un volume de trafic de données croissant et fournir une connectivité permanente et diversifiée.

1.4.1 Défis soulevés par la 5G

L'objectif de la 5G est d'assurer les améliorations suivantes [12] :

- Augmentation importante du nombre d'utilisateurs de la 5G
- Réduction de **10 fois** le temps de latence.
- Gestion d'un volume de trafic énorme généré par les utilisateurs de la 5G.
- Expansion de la bande passante d'application avec une diversité de demandes et de caractéristiques

1.4.2 Présentation des services 5G

Contrairement aux réseaux mobiles actuels, la 5G ne sera pas principalement axée sur la téléphonie. Cette particularité en fait son originalité.

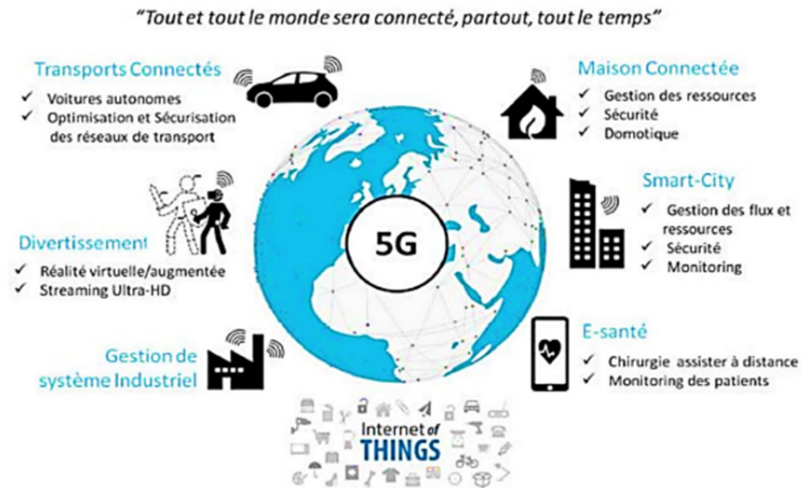


FIG. 1.1 : Applications du réseau 5G [13].

En effet, nous pouvons identifier plusieurs applications majeures que le réseau 5G servira (FIG. 1.1) :

- La smart-city dont l'infrastructure pourra être gérée plus efficacement tout en optimisant sa consommation de ressources grâce à des réseaux de capteurs complexes.
- La maison connectée est contrôlée facilement et efficacement, notamment en termes de ressources, et sécurisée à distance via des capteurs et des systèmes domotiques.
- Les transports connectés, avec notamment l'avènement des voitures autonomes, qui permettra de sécuriser et d'optimiser le réseau routier.
- La santé connectée avec des innovations majeures telles que la chirurgie à distance des patients et personnes à risques.

Dans les domaines des activités industrielles, logistiques et en matière de sécurité, on peut prévoir d'autres applications moins révolutionnaires que les précédentes, et toutefois significatives.

1.4.3 Indicateurs clés de performance (KPI)

Afin de mettre en œuvre les trois types d'utilisation (URLLC, mMTC et eMBB), Huit indicateurs de Performance (KPI) ont été établis par l'UIT pour spécifier, quantifier et mesurer les caractéristiques des systèmes **IMT-2020 (5G)** [3] :

- Débit crête par utilisateur (**Gbit/s**).
- Débit moyen perçu par l'utilisateur (**Mbit/s**).
- Efficacité spectrale (**bit/Hz**).
- Vitesse maximale des terminaux (**km/h**).

- Latence (ms).
- Nombre d'objets connectés sur une zone (**quantité d'objets/km²**).
- Efficacité énergétique du réseau.
- Débit sur une zone (**Mbit/s/m²**).

1.4.4 Catégories d'usage 5G

L'Union internationale des télécommunications (UIT) prévoit trois domaines d'utilisation pour la 5G : le haut débit mobile amélioré (eMBB), la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (URLLC) et la communication de masse de type machine (mMTC) [14]. La figure (FIG. 1.2) présente le résumé des trois cas d'utilisation de la 5G dans les différents domaines d'applications.

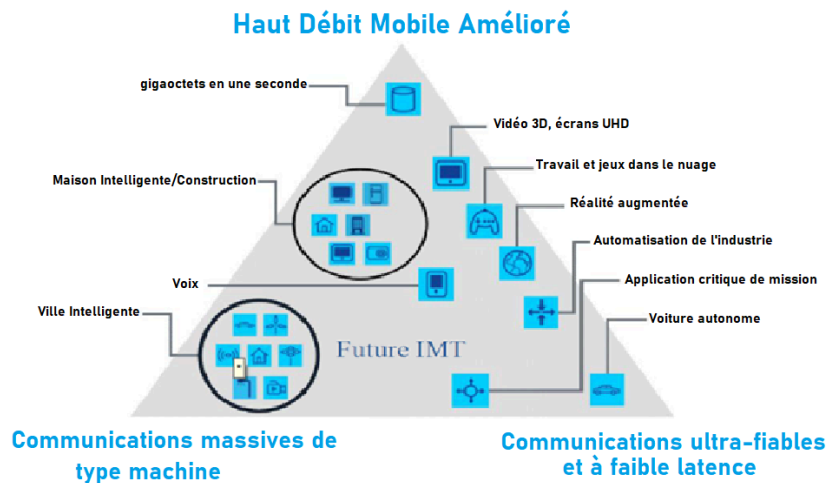


FIG. 1.2 : Catégories d'usages de la 5G [3].

Les principales caractéristiques des domaines d'utilisation sont décrites dans les sections suivantes :

1. **Le haut débit mobile amélioré (eMBB)** : Les principales caractéristiques de ce domaine d'utilisation sont : débits de données élevés, haute densité d'utilisateurs et une grande mobilité (par exemple : trains à grande vitesse). L'accès mobile à haut débit amélioré assure une transition en douceur entre le réseau fixe et le réseau mobile.

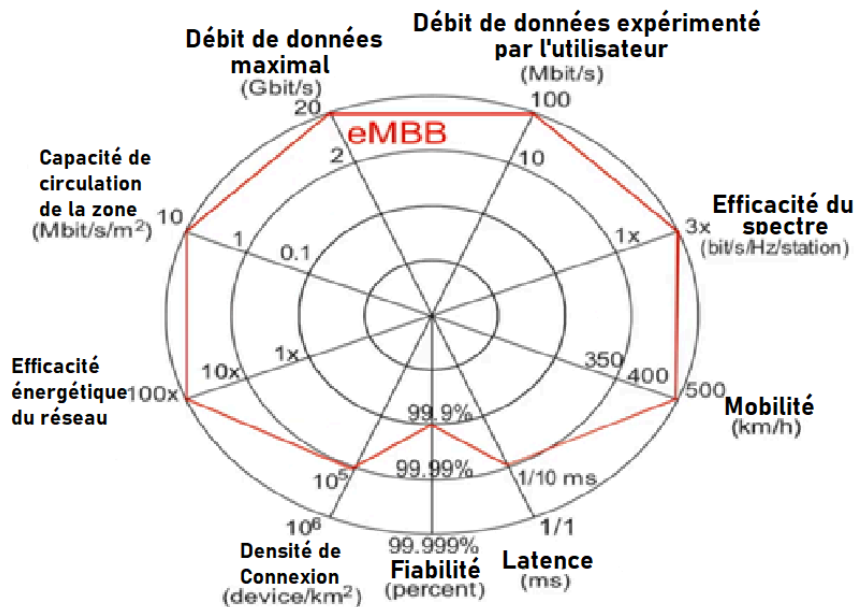


FIG. 1.3 : Indicateurs clés de performance pour eMBB [15].

La figure (FIG. 1.3) illustre la position du cas d'utilisation haut débit mobile amélioré sur l'étoile des 8 KPI mentionnés précédemment.

2. **Communication de masse de type machine mMTC** : Le concept de *massive MTC* met l'accent sur les besoins d'un grand nombre d'appareils connectés qui requièrent une faible capacité de données et des exigences en latence réduites [12].

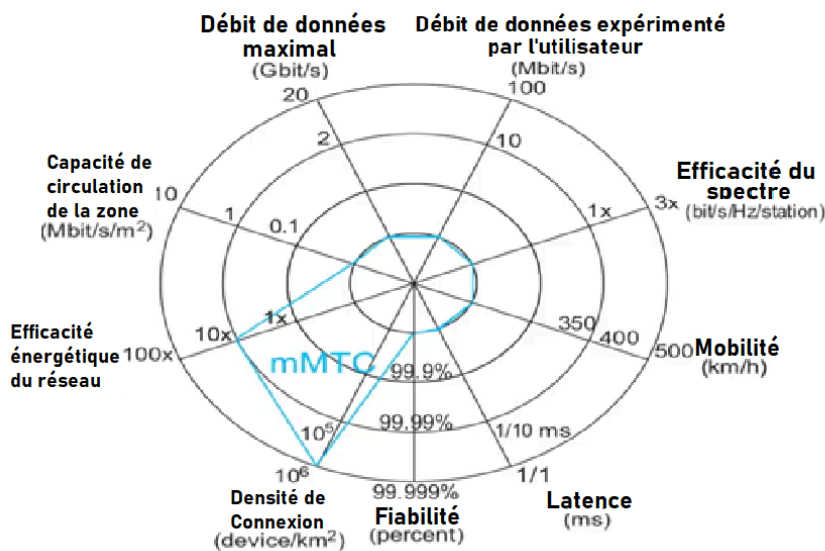


FIG. 1.4 : Indicateurs clés de performance pour mMTC [15].

La Figure (FIG. 1.4) situe le cas d'utilisation de la communication de masse de type machine sur l'étoile des 8 KPI précédemment mentionnée.

3. **Communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (URLLC)** : Les communications ultra-fiables pour les besoins critiques avec une très faible latence permettent une réactivité accrue [16].

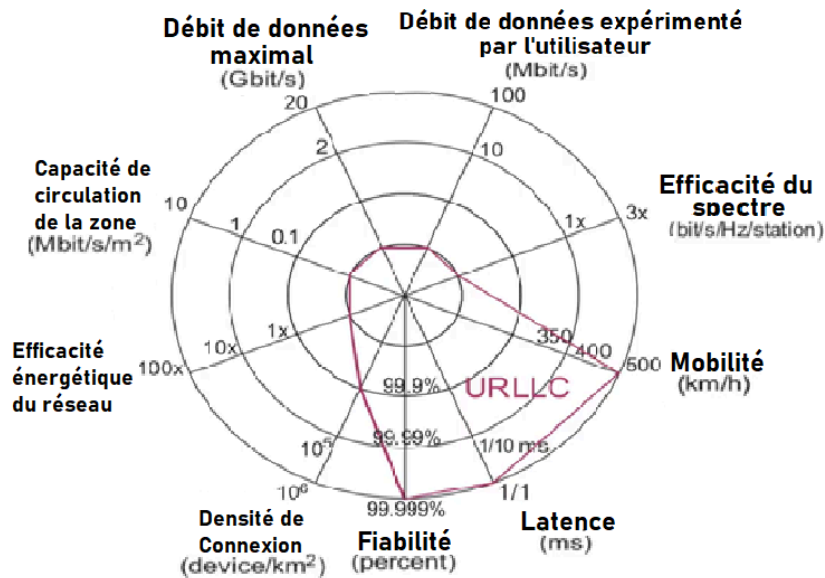


FIG. 1.5 : Indicateurs clés de performance pour URLLC [15].

La position du cas d'utilisation de la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible est représentée sur l'étoile des 8 KPI mentionnés précédemment, comme illustré dans la figure (FIG. 1.5).

Chacun de ces familles d'usages regroupe donc des différents services (FIG. 1.6).

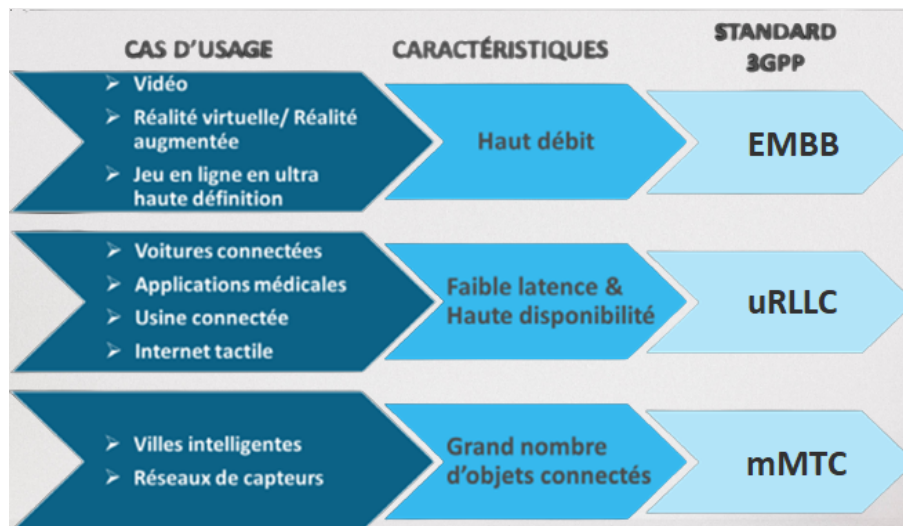


FIG. 1.6 : Cas d'usage de la 5G [15].

L'eMBB est conçu pour répondre aux exigences d'une société de plus en plus numérisée en se concentrant sur les services à haut débit tels que la réalité virtuelle, les appels et conférences vidéo, ainsi que les jeux en ligne en ultra haute définition. Le mMTC, quant à lui, inclut les applications de ville intelligente et les réseaux de capteurs, tandis que l'URLLC est destiné à répondre aux attentes de la fabrication industrielle contrôlée à distance, de la chirurgie médicale à distance, des réseaux intelligents et de la conduite automatisée, etc.

1.4.5 Comparaison entre 4G et 5G

L'UIT a défini la quatrième génération de normes de télécommunications en se basant sur huit indicateurs clés de performances spécifiées dans un schéma (FIG. 1.7). Ce même schéma inclut également des spécifications pour la cinquième génération.

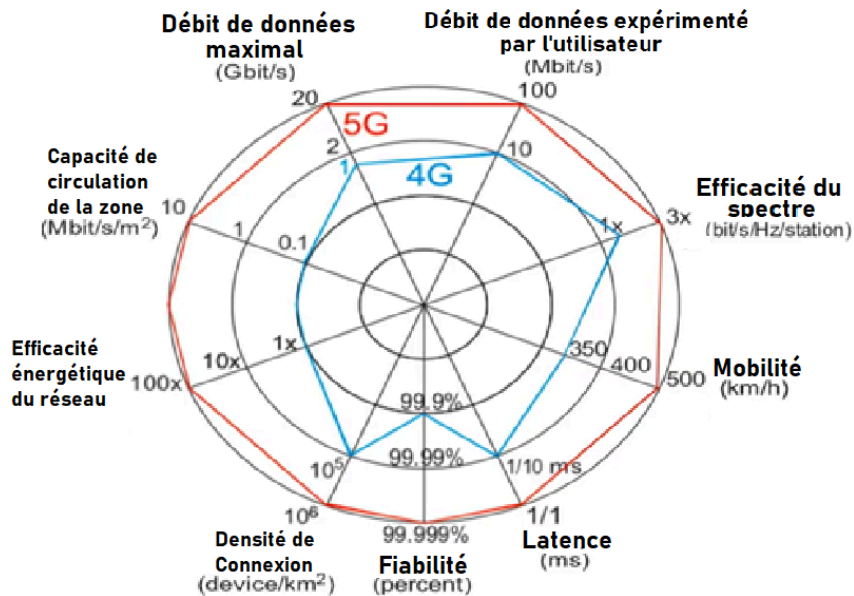


FIG. 1.7 : Comparaisons entre 4G et la 5G [15].

Le tableau (TAB. 1.1) récapitulatif des performances prévues de la 5G et celles actuellement disponibles avec la 4G :

Performances/Génération	4G	5G
1. Débit maximal (Gbit/s)	1	20
2. Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
3. Efficacité spectrale	1x	3x
4. Vitesse (km/h)	350	500
5. Latence (ms)	10	1
6. Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	10 ⁵	10 ⁶
7. Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
8. Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0,1	10

TAB. 1.1 : Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G [17].

1.4.6 Techniques exploitées dans la 5G

Pour comprendre comment la 5G va modifier le paysage des télécommunications, il est nécessaire de se concentrer sur les technologies qui en constituent le fondement. L'utilisation de plusieurs technologies clés distingue la 5G des normes précédentes (FIG. 1.8) :



FIG. 1.8 : Techniques utilisées dans la technologie 5G [18].

1- Bande de fréquence

La 5G a besoin de trois plages de fréquences clés afin d'offrir une large couverture et de garantir tous les cas d'utilisation. Les bandes pour NR sont fondamentalement classées comme bandes basses, moyennes et hautes. Ces bandes peuvent être utilisées en fonction de l'application comme suit :

- **Bandes basses au-dessous de 1 GHz** : Cet ensemble est destiné à couvrir de grandes zones, généralement pour un déploiement rural. La bande passante maximale pour un utilisateur est de **100 MHz**.
- **Bandes moyennes 1 GHz à 6 GHz** : Cette gamme intermédiaire est destinée au déploiement 5G dans un contexte urbain ou sous-urbain. Ici aussi, la bande passante maximale est de **100 MHz** [19].
- **Bandes hautes au-dessus de 24 GHz (*mm Wave*)** : Sa propagation est plus faible, mais sa bande passante est plus élevée (bande passante maximale de **400 MHz**). Cette plage est destinée à un environnement dense urbain [19].

Pour résumer, 5G utilise deux gammes de fréquences :

- **Gamme de fréquences 1 (FR1)** : y compris les bandes de fréquences inférieures à **6 GHz**.
- **Gamme de fréquences 2 (FR2)** : y compris les bandes de fréquences dans la gamme (**24–100 GHz**) [20].

2- Ondes Millimétriques (*mm Wave*)

Le nom *mm wave* désigne toutes les composantes présentes dans le spectre de fréquence entre **24** et **100 GHz** (FIG. 1.9), qui n'ont encore jamais pris pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation.

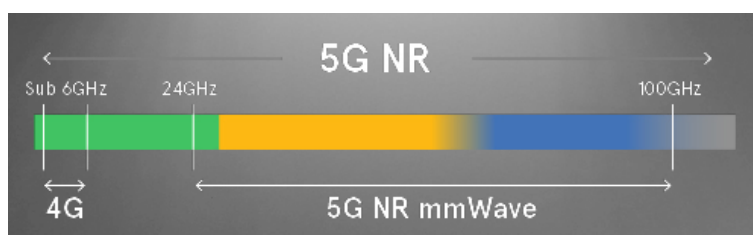


FIG. 1.9 : Spectre des ondes millimétriques [21].

La croissance constante des débits et des volumes de données échangées exige l'utilisation de bandes de fréquences plus larges, qui nécessitent le développement de technologies avancées telles que la miniaturisation, la réduction des coûts et la compatibilité de la consommation énergétique pour permettre une utilisation efficace et économique.

Selon l'utilisation de ces bandes de fréquences pourrait offrir des réserves de spectre importantes.

3- Massive MIMO

Les systèmes *MIMO* font partie intégrante des systèmes sans fil actuels, offrant une efficacité spectrale et énergétique élevée pour répondre à la demande croissante en débit pour un grand nombre d'utilisateurs.

Bien que les nouvelles technologies MIMO telles que le *MIMO* mono-utilisateur (*SU-MIMO*) et le *MIMO* multi-utilisateur (*MU-MIMO*) aient été développées pour répondre à cette demande, elles ne suffisent plus à satisfaire les besoins toujours croissants.

Les utilisateurs sans fil ont produit des milliards de données au cours des dernières années, nécessitant une efficacité et une fiabilité accrues dans le traitement de ces données.

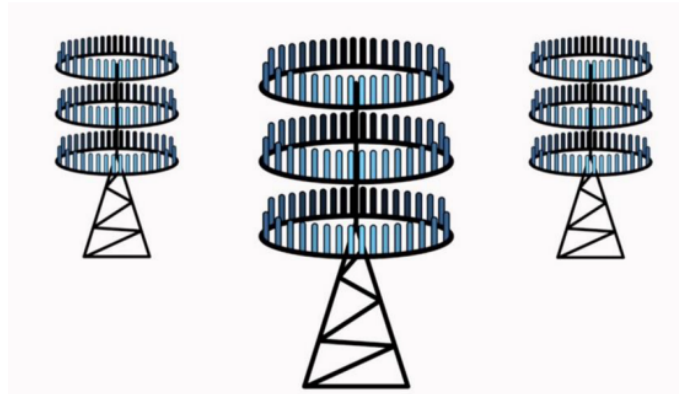


FIG. 1.10 : Illustration des antennes basées sur le Massive MIMO [22].

La technologie *Massive MIMO* (FIG. 1.10) est considérée comme la plus captivante pour la 5G et au-delà de l'ère de l'accès sans fil. Cette technologie représente une avancée des systèmes *MIMO* actuels en regroupant des centaines, voire des milliers d'antennes à la station de base pour desservir simultanément de nombreux utilisateurs.

L'utilisation d'un grand nombre d'antennes supplémentaires dans le système *Massive MIMO* permet de concentrer l'énergie dans une région de l'espace plus petite, offrant ainsi une meilleure efficacité spectrale et un débit plus élevé [23].

4- Beamforming

Le *beamforming* est la capacité de la station de base à adapter le modèle de rayonnement de l'antenne [17].

Le *beamforming* aide la station de base à trouver une route appropriée pour livrer des données à l'utilisateur, et il réduit également les interférences avec les utilisateurs voisins le long de la route, comme indiqué dans la figure (FIG. 1.11).

