

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 : TAOUI Amel

NOUAR Bochra Chaimaa

Sujet

Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau 5G NR

Soutenu publiquement, le 13 / 06 /2024 , devant le jury composé de :

M/ M. FEHAM	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme/Y. BOUCHENAK KHELLADI	MAB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M/ R. MERZOUGUI	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicace

“

Oh Allah, les moments ne sont agréables qu'avec Ta mention et Ta gratitude, et l'au-delà ne sera agréable qu'avec Ton pardon, et le paradis ne sera agréable qu'avec Ta vue. Je dédie ma remise de diplôme et ma joie à :

من قال فيهما الله تعالى : وقضى ربك الا تعبدوا الا اياه و بالوالدين احسانا

MAMAN, j'arrivais à la date prévue. Me voici, poursuivant notre chemin que nous avons entamé ensemble pour y parvenir, seule sans toi. Combien j'ai souhaité ardemment ton étreinte le jour de ma remise de diplôme. Mais c'est ainsi, ô lumière de mes yeux, la vie m'a volé ta présence et m'a laissée seule pour lutter pour nos rêves que nous avons construits ensemble. Que Dieu ait pitié de toi, Maman.

À la prunelle de mes yeux. À la source de ma joie et de mon bonheur, au fil d'espoir qui illumine mon chemin, deuxième maman.

À celui qui a été mon guide depuis que j'ai ouvert les yeux sur la vie et mon ange dans la vie, à mon prince papa.

À mes deux personnes les plus chères, compagnons de mon chemin, qui ont partagé mes joies et mes peines, et m'ont accompagné dans les moments de succès, mon cher mari et ma chère fille Assil.

À mon cher frère Houssam, à mes chères sœurs Romaïssa, Fatima et Meriem. Je voudrais exprimer ma profonde gratitude, mais je ne trouve pas les mots suffisants pour décrire l'étendue de mon amour et de ma reconnaissance envers vous. Je souhaite que le succès et le bonheur vous accompagnent tout au long de votre vie. Je vous aime beaucoup.

À mon grand-père et ma grand-mère qui ne m'ont jamais oublié dans leurs prières, que Dieu prolonge leur vie.

À la plus belle coïncidence parmi mille choix, les amies de l'université, mon binôme AMEL.

À ma collègue qui m'a aidé et encouragé, merci pour tout le soutien pendant cette période. Je vous souhaite tout le succès et la prospérité

dans votre vie, ma chère Bouchra Ayat Allah.

À ma chère khaoula, Imane, Sarah, à tous ceux que je connais ; merci d'avoir été là pour moi dans les moments difficiles, Vous êtes ma source de force. Je suis très reconnaissante pour votre amour et votre soutien que je n'oublierai jamais. Vous êtes les meilleures amies.

À tous les membres de ma famille.

Merci.

”

- Nouar Bochra Chaimaa

“

Tout d'abord et avant toute chose, je remercie Allah pour Sa grâce, Sa guidance et Sa force qui m'ont permis de mener à bien cet travail. Je souhaite également dédier ces quelques lignes à tous ceux qui me sont très chers.

À, mon père, tu es le plus précieux de ce que je possède. Tu as toujours été à mes côtés, mon compagnon et mon soutien inébranlable depuis ma naissance, dans tous les aspects de ma vie et pas seulement pendant mon parcours scolaire. Je t'aime énormément, cœur de mon cœur, et je suis fière d'être ta fille, d'être la fille d'un homme comme toi.

À ma mère, tu sais que tu es mon monde et que rien n'est complet sans toi. Tu es ma source de force et d'amour, je trouve en toi tout ce qui me procure confort et sécurité. Je suis très heureuse d'avoir réalisé l'un de tes rêves. Je t'aime, mon cœur.

À mes frères, vous m'avez toujours fait sentir comme une princesse parmi vous. Vous avez offert et continuez d'offrir beaucoup d'amour et d'attention. Je vous aime énormément et je vous souhaite tout le succès et le bonheur dans tout ce que vous entreprenez.

À ma meilleure amie et sœur, Fairouz, je sais que tu lis ceci. Je veux te dire que tu fais partie de moi, même si tu n'es pas à mes côtés. Merci d'être dans ma vie. Je te souhaite encore plus de succès dans ta vie.

*À ma chère amie Moumen Bouchra Ayat Allah, que le hasard a mise sur mon chemin et dont l'amitié est le premier fruit de ce mémoire. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi, en paroles et en actes.
Merci, ma chère*

À mes amies que j'ai rencontrées durant mon parcours scolaire et universitaire, spécifiquement Tizaoui Fatima Zohra. Votre amitié est précieuse pour moi et vous le savez. Je vous souhaite encore plus de succès et de réussite.

À ma chère amie Bochra, qui a été ma partenaire dans ce mémoire. Je sais que ce n'était pas facile au début, mais nous avons réussi à la fin, ma belle.

Enfin, À la personne la plus petite et la plus gentille que j'ai rencontrée pendant ce mémoire, ma petite Assil.

Merci.

”

- TAOUI AMEL

Remerciements

“

Avant tout, nous remercions Allah qui nous a ouvert la voie pour parvenir à ce jour et nous a procuré les moyens et les motivations qui nous ont aidés et nous ont honorés d'achever ce modeste travail. Nous exprimons également notre gratitude envers le superviseur de ce travail et notre mentor, le professeur Merzougui Rachid, pour sa confiance en nous, son choix de ce sujet et ses efforts continus pour nous guider vers l'excellence.

Nous tenons à exprimer notre gratitude spéciale au comité de juges pour leur présence et leur contribution au soutien de ce travail, ainsi que pour leur souci de fournir des informations scientifiques avec sincérité et crédibilité.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à Monsieur Feham Mohamed pour avoir présidé cette discussion et à Madame Bouchnek Khaladi Ysmina pour l'avoir examinée.

Nous tenons également à remercier l'ingénieur Attar Mohamed Abderrahmane pour son assistance.

Enfin, nous remercions tous nos enseignants du département de Télécommunication de l'Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, sans oublier de citer tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis l'école primaire jusqu'aux études universitaires.