Le *beamforming* présente plusieurs avantages pour les réseaux 5G et au-delà. Selon la situation, la technologie de *beamforming* peut être mise en œuvre de plusieurs façons différentes dans les réseaux futurs.

Pour les systèmes *massifs MIMO*, le *beamforming* aide à augmenter l'efficacité spectrale, et pour les *mm wave*, il aide à augmenter le débit de données.

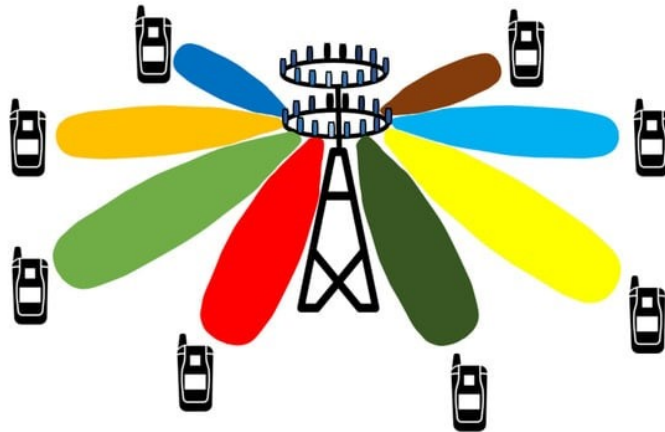


FIG. 1.11 : Massive MIMO & Beamforming [22].

Dans les systèmes *massifs MIMO*, la station de base peut envoyer des données à l'utilisateur à travers différentes voies, et le *beamforming* coordonne le mouvement des paquets et le temps d'arrivée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément. Étant donné que le *mm wave* ne peuvent pas pénétrer les obstacles et ne se propagent pas sur de longues distances en raison de leur courte longueur d'onde, le *beamforming* permet l'envoi de faisceaux concentrés vers les utilisateurs. Ainsi, le *beamforming* permet à un utilisateur de recevoir un signal fort sans interférence avec d'autres utilisateurs.

5- Petites cellules

Les *petites cellules* sont une technologie prometteuse pour les réseaux 4G et 5G, car elles reposent sur l'installation d'un grand nombre de stations de base couvrant de petites zones géographiques et des espaces intérieurs tels que les gares ou les centres commerciaux.

Les *petites cellules* permettent d'améliorer la couverture et les capacités des réseaux pour faire face à l'augmentation du trafic de données mobiles, grâce à la multiplication des antennes qui permet de diminuer le nombre d'utilisateurs connectés à chaque antenne, offrant ainsi de meilleurs débits et une meilleure qualité de service.

En outre, ces réseaux peuvent être configurés dynamiquement en fonction du nombre d'utilisateurs, par exemple en désactivant des cellules sous-utilisées à certains moments de la journée, ce qui permettrait de réaliser des économies d'énergie [24].

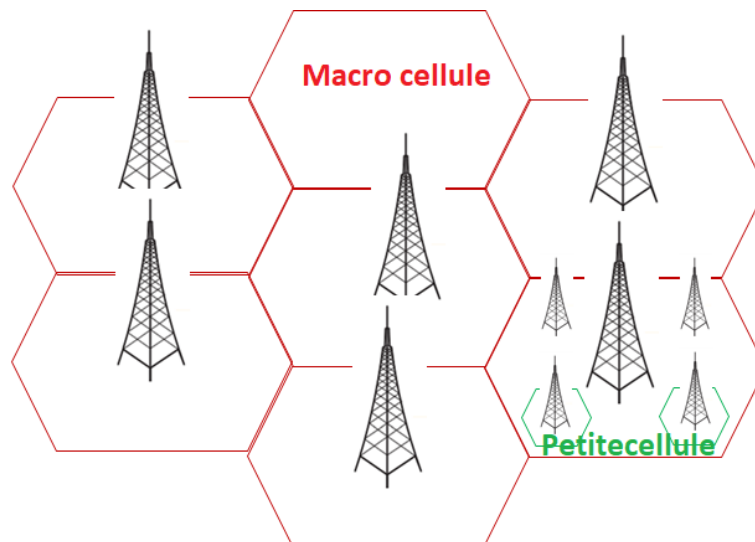


FIG. 1.12 : Petites cellules [25].

En somme, les *petites cellules* sont une solution de densification du réseau pour compléter l'infrastructure mobile actuelle, qui repose principalement sur des stations plus grandes appelées *macro cellules*. [26] [24].

6- Full duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences, connu sous le nom de FDD, utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles), soit à des moments différents (duplexage temporel, appelé TDD).

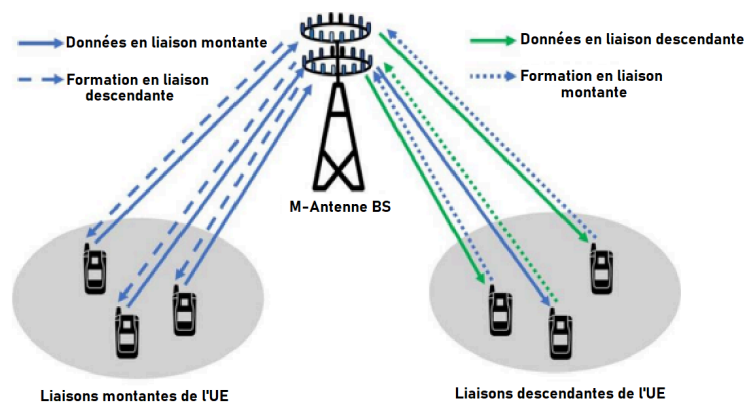


FIG. 1.13 : Technologie full duplex [27].

Le *full duplex* permet l'émission et la réception simultanée d'information (FIG. 1.13), sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit [17].

Ce duplex offre plusieurs avantages :

- Efficacité du spectre.
- Caractéristique d'évanouissement.
- Filtrage.

- Nouvelle solution de relais.
- Coordination améliorée des interférences.

1.5 Conclusion

La 5G, ou cinquième génération, est la nouvelle version de l'ensemble des technologies mobiles dont le déploiement doit commencer. Il s'agit d'un ensemble de méthodes de transmission de l'information qui doit offrir à la fois une rapidité et un temps de latence extrêmement faibles, permettant le développement de nouveaux services et l'amélioration des systèmes existants. La 5G doit également permettre de nombreuses innovations : prendre en charge la connexion de tous les véhicules autonomes et connectés, faciliter le développement de la santé.

Dans le prochain chapitre et comme suite logique de notre travail, nous allons exposer l'architecture du réseau 5G et ces composants principaux tout en présentant un aperçu général de leur couche physique.

Chapitre 2

Bases fondamentales du système 5G

2.1 Introduction

5G est la norme sans fil qui constituera le fondement de la prochaine génération de réseaux de téléphonie mobile. La 5G connectera nos smartphones, voitures, compteurs, périphériques portables, etc. Elle vise à rendre le haut débit sans fil identique à celui des réseaux filaires avec coût par bit nettement inférieur. Avec de nouveaux niveaux de latence, de fiabilité et de sécurité, la 5G évoluera pour connecter efficacement l'immense Internet des objets (IoT) et offrira de nouveaux types de services.

Ce chapitre va présenter une vue globale de l'architecture du réseau, non seulement le réseau cœur et le réseau d'accès, mais aussi les composants et les éléments caractérisant cette technologie, tout en basant sur les fonctionnalités de la couche physique.

2.2 Modes de déploiement du réseau 5G

Le 3GPP implémente six options d'architecture pour le déploiement 5G chez un opérateur. Comme montre la FIG. 2.1, les options de déploiement ont été principalement regroupées en deux catégories. L'option autonome (SA) dans laquelle il n'y a qu'un seul réseau d'accès indépendant (LTE ou 5G) est connecté à l'EPC ou au 5GC.

Pour les options non autonomes (NSA), les deux technologies d'accès radio LTE et 5G sont utilisées pour permettre à l'un des réseaux d'accès de se connecter à un EPC ou à un 5GC.

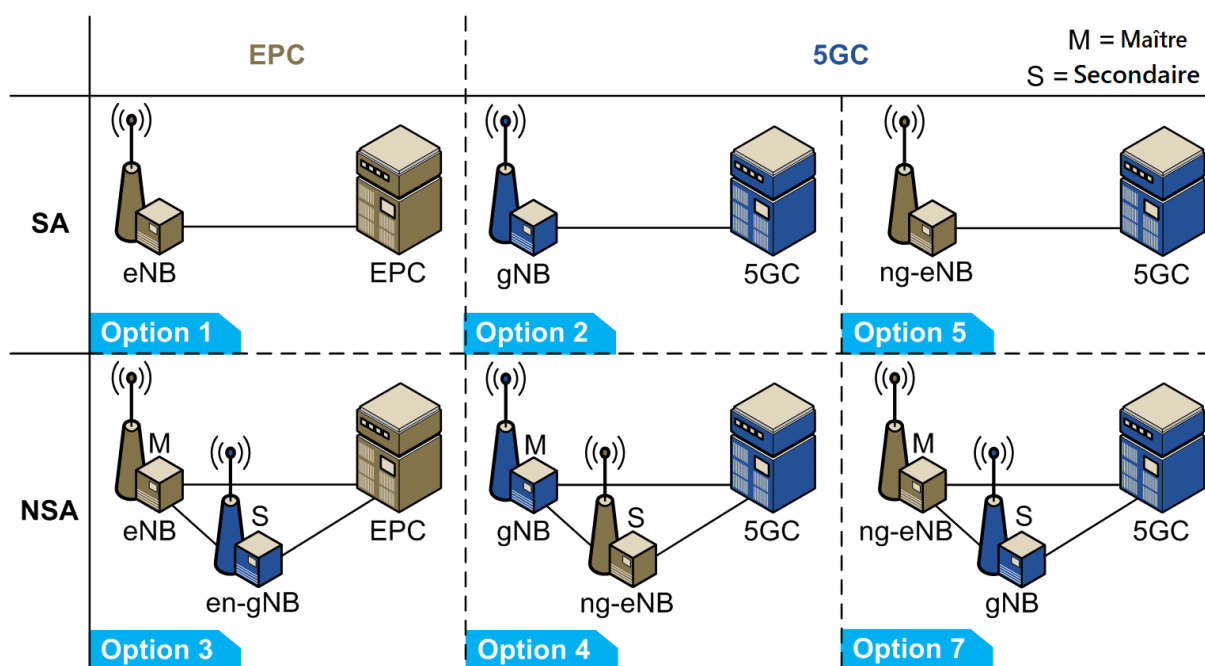


FIG. 2.1 : Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA [28].

Les options 1, 2 et 5 appartiennent à la catégorie SA, tandis que les options 3, 4 et 7 appartiennent à la catégorie NSA.

1. **Non-autonome :** L'architecture NSA peut être considérée comme une étape temporaire vers le déploiement. Dans cette catégorie, la station de base NR (gNB) se connecte à la station de base LTE (eNB) via l'interface X2.

La figure (FIG. 2.2) illustre l'architecture NSA :

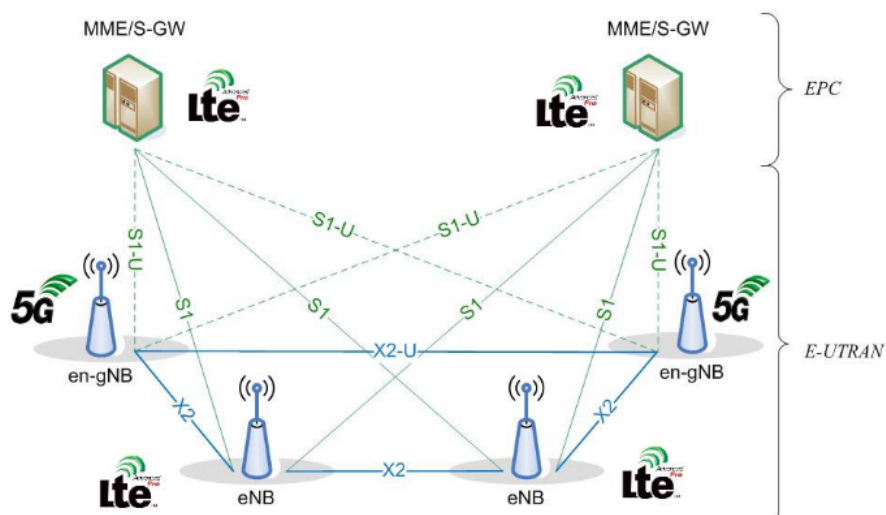


FIG. 2.2 : Architecture NSA pour système 5G [29].

L'interface X2 a été implémentée avant la version 15 pour permettre la connexion de deux eNB. La **version 15** prend également en charge la connexion d'un eNB et d'un en-gNB pour fournir la NSA.

La NSA offre une connectivité double via les réseaux d'accès : 4G (E-UTRA) et 5G. Elle est donc appelée EN-DC. Dans ce mode de connectivité, l'eNB 4G est le nœud principal (MN) tandis que l'en-gNB 5G est le nœud secondaire (SN) [29].

2. **Autonome** : L'architecture SA est présentée sur la figure (FIG. 2.3) :

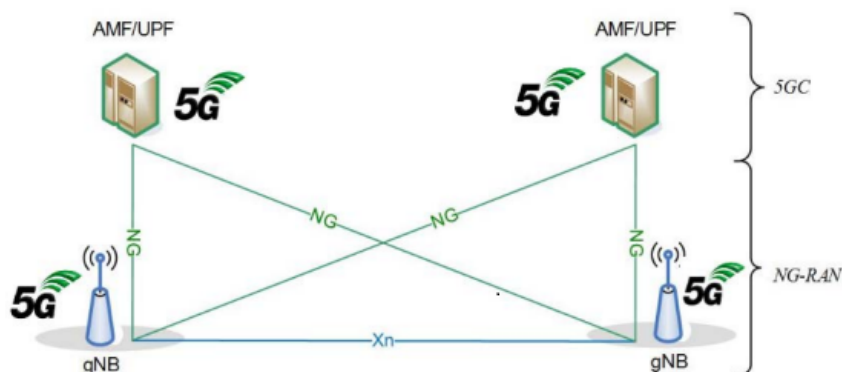


FIG. 2.3 : Architecture SA pour système 5G [30].

L'architecture SA peut être considérée comme le "déploiement complet de la 5G" aucune partie de 4G ne peut être considéré. La station de base NR (gNB) se connecte via l'interface Xn et le réseau d'accès (NG-RAN) se connecte au réseau 5GC via l'interface NG [31].

2.2.1 Options de déploiement

Il existe plusieurs options de configuration et de déploiement dans les catégories SA et NSA. Nous étudierons ces options dans les sections suivantes :

- **Option 1** : Est une option de déploiement autonome qui présente le déploiement actuel de la 4G (LTE+EPC) tel qu'il est illustré sur la figure (FIG. 2.4). En d'autres termes, il s'agit du déploiement traditionnel de la radio LTE connectée à l'EPC et n'a aucun lien avec la 5GC ou la 5G.

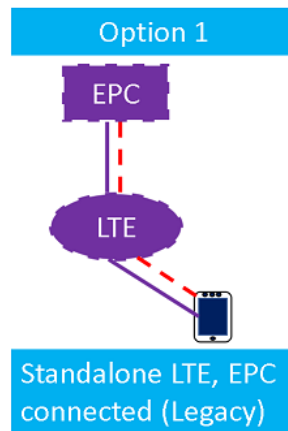


FIG. 2.4 : Option 1 de déploiement SA 5G [29].

La plupart des opérateurs dans le monde entier exploitent actuellement leurs réseaux selon ce mode de déploiement.

- **Option 2** : Est en effet une option SA qui nécessite l'utilisation d'un gNB en tant que réseau d'accès radio (NG-RAN) et d'un 5GC comme réseau central. De plus, tous les équipements utilisateurs (UE) doivent être compatibles avec la 5G pour pouvoir bénéficier de toutes les fonctionnalités offertes par cette technologie.

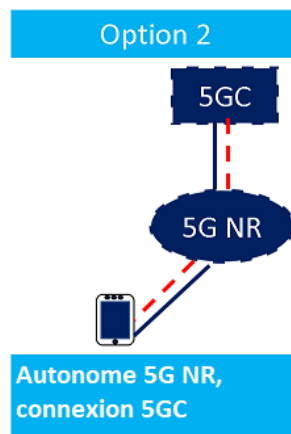


FIG. 2.5 : Option 2 de déploiement SA 5G [29].

La figure (Fig. 2.5) illustre l'option 2 de déploiement SA 5G.

- **Option 3** : Cette option est divisée en trois tâches (options) : **3**, **3a** et **3x**, comme il est indiqué dans la figure (FIG. 2.6).

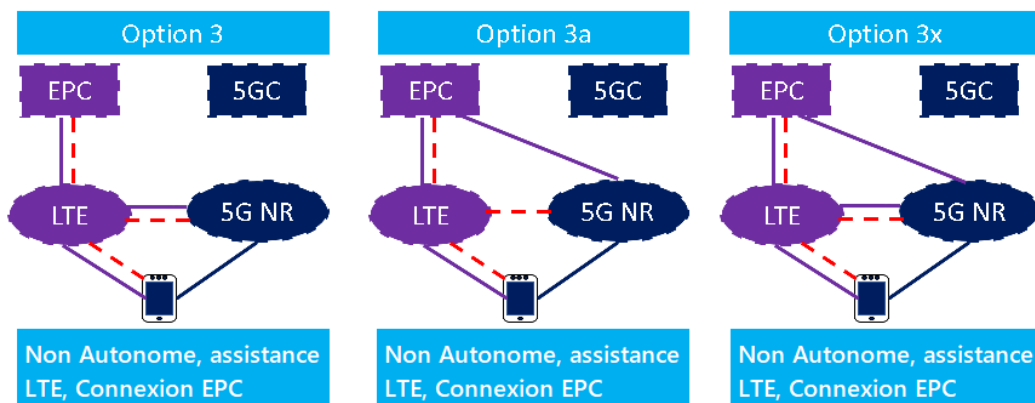


FIG. 2.6 : Option 3 de déploiement SA 5G [29].

L'option **3** utilise le RAN LTE pour envoyer les données d'utilisateur au 5G, tandis que l'option **3a** envoie les données directement depuis l'EPC au 5G. L'option **3x** combine les deux options en acheminant une partie des données du plan utilisateur directement de l'EPC au 5G et une autre partie via le RAN LTE.

- **Option 4** : est également une possibilité de déploiement en mode NSA où les technologies d'accès radio LTE et 5G sont déployées conjointement et contrôlées via le 5GC.

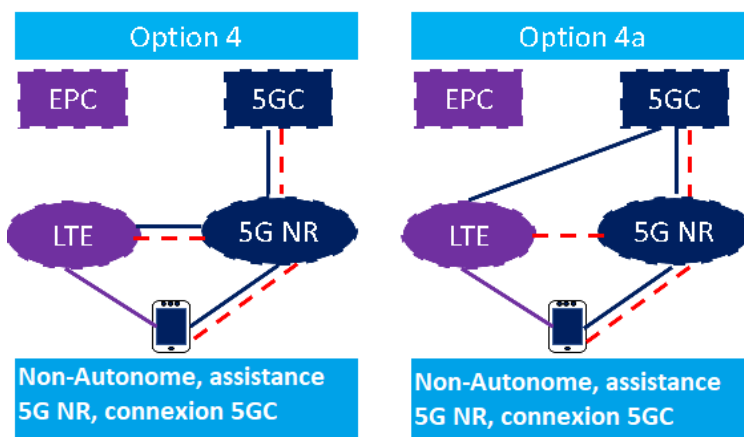


FIG. 2.7 : Option 4 de déploiement NSA 5G [29].

Dans cette option de déploiement, la signalisation de contrôle du LTE RAN est routée vers le 5GC via le 5G. La seule différence entre l'option **4** et **4a** (FIG. 2.7) c'est que dans l'option **4**, les connexions de plan utilisateur LTE passent par le 5G tandis que dans l'option **4a**, le trafic de plan utilisateur est directement envoyé du 5GC au LTE RAN.

- **Option 5** : Est un déploiement SA où nous avons un réseau d'accès radio LTE autonome connecté à 5GC (FIG. 2.8). Dans ce cas, le LTE doit être un réseau d'accès radio LTE évolué (eLTE) qui comprend la nouvelle signalisation 5GC.

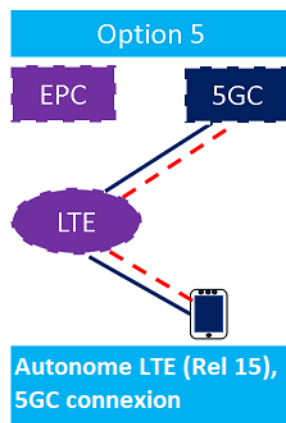


FIG. 2.8 : Option 5 de déploiement SA 5G [29].

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

- **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.

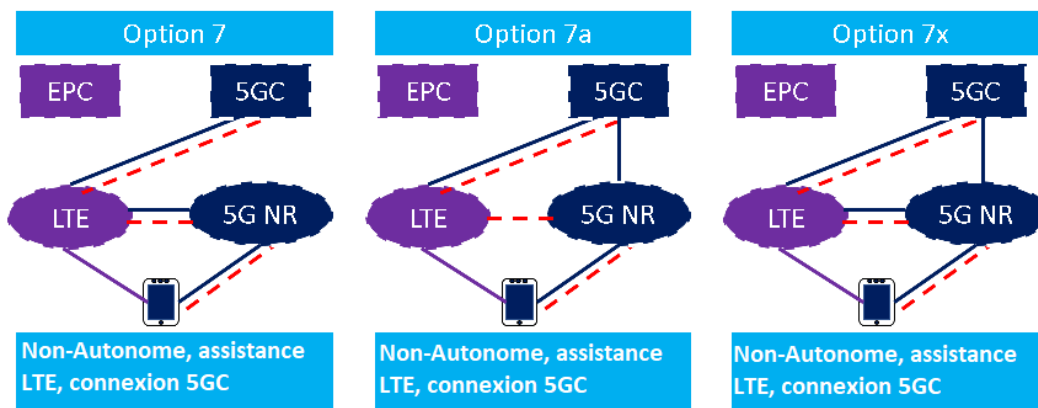


FIG. 2.9 : Option 7 de déploiement SA 5G [29].