”

Résumé

Le développement technologique et démographique continu que connaît le monde au fil des années place les réseaux de communication dans une dynamique d'évolution et d'amélioration constante afin de suivre ces avancées et de répondre à tous les besoins.

Dans ce contexte, la mise en place du **réseau de cinquième génération (5G)** représente une réelle avancée par rapport au **réseau de quatrième génération (4G)**, car elle vise à combler les lacunes de ce dernier en fournissant une **haute mobilité**, une **latence minimale**, une **fiabilité accrue**, une **efficacité énergétique** et un **transfert de données à haut débit à moindre coût**.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous proposons le **déploiement**, la **configuration** et la **mise en œuvre** de ce réseau dans une zone de la wilaya de **Tlemcen**, couvrant une superficie de **7,785 km²**, tout en cherchant à améliorer la **couverture** et à augmenter sa **capacité** de la meilleure manière possible.

Pour cela, nous exploitons l'outil de planification professionnel **Atoll** dans sa version **3.4.0** pour la partie simulation de ce réseau.

Mots clés : 5G, gNB, Tlemcen, Atoll, planification, couverture, capacité, optimisation et ACP.

Abstract

The continuous technological and **demographic development** that the world has seen over the years means that communications networks are constantly evolving and improving, in order to keep pace with these advances and meet all needs.

In this context, the introduction of the **fifth-generation (5G) network** represents a real advance on the **fourth-generation (4G) network**, as it aims to fill the latter's gaps by providing **high mobility, minimal latency, increased reliability, energy efficiency and high-speed data transfer** at **lower cost**.

In this thesis, we propose the **deployment, configuration and implementation** of this network in an area of the **wilaya of Tlemcen**, covering an area of **7,785 km²**, while seeking to improve **coverage** and increase **capacity** in the best possible way.

To this end, we are using the professional planning tool **Atoll** version **3.4.0** for the simulation part of the network.

Keywords : 5G, gNB, Tlemcen, Atoll, planning, coverage, capacity, optimization and ACP.

ملخص

ان التطور التكنولوجي و السكاني المستمر الذي يشهده العالم على مر السنين يضع شبكات الاتصال في دائرة التطور والتحسين المستمر لشبكات الاتصال من اجل مواكبة هذه التطورات وتلبية جميع الاحتياجات.

وفي هذا السياق، تم إنشاء شبكة الجيل الخامس التي تعد تطوراً فعلياً لشبكة الجيل الرابع كونها تركز على سد نقائص هذه الشبكة من خلال توفير الحركية العالية و التأخير المنخفض و الموثوقية المتزايدة و الكفاءة الطاقوية مع التركيز على نقل البيانات بسرعة عالية و أقل تكلفة ممكنة.

وفي سياق هذا العمل الختامي، نقترح نشر، تكوين و تنفيذ هذه الشبكة في منطقة من ولاية تلمسان المقدرة بـ **7.785 كم²**، مع محاولة تحسين تغطية هذه الشبكة وزيادة قدرتها بأفضل صورة ممكنة. لتحقيق ذلك، نستخدم أداة التخطيط المهنية **Atoll** في نسختها **3.4.0** لمحاكاة هذه الشبكة.

كلمات مفتاحية :

تلمسان، التخطيط، التغطية ، القدرة، التحسين . ACP ، GNB ، 5G

Table des matières

Dédicace.....	II
Remerciements	V
Résumé	VI
Abstract.....	VII
IIIIV	ملخص
Table des matières.....	X
Listes des figures	XIII
Liste des tableaux	XV
Liste des sigles et acronymes.....	XVI
Introduction générale	1
1 Concepts Fondamentaux de la 5G NR	3
1.1 Introduction	4
1.2 Qu'est-ce qu'un réseau de téléphonie mobile ?.....	4
1.3 Évolution des réseaux mobiles	4
1.4 5ème génération (5G).....	5
1.4.1 Présentation de la 5G.....	5
1.4.2 Caractéristiques techniques	5
1.4.3 Défis de la 5G.....	6
1.4.4 Catégories d'usage 5G	6
1.4.5 Indicateurs clés de performance (KPI)	8
1.4.6 Étude technique du réseau 5G	9
1.4.6.1 Architecture de réseau 5G	9
1.4.7 Bande de fréquence	12
1.5 Caractéristiques de la couche physique.....	13
1.5.1 Accès multiple.....	13
1.5.2 Numérolgie	15
1.5.2.1 Structure de trame temporelle	15
1.5.2.2 Structure de trame fréquentielle.....	16
1.5.3 Techniques utilisées.....	18
1.5.3.1 Ondes millimétriques (mmWave).....	18
1.5.3.2 MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	19

1.5.3.3	Beamforming.....	19
1.5.3.4	Petites cellules.....	20
1.5.3.5	Full Duplex	20
1.6	Avantages	21
1.7	Conclusion.....	21
2	Dimensionnement et planification de réseaux 5G NR.....	22
2.1	Introduction.....	23
2.2	Déploiement.....	23
2.2.1	Non-autonome (NSA).....	23
2.2.2	Autonome (SA).....	24
2.2.3	Option de déploiement	25
2.3	Modèle de propagation	28
2.3.1	Modèle OKUMURA-HATA.....	28
2.3.2	Modèle COST 231-HATA	29
2.3.3	Modèle de propagation standard	30
2.3.4	Planification de réseau radio.....	30
2.3.4.1	Processus de planification	31
2.4	Dimensionnement de réseau 5G.....	32
2.4.1	Processus de dimensionnement	32
2.4.1.1	Pré-dimensionnement.....	33
2.4.1.2	Dimensionnement de couverture	33
2.4.1.3	Dimensionnement de capacité.....	37
2.5	Conclusion.....	40
3	Planification et optimisation de la couverture et la capacité.....	41
3.1	Introduction.....	42
3.2	Étapes de planification avec atoll.....	42
3.3	Prédictions avant l'optimisation	46
3.3.1	Prédiction du niveau de signal pour la couverture 5G.....	46
3.3.1.1	Couverture 5G par PDSCH C/(I+N).....	47
3.3.1.2	Couverture 5G par SS-RSRP.....	48
3.3.1.3	Qualité de la liaison montante.....	49
3.3.1.4	Capacité 5G pour liaison descendante.....	50
3.3.1.5	Couverture dans les zones de chevauchement	50
3.3.2	Optimisation.....	51
3.3.2.1	Changement de la hauteur des sites.....	51
3.3.3	Planification automatique des cellules.....	51
3.3.4	Après optimisation	53
3.3.4.1	Prédiction du niveau de signal pour la couverture 5G.....	53
3.3.4.2	Couverture 5G par PDSCH C/(I+N).....	53
3.3.4.3	Couverture 5G par SS-RSRP.....	54
3.3.4.4	Qualité de la liaison montante.....	55
3.3.4.5	Capacité 5G pour liaison descendante.....	56
3.3.4.6	Couverture dans les zones de chevauchement	57
3.3.5	Analyse de performance du réseau prévu	57
3.3.5.1	Perte de chemin 5G avec la distance	57
3.4	Simulation	59