N.B : L'option de déploiement 6 a été retirée des options proposées (FIG. 2.1) 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.

2.3 Architecture générale du réseau 5G

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



FIG. 2.10 : Aperçu du 5GS [19].

2.3.1 Équipement utilisateur

L'équipement utilisateur (UE) est un terme qui désigne les appareils mobiles compatibles avec la technologie 5G : smartphones, tablettes, ordinateurs portables... L'UE se connecte au réseau d'accès radio via une carte SIM. Cette carte est insérée dans l'appareil permettant d'identifier et d'authentifier l'utilisateur auprès du réseau mobile. Une fois la connexion établie, l'UE peut utiliser les services offerts par le cœur de réseau qui comprend les serveurs et les équipements réseau. Ces terminaux assurent la gestion des appels, des messages et des données mobiles.

2.3.2 Réseau d'accès radio NG-RAN

Le NG-RAN se compose d'un ensemble de stations de base 5G, nommées gNB qui sont connectées au 5GC via un ensemble d'interfaces logiques (FIG. 2.11).

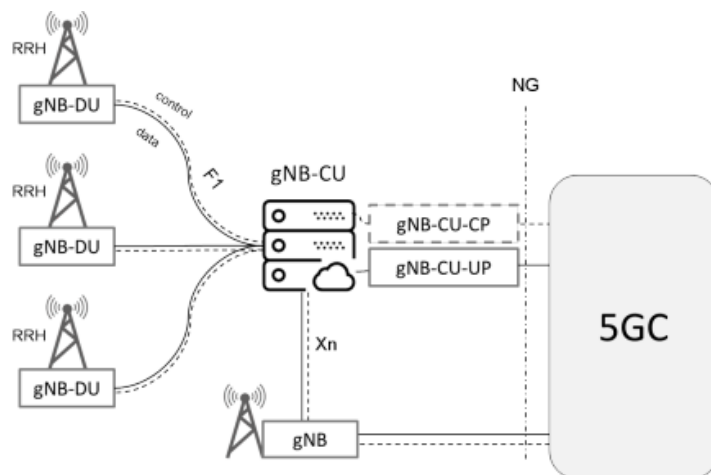


FIG. 2.11 : Architecture globale du réseau NG-RAN [32].

Parfois, la fonctionnalité d'un gNB est répartie entre plusieurs unités. Dans ce cas, l'architecture résultante comprend une unité centrale (gNB-CU). Cette unité contrôle une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) via l'interface F1. La gNB-CU est elle-même divisée en deux parties : une pour les fonctions de contrôle (gNB-CU-CP) et une pour les fonctions utilisateur, en utilisant une approche appelée séparation de plan de contrôle et de plan utilisateur (CUPS) / SDN) introduite dans les dernières versions de la LTE.

2.3.3 Réseau cœur 5G

5GC est le cœur de réseau 5G qui gère les fonctions de base de la 5G : authentification, mobilité, gestion de session et la qualité de service.

Il repose sur plusieurs fonctions clés (FIG. 2.7) pour offrir des fonctionnalités avancées de communication sans fil (l'AMF, le SMF, l'UPF, l'AUSF, le NRF, le NSSF, l'UDM et la NEF).

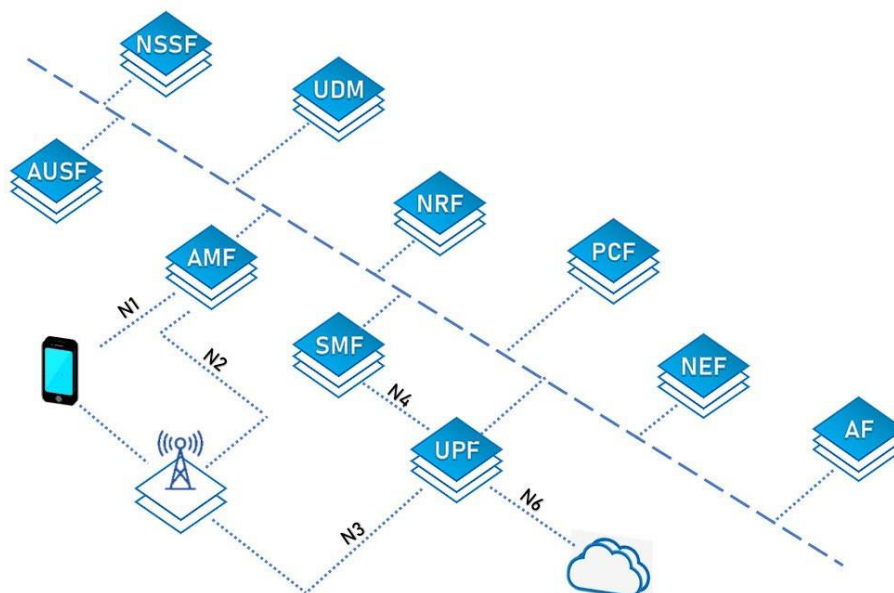


FIG. 2.12 : Architecture du cœur 5GC [33].

Nous décrivons ci-dessous le rôle principal de chaque composant :

- **AMF** : Cette fonction assure la gestion de tous les signaux entrants et sortants de l'UE vers le 5GC. Elle permet aux utilisateurs d'accéder au réseau et gère leur mobilité en interagissant avec l'UE ainsi que d'autres fonctions réseau, le SMF ou l'AUSF. En outre, l'AMF intègre une partie de la fonctionnalité MME de la 4G [32].
- **SMF** : est une fonction du réseau de communication 5G (5GC) permet de gérer et contrôler les sessions utilisateur. Elle est responsable de la configuration et de la gestion des tunnels NG, de l'attribution des adresses IP via DHCP, de la gestion de la qualité de service (QoS) et de la redirection du trafic en fonction des politiques de sécurité et des besoins des applications [34].
SMF est également responsable de la communication de l'AMF et l'UPF.
- **UPF** : Ce composant gère la transmission de tunnel NG-U et les services de chemin de données associés à l'ancrage pour le transfert, à la qualité de service (QoS) et à l'application des politiques de trafic. Il peut y avoir plusieurs UPF associés à un UE ; ces UPF peuvent être situés dans une seule tranche ou dans plusieurs. L'UPF contient des parties des fonctionnalités SGW et PGW de la 4G [34].
- **AUSF** : Il est un serveur d'authentification qui joue un rôle crucial dans le réseau 5G. Il permet l'enregistrement de l'équipement mobile en utilisant une double authentification effectuée à la fois par l'entité AMF et l'UE, à partir de vecteurs d'authentification fournis par l'AUSF.

En d'autres termes, l'AUSF est responsable de l'authentification des utilisateurs et des équipements mobiles et garantit ainsi la sécurité du réseau 5G. Son rôle principal est de garantir que seuls les équipements mobiles autorisés peuvent accéder au réseau.

- **NSSF** : opte pour les différentes instances de tranches de réseau qui servent l'UE, ainsi que le meilleur AMF.
- **UDM** : Il peut être considéré comme un référentiel pour les informations liées à l'UE comme : les informations d'identification, les identificateurs, les détails AMF et les affectations SMF pour la session en cours.
L'idée sous-jacente de l'UDM est de créer chaque fois que possible une base de données centrale pour les informations de configuration UE, de sorte que les NF puissent être conçus en tant que services sans état, améliorant l'agilité architecturale. L'UDM contient une partie de la fonctionnalité HSS de la 4G [34].
- **NRF** : C'est l'une des parties essentielles du cœur de la 5G qui représente un nouveau concept dans le cœur de réseau de nouvelle génération et qui n'existait pas dans les générations précédentes. Sa fonction principale consiste à découvrir les fonctions de réseau (NFs) basée sur le principe de requête/réponse. Cette fonction s'adapte à l'architecture des services de la 5G.
Le NRF joue également un rôle clé dans l'établissement de la signalisation lorsque l'utilisateur accède pour la première fois au réseau ainsi que dans le choix de la tranche que l'utilisateur souhaite utiliser.
- **PCF** : Il joue le rôle d'une entité unifiée qui fournit des règles de politique (filtrage, facturation, etc.) aux autres fonctions du plan de contrôle, notamment le SMF.
- **NEF** : Il permet d'ouvrir l'accès aux capacités des réseaux et des événements de réseau/UE à des tiers pour des fonctions d'application, de l'informatique en périphérie et d'autres utilisations.
Contrairement à la technologie 4G, cette fonction n'est pas disponible dans cette dernière.
- **AF** : Cette fonction est une entité similaire à un serveur d'application permettant d'interagir avec d'autres NF du plan de contrôle. Les AF peuvent être exploitées pour différents services d'application et associés à l'opérateur de réseau ou à des tiers de confiance [34].

2.4 Etude de la couche physique

Dans cette section, nous allons explorer les principales caractéristiques de la couche physique de la technologie 5G. Nous allons aborder les techniques d'accès multiple, la structure temporelle et fréquentielle, les différentes configurations de duplexage, les canaux physiques, ainsi que les signaux de référence.

2.4.1 Accès multiple

La 5G exploite l'OFDMA dans la liaison descendante et le SC-FDMA dans la liaison montante pour permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément au réseau sans fil [35].

1- OFDMA :

OFDMA est l'une des technologies de modulation les plus importantes utilisées dans la norme de communication sans fil 5G. Elle est principalement utilisée dans la liaison descendante pour la communication entre la station de base (gNB) et les terminaux mobiles.

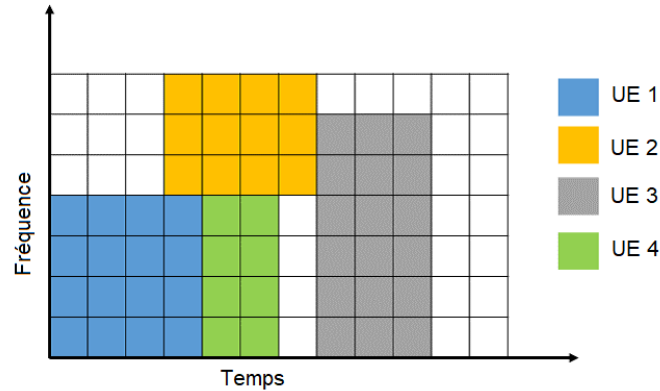


FIG. 2.13 : Allocation de sous-porteuses en OFDMA [36].

Cette technique permet de partager la bande passante entre plusieurs utilisateurs en utilisant des sous-porteuses orthogonales dans la liaison descendante (FIG. 2.13). L'OFDMA assure une allocation dynamique de la bande passante, une gestion efficace des interférences et une adaptation aux besoins des utilisateurs en temps réel.

L'OFDMA permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante tout en minimisant les interférences entre les transmissions.

2- SC-FDMA

La technique SC-FDMA est principalement utilisée dans la liaison montante de la technologie 5G pour transmettre les données de l'appareil mobile vers la station de base. Contrairement à OFDMA où les données sont réparties sur plusieurs sous-porteuses, dans SC-FDMA, les données sont étalées sur une seule porteuse (FIG. 2.14).

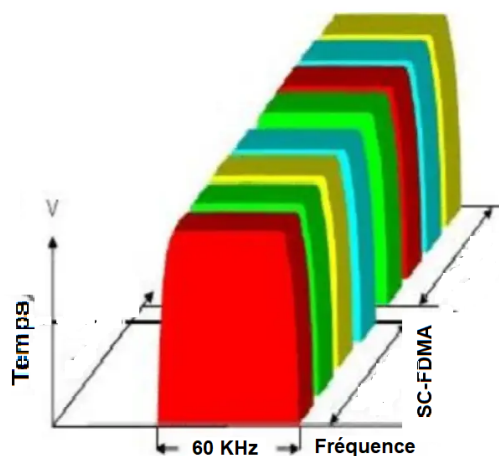


FIG. 2.14 : Allocation de sous-porteuses en SC-FDMA [36].

Cette technique permet une meilleure utilisation de la bande passante limitée de la liaison montante et maintient un *PAPR* (le rapport entre la puissance crête et la puissance moyenne est une valeur sans dimension exprimé en **dB**) plus faible, ce qui est important pour une amplification de puissance efficace dans les appareils mobiles.

2.4.2 Numérologie

La numérologie dans la norme 5G définit différents espacements entre les sous-porteuses (Δf). Contrairement au LTE qui ne dispose que d'un seul type d'espacement de sous-porteuses (**15 kHz**), la 5G propose plusieurs types d'espacement de sous-porteuses à savoir **15,30, 60, 120 et 240 kHz**.

Chaque numérologie correspond à une durée de symbole et un préfixe cyclique différents, ce qui permet de personnaliser davantage la configuration de la bande passante pour répondre aux besoins des différents cas d'utilisation de la 5G. La numérologie **N=0** représente un espacement de sous-porteuses de **15 kHz** identique à celui utilisé dans le LTE.

Le tableau (TAB. 2.1) récapitule les différentes numérologies (N) disponibles dans la norme 5G ainsi que leur espacement de sous-porteuses (Δf), leur durée de symbole et leur préfixe cyclique correspondants.

N	Espacement des sous porteuses (Δf)	Durée du symbole	Préfixe cyclique
0	15 kHz	66,67 μ s	4,69 μ s
1	30 kHz	33,33 μ s	2,34 μ s
2	60 kHz	16,67 μ s	1,17 μ s
3	120 kHz	8,33 μ s	0,59 μ s
4	240 kHz	4,17 μ s	0,29 μ s

TAB. 2.1 : Numérologies de transmission prises en charge [37].

Les faibles valeurs de Δf sont préférables pour les basses fréquences, car elles permettent l'utilisation de préfixes cycliques plus longs pour contrer la propagation de retard, tandis que les valeurs plus élevées de Δf sont utiles pour les hautes fréquences, car elles réduisent les erreurs de fréquence et le bruit de phase.

2.4.3 Structure de trame temporelle

La couche physique de la 5G organise les transmissions dans le domaine temporel en trames radio ayant une durée de **10 ms**. Chaque trame radio est ensuite subdivisée en **10 sous-trames** de **1 ms** chacune. Chaque sous-trame est à son tour divisée en créneaux dont le nombre dépend de l'espacement des sous-porteuses utilisées pour la transmission.

Cette structure en trame permet de faciliter la gestion des transmissions et de garantir une organisation efficace des données échangées [38]. Le tableau (TAB. 2.2) décrit les différents espacements de sous-porteuses (Δf) possibles dans la norme 5G ainsi que la durée du slot et le nombre de slots par sous-trame correspondants pour chaque SCS.

Espacement sous-porteur (Δf)	Durée du slot	Nombre de slot par sous trame
15 kHz	1 ms	1
30 kHz	500 ms	2
60 kHz	250 ms	4
120 kHz	125 ms	8
240 kHz	62,5 ms	16

TAB. 2.2 : Caractéristiques de la numérologie en 5G [38].

La représentation schématique montre les relations temporelles entre les trames, les sous-trames et les emplacements.

Les trames sont représentées sous forme de blocs verticaux de **10 ms** divisés en sous-trames plus petites de **1 ms** chacune. Les sous-trames sont ensuite divisées en emplacements horizontaux représentés par des carrés plus petits.

Le nombre d’emplacements dans une sous-trame dépend de l’espacement des sous-porteuses utilisées pour la transmission, comme indiqué dans le tableau que nous avons vu précédemment (TAB. 2.2).

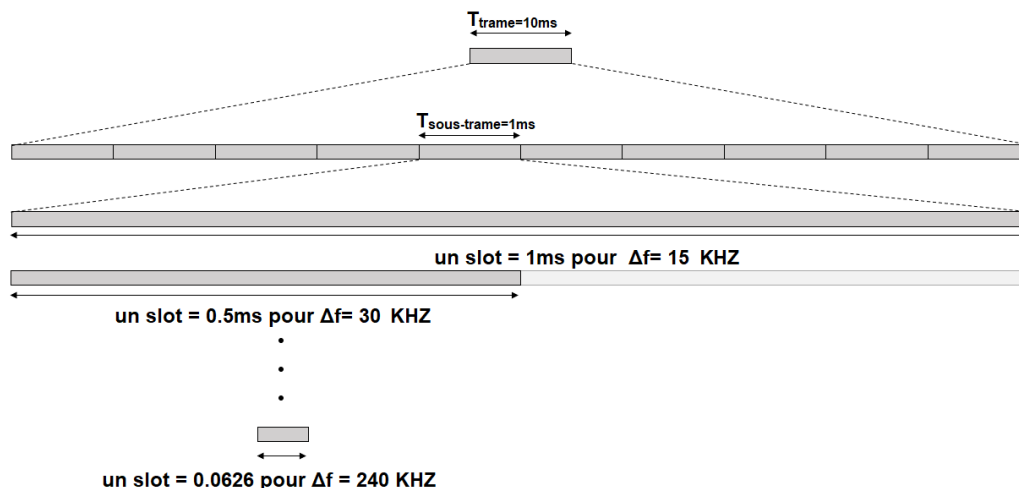


FIG. 2.15 : Structure temporelle dans les trames 5G [37].

Cette représentation schématique (FIG. 2.14) est utile pour comprendre la structure de trame de la 5G et pour visualiser la façon dont les données sont organisées et transmises dans le domaine temporel.

2.4.4 Structure de trame fréquentielle

La technologie 5G peut fonctionner dans des bandes de fréquences réparties en deux gammes principales, FR1 et FR2. La gamme FR1 comprend les bandes de fréquences inférieures à **6 GHz** alors que la gamme FR2 s’étend de **24 GHz** à **100 GHz**, comme il est expliqué dans le **chapitre 1**. Dans cette partie, nous présentons les plages de fréquences pour chaque bande NR ainsi que les modes duplex pour les liaisons montantes et descendantes. Les modes duplex peuvent être en FDD, TDD ou SDL. Ils déterminent la façon dont les données sont transmises sur les liaisons montantes et descendantes.

Bande NR	Liaison montante (UL)	Liaison descendante (DL)	Mode duplex
n1	1920 MHz– 1980 MHz	2110 MHz –2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz– 1910 MHz	1930 MHz– 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz– 1785 MHz	1805 MHz– 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz– 2570 MHz	2620 MHz– 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
n18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n25	1850 MHz– 1915 MHz	1930 MHz –1995 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n29	N/A	717 MHz – 728 MHz	N/A
n30	2305 MHz– 2315 MHz	2350 MHz– 2360 MHz	FDD
n34	2010 MHz–2025 MHz	2010 MHz–2025 MHz	TDD
n38	2570 MHz–2620 MHz	2570 MHz–2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz –1920 MHz	1880 MHz–1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz– 2400 MHz	2300 MHz– 2400 MHz	TDD
n41	2496 MHz–2690 MHz	2496 MHz–2690 MHz	TDD
n48	3550 MHz– 3700 MHz	3550 MHz– 3700 MHz	TDD
n50	1432 MHz–1517 MHz	1432 MHz–1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz–1432 MHz	1427 MHz–1432 MHz	TDD
n65	1920 MHz– 2010 MHz	2110 MHz– 2200 MHz	FDD
n66	1710 MHz–1780 MHz	2110 MHz–2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz–1710 MHz	1995 MHz –2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n74	1427 MHz–1470 MHz	1475 MHz–1518 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz–1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz–1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz–4200 MHz	3300 MHz–4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz–3800 MHz	3300 MHz–3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz–5000 MHz	4400 MHz–5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz–1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz–1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz– 1780 MHz	N/A	SUL
n89	824 MHz – 849 MHz	N/A	SUL
n90	2496 MHz– 2690 MHz	2496 MHz–2690 MHz	TDD
n91	832 MHz – 862 MHz	1427 MHz– 1432 MHz	FDD
n92	832 MHz – 862 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	FDD
n93	880 MHz – 915 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	FDD
n94	880 MHz – 915 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	FDD
n95	2010 MHz – 2025 MHz	N /A	SUL

TAB. 2.3 : Bandes d'exploitation pour NR dans FR1 [39].

Bande NR	Liaison montante (UL)	liaison descendante (DL)	Mode duplex
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n259	39500 MHz – 43500 MHz	39500 MHz – 43500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD

TAB. 2.4 : Bandes d’exploitation pour NR dans FR2 [39].

Les spécifications 3GPP pour NR incluent un total de **50** bandes de fréquences dont **45** bandes dans la plage de FR1 (TAB. 2.3) et **5** bandes dans la plage de FR2 (TAB. 2.4). Chaque bande de fréquences a un numéro unique où les bandes NR sont numérotées **n1**, **n2**, **n3**, etc. Il convient de noter que lorsque la même plage de fréquences est définie comme une bande d’exploitation pour différentes technologies d’accès radio, le même nombre est utilisé, mais écrit d’une manière différente. Par exemple, les bandes LTE sont écrites avec des chiffres latins (**1**, **2**, **3**, etc.), tandis que les bandes UTRA 3G sont écrites avec des chiffres romains (**I**, **II**, **III**, etc.). Il est important de noter que les bandes de fréquences dans lesquelles NR fonctionne se situent dans des spectres appariés et non appariés, ce qui nécessite une certaine souplesse dans l’agencement duplex. Pour cette raison, NR prend en charge à la fois les opérations FDD et TDD. En outre, certaines gammes sont également définies pour SDL ou SUL [39].

2.4.5 Canaux et signaux physiques

1- Canaux physiques

L’architecture de la 5G est divisée en deux parties distinctes : le plan utilisateur et le plan de contrôle. Le plan utilisateur est responsable du traitement des données de l’utilisateur et le plan de contrôle se focalise sur l’établissement de la connexion, la mobilité et la sécurité. Le plan utilisateur peut être subdivisé en plusieurs couches : la couche physique (PHY), la couche de contrôle d’accès au support (MAC), la couche de contrôle de la liaison radio (RLC), la couche de protocole de convergence des données par paquets (PDCP) et la couche de protocole d’application des données de service (SDAP) [37].

- **SDAP** : Il met en correspondance des supports de qualité de service avec les supports radio en fonction de leurs exigences de qualité de service. Cette couche de protocole n’est pas présente dans le LTE mais elle est introduite dans le NR lors de la connexion au réseau central de la 5G en raison de la nouvelle gestion de la qualité de service [39].
- **PDCP** : Il effectue la compression de l’en-tête IP, le chiffrement et la protection de l’intégrité. Il s’occupe également des retransmissions, de la livraison en séquence et du retrait des duplicatas en cas de transfert. Pour une double connectivité avec des porteurs divisés, PDCP peut fournir le routage et la duplication. La duplication et la transmission de différentes cellules peuvent être utilisées pour assurer la diversité des services nécessitant une très grande fiabilité. Il y a une entité PDCP par porteur radio configuré pour un dispositif [39].
- **RLC** : Il est responsable de la gestion de la segmentation et de la retransmission. Le RLC fournit des services au PDCP sous forme de canaux RLC. [39].
- **MAC** : il gère le multiplexage des canaux logiques et les fonctions d’ordonnement pour la liaison montante et la liaison descendante.

Les services fournis par le MAC au RLC sont sous la forme de canaux logiques. La fonctionnalité d'ordonnement est située dans le gNB. La structure de l'en-tête de la couche MAC a été modifiée en NR pour permettre une prise en charge plus efficace du traitement à faible latence qu'en LTE [39].

- **PHY** : Il gère le codage/décodage, la modulation/démodulation, la cartographie multiantennes et d'autres fonctions de couche physique typiques. La couche physique offre des services à la couche MAC sous forme de canaux de transport [39].

Les canaux physiques sont les ressources temporelles et fréquentielles qui acheminent les informations des couches supérieures vers la couche PHY (sous-couche au-dessus de la couche physique). Ils sont présents sur la liaison descendante et sur la liaison montante [40] [37].

Les canaux de la liaison descendante comprennent le PDSCH (Le canal physique partagé de la liaison descendante), le PDCCH (Le canal de contrôle de la liaison descendante physique) et le PBCH (Le canal de diffusion physique). Les canaux de la liaison montante sont le PRACH (Le canal physique à accès aléatoire), le PUSCH (Le canal physique partagé sur la liaison montante) et le PUCCH (Le canal de contrôle de la liaison montante physique).

- **PDSCH** : Il est principalement utilisé pour la transmission de données unicast et des informations de radiomessagerie.
- **PDCCH** : Il transporte les informations de contrôle de la liaison descendante sous forme de décisions de programmation.
- **PBCH** : Il transporte les informations du système demandées par l'UE pour accéder au réseau.
- **PRACH** : Il est exploité par un UE pour demander l'établissement d'une connexion nommée accès aléatoire.
- **PUSCH** : C'est l'équivalent du PDSCH sur la liaison montante.
- **PUCCH** : Il est utilisé par l'appareil pour envoyer des accusés de réception, des rapports sur l'état du canal et pour demander des ressources afin de transmettre des données sur la liaison montante.

Le tableau (TAB. 2.5) résume les canaux physiques, les modulations et les codages des canaux pour les liaisons descendante et montante :

DL / UL	Canal physique	Modulation	Codage des canaux
DL	PDSCH	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	LDPC
DL	PDCCH	QPSK	Codage polaire
DL	PBCH	QPSK	Codage polaire
UL	PRACH	N/A	N/A
UL	PUSCH	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	LDPC
UL	PUCCH	$\pi/2$ -BPSK, BPSK, QPSK	N/A

TAB. 2.5 : Modulation et codage des canaux pour chaque canal [41].

2- Signaux physiques

Les signaux de référence principaux de la 5G comprennent :

- **DM-RS** : Il prend en charge l'estimation de canal dans le cadre de la démodulation cohérente.
- **PT-RS** : Il prend en charge l'estimation de canal dans le cadre de la démodulation cohérente.
- **CSI-RS** : Il est utilisé par l'UE dans la liaison descendante pour déterminer l'état du canal.
- **SRS** : C'est un signal de référence UL utilisé pour l'estimation du canal de liaison montante.
- **TRS** : C'est un signal de référence non répétitif utilisé pour aider l'appareil à suivre le temps et la fréquence. Différents RS sont mappés à certains éléments de ressource de la grille de ressources pour chaque port d'antenne [37].

Ces signaux sont utilisés pour la communication entre l'UE et le réseau ainsi que pour le traitement des signaux RF en raison d'une transmission sans fil efficace et fiable.

2.5 Modèle de propagation

Le modèle de propagation est un élément essentiel lors de la phase initiale de déploiement d'un réseau. Il permet de faire des prédictions précises sur la couverture [42].

Le modèle de propagation des ondes radio est un outil mathématique qui simule les pertes entre un émetteur et un récepteur en exploitant différents paramètres : les caractéristiques techniques et l'environnement géographique [43].

Il existe différents types de modèles de propagation [2] :

2.5.1 Modèle OKUMURA-HATA

Il s'agit du modèle couramment utilisé pour les zones urbaines et suburbaines. Ce modèle est le plus fréquemment utilisé pour la planification de la couverture de *macro-cellules*. Il s'agit d'une combinaison du travail d'Okumura et de Okumura Hata a pu réaliser des mesures de test au Japon. Ces mesures ont porté sur différents types de couverture, la hauteur de l'émetteur, la puissance de l'émetteur et la fréquence [44]. La perte de trajet en dB pour l'environnement urbain est donnée par :

$$L_{\text{urbain}}(\text{dB}) = A_{\text{urbain}} + B \log(d). \quad (2.1)$$

Où :

d : est la distance en kilomètres.

A_{urbain} : est une perte fixe qui dépend de la fréquence du signal est donnée par :

$$A_{\text{urbain}} = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b)] \log_{10}(d). \quad (2.2)$$

B : est une constante définie par :

$$B = 44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b). \quad (2.3)$$

Où :

- f : est la fréquence mesurée en **MHz**.
- h_b : est la hauteur de l'antenne de la station de base en **mètres**.
- h_m : est la hauteur de l'antenne mobile en **mètres**.
- $a(h_m)$: est le facteur de correction en **dB**.

Par conséquent,

$$L_{p,urbain}(dB) = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b)] \log_{10}(d). \quad (2.4)$$

Où :

$$a(h_m) = 3,2 \log_{10}^2(11,75 h_m) - 4,97. \quad (2.5)$$

2.5.2 Modèle COST 231-HATA

Le modèle COST 231 Hata est une extension du modèle Okumura-Hata. Il est conçu pour être utilisé dans la plage de fréquences de **500 MHz à 2000 MHz**. Ce modèle dispose de corrections pour les environnements urbains, suburbains et ruraux. En raison de sa simplicité et de ses facteurs de correction, il est largement utilisé pour les prévisions de perte de trajet à ces bandes de fréquences.

La perte de trajet en zone urbaine est donnée par :

$$L_{urbain}(dB) = 46,33 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(d). \quad (2.6)$$

Où :

$$a(h_m) = 1,1 \log(f) - 0,7 h_m - 1,56 \log(f) + 0,8. \quad (2.7)$$

Avec :

- h_b : hauteur de l'antenne de la station de base en **mètres**.
- h_m : hauteur de l'antenne mobile en **mètres**.
- $a(h_m)$: facteur de correction en **dB**.

2.5.3 Modèle de propagation standard

Le modèle de propagation standard (SPM) est basé sur les formules de Hata et convient aux prévisions dans la bande de fréquences de **150 à 3500 MHz** sur de longues distances allant de **1 à 20 km**. Il est particulièrement adapté aux technologies de radio GSM 900 et GSM 1800, UMTS, CDMA 2000, WiMAX et LTE.

Le modèle de propagation standard repose sur la formule (2.8) [45] :

$$Pr = Pt (K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(h_t) + K_4 \text{DiffractionLoss} + K_5 \log(d) \log(h_t) + K_6 h_r + K_7 \log(h_r) + K_{\text{clutter}} f_{\text{clutter}} + K_{\text{hill,los}}). \quad (2.8)$$

Où :

- **Pr** : Puissance reçue en **dBm**.
- **Pt** : Puissance transmise (EIRP) en **dBm**.
- **K₁** : Décalage constant en **dB**.
- **K₂** : Facteur de multiplication pour $\log(d)$.
- **d** : Distance entre le récepteur et l'émetteur en **mètres**.
- **K₃** : Facteur de multiplication pour $\log(d)$.
- **h_t** : Hauteur effective de l'antenne de l'émetteur en **mètres**.
- **K₄** : Facteur de multiplication pour le calcul de la diffraction.
- **Diffraction Loss** : Diffraction Lors de pertes dues à la diffraction sur un chemin obstrué (**dB**).
- **K₅** : Facteur de multiplication pour $\log(d), \log(h_t)$.
- **K₆** : Facteur de multiplication pour **h_r**.
- **K₇** : Facteur de multiplication pour $\log(h_r)$.
- **h_r** : Hauteur effective de l'antenne du récepteur mobile en **mètres**.
- **K_{clutter}** : Facteur de multiplication pour Moyenne des pertes pondérées dues à l'encombrement.
- **f_{clutter}** : Facteur de correction pour les régions vallonnées.

2.6 Conclusion

L'architecture de la 5G est conçue pour offrir une bonne qualité de communication aux utilisateurs grâce à une connectivité sans fil ultra-rapide, une faible latence et une capacité de connexion élevée. Cette architecture se compose de l'équipement utilisateur, du réseau d'accès radio 5G et du réseau cœur 5G.

L'étude de la couche physique de la 5G est cruciale pour comprendre les caractéristiques clés de cette technologie. Les aspects tels que l'accès multiple, la numérogie, la structure de trame temporelle et fréquentielle, la transmission multiantennes, les canaux et signaux physiques ainsi que les modèles de propagation sont étudiés en détail pour non seulement comprendre le potentiel de cette technologie, mais aussi concevoir des solutions innovantes qui répondent aux besoins de connectivité de demain.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la partie pratique de ce document, où nous découvrirons l'outil de planification radio exploité pour la planification.

Chapitre 3

Planification du réseau mobile 5G

3.1 Introduction

La planification du réseau mobile 5G sous *Atoll* est une étape primordiale pour garantir une connectivité de qualité aux utilisateurs. 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. Elle repose sur une analyse détaillée de la couverture, de la capacité, de l'identification des éventuels problèmes et des obstacles qui pourraient impacter la performance du réseau. Dans ce chapitre, nous allons parcourir les étapes clés de la planification du réseau mobile 5G sous l'outil radio *Atoll*, les principaux outils et méthodes utilisés pour atteindre un déploiement efficace du réseau.

3.2 Planification de réseau radio

La planification de réseau radio est un processus clé dans la mise en place d'un réseau de communication mobile. Cela implique de déterminer la meilleure disposition des antennes, des équipements de base et des autres composants du réseau afin de garantir une couverture optimale, une qualité de service élevée, une capacité suffisante (FIG. 3.1).

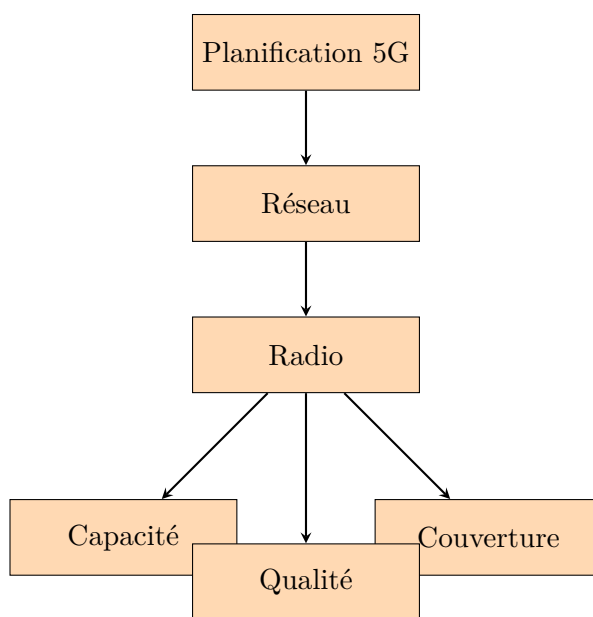


FIG. 3.1 : Architecture de la planification 5G.

3.2.1 Objectif de la planification

La planification du réseau radio est indispensable pour assurer une performance optimale et répondre aux besoins des clients en termes de l'optimisation de la couverture, la grande capacité et la qualité de service améliorée tout en garantissant une utilisation efficace du réseau. Cela réduit les coûts et améliore la rentabilité des opérateurs de réseau. Sans une planification adéquate, il existe un risque de surestimation ou de sous-estimation de la capacité et de la couverture nécessaires aux besoins des utilisateurs.

La surestimation peut entraîner un déploiement excessif de sites, ce qui peut générer des coûts supplémentaires pour l'opérateur de réseau.

La sous-estimation peut entraîner une qualité de service insatisfaisante pour les utilisateurs et des coûts supplémentaires chez l'opérateur. Ce dernier veut toujours remédier ce genre de problèmes.

3.2.2 Besoin d'un processus de planification

Nous avons besoin d'un processus de planification pour obtenir :

- Le nombre minimum de sites $[N]$ nécessaires.
- Où déployer ces $[N]$ sites.
- Quelle configuration initiale doit être effectuée pour ces sites.

3.2.3 Processus de planification

Le processus de planification d'un réseau cellulaire est composé de cinq étapes principales dont quatre sont réalisées avant le lancement du réseau et la dernière se déroule après son lancement.

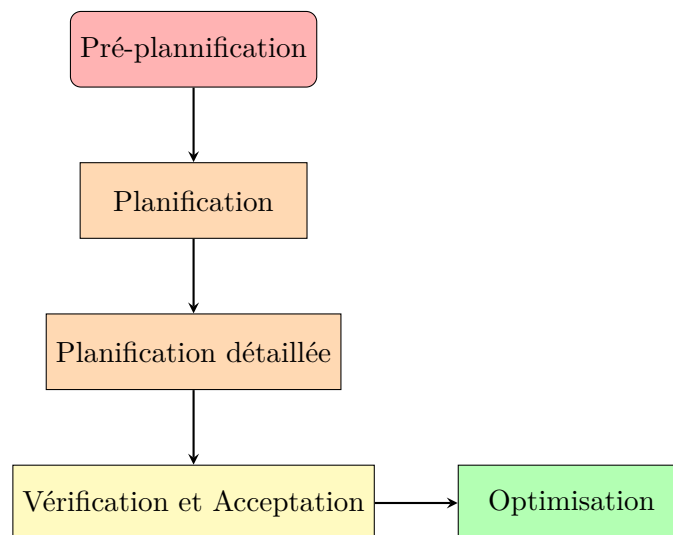


FIG. 3.2 : Étapes de planification d'un réseau cellulaire.

Un diagramme de flux illustrant ces cinq étapes est présenté dans la figure (FIG. 3.2). Les cinq étapes principales sont : la pré-planification, la planification, la planification détaillée, la vérification et l'acceptation ainsi que l'optimisation [46].

1. Pré-planification :

La phase de pré-planification est une étape préalable nécessaire avant de pouvoir entamer la planification réelle du réseau. Pour cela, il est important de collecter des informations sur la zone de déploiement. Voici quelques exemples d'informations à collecter :

- Des informations détaillées sur le gNB et l'UE.
- Des informations sur la zone de déploiement : la superficie, les données démographiques, les données météorologiques, etc.

- Des données géographiques : des cartes, la population, la zone à couvrir et le taux de pénétration des abonnés dans cette zone (trafic offert, services demandés, etc.).
 - Une liste des sites où les gNB seront installés en identifiant clairement les emplacements appropriés [47].
2. **Planification** : La planification du réseau prend en compte les informations de dimensionnement et de configuration initiale pour établir la couverture et la capacité du réseau radio à l'aide d'un outil spécifique. Le plan nominal fournit une première idée des positions et des distances entre les sites, mais ne précise pas les positions exactes des sites [46].
 3. **Planification détaillée** : Une fois que la phase de planification initiale est terminée et que les emplacements des sites et les configurations sont connus, la planification détaillée peut commencer. Cette phase comprend la planification de la fréquence, de l'adjacence et des paramètres caractéristiques de déploiement du réseau (puissance de transmission, utilisation des antennes, réglages des transporteurs...), afin d'assurer la couverture et la capacité optimales du réseau [46].
 4. **Vérification et Acceptation** : Après l'installation, une vérification est effectuée pour détecter tout défaut éventuel. L'optimisation avant le lancement se concentre sur les aspects les plus importants du réseau, sans s'attarder sur les détails. Après le lancement, l'optimisation du réseau se poursuit à un stade plus complet pour améliorer la qualité et la performance du réseau [46].
 5. **Optimisation** : Comme nous le savons, l'optimisation est un processus continu. Toutes les informations disponibles sur le réseau et son état doivent être prises en compte pour l'optimisation. Certains éléments importants comme les données statistiques, les alarmes et le trafic doivent être surveillés attentivement [46].

Après avoir examiné en détail la théorie dans les chapitres 1 et 2 et compris les étapes de la planification, nous allons maintenant passer à l'étude pratique qui est l'objectif de notre projet.

3.2.4 Pré-planification

La figure (FIG. 3.3) présente la carte de la zone géographique étudiée, qui correspond à la commune de *Chetouane* située dans la ville de *Tlemcen* et couvrant une superficie de plus de **5,078 km²** (TAB. 3.1).

Paramètre	Valeur
Zone	Chetouane (Tlemcen)
Superficie	5,078 km ²
Morphologie de la zone	Urbaine
Type de multiplexage	TDD
Probabilité de couverture	90%
Bande de fréquence	3,5 GHz
Largeur de bande	50 MHz

TAB. 3.1 : Paramètres de la zone.

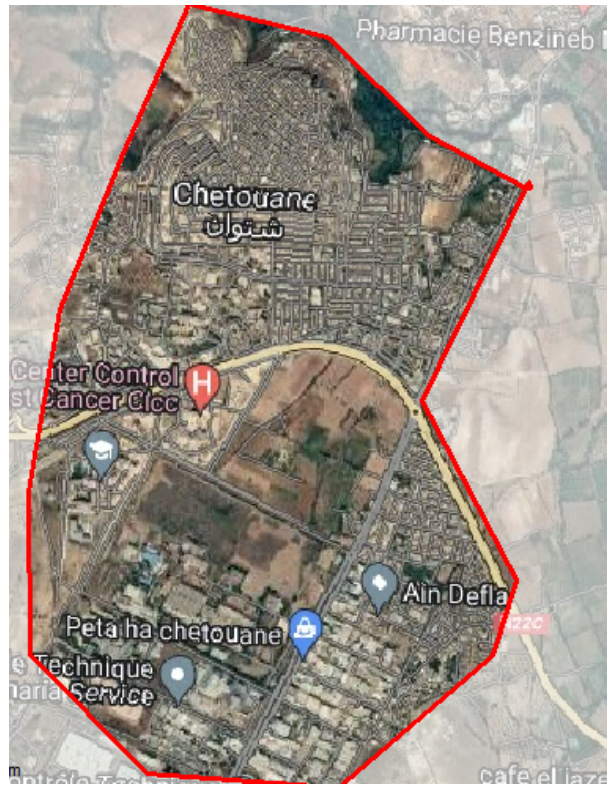


FIG. 3.3 : Zone de Chetouane.

3.2.5 Dimensionnement de couverture

Le dimensionnement de la couverture d'un réseau de télécommunications sans fil consiste à déterminer le nombre de sites nécessaires pour couvrir une zone donnée. Pour cela, nous exploitons un modèle de propagation approprié avec le bilan de liaison (RLB) pour estimer le taux de perte du trajet.

La planification de couverture est utilisée pour déterminer la zone maximale qu'une station de base peut couvrir en utilisant le budget de liaison radio, la puissance isotrope rayonnée efficace (EIRP), le calcul de la sensibilité minimale du récepteur, la perte de chemin maximale autorisée (MAPL), le modèle de propagation et l'analyse de couverture.

Les gains et les pertes dans le chemin du signal du transmetteur au récepteur sont inclus dans le budget de liaison radio pour les canaux DL et UL. Les paramètres les plus importants dans le budget de liaison sont la puissance, les gains, les pertes de câble ou d'utilisateur et les pertes de corps. Cette démarche est résumée sur la figure (FIG. 3.4) :

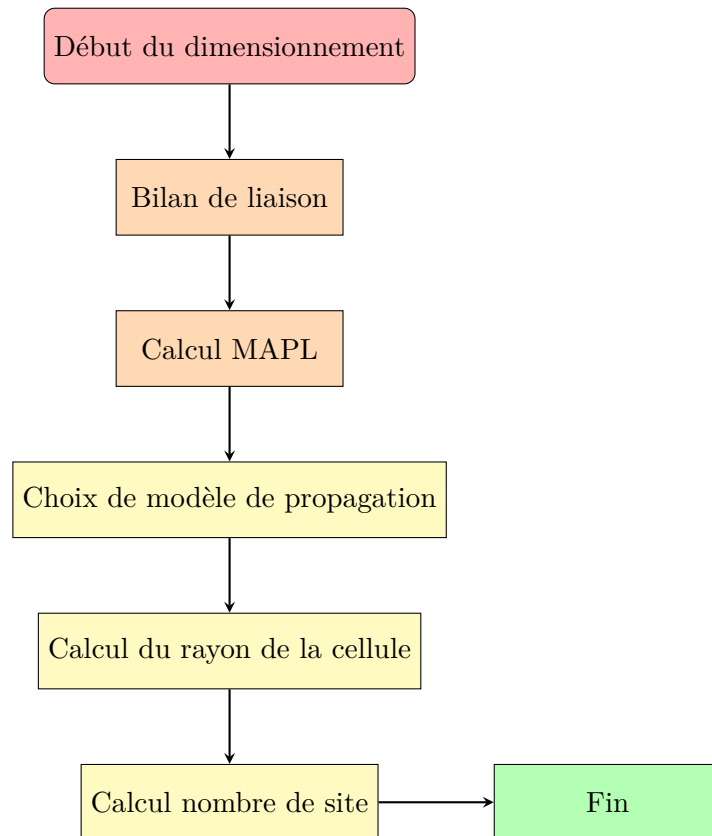


FIG. 3.4 : Calcul de Dimensionnement de couverture.