3.5	Comparaison.....	60
3.5.1	Comparaison avant et après l'optimisation	60
3.5.2	Comparaison avec les travaux connexes	60
3.6	Conclusion.....	61
4	Conclusion générale et perspective.....	62
5	Bibliographie.....	66
	Annexes.....	68
	A Présentation de logiciel atoll	69
	B Tableau	71

Table des figures

1.1	Évolution des réseaux mobiles.....	5
1.2	Cas d'utilisation de la 5G.....	8
1.3	Etoile des 8 KPI susmentionnés pour les trois catégories d'usage de la 5G.....	10
1.4	Architecture de réseau 5G	11
1.5	Architecture de NG-RAN.....	12
1.6	Architecture du cœur 5GC	13
1.7	Bande de fréquences	15
1.8	Allocation de sous-porteuses en OFDMA.....	17
1.9	Allocation de sous-porteuses en SC-FDMA	18
1.10	Structure temporelle dans les trames 5G NR.....	20
1.11	Technique utilisée dans 5G NR.....	23
1.12	Technique utilisée dans 5G NR.....	24
1.13	Beamforming.....	25
1.14	Petite cellule	26
1.15	Technologie Full Duplex.....	27
2.1	Architecture NSA pour système 5G.....	23
2.2	Architecture SA pour système 5G.....	24
2.3	options de déploiement de la NSA et SA.....	25
2.4	Option 1 de déploiement SA 5G	25
2.5	Option 2 de déploiement SA 5G	26
2.6	Option 3 de déploiement SA 5G	26
2.7	option 4 de déploiement NSA 5G	27
2.8	option 5 de déploiement SA 5G.....	27
2.9	option 7 de déploiement NSA 5G	28
2.10	Processus de planification.....	31
2.11	Zone de Mansourah, Tlemcen.....	31
2.12	Schéma du processus de dimensionnement et d'optimisation	33
2.13	Bilan de liaison	34
3.1	Étapes nécessaires pour créer un nouveau projet.....	42
3.2	Échelle des coordonnées.....	43
3.3	Le système de coordonnées.....	43
3.4	Wilaya de Temcen.....	44
3.5	Zone d'étude.....	44
3.6	Réalisation de la cartographie des sites sur Google Earth.....	45
3.7	Caractéristiques des sites.....	45
3.8	Réalisation de la cartographie des sites.....	47
3.9	Prédiction de la qualité par PDSCH C/(I+N) de la liaison descendante.....	48
3.10	Prédiction de la Couverture par SS-RSRP.....	49
3.11	Prédiction de la qualité de la liaison montante.....	49
3.12	Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.....	50

3.13	Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.	51
3.14	Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP	52
3.15	Résultat après l'optimisation.....	52
3.16	Résultat après l'optimisation.....	53
3.17	Prédiction de la qualité par PDSCH C/(I+N) de la liaison descendante.	54
3.18	Prédiction de la Couverture par SS-RSRP.....	55
3.19	Prédiction de la qualité de la liaison montante.	56
3.20	Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.	56
3.21	Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.....	57
3.22	Perte de chemin 5G avec de la distance pour le site 47, secteur 2.....	58
3.23	Présente l'analyse ponctuelle du SS-RSRP dans la réception 5G	58
3.24	Répartition des utilisateurs de la 5G	59
3.25	Répartition des utilisateurs de la 5G	59

Liste des tableaux

1.1	Performances du réseau 5G ciblées par le projet IMT-2020.....	7
1.2	Description des composants du cœur	14
1.3	Numérologies de transmission prises en charge.....	19
1.4	Caractéristiques de la numérolgie en 5G.....	19
1.5	Bandes d'exploitation pour NR dans FR1.....	21
1.6	Bandes d'exploitation pour NR dans FR2.....	22
2.1	Caractéristiques de la zone.....	41
2.2	Principe du budget de liaison radio montante 5G NR.....	45
2.3	Principe du budget de liaison radio descendante 5G NR.....	45
2.4	Rayon de la cellule et le résumé des paramètres	46
2.5	Catégorie de service de l'utilisateur.....	48
2.6	Paramètres utilisés pour calculer les débits pour la nouvelle radio 5G.....	49
2.7	Meilleurs gNBs sélectionnés à partir du nombre de sites basé sur la capacité	50
2.8	Meilleur nombre de gNBs sélectionnés	50
3.1	Exemples des données des coordonnées utilisées pour localiser les sites.	46
3.2	Comparaison avant et après l'optimisation	60
3.3	Comparaison avec les travaux connexes.	60

Liste des sigles et acronymes

3G	Third Generation
3.5G	<i>3.5th Generation .</i>
3.75G	<i>3.75th Generation .</i>
3rd	Third
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project .</i>
3GPP Rel 15	<i>3rd Generation Partnership Project Release 15 .</i>
4G	<i>Fourth generation.</i>
5G	<i>Fifth generation.</i>
5GC	5G Core .
5G NR	5G New Radio .

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>

C

CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i>
-------------	---------------------------------------

D

DL *Downlink.*

DN *Data Network .*

E

EIRP Effective Isotropic Radiation Power.

eLTE *enhanced LTE.*

eMBB *enhanced Mobile Broadband.*

eNB *Evolved Node B.*

En-gNB *gNodeB end-to-end.*

EPC *Evolved Packet Core.*

E-UTRAN *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network .*

F

FDD *Frequency Division Duplex .*

FR1 *Frequency Range 1 .*

FR2 *Frequency Range 2 .*

G

gNB *Next Generation Node Base Station .*

gNB-CU *gNB - Central Unit .*

gNB-CU-CP *gNB - Central Unit - Control Plane .*

gNB-CU-UP *gNB - Central Unit - User Plane .*

gNB-DU *gNB - Distributed Unit .*

GPRS General Packet Radio Service .

GSM *Global System for Mobile communications .*

I

IMT-2020 *International Mobile Telecommunications-2020.*

IP *Internet Protocol.*

K

KPI *Key Performance Indicators.*

L

LTE *Long-Term Evolution.*

M

MAPL *Maximum Allowable PathLoss*

MHz *Mega Hertz .*

MIMO *Multiple-Input Multiple-Output .*

MME *Mobility Management Entity .*

mMTC *massive Machine Type Communication .*

mmWave *millimeter wave .*

MS *Mobile Station .*

N

NEF *Network Exposure Function .*

NG-RAN *Next Generation Radio Access Network .*

NMT *Narrowband Multi-channel Transceiver .*

NRF *Network Repository Function .*

NR-Uu *New Radio - Uu Interface .*

NSA *Non-Standalone Access .*

NSSF *Network Slice Selection Function .*

O

OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access.*

P

PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio.</i>
PCF	<i>Policy Control Function.</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel.</i>

Q

QOS	<i>Quality of Service.</i>
------------	----------------------------

R

RLB	<i>Radio Link Budget .</i>
RRH	<i>Remote Radio Head .</i>

S

SA	<i>Standalone Access .</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier- Frequency Division Multiple Access .</i>
SDL	<i>Supplementary Downlink .</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SS-RSRP	<i>Synchronization Signal Reference Signal Received Power</i>
SUL	<i>Supplementary Uplink</i>

T

TACS	<i>Total Access Communication System.</i>
TDD	<i>Time Division Duplex.</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access.</i>

U

UDM	<i>Unified Data Management.</i>
UE	<i>User Equipment.</i>
UL	<i>Uplink.</i>
UIT	<i>International Telecommunications Union.</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low Latency Communication.</i>
UPF	<i>User Plan Function.</i>

W

WiFi	<i>Wireless Fidelity .</i>
WIMAX	<i>Wideband Interoperability for Microwave Access.</i>

Introduction générale

Contexte

La cinquième génération de réseaux de communication représente bien plus qu'une simple évolution technologique. En réalité, elle constitue le fondement de la prochaine révolution numérique.

En offrant des vitesses de téléchargement ultra-rapides, une connectivité fiable et une latence minimale [1], la 5G ouvre la voie à une multitude d'innovations et de nouvelles opportunités dans divers secteurs tels que la santé, l'industrie, le transport et les villes intelligentes.

En s'appuyant sur des technologies avancées telles que le MIMO, le beamforming et les mm Wave pour améliorer les performances des réseaux, la 5G devient un élément essentiel de l'infrastructure technologique mondiale.

Grâce à ses capacités révolutionnaires, elle propulse notre monde vers un avenir plus connecté, intelligent et efficace [2].

Problématique

Les avancées dans les communications mobiles exigent une étude approfondie de la technologie 5G, y compris la planification du réseau d'accès sans fil.

Le défi consiste à installer et configurer de manière parfaite et fiable d'une station de base 5G NR, assurant ainsi l'amélioration de la couverture et de la capacité, en exploitant l'outil de planification sans fil spécialisé ATOLL, utilisé couramment par les opérateurs de téléphonie mobile.

Objectifs

L'objectif de cette étude est de planifier et de déployer un réseau de cinquième génération (5G) dans une zone de la wilaya de Tlemcen, tout en améliorant la couverture et en augmentant la capacité au maximum possible en utilisant l'outil ATOLL.

Ceci dans le but de mettre en avant les capacités de cette génération par rapport aux précédentes.

Organisation

Le mémoire est organisé autour en trois chapitres :

1. **Le premier chapitre** présente un aperçu sur les réseaux de téléphonie mobile, en étudiant les bases et les techniques fondamentales du système 5G.
2. **Le deuxième chapitre** est consacré aux différentes étapes de la planification de la technologie 5G.
3. **Le troisième chapitre** présentera la partie simulation en utilisant l'outil ATOLL pour les paramètres de couverture et de capacité dans une région spécifique.

Enfin, la conclusion générale et les perspectives de ce travail sont présentées, avec deux annexes liées aux différentes parties du document.

Chapitre 1

Concepts Fondamentaux de la 5G NR

1.1 Introduction

Le développement technologique et la croissance démographique observés dans le monde au fil des années mettent les réseaux de communication sous étude et en constante évolution pour suivre ces avancées et changements, surtout sur le plan technologique.

Ces réseaux ont connu depuis leur création jusqu'à présent cinq générations, de la première génération jusqu'à la cinquième génération actuelle, également appelée **5G**, qui est toujours en cours d'étude et de développement continu pour améliorer sa capacité et son efficacité.

Dans ce chapitre, nous commencerons par définir le concept de réseau de téléphonie mobile. Ensuite, nous passerons en revue les différentes générations de ces réseaux et leurs principales caractéristiques de manière concise.

Après cela, nous plongerons dans une étude approfondie du **réseau de cinquième génération**.

1.2 Qu'est-ce qu'un réseau de téléphonie mobile ?

Un réseau de téléphonie mobile est un système de télécommunications qui permet aux utilisateurs de communiquer à distance en utilisant des terminaux mobiles tels que les téléphones portables et les smartphones. Ce système utilise des antennes-relai pour établir des connexions sans fil entre les appareils mobiles et les réseaux de communication permettant aux utilisateurs de passer des appels, d'envoyer des messages texte et d'accéder à Internet.