Cette partie vise à déterminer le nombre de sites (N) nécessaires pour couvrir une certaine zone donnée étant donné le rayon d'un site (R) et la distance inter-sites (D).

- La distance inter-sites peut être calculée en utilisant la formule (3.1) :

$$D = 1,5R. \quad (3.1)$$

- Le nombre de sites :

$$N = \frac{\text{Surface totale à couvrir}}{\text{Surface couverte par un seul site}} A_{\text{site}}. \quad (3.2)$$

- Pour calculer la surface couverte par un seul site, il y a deux équations en fonction du type d'antenne utilisé :

- Pour une antenne omnidirectionnelle, la formule est :

$$A_{\text{site}} = \frac{3}{2} \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2. \quad (3.3)$$

- Pour une antenne à deux secteurs, la formule est :

$$A_{\text{site}} = \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2. \quad (3.4)$$

- Pour une antenne à trois secteurs, la formule est :

$$A_{\text{site}} = \frac{9}{8} \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2. \quad (3.5)$$

1- Bilan de liaison

Le calcul du budget de liaison vise à estimer la perte de chemin maximale admissible (MAPL) ou l'affaiblissement du signal reçu entre l'antenne mobile et l'antenne de la station mobile, tant pour la liaison descendante que pour la liaison montante.

En effet, il s'agit d'additionner tous les éléments du gain (augmentation) ou de perte (diminution) de la puissance du signal radio entre chaque extrémité (FIG. 3.5). Ce bilan est nécessaire pour déterminer si deux nœuds peuvent communiquer entre eux tout en maintenant une qualité de connexion suffisante.

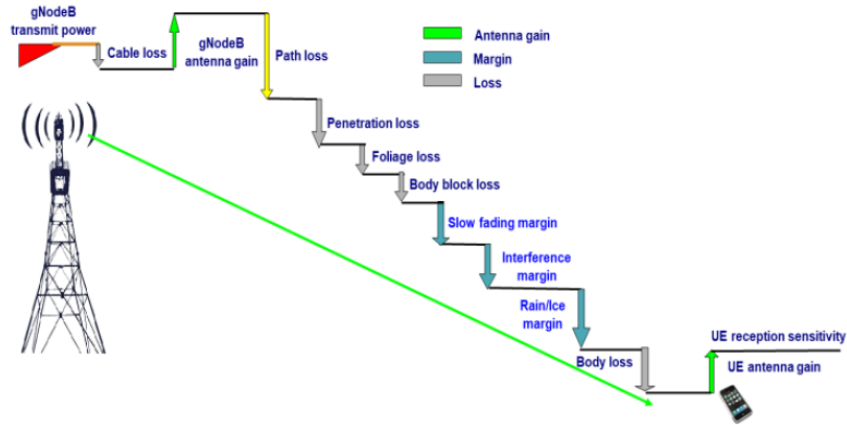


FIG. 3.5 : Bilan de Liaison 5G [48].

La formule suivante est utilisée pour calculer le niveau de signal reçu du bilan de la liaison 5G :

$$\text{Niveau du signal reçu au niveau du récepteur (dBm)} = \text{puissance d'émission gNodeB (dBm)} - 10 \log_{10}(\text{quantité de sous-porteuse}) + \text{gain d'antenne gNodeB} - \text{Perte de câble gNodeB (dB)} - \text{Perte de trajet (dB)} - \text{Perte de pénétration (dB)} - \text{perte de feuillage (dB)} - \text{perte de bloc corporel (dB)} - \text{marge d'interférence (dB)} - \text{marge pluie/glace (dB)} - \text{marge d'évanouissement lent} - \text{perte de bloc corporel (dB)} + \text{gain d'antenne UE (dB)} \quad (3.6)$$

La formule (3.7) permet de calculer la perte de trajet d'un signal dans un réseau de télécommunications :

$$\text{perte de trajet (dB)} = \text{puissance d'émission gNB} + \text{gain d'antenne gNB} - \text{Perte de câble gNB} - \text{Perte de pénétration} - \text{perte de feuillage} - \text{perte de bloc corporel} - \text{marge d'interférence} - \text{marge pluie/glace} - \text{marge d'évanouissement lent} + \text{gain d'antenne UE} - \text{Puissance de bruit thermique} - \text{facteur de bruit UE} - \text{seuil de démodulation SINR} \quad [49]. \quad (3.7)$$

Après avoir présenté l'étude théorique, le tableau (TAB. 3.2) récapitule les résultats obtenus pour notre travail :

Paramètre	DL	UL
Puissance d'émission gNB (dBm)	71	60
Gain d'antenne gNB (dBi)	24	24
Perte de câble gNB (dB)	0	0
Perte de pénétration (dB)	22	22
Perte de feuillage (dB)	11	11
Perte de bloc corporel (dB)	3	3
Marge d'interférence (dB)	6	6
Marge pluie / glace (dB)	0	0
Marge d'évanouissement lent (dB)	4	4
Gain d'antenne UE (dB)	0	0
Puissance de bruit thermique (dBm)	-173,22	-174,22
Facteur de bruit UE (dB)	7	7
Seuil de démodulation SINR (dB)	-65	-63

TAB. 3.2 : Paramètres de la transmission.

2- Calcul MAPL

Quand nous substituons ces informations dans l'équation (3.6), nous trouvons que le MAPL est :

$$\text{MAPL}_{\text{DL}} = 280,22 \text{ dB.} \quad (3.7)$$

$$\text{MAPL}_{\text{UL}} = 282,22 \text{ dB.} \quad (3.8)$$

3- Choix du modèle de propagation

Il est envisageable de calculer le rayon de la cellule. Pour cela, nous utilisons à la fois le chemin de liaison montante (UL) et le chemin de liaison descendante (DL), le modèle de propagation choisi ainsi que le MAPL UL et DL. Le rayon effectif sera le plus petit des deux rayons de chemin UL et DL. Les hauteurs d'antenne du gNB et de l'UE sont respectivement de **30** et **1,5 mètre**. En utilisant la formule d'Okumura-Hata (2.8) et le MAPL du budget de liaison radio descendante.

4- Calcul du rayon de la cellule

Il est possible de calculer le rayon de la cellule dans le chemin DL et dans le chemin UL. Comme indiqué ci-dessous :

$$d_{\text{DL}} = 10^{\frac{\text{PL}-298,81}{35,23}} = 0,297 \text{ km.} \quad (3.9)$$

$$d_{\text{UL}} = 10^{\frac{\text{PL}-298,81}{35,23}} = 0,338 \text{ km.} \quad (3.10)$$

Le rayon effectif est le minimum entre d_{DL} et d_{UL} .

Donc :

$$\mathbf{R_{\text{eff}}} = \min(d_{\text{DL}}, d_{\text{UL}}) = \min(0,297 \text{ km}, 0,338 \text{ km}). \quad (3.11)$$

Ce qui donne :

$$\mathbf{R_{\text{eff}}} = 0,297 \text{ km.} \quad (3.12)$$

Paramètre	Liaison descendante	Liaison montante
Hauteur de l'antenne gNB (m)	30	
Hauteur de l'antenne UE (m)	1,5	
Fréquence en MHz	3500	
MAPL (dB)	280,22	282,22
Rayon de cellule (km)	0,297	0,338
Rayon de cellule effectif (km)	0,297	

TAB. 3.3 : Résumé des paramètres et du rayon de cellule.

Le tableau (TAB. 3.3) synthétise nos résultats de calcul.

5- Calcul du nombre de sites

Tout d'abord, pour calculer le nombre de sites nécessaires, nous devons déterminer la surface couverte par un seul site en utilisant l'équation (3.2). Étant donné que la zone cible est une zone urbaine (TAB. 3.1), nous supposons que tous les gNB sont des antennes à trois secteurs. La superficie du site et le nombre total de sites basés sur la couverture peuvent être calculés à l'aide de l'équation (3.5).

$$A_{\text{site}} = \frac{9}{8} \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2. \quad (3.13)$$

Où R_{eff} est le rayon effectif de la cellule.

$$R_{\text{eff}} = 0,297 \text{ km}. \quad (3.14)$$

En substituant cette valeur, on obtient :

$$A_{\text{site}} = \frac{9}{8} \sqrt{3} (0,297)^2 = 0,172 \text{ km}^2. \quad (3.15)$$

Le nombre de sites nécessaires est donc donné par :

$$N = \frac{\text{Surface totale}}{\text{Surface couverte par un site}} = \frac{5,078 \text{ km}^2}{0,172^2} \approx 29,53 \approx \boxed{30 \text{ sites}}. \quad (3.16)$$

Et la distance inter-site :

$$D = 1,5R = \boxed{0,438 \text{ km}}. \quad (3.17)$$

3.3 Planification détaillé

3.3.1 Présentation du logiciel de planification atoll

Atoll est un logiciel de planification de réseaux de communication sans fil développé par l'entreprise française Forsk. Il a été lancé en 2001 et est maintenant utilisé par de nombreux opérateurs de télécommunications dans le monde entier, offrant des fonctionnalités avancées telles que *massive MIMO*, *3D beamforming* et propagation *mm Wave* pour la planification de réseaux 5G.

Atoll propose un cadre solide pour la conception et l'optimisation de réseaux multi-technologies intégrés, actuels et futurs pour les opérateurs et les fournisseurs de télécommunications. Dans ce projet de fin d'étude, la *version 3.4.0 d'Atoll* a été utilisée.

3.3.2 Environnement de travail d'Atoll

Atoll est un outil de planification radio qui utilise une interface *Windows* pour faciliter le processus. Cette interface permet d'ouvrir plusieurs fenêtres de document en même temps et de glisser-déposer facilement les éléments. *Atoll* offre également de nombreuses options pour créer et exporter des résultats en fonction des besoins du projet. L'environnement de travail *d'Atoll* est présenté dans la figure (FIG. 3.6).

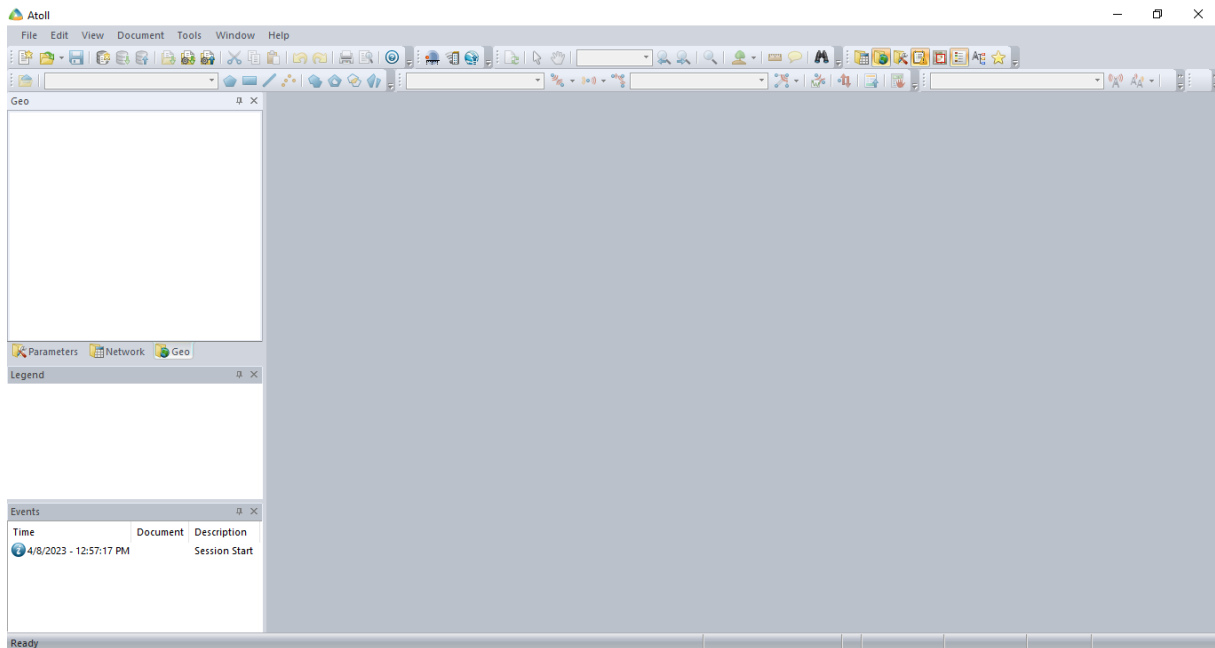


FIG. 3.6 : Environnement de travail d'Atoll.

L'environnement de travail *d'Atoll* comprend un outil de recherche pour localiser des sites ou des points sur une carte ainsi que trois onglets pour gérer les objets de données *Atoll* : les sites, les émetteurs et les calculs ainsi que les données géographiques (modèle numérique de terrain et les cartes de trafic). Les tables associées à ces données peuvent être triées, filtrées et utilisées pour importer et exporter des données.

3.3.3 Étapes de planification

Les étapes de configuration *d'Atoll* sont les suivantes :

1. Création d'un projet 5G.
2. Importation de la carte de la wilaya de *Tlemcen* exact *Chetouane*.
3. Choix du système de coordonnées.
4. Ajoute de sites, une position et une hauteur.

1- Création d'un projet 5G

On peut utiliser *Atoll* pour gérer différentes technologies d'accès radio 3GPP, notamment la 5G, LTE, UMTS, GSM et CDMA, etc. Cette application est donc multiplateforme (FIG. 3.7) :

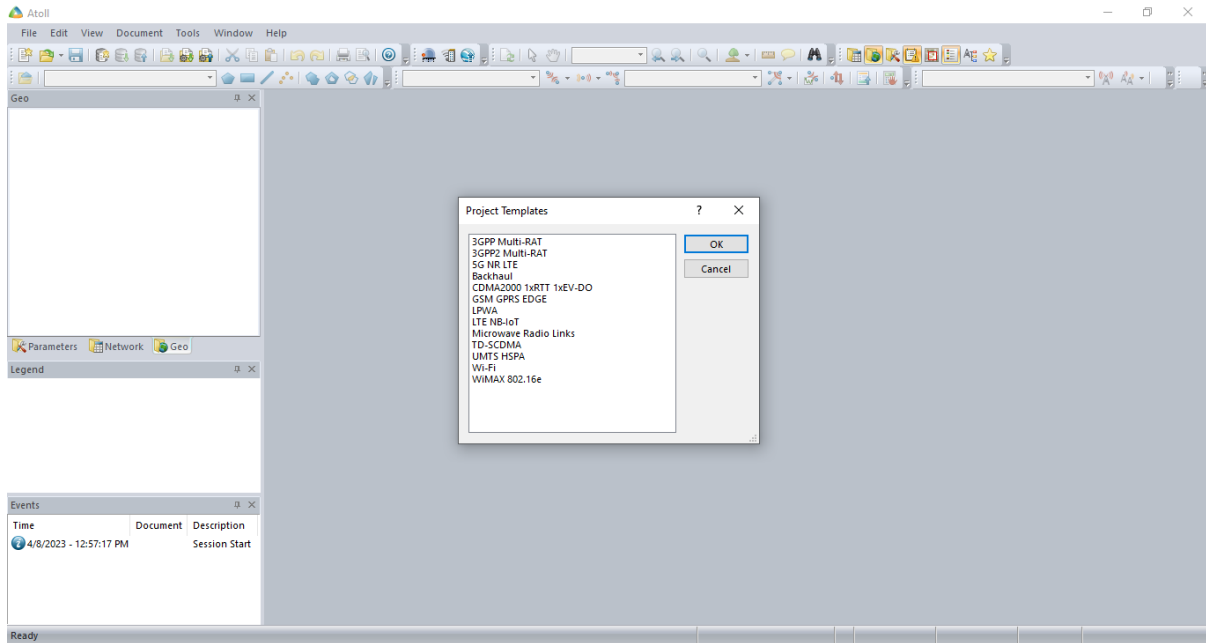


FIG. 3.7 : Création d'un nouveau projet sur Atoll.

Notre choix se porte sur la technologie 5G puisque notre projet concerne la planification d'un réseau 5G (FIG. 3.8).

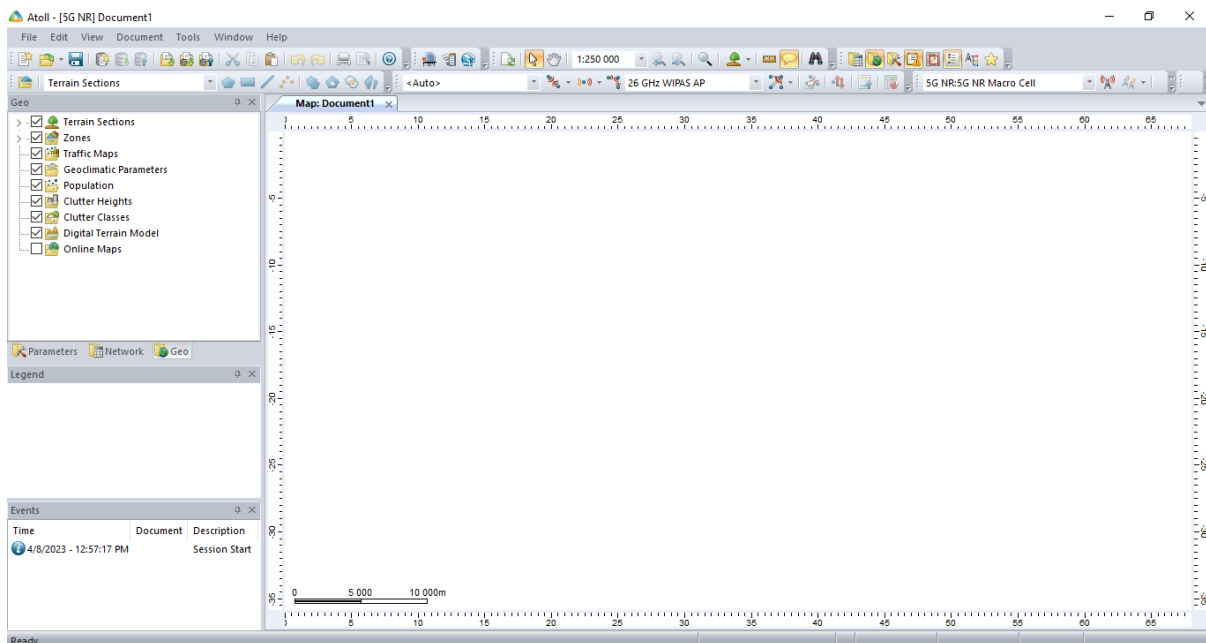


FIG. 3.8 : Nouveau projet 5G.

2- Importation de la carte

Premièrement, nous importerons la grande carte de l'Algérie (FIG. 3.9). Ensuite, nous appliquons un zoom sur la Wilaya de Tlemcen (FIG. 3.10) et nous précisons la commune de Chetouane (FIG. 3.11).

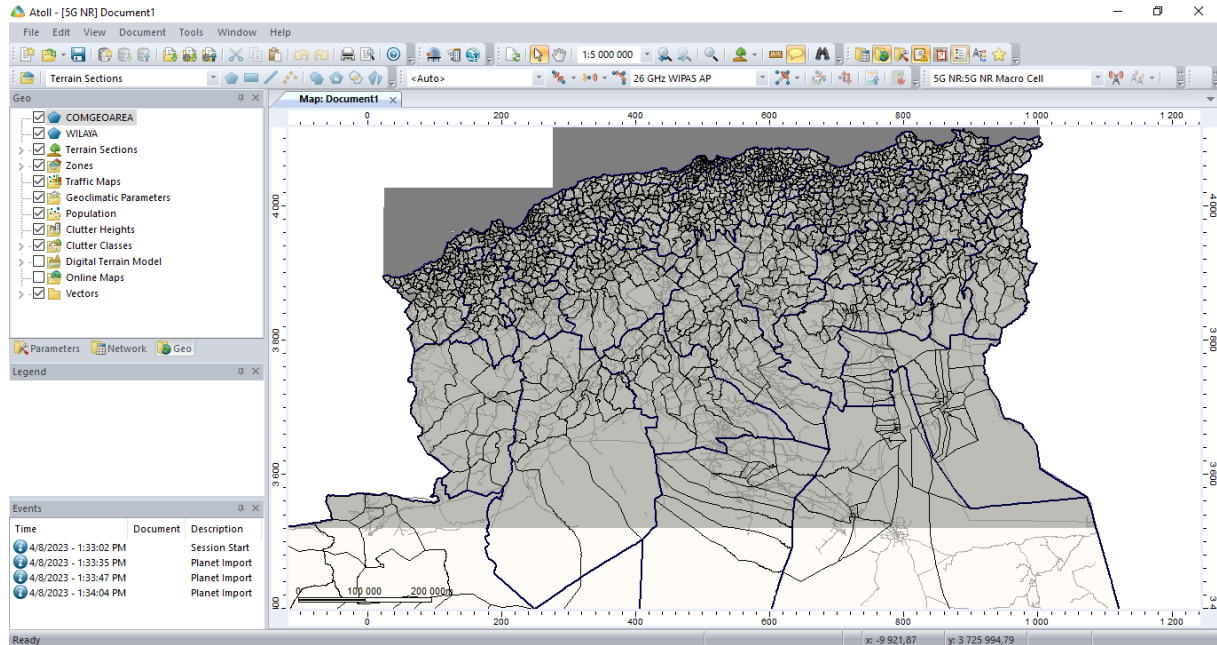


FIG. 3.9 : Importer la carte d'Algérie.