Ces réseaux sont conçus pour offrir une connectivité continue et fiable, quel que soit l'endroit où se trouvent les utilisateurs [3].

1.3 Évolution des réseaux mobiles

Les réseaux de téléphonie mobile ont connu une évolution significative à travers différentes générations depuis l'avènement du téléphone portable. D'après la figure (FIG. 1.1) chaque génération a apporté des améliorations notables en termes de technologie, de capacités de transmission de données et de services offerts aux utilisateurs.

La première génération, lancée dans les années **1980**, reposait sur des technologies analogiques et se concentrait principalement sur les appels vocaux. Parmi les systèmes les plus remarquables de cette génération, on trouve **l'AMPS, le NMT et le TACS**.

Dans les années **1990**, la deuxième génération a vu le jour, introduisant des systèmes numériques comme le **GSM**, qui utilise les bandes de fréquence de **900 MHz et de 1800 MHz** en Europe, avec un débit maximal de **9,6 kbps**, offrant une qualité vocale améliorée et la possibilité d'envoyer des messages textuels. Ce système s'est ensuite développé en **GPRS et en EDGE**.

Le passage à la troisième génération dans les années **2000** a marqué une avancée majeure avec une bande de fréquence entre **1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz**, et des vitesses de transmission de données plus rapides allant jusqu'à **2 Mbps**, permettant un accès à l'internet mobile et à des services multimédias plus avancés. La 3G a évolué ensuite vers la **3,5G et la 3,75G**.

En **2010**, la technologie de quatrième génération est apparue avec de nouvelles améliorations, utilisant des bandes de fréquences de **800 MHz, 1 800 MHz et 2 600 MHz**, ce qui a permis de fournir des services de voix et de données à haut débit, de grande capacité et sécurisés par rapport aux technologies précédentes.

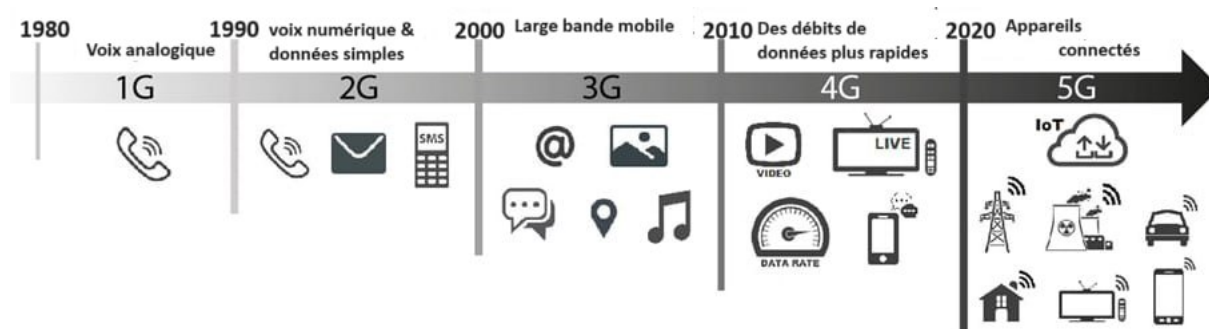


FIG. 1.1 : Évolution des réseaux mobiles [4].

En **2020**, la technologie de cinquième génération (**5G**) est apparue, apportant une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. Cette technologie sera le sujet principal de notre travail de fin d'étude "*Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau 5G NR*".

1.4 5ème génération (5G)

1.4.1 Présentation de la 5G

La **5G**, ou cinquième génération des normes de téléphonie mobile, est une technologie de communication sans fil qui offre des débits de données plus rapides, une latence réduite et une capacité accrue par rapport aux générations précédentes telles que la **4G LTE**.

Quant à la **5G NR (Nouvelle Radio)**, c'est la spécification technique définie par le **3rd Generation Partnership Project (3GPP)** pour la mise en œuvre de la **5G**. Elle inclut les technologies de modulation, les fréquences, les antennes et d'autres aspects techniques nécessaires pour déployer efficacement la **5G** [5].

1.4.2 Caractéristiques techniques

Le réseau **5G** vise à réaliser une avancée significative dans le domaine des communications sans fil à travers son système novateur, en se basant sur un ensemble de caractéristiques définies dans le projet **IMT-2020** [6].

Le tableau (TAB. 1.1) illustre les performances visées du réseau **5G** :

Paramètres	Valeurs
Débit maximum descendant	20 Gbit/s
Débit maximum ascendant	10 Gbit/s
Efficacité spectrale maximale dans le sens descendant	30 bit/s/Hz
Efficacité spectrale maximale dans le sens ascendant	15 bit/s/Hz
Trafic par unité de surface	10 Mbit/s/m ²
Temps de latence	1 – 4 ms
Densité de terminaux connectés	1 million/km ²
Largeur de bande	100 MHz– 1 GHz

TAB. 1.1 : Performances du réseau 5G ciblées par le projet IMT-2020 [7].

1.4.3 Défis de la 5G

Les objectifs du réseau **5G** ont été confrontés à un ensemble de défis, voici les plus remarquables :

- **Déploiement de l'infrastructure** : Le déploiement d'une infrastructure **5G** nécessite des investissements importants en termes de nouveaux équipements et d'infrastructures de réseau [8].
- **Gestion de la capacité du réseau** : La **5G** promet des débits de données beaucoup plus élevés, ce qui nécessite une gestion efficace de la capacité du réseau pour répondre à la demande croissante en bande passante [2].
- **Sécurité et confidentialité des données** : Avec une connectivité accrue et une plus grande quantité de données transitant par les réseaux **5G**, la sécurité et la confidentialité des données deviennent des préoccupations majeures [9].
- **Interférences et gestion du spectre** : L'exploitation efficace du spectre radioélectrique est essentielle pour éviter les interférences et garantir des performances optimales dans les réseaux **5G** [10].

1.4.4 Catégories d'usage 5G

Dans le contexte de la technologie **5G**, ces applications ont été caractérisées pour définir trois catégories de services (voir FIG. 1.2), chacun avec un ensemble unique d'exigences de performances : Le haut débit mobile amélioré (**eMBB**), la communication de masse de type machine (**mMTC**) et la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (**URLLC**).

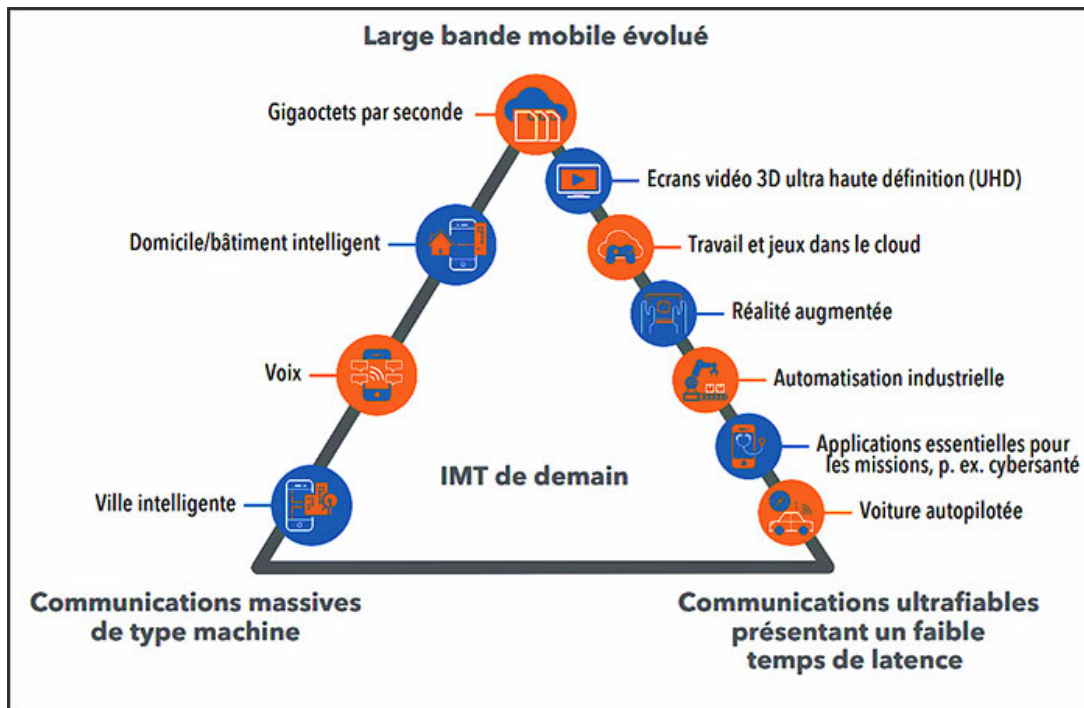


FIG. 1.2 : Cas d'utilisation de la 5G [11].

Les principales caractéristiques des domaines d'application sont détaillées dans les sections suivantes :

1. Haut débit mobile amélioré (eMBB)

L'eMBB est la première catégorie 5G à apporter les avantages de la 5G au grand public. Il offre un accès Internet de haute qualité, même dans des conditions environnementales difficiles. Il garantit une gamme gigabit de vitesses de haut débit mobile et une bande passante de données plus élevée [12].

2. Communications massives de type machine (mMTC)

Le mMTC se réfère à des services où un grand nombre de capteurs et d'actionneurs sont utilisés pour contrôler un environnement via une communication simple, évolutive et économe en énergie, permettant de prendre en charge un grand nombre d'appareils dans des domaines spécifiques, leur aptitude à opérer sur des batteries pendant des durées prolongées [13].

3. Communications ultra-fiabiles à très faible latence (URLLC)

L'URLLC représente une caractéristique fondamentale des réseaux **5G** élaborée pour satisfaire aux exigences rigoureuses des applications critiques telles que la conduite autonome, la chirurgie à distance et l'automatisation industrielle.

Elle assure une communication ultra-fiable et à faible latence en réduisant au maximum le délai entre la transmission et la réception des données. Cette fonctionnalité revêt une importance cruciale pour les applications nécessitant une réactivité en temps réel et une fiabilité maximale [14].

1.4.5 Indicateurs clés de performance (KPI)

Pour implémenter ces trois types d'utilisations, l'UIT a établi huit indicateurs clés de performance (**KPI** - Key Performance Indicators) afin de spécifier, quantifier et mesurer les caractéristiques des systèmes **IMT-2020 (5G)** [15] :

- Débit de données maximal (**Gbit/s**).
- Débit moyen perçu par l'utilisateur (**Mbit/s**).
- Mobilité (**km/h**).
- Latence (**ms**).
- Densité de raccordement (**quantité d'objets/km²**).
- Efficacité énergétique des réseaux (**bit/joule**).
- Efficacité du spectre (**bit/s/Hz/cellule**).
- Capacité de trafic d'une zone (**Mbit/s/m²**) [16].