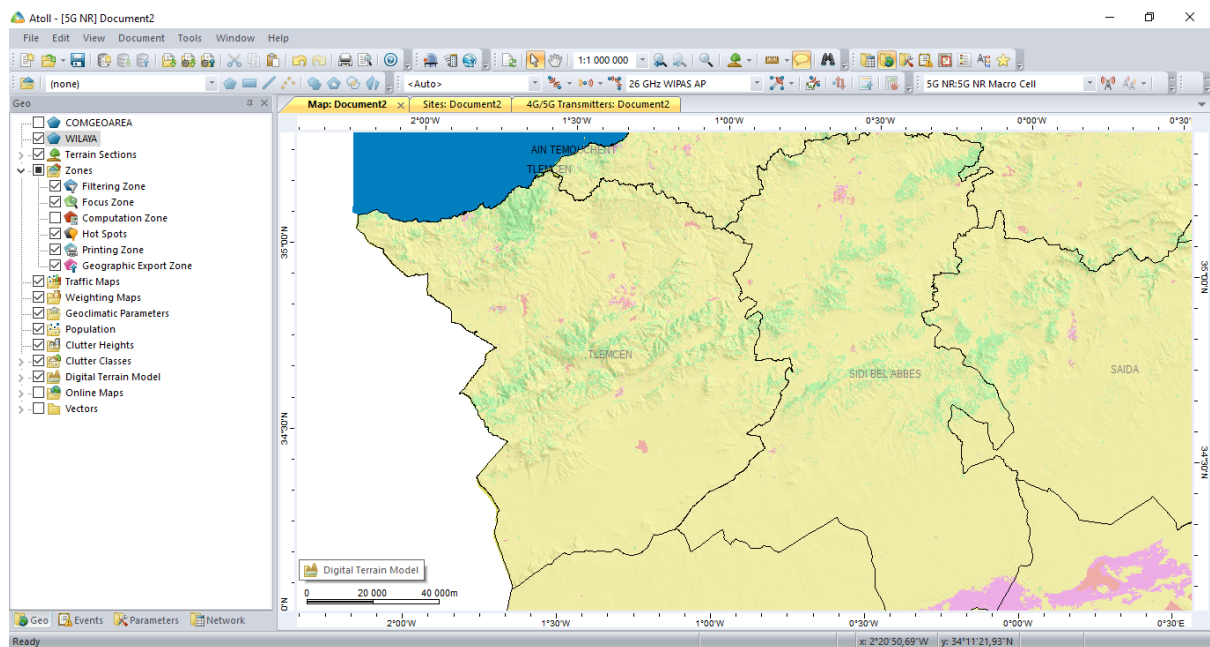


FIG. 3.10 : Wilaya de Tlemcen.

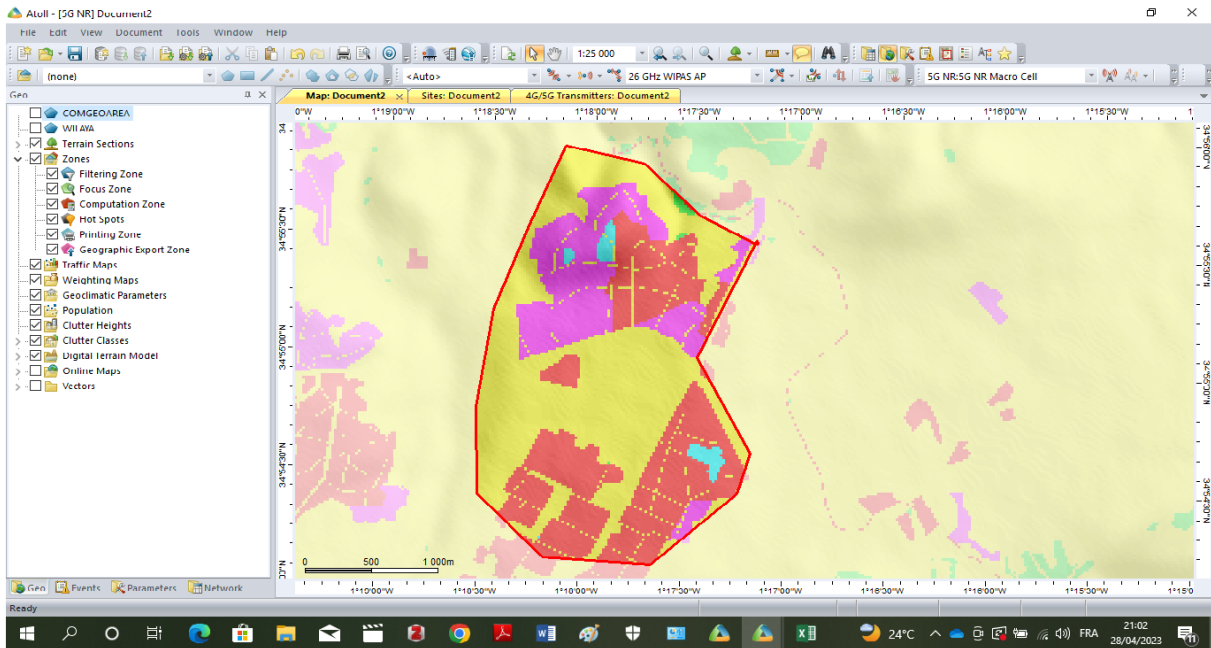


FIG. 3.11 : Commune de Chetouane.

Pour assurer une couverture totale de **5,078 km²** tout en maintenant une bonne qualité de service, la zone est délimitée par une *Computation zone* en rouge, elle détermine la zone où *ATOLL* prend en compte les émetteurs actifs.

Et un *focus zone* en vert qui est la zone exacte où *ATOLL* génère ses rapports et statistiques (FIG. 3.12).

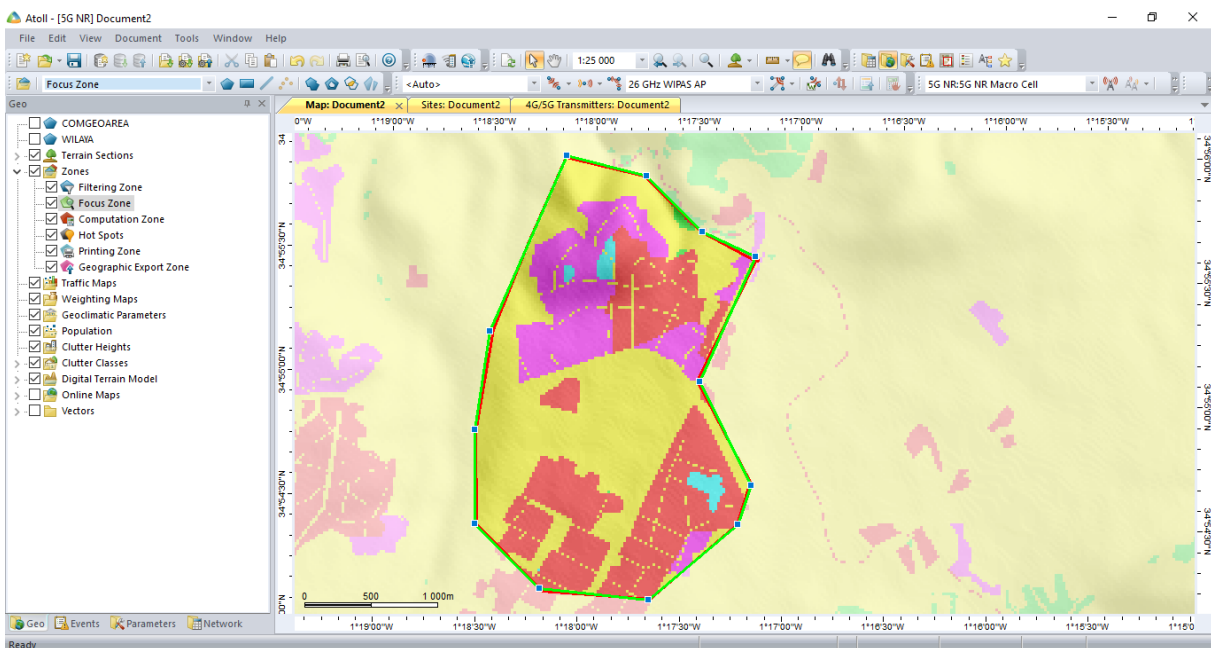


FIG. 3.12 : zone de chetouane après focus et commutation de zone.

3- Choix du système de coordonnées

Pour choisir le système de coordonnées, nous devons d'abord cliquer sur le menu *document* puis sur *Propriétés*. La fenêtre *Systèmes de coordonnées de projection* s'affiche (FIG. 3.13). Le système de coordonnées *WGS84 UTM Zones* est un système géodésique standard largement

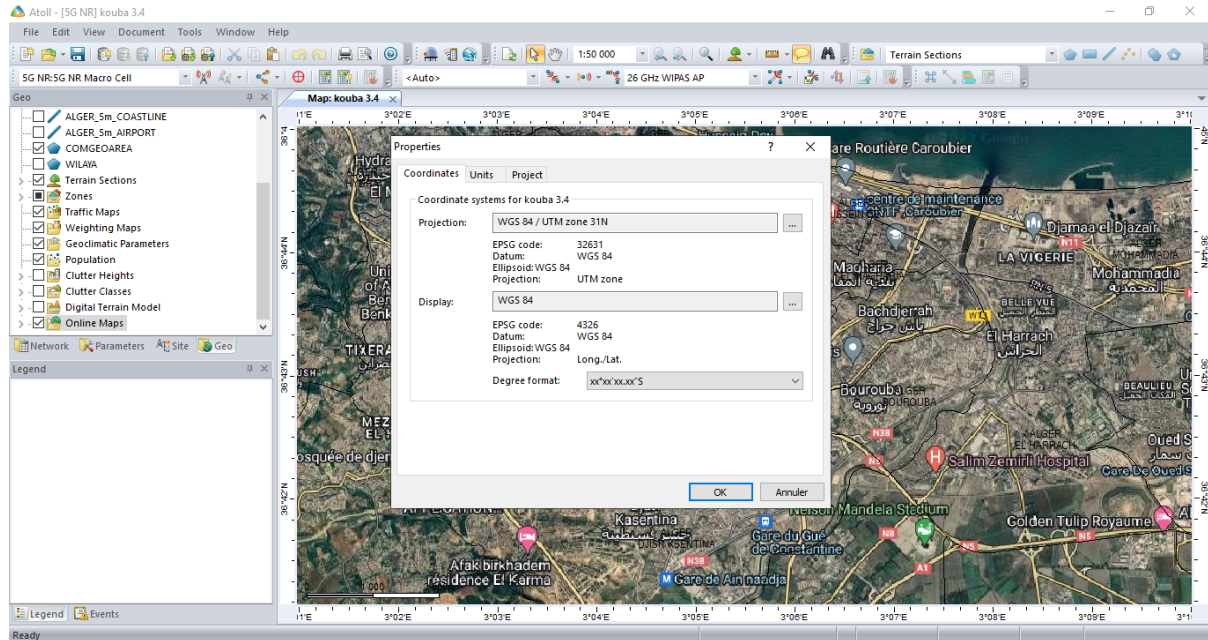


FIG. 3.13 : Choix du système de coordonnées.

utilisé à travers le monde, notamment par le système *GPS*. Il a été choisi pour la cartographie, car il permet de localiser la position sur la terre par la latitude et la longitude.

4- Ajoute de sites

Dans cette partie, nous avons ajouté **30** nouveaux sites (FIG. 3.14) à notre réseau comme nous l'avons vu dans la partie (3.2.5).

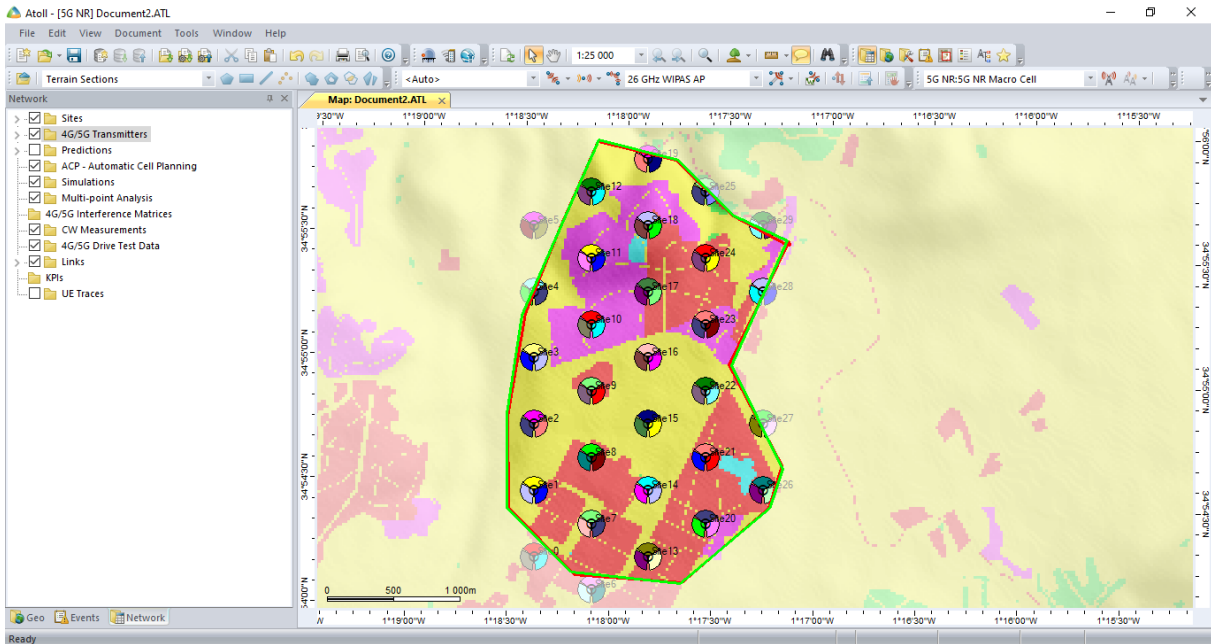


FIG. 3.14 : Cartographie des sites.

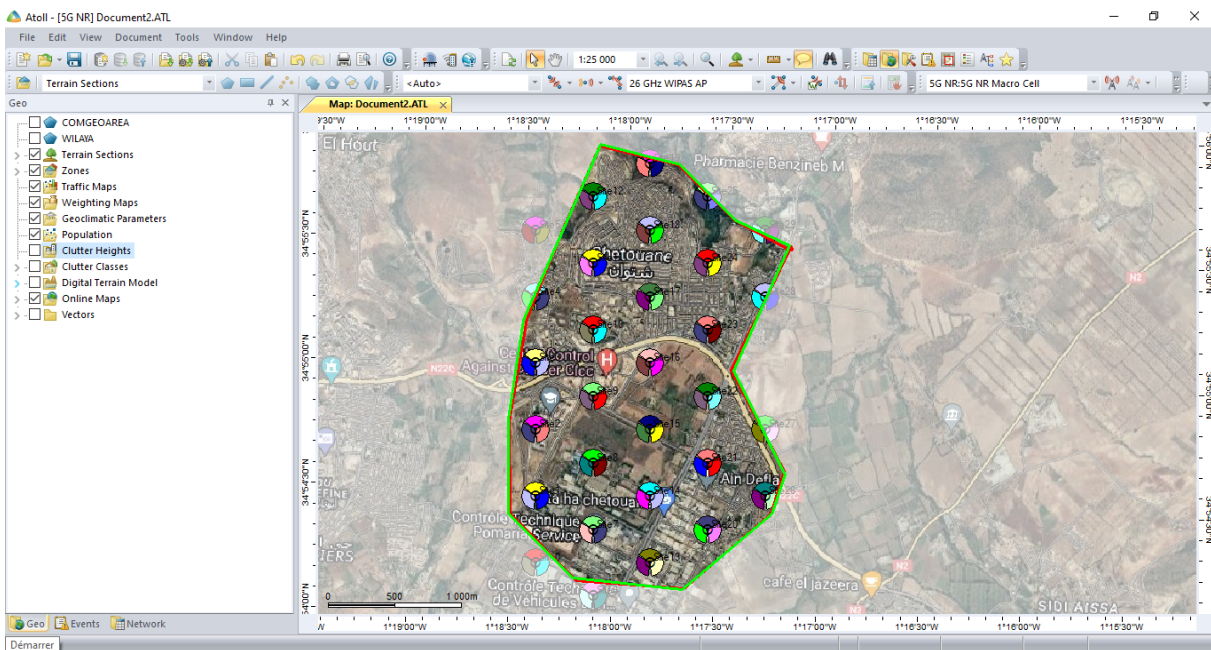


FIG. 3.15 : Cartographie des sites sur Google Earth.

Dans la figure (FIG. 3.15), on peut observer un aperçu de la zone à planifier sur *Google Earth*, ainsi que la répartition des sites numérotés de **Site 0** à **Site 29**.

Nom	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Hauteur du support (m)
Site 0	1°18'22,56"W	34°54'12,95"N	[640]	30
Site 1	1°18'23,4"W	34°54'28,97"N	[626]	30
Site 10	1°18'8,67"W	34°55'9,61"N	[590]	30
Site 11	1°18'9,51"W	34°55'25,67"N	[602]	30

TAB. 3.4 : Exemple de données de coordonnées utilisées pour la localisation des sites.

Le tableau (TAB. 3.4) présente un exemple des coordonnées utilisées pour localiser les sites.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a porté sur la planification de réseau radio pour fournir une couverture optimale. Nous avons discuté les étapes du processus de planification, y compris la pré-planification, le dimensionnement de la couverture, le choix du modèle de propagation et le calcul du nombre de sites nécessaires. Nous avons également exploré le logiciel de planification Atoll qui est largement utilisé dans l'industrie des télécommunications en examinant son environnement de travail et ses paramètres de configuration.

L'exécution de différentes étapes de planification et les résultats des calculs seront présentés dans le dernier chapitre.

Chapitre 4

Simulation et discussion des résultats

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats de la planification de couverture réalisée sous l'outil professionnel *ATOLL*. Pour cela, nous allons analyser les paramètres calculés de la prédiction et utiliser *l'ACP* pour optimiser la couverture et la capacité du réseau.

4.2 Optimisation

4.2.1 Planification automatique des cellules

L'ACP est un module d'optimisation automatique pour les réseaux GSM, UMTS, LTE et 5G. Il est utilisé pour améliorer les réseaux existants en ajustant les paramètres qui peuvent être facilement modifiés à distance : l'inclinaison de l'antenne et la puissance. Pour optimiser un réseau encore en phase de planification, on peut sélectionner des antennes, changer l'azimut de l'antenne, modifier l'inclinaison mécanique de l'antenne, changer la hauteur de l'antenne et sélectionner des sites parmi une liste de sites candidats.

L'ACP est disponible pour les technologies 5G, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM, CDMA, WiMax et Wi-Fi. Les objectifs d'optimisation comprennent l'amélioration de la couverture, l'augmentation de la capacité, la distribution du trafic et la maximisation du débit [50].

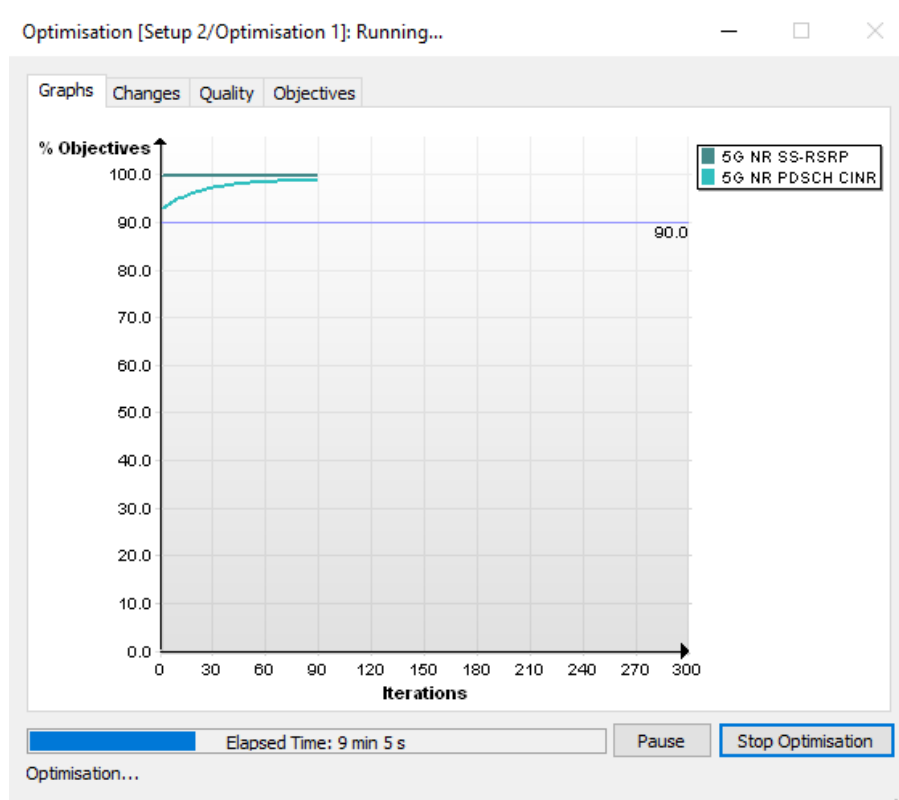


FIG. 4.1 : Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP.