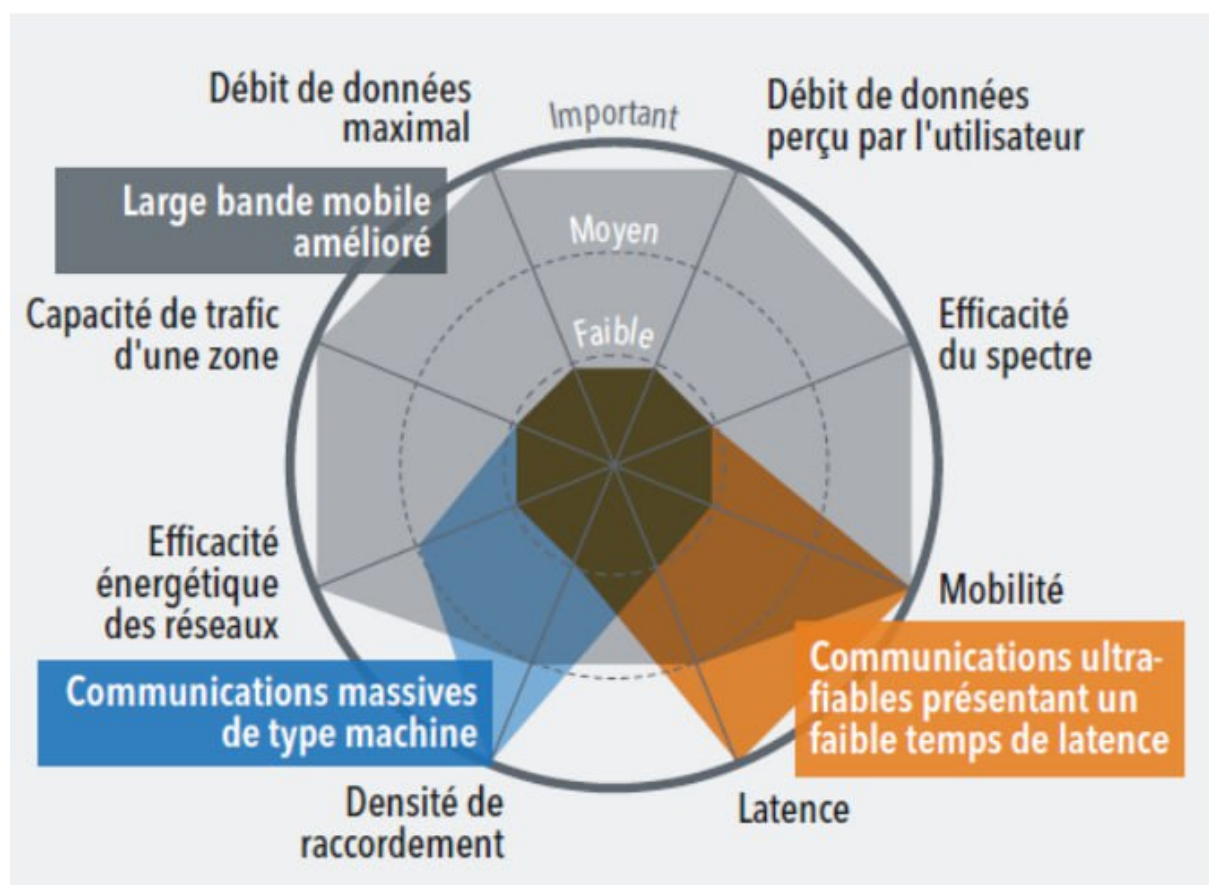


FIG. 1.3 : Etoile des 8 KPI susmentionnés pour les trois catégories d'usage de la 5G [17].

La Figure (FIG. 1.3) représente l'étoile des 8 **KPI** susmentionnés pour les trois catégories d'usage de la **5G** pour les trois cas d'utilisation de la **5G**.

1.4.6 Étude technique du réseau 5G

1.4.6.1 Architecture de réseau 5G

Un réseau **5G** se compose d'un réseau d'accès radio (**NG-RAN**), du cœur de réseau (**5GC**), et de l'équipement utilisateur (**UE**), comme illustré dans la Figure (voir FIG. 1.4) :

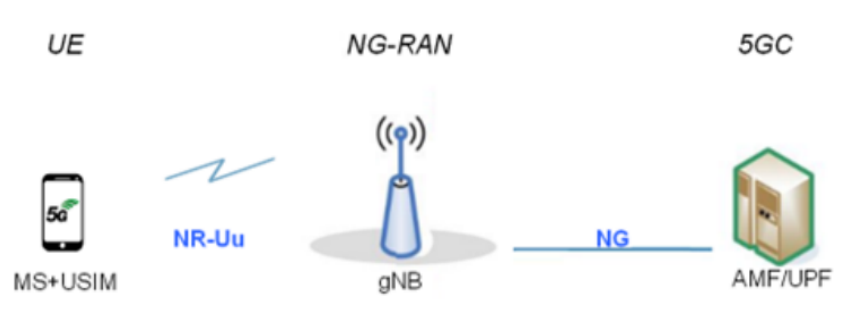


FIG. 1.4 : Architecture de réseau 5G [18].

1. Équipement utilisateur

L'équipement utilisateur (**UE**) établit sa connexion avec le réseau d'accès radio via une carte SIM. Cette carte, insérée dans l'appareil, joue un rôle crucial en identifiant et en authentifiant l'utilisateur auprès du réseau mobile. Une fois la connexion établie, l'UE peut accéder aux services fournis par le cœur de réseau, qui comprend des serveurs et des équipements réseau. Ces éléments sont chargés de gérer les appels, les messages et les données mobiles.

2. Réseau d'accès radio NG-RAN

Comme illustré dans la figure (FIG. 1.5), le NG-RAN est un regroupement de stations de base **5G**, nommées gNB, où "g" signifie "5G" et "NB" fait référence à "Node B".

Ces gNB sont connectées au **5GC** via un ensemble d'interfaces logiques. Les gNB peuvent être interconnectées via l'interface Xn pour améliorer les fonctionnalités de mobilité (handover) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires) [19].

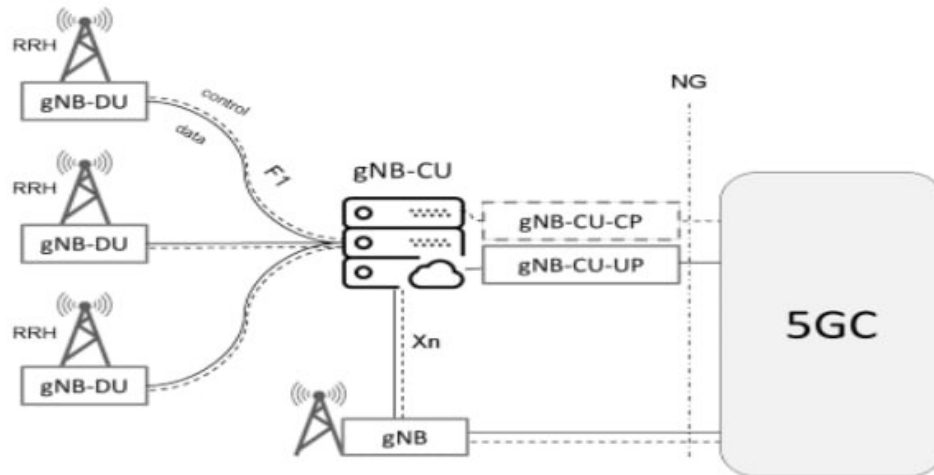


FIG. 1.5 : Architecture de NG-RAN [20].