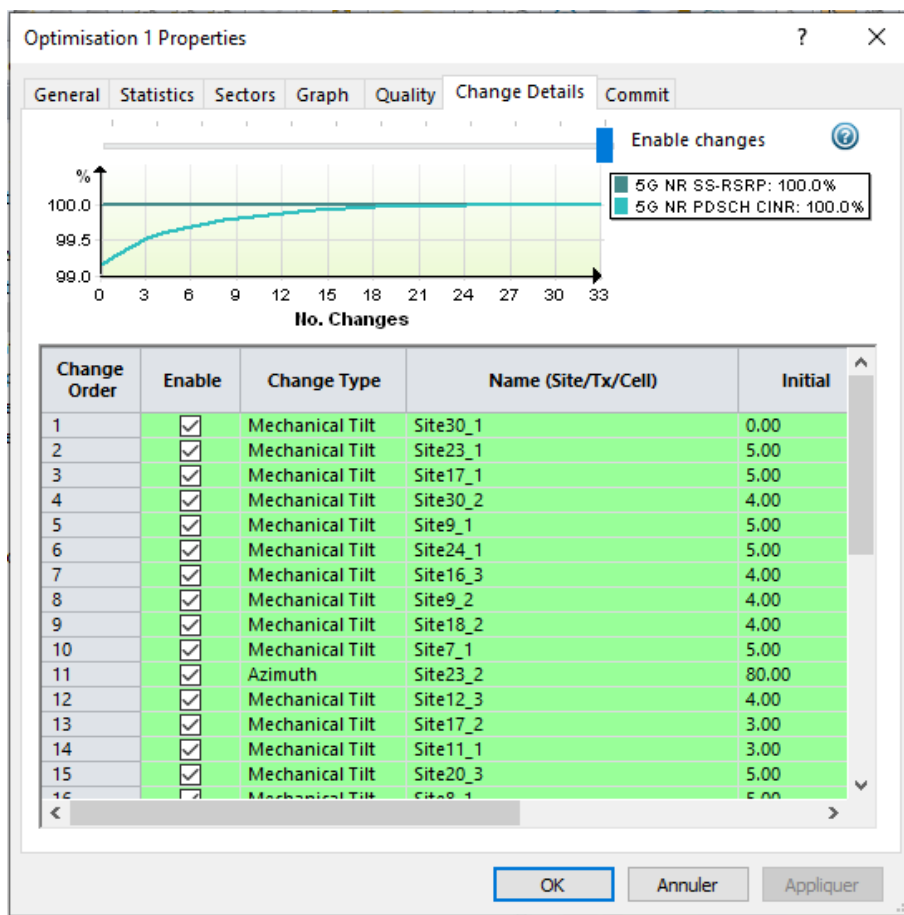


FIG. 4.2 : Modification de détail après optimisation.

Après l'ACP (FIG. 4.1 et FIG. 4.2), nous avons modifié certains paramètres et optimisés des sites (FIG. 4.3).

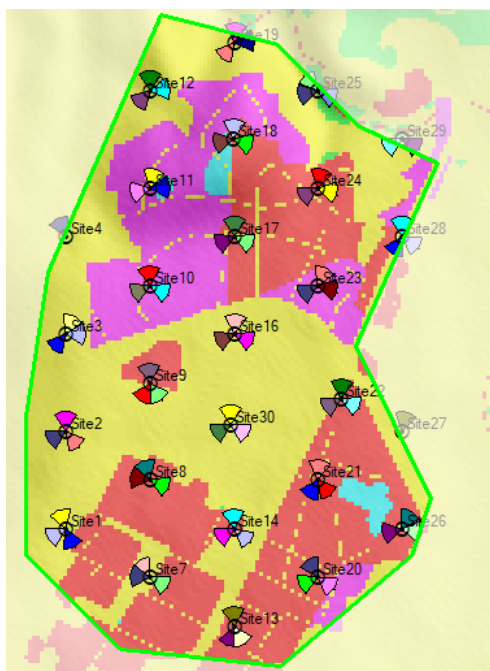


FIG. 4.3 : Résultats après l'optimisation

4.3 Résultats de différentes prédictions

4.3.1 Niveaux de signal pour la couverture 5G

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 **-65,9 dBm**. Les simulations indiquent que cette prédiction offre une couverture adéquate.

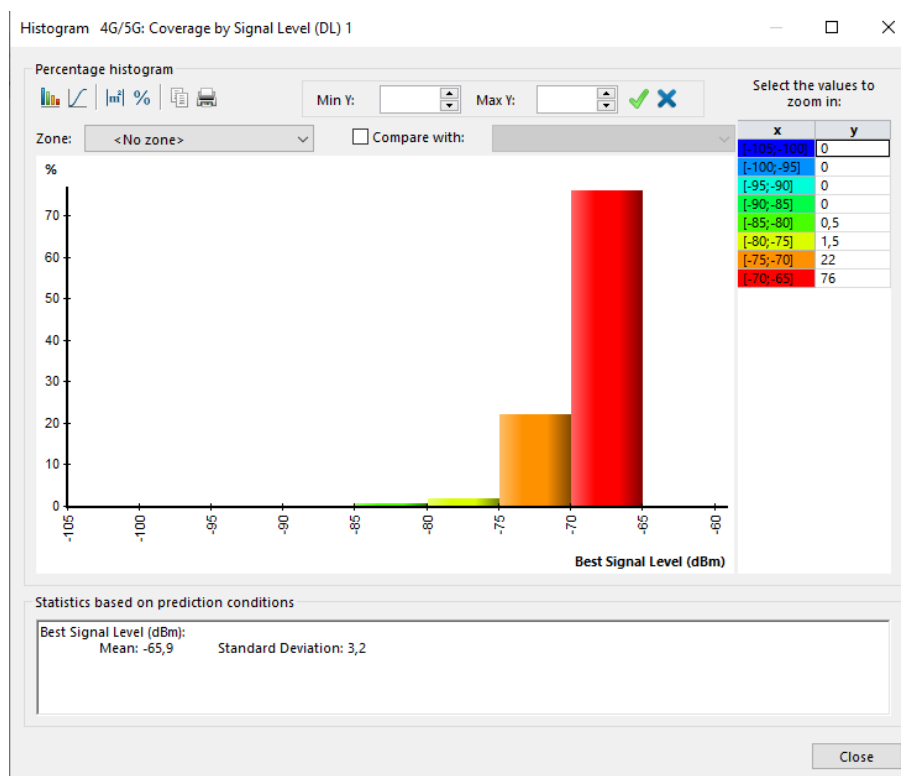


FIG. 4.4 : Prédiction de la couverture 5G par niveau de signal.

Le résultat statistique présenté dans l'histogramme (FIG. 4.4) montre que dans l'intervalle **[-70 ; -65]** la couverture continue d'augmenter à **76%**. Ces résultats sont encourageants, car ils démontrent que la majorité des zones étudiées bénéficient d'une couverture solide et d'une connectivité fiable.

4.3.2 Couverture 5G par SS-RSRP

Le *SS-RSRP* C'est une mesure utilisée dans la technologie 5G pour déterminer la qualité du signal reçu. Les dispositifs mobiles doivent mesurer la force et la qualité du signal des cellules voisines lorsqu'ils se déplacent d'une cellule à une autre afin de sélectionner et de re-sélectionner les cellules et de transférer les données intercellulaires.

La spécification 3GPP pour le *SS-RSRP* stipule que l'estimation de la couverture dépend des résultats de simulation et qu'un *SS-RSRP* $\geq 90\text{dBm}$ 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* $-67,36\text{ dBm}$ voir la figure (FIG. 4.5). 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 [50].

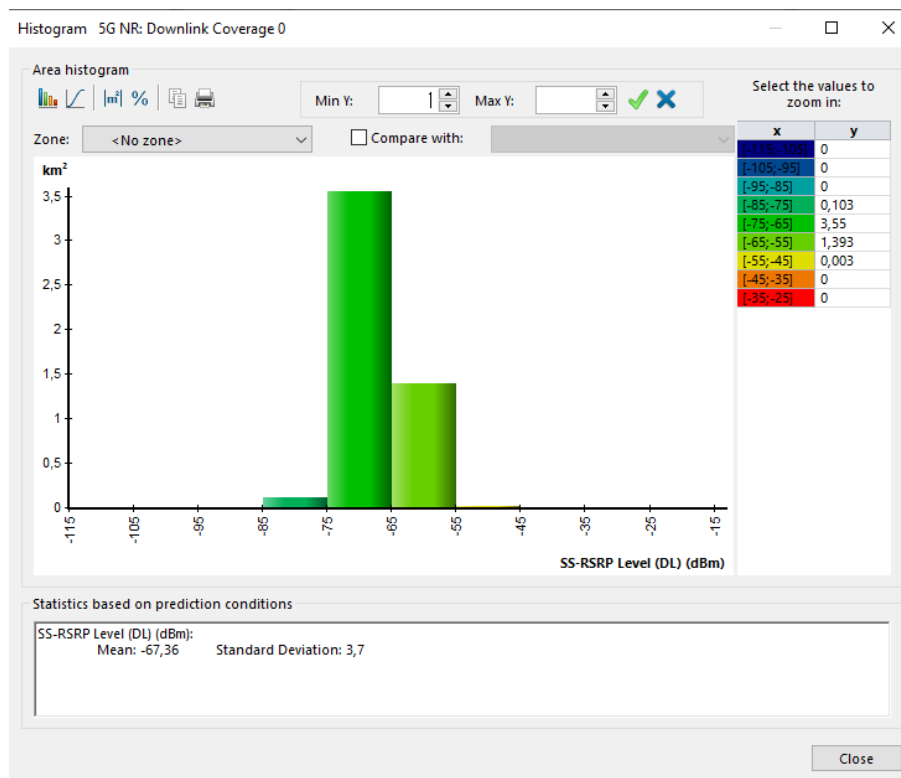


FIG. 4.5 : Couverture 5G par SS-RSRP.

Le résultat de simulation *SS-RSRP* $\geq -67,36\text{dBm}$ montre que la zone cible est effectivement couverte par un signal de qualité élevée.

4.3.3 Couverture 5G par PDSCH $C/(I+N)$

La figure (FIG. 4.6) présente un histogramme de zone (pourcentage) en fonction de la prédiction de qualité par *PDSCH C/(I+N)* dans la liaison descendante.



FIG. 4.6 : Qualité par PDSCH C/(I+N)

On remarque d'après l'histogramme des pourcentages de meilleure, bonne et faible qualité de signal sont respectivement **6%**, **84,9%** et **11,4%**.

4.3.4 Qualité de la liaison montante

Selon les résultats de la simulation de réseau 5G, la zone cible est couverte à **100%** par un niveau de signal de **10,4 dB** (FIG. 4.6) pour la liaison montante.

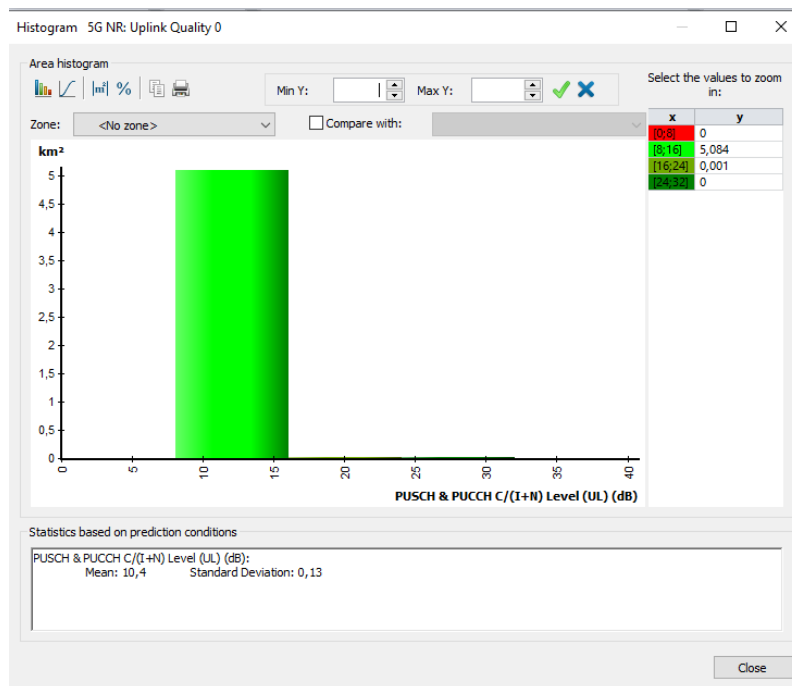


FIG. 4.7 : prédiction de la qualité de la liaison montante

La prédiction de qualité de cette liaison est indispensable pour assurer une communication bidirectionnelle efficace entre le terminal et son réseau.

4.3.5 Capacité 5G par débit (DL)

La prédiction de capacité 5G par débit pour les liaisons descendantes est essentielle pour évaluer les performances des réseaux de communication sans fil.

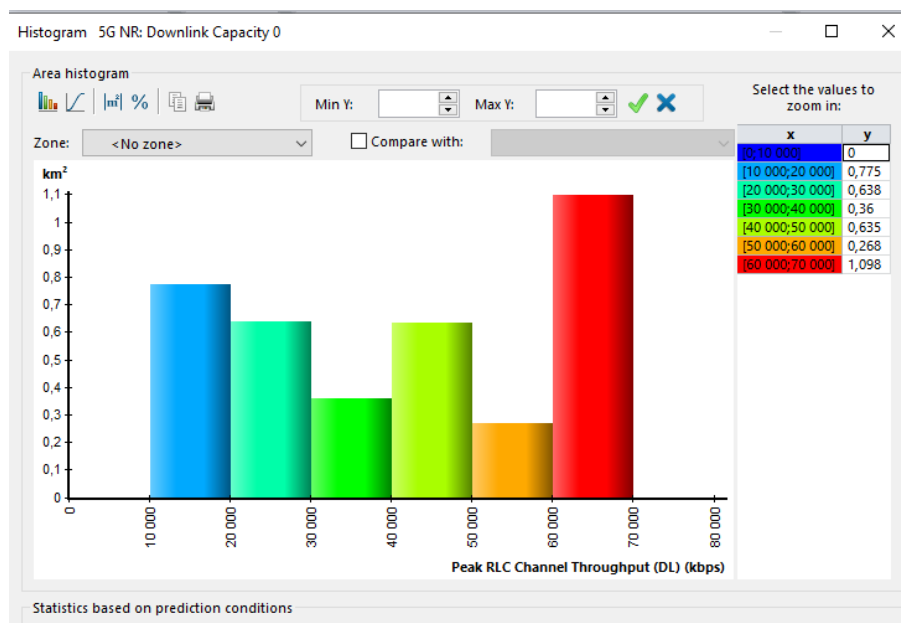


FIG. 4.8 : Prédiction de capacité 5G (DL).

La figure (FIG. 4.8) illustre la prédiction de capacité 5G en termes de débit descendant. On peut observer une vaste zone offrant un débit élevé pouvant atteindre jusqu'à **70 Mbps**. Les autres zones présentent des débits maximums de : **20, 30, 40, 50, 60 Mbps**.

4.3.6 Couverture dans les zones de chevauchement.

Les cellules avoisinantes se chevauchent pour permettre aux abonnés mobiles de rester connectés. Les zones de chevauchement se produisent fréquemment et peuvent dégrader la qualité du réseau. L'existence de nombreuses zones dans une couverture par une cellule dominante (meilleur serveur) est appelée zone de chevauchement. Cela est principalement causé par des antennes positionnées à des hauteurs et des basses altitudes, bien que cela puisse également être généré par des réflexions environnementales.

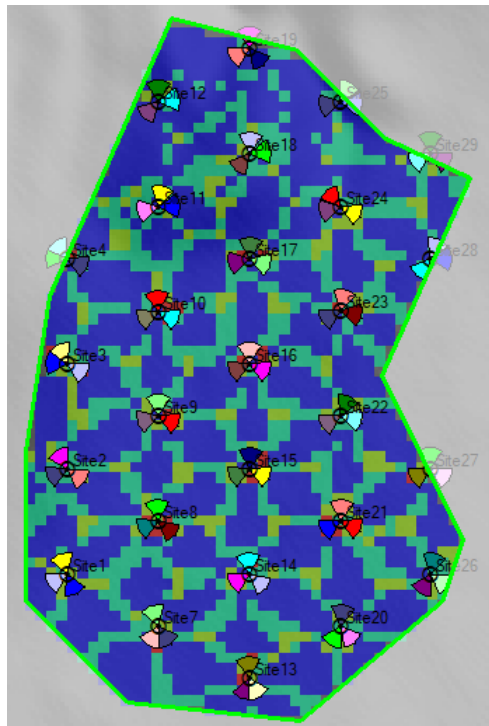


FIG. 4.9 : Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.

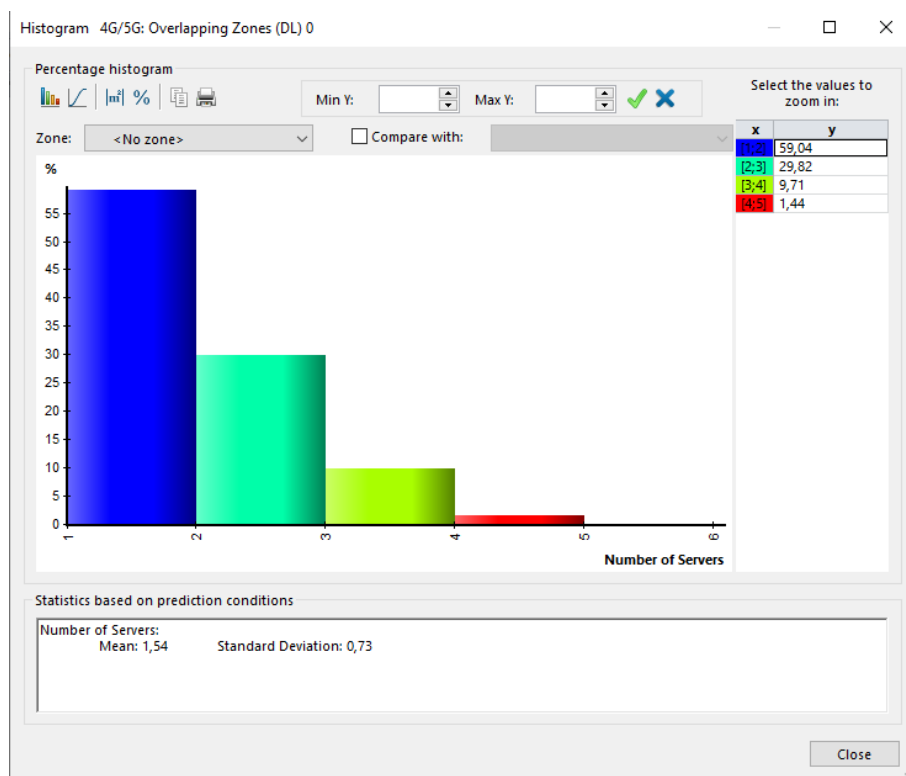


FIG. 4.10 : Histogramme de Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.

Comme nous pouvons le constater sur les figures : FIG. 4.9 et FIG. 4.10, un pourcentage plus élevé de la zone cible est couvert par un ou deux serveurs, ce qui montre une amélioration des performances lorsqu'elle est couverte par plus de deux serveurs.

4.4 Analyse de performance du réseau planifié

On peut réaliser une analyse de performance en utilisant des points d'analyse (perte de chemin, réception et interférences). Dans le cadre de ce projet de mémoire, nous nous focalisons sur l'analyse de la perte de chemin et de la réception.

4.4.1 Perte de chemin en 5G en fonction de la distance

Selon les résultats de planification de la couverture basés sur des estimations de budget de liaison et le modèle de propagation Okumura-Hata, le rayon de cellule de liaison descendante devrait être d'environ **0,297 km** et le rayon de cellule de liaison montante devrait autour de **0,338 km**.

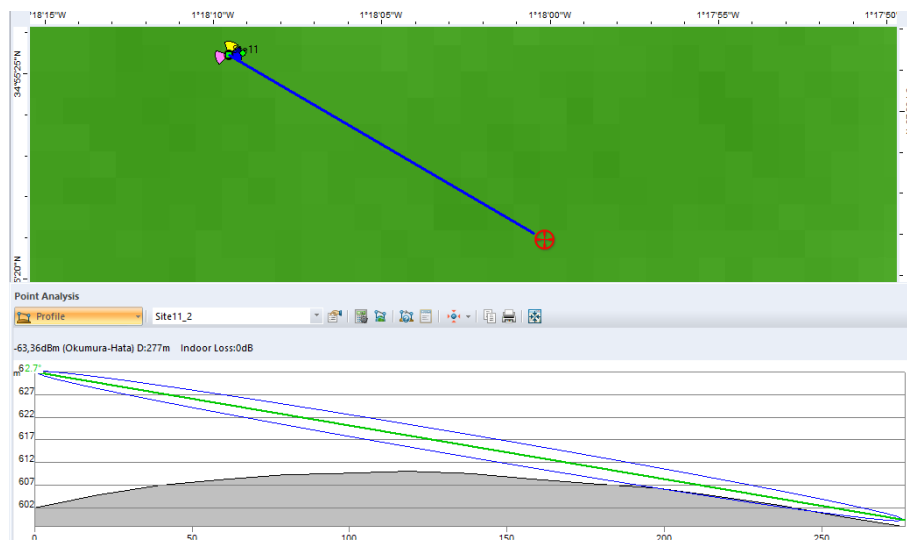


FIG. 4.11 : Perte de chemin 5G pour le secteur 1 du site 17.

Dans l'étape d'analyse des points, nous prenons à titre d'exemple une position distante de **0,277 km** par rapport au transmetteur **2** du site **11** (FIG. 4.11). La simulation confirme que le signal peut desservir complètement un utilisateur à cet endroit.

4.4.2 Réception 5G

Le résultat de la simulation Atoll de l'analyse de points montre que l'UE peut recevoir plusieurs signaux issus de différentes antennes à un emplacement donné. Cependant, le signal le plus puissant sera privilégié et pourra être utilisé pour desservir l'utilisateur. La figure (FIG. 4.12) illustre l'analyse de points de *SS-RSRP* dans le cadre de la réception 5G.

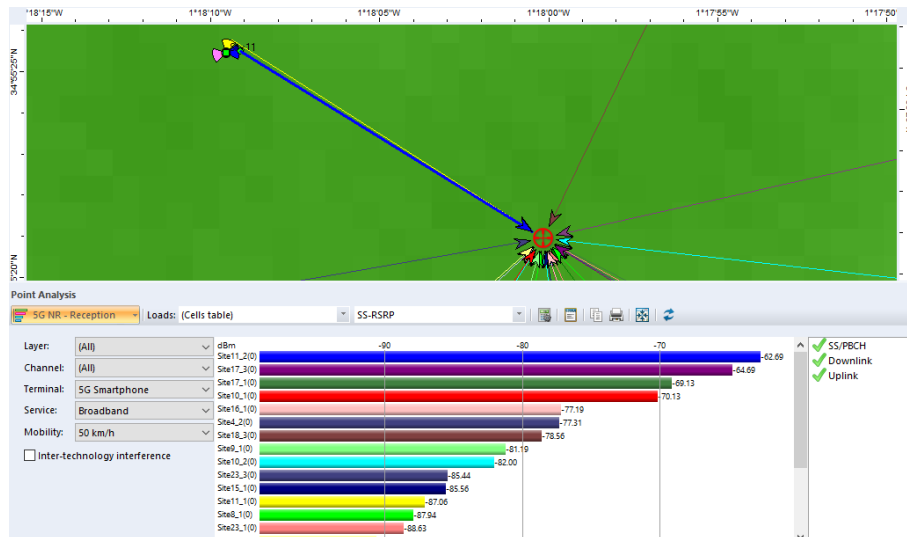


FIG. 4.12 : Analyse ponctuelle de la SS-RSRP dans la réception 5G.

4.5 Simulation

La figure (FIG. 4.13) 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.

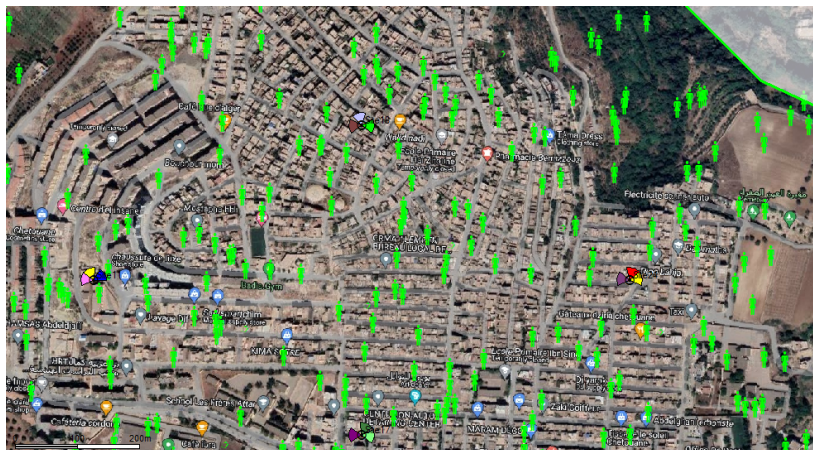


FIG. 4.13 : Distribution des utilisateurs 5G.

La figure (Fig. 4.14) 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.

		Value	Legend
1		Connected DL+UL	Connected DL+UL
2		Connected DL	Connected DL
3		Connected UL	Connected UL
4		Inactive	Inactive
5		No Coverage	No Coverage
6		No Service	No Service
7		Scheduler Saturation	Scheduler Saturation
8		Resource Saturation	Resource Saturation
9		Backhaul Saturation	Backhaul Saturation

FIG. 4.14 : Distribution des utilisateurs 5G.

4.6 Comparaison

Le tableau (TAB. 4.1) récapitule nos résultats obtenus avec ceux de la littérature :

Mémoire	SS-RSRP	Quality DL	Débit
<i>Notre projet</i> : Région : Chetouane, Superficie : 5,078 km ² Hauteur d'antenne gNB : 30 m Hauteur d'antenne UE : 1,5 m Modèle de propagation : Okumura-Hata	-67,36 dBm	82,6%	70 Mbps
<i>Projet 1</i> : Région : Arada Superficie : 9,91 km ² Hauteur d'antenne gNB : 30 m Hauteur d'antenne UE : 1,5 m Modèle de propagation : Okumura-Hata	-95 dBm	24,32%	59 Mbps
<i>Projet 2</i> : Région : Oran, Superficie : 64,53 km ² Hauteur d'antenne gNB : 30 m Hauteur d'antenne UE : 1,5 m Modèle de propagation : SPM	-91,46 dBm	44,06%	50 Mbps

TAB. 4.1 : Comparaison des résultats de prédiction 5G [51] [49].

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploité les outils de planification automatique de cellules pour optimiser la couverture du réseau 5G. Nous avons discuté des résultats de simulation, notamment la prédiction des niveaux de signal, la qualité de liaison montante et la couverture dans les zones de chevauchement. Nous avons également analysé les performances du réseau planifié en termes de perte de chemin et de réception 5G. En conclusion, cette étude a fourni des résultats utiles pour la planification et l'optimisation des réseaux de communication 5G.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire a pour objectif le déploiement et la mise en œuvre de réseau 5G sur la région de Chetouane au niveau de la wilaya de Tlemcen. Ce projet nous a permis d'acquérir beaucoup de connaissances et des bases non seulement sur la technologie 5G et leur déploiement, mais aussi sur l'outil de planification radio *ATOLL*.

Les résultats des simulations et des discussions ont confirmé plusieurs éléments clés liés au déploiement du réseau 5G. Tout d'abord, la prédiction des niveaux de signal pour la couverture 5G a démontré une couverture adéquate de la zone cible avec un signal fort de **-65,9 dBm**. Cela garantit une connectivité fiable, sûre et des services de bonne qualité pour les utilisateurs. De plus, la prédiction de la couverture par *SS-RSRP* a confirmé une excellente qualité de signal avec une valeur de **-67,36 dBm** sur la région en question permettant une sélection et une re-sélection efficaces des cellules ainsi qu'une gestion optimale de la mobilité des utilisateurs.

La prédiction de la capacité 5G par débit a révélé des débits élevés allant jusqu'à 70 Mbps sur une grande superficie tout en garantissant des performances optimales et idéales pour les utilisateurs en termes des services à large bande, d'accès à Internet, des appels vidéos et vocaux. Enfin, la prédiction de la couverture dans les zones de chevauchement a démontré une amélioration des performances lorsque la zone cible est couverte par un ou deux serveurs, en maintenant ainsi une connectivité continue aux abonnés mobiles.

Une étude comparative par rapport des travaux connexes a été effectuée pour bien évaluer nos résultats. Cette comparaison nous montre que notre projet propose des bons résultats et des valeurs significatifs en termes de signal, de débit et de qualité.

En résumé, ce mémoire représente une contribution significative à la recherche et à la pratique du déploiement des réseaux 5G. Les résultats de simulation obtenus confirment l'importance et les avantages de la technologie 5G offrant une connectivité de qualité et des performances élevées.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de développement technologique et économique dans une telle région. Il serait intéressant par exemple de considérer le déploiement d'un réseau 4G/5G intégrant à la fois des macro-cellules et des petites cellules en augmentant la densité du réseau avec un nombre réaliste de sites afin d'obtenir des résultats plus significatifs.

Ainsi, il est pertinent d'explorer les fonctionnalités de conception en *3D* et de *MIMO massive* offertes par *Atoll*, tant dans la bande FR1 que dans la bande FR2.

Enfin, grâce à la fonctionnalité de simulation du trafic en *3D d'Atoll*, on peut étudier la propagation du signal à l'intérieur des bâtiments, ce qui permet une meilleure compréhension de la couverture et de la qualité du signal à l'intérieur des structures.

Bibliographie

- [1] C. SUDHAMANI, M. ROSLEE, J. J. TIANG et A. U. REHMAN, “A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques : Issues and Future Challenges,” *Sensors*, t. 23, n° 4, p. 2356, 2023.
- [2] T. S. RAPPAPORT, *Wireless communications : Principles and practice, 2/E*. Pearson Education India, 2010.
- [3] M. SERIES, “IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” *Recommendation ITU*, t. 2083, n° 0, 2015.
- [4] E. MEURISSE, “L’UMTS et le haut-débit mobile,” *Rapport Institut d’électronique et d’informatique*, 2007.
- [5] K. MELAL, “Analyse des méthodes d’égalisation des techniques CDMA,” thèse de doct., Université de Batna 2, 2008.
- [6] P. Z. KHALID, “Dimensionnement et optimisation du,” thèse de doct., Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2010.
- [7] M. SALEM, “VIRTUALISATION DES RESEAUX SAN FIL (LTE),” thèse de doct., Univ M’sila, 2020.
- [8] B. BOUSLIMANI, B. HAIF et M. N. E. TEMMAR, “Développement d’antenne MIMO à ondes millimétriques pour les communications mobiles 5G,” 2022.
- [9] B. BELKACEM et D. YOUCEF, “Etude de dimensionnement et planification d’un réseau d’accès WCDMA 3G,” thèse de doct., Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [10] M. KHALIL, B. B. EDDINE et P. R. SALAH, “Mémoire de fin d’étude,” 2019.
- [11] J.-P. DAMIANO, “De la 5G à la 6G : contexte et enjeux!,” 2020.
- [12] S. E. HAJRI, “L’amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs,” thèse de doct., Université Paris-Saclay (ComUE), 2018.
- [13] G. P. FETTWEIS, “The tactile internet : Applications and challenges,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, t. 9, n° 1, p. 64-70, 2014.
- [14] R. BARBAU, “Performances des réseaux NB-IoT terrestres et satellites,” thèse de doct., 2022.
- [16] A. A. NOUHA, “Une gestion des tranches de réseau 5G basée sur l’apprentissage automatique,”
- [18] A. Y. ADJDIR et H. AYAD, “Etude d’un réseau 5G pour la transmission de petits paquets dans l’internet des objets,” thèse de doct.
- [20] A. MOUSSAOUI, F. DAOUDI et A. GACEMI, “Etude et simulation de la transmission radio des réseaux 5G.,” 2020.

- [22] R. CHATAUT et R. AKL, “Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction,” *Sensors*, t. 20, n° 10, p. 2753, 2020.
- [23] Z. EL-HACI, “Modélisation d’un réseau MIMO-mmWave dans l’environnement Simulink,” thèse de doct.
- [24] X. GE, S. TU, G. MAO, C.-X. WANG et T. HAN, “5G ultra-dense cellular networks,” *IEEE Wireless Communications*, t. 23, n° 1, p. 72-79, 2016.
- [27] N. AOUGHLIS, H. BELLAHSENE, S. BENABDALLAH et al., “Introduction du massive MIMO au réseau cellulaire 5G,” thèse de doct., Université Abderahmane MIRA de Bejaia, 2020.
- [28] MPirical, “5G is almost here,” *MPirical*, avr. 2019.
- [29] 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.
- [30] 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,”
- [32] B. A. DEHEMCHI MARWA, “Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G,” 2019.
- [34] A. DETTI, “Functional architecture,” *CNIT-Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata*, 2018.
- [35] K. MOHAMDI, A. MAHDJOUBI, M. N. E. TEMMAR et Z. KECHIDI, “Étude du scénario de déploiement du réseau mobile 5G,” 2022.
- [36] A. BOULEGHALEGH, B. GUERSES, Y. OUAZIZ, M. TOUNSI et al., “Prédiction des performances de réseaux 5G.,” thèse de doct., Université A. Mira-Bjaia, 2021.
- [37] M. MAS FERRER, “Network Deployment studies in 5G using ATOLL radio planning tool,” mém. de mast., Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [38] F. LAUNAY, *NG-RAN et 5G-NR : L’accès radio 5G et l’interface radioélectrique*. ISTE Group, 2021.
- [39] E. DAHLMAN, S. PARKVALL et J. SKOLD, *5G NR : The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
- [40] A. ZAIDI, F. ATHLEY, J. MEDBO, U. GUSTAVSSON, G. DURISI et X. CHEN, *5G Physical Layer : principles, models and technology components*. Academic Press, 2018.
- [41] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), “Release 15, TR 21.915,” rapp. tech., sept. 2019.
- [42] H. TERDAYET et M. BOUJNAH, “Calibration de modèles de propagation pour les réseaux GSM, WCDMA et LTE,” *mémoire de master, Sciences et technologies de l’Information et de la Communication-Option RST, Tunisie*, t. 2013, 2012.
- [43] N. MELOUKI, “Etude et estimation des pertes dans réseau GSM,” *mémoire de mestre, université de M’sila*, 2014.
- [44] J. C. OGBULEZIE, M. ONUU, J. USHIE et B. USIBE, “Propagation models for GSM 900 and 1800 MHZ for port Harcourt and Enugu, Nigeria,” *Network and Communication Technologies*, t. 2, n° 2, p. 1, 2013.
- [45] S. I. POPOOLA et O. F. OSENI, “Empirical path loss models for GSM network deployment in Makurdi, Nigeria,” *International Refereed Journal of Engineering and Science*, t. 3, n° 6, p. 85-94, 2014.

- [46] M. E. MOHAMMED et K. H. BILAL, “Coverage and QoS Analysis of LTE Radio Network Planning Considering Khartoum City,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, p. 1465-1468, 2014.
- [47] Y. OUARI, S. BERRAH et al., “Modèle de propagation et de couverture de la 4G,” thèse de doct., université Abderahmene Mira. Bejaia, 2020.
- [48] T. ETSI, “138 901 v14. 0.0, “5G; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100GHz,”” 3GPP TR 38.901 version 14.0. 0 Release 14),” ETSI, Tech. Rep, rapp. tech., 2017.
- [49] T. W. EFREM, “5G New Radio Network Dimensioning and Optimization : A Case Study in Arada Sub-City Addis Ababa,” thèse de doct., 2022.
- [50] J.-M. PICARD, Z. ALTMAN, S. B. JAMAA, M. DEMARS, H. DUBREIL, B. FOURESTIE et A. ORTEGA, “Automatic cell planning strategies for UMTS networks,” *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, t. 1, n° 1, p. 8-17, 2005.
- [51] M. KHELIL CHERFI et M. GUEDMANI, “5G NR Planning : Influence of advanced antenna systems implementation on RF planning predictions,” 2022.

Webographie

- [15] F. MOOC, *Explorer la 5G*, <http://www.fun-mooc.fr/fr/cours/explorer-la-5g/>, Consulté le 3 avril 2023.
- [17] ARCEP, *Les enjeux de la 5G*, https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-enjeux-5G_mars2017.pdf, Consulté le 3 avril 2023, 2017.
- [19] 3GPP, *5G System Overview*, <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>, Accessed on April 3, 2023.
- [21] AVNET, *No, millimeter wave 5G is not dead*, <https://www.avnet.com/wps/portal/us/resources/article/no-millimeter-wave-5g-is-not-dead/>, Consulté le 27 mars 2023.
- [25] R. W. WORLD, *5G Small Cells - Basics and Types*, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/5G-Small-Cells-Basics-and-Types.html>, Accessed on : April 29, 2023, n.d.
- [26] *Les small cells*, <https://hellofuture.orange.com/fr/les-small-cells/>, Consulté le 3 avril 2023.
- [31] 3GPP, *Release 15, TR 21.915: Technical Specification Group Services and System Aspects ; Vocabulary for 3GPP Specifications*, <http://www.3gpp.org>, sept. 2019.
- [33] *IPLOOK 5GC - Solutions réseau 5G*, <https://fr.iplook.com/produit/5gc/nrf.html>, Consulté le 5 avril 2023.

Annexes

Annexe A

Définitions

A.1 Station de base

A.1.1 NG-ENB

NG-ENB est un terme utilisé dans la norme 3GPP **Rel 15** pour désigner les nœuds de base dans le réseau d'accès 5G. Cependant, ce terme a été remplacé par en-gNB dans la norme 3GPP **Rel 16** et versions ultérieures.

A.1.2 En-gNB

En-gNB est le terme utilisé dans la norme 3GPP Rel 16 et versions ultérieures pour désigner les nœuds de base dans le réseau d'accès 5G. Il est conçu pour fonctionner de manière autonome sans avoir besoin d'un réseau d'accès LTE existant. Le en dans en-gNB signifie *end-to-end*, ce qui implique une connectivité directe au cœur de réseau 5G.

Annexe B

Tableau Atoll

B.1 sites

Nom	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Hauteur du support(m)
Site 1	1°18'23,4"W	34°54'28,97"N	[626]	30
Site 10	1°18'8,67"W	34°55'9,61"N	[590]	30
Site 11	1°18'9,51"W	34°55'25,67"N	[602]	30
Site 12	1°18'10,35"W	34°55'41,69"N	[557]	30
Site 13	1°17'48,88"W	34°54'14,14"N	[627]	30
Site 14	1°17'49,72"W	34°54'30,16"N	[615]	30
Site 16	1°17'51,39"W	34°55'2,21"N	[587]	30
Site 17	1°17'52,23"W	34°55'18,24"N	[583]	30
Site 18	1°17'53,07"W	34°55'34,26"N	[634]	30
Site 19	1°17'53,9"W	34°55'50,28"N	[515]	30
Site 2	1°18'24,23"W	34°54'44,99"N	[611]	30
Site 20	1°17'32,44"W	34°54'22,73"N	[618]	30
Site 21	1°17'33,28"W	34°54'38,76"N	[608]	30
Site 22	1°17'29,35"W	34°54'52,38"N	[593]	30
Site 23	1°17'34,95"W	34°55'10,84"N	[579]	30
Site 24	1°17'35,79"W	34°55'26,86"N	[564]	30
Site 25	1°17'36,62"W	34°55'42,88"N	[522]	30
Site 26	1°17'16,04"W	34°54'31,36"N	[602]	30
Site 27	1°17'16,88"W	34°54'47,38"N	[587]	30
Site 28	1°17'18,55"W	34°55'19,43"N	[566]	30
Site 29	1°17'19,38"W	34°55'35,45"N	[546]	30
Site 3	1°18'25,07"W	34°55'1,02"N	[598]	30
Site 30	1°17'51,36"W	34°54'47,2"N	[599]	30
Site 4	1°18'25,91"W	34°55'17,04"N	[572]	30
Site 7	1°18'6,16"W	34°54'21,54"N	[625]	30
Site 8	1°18'6,99"W	34°54'37,56"N	[615]	30
Site 9	1°18'7,83"W	34°54'53,59"N	[602]	30

B.2 Emetteur

Site	Nom	Antenne	Azimut	Élévation
Site 14	Site 14 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	330	0
Site 14	Site 14 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	100	0
Site 14	Site 14 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	185	0
Site 16	Site 16 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	10	3
Site 16	Site 16 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	125	0
Site 16	Site 16 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	260	4
Site 17	Site 17 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	25	5
Site 17	Site 17 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	80	3
Site 17	Site 17 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	270	5
Site 18	Site 18 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	345	0
Site 18	Site 18 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	80	4
Site 18	Site 18 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	280	0
Site 19	Site 19 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	5	0
Site 19	Site 19 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	80	0
Site 19	Site 19 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	280	5
Site 2	Site 2 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	320	5
Site 2	Site 2 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	120	0
Site 2	Site 2 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	255	0
Site 20	Site 20 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	35	0
Site 20	Site 20 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	115	0
Site 20	Site 20 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	205	5
Site 21	Site 21 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	40	0
Site 21	Site 21 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	105	1
Site 21	Site 21 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	255	0
Site 22	Site 22 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	5	0
Site 22	Site 22 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	110	5
Site 22	Site 22 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	200	0
Site 23	Site 23 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	30	5
Site 23	Site 23 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	80	0
Site 23	Site 23 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	215	1
Site 24	Site 24 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	20	5
Site 24	Site 24 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	80	0
Site 24	Site 24 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	280	0
Site 25	Site 25 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	30	0
Site 25	Site 25 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	115	2
Site 25	Site 25 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	280	0
Site 26	Site 26 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	40	0
Site 26	Site 26 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	125	0
Site 26	Site 26 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	200	5
Site 27	Site 27 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	240	0
Site 28	Site 28 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	35	0
Site 28	Site 28 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	85	0

Annexe B. Tableau Atoll

Site 28	Site 28 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	200	0
Site 29	Site 29 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	120	0
Site 29	Site 29 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	240	0
Site 3	Site 3 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	320	0
Site 3	Site 3 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	160	2
Site 3	Site 3 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	280	0
Site 30	Site 30 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	15	0
Site 30	Site 30 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	125	4
Site 30	Site 30 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	250	0
Site 4	Site 4 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	110	0
Site 7	Site 7 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	335	5
Site 7	Site 7 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	160	5
Site 7	Site 7 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	205	0
Site 8	Site 8 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	320	5
Site 8	Site 8 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	120	4
Site 8	Site 8 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	250	5
Site 9	Site 9 ₁	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	325	5
Site 9	Site 9 ₂	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	130	4
Site 9	Site 9 ₃	65deg 24dBi 2Tilt 850/900MHz	255	5