L'architecture de la gNB est organisée en fonctionnalités. Elle est constituée d'une unité centrale (**gNB-CU**, central unit) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (**gNB-DU**, distributed units) connectées à une carte radio distante (**RRH**, remote radio head).

L'unité centrale (**gNB-CU**) est elle-même divisée en deux parties : l'une pour les fonctions de plan de contrôle (**gNB-CU-CP**, control plane functions) et l'autre pour les fonctions de plan utilisateur (**gNB-CU-UP**, user plane functions) [21].

3. 5G Core Network (5GC)

Le "réseau cœur **5G**" constitue le pivot central de l'infrastructure de communication employée pour les réseaux **5G** [22]. Il joue un rôle crucial dans l'assurance d'un fonctionnement optimal de la technologie **5G**, en prenant en charge des fonctions essentielles telles que la gestion des données, le maintien de la qualité de service, la commutation de trafic, ainsi que d'autres fonctions critiques.

La figure (FIG. 1.6) présente l'architecture d'un réseau **5GC** :

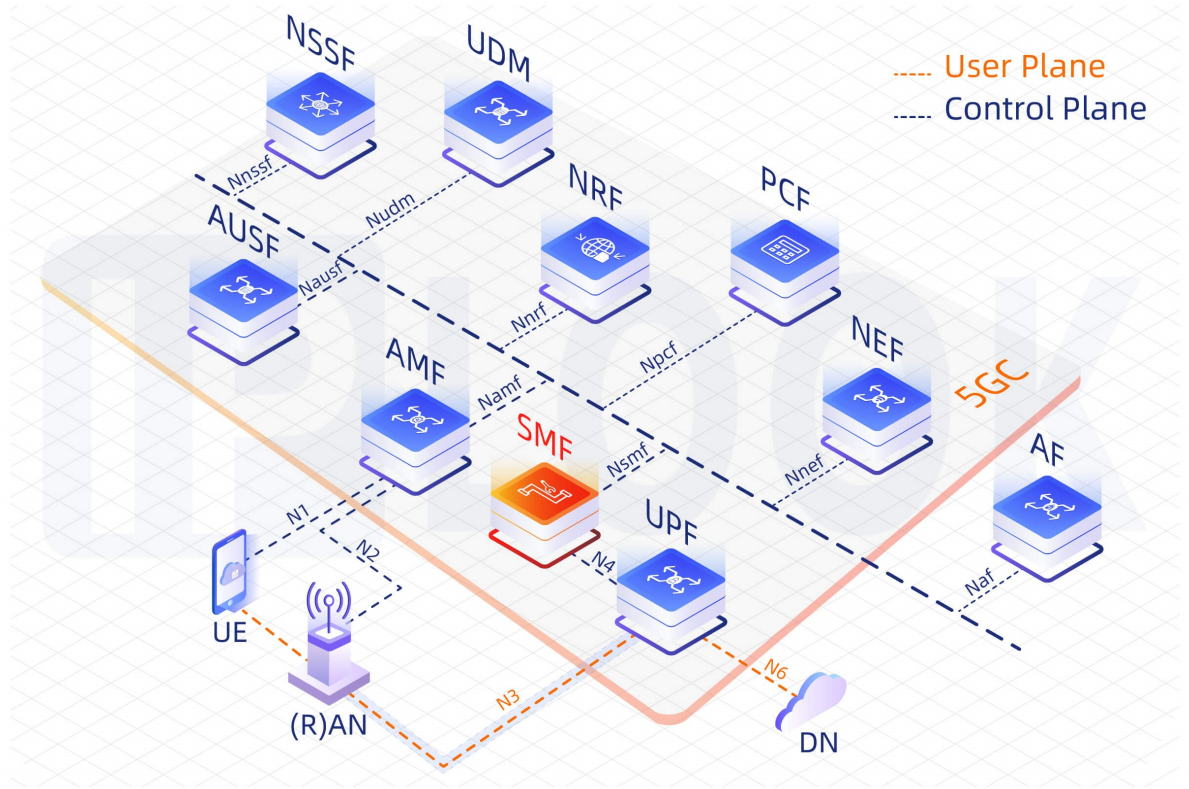


FIG. 1.6 : Architecture du cœur 5GC [23].

L'**AMF** établit une connexion NAS avec le mobile UE et a pour fonction l'enregistrement (attachement) des mobiles UE et l'administration de leur emplacement sur le réseau [24].

De plus, l'**AMF** intègre une section des fonctions du **MME** de la **4G**. L'**UPF** assure la gestion des fonctionnalités en relation avec les données utilisateur, incluant le routage des paquets, la qualité de service (QoS), et le suivi du trafic utilisateur.

AMF et **UPF** sont les fonctions du réseau central qui interagissent avec le réseau d'accès [25].

Les autres fonctions du réseau cœur sont définies dans le tableau (TAB. 1.2) :

/	Nom	Définition
DN	Data Network	Administre l'interaction avec les réseaux de données extérieurs.
SMF	Session Management Function	Administration des sessions, attribution des adresses IP des équipements utilisateurs (UE).
AUSF	Authentication Server Function	Administration de l'authentification.
NSSF	Network Slice Selection Function	Sélection et administration de la fonction de découpage de réseau.
UDM	Unified Data Management	Fonctionnalités de séparation entre traitement et stockage, stockage de données.
NRF	Network Repository Function	Il offre un soutien pour la gestion des services liés aux fonctions réseau telles que l'enregistrement, la découverte et l'autorisation.
PCF	Policy Control Function	Il offre un cadre uniforme pour le contrôle du comportement du réseau.
NEF	Network Exposure Function	Il présente l'accès externe aux capacités des fonctions réseaux, incluant la supervision, la surveillance, et d'autres fonctions similaires.
AF	Application Function	Fonction précisée et déployée par l'opérateur pour des services particuliers.

TAB. 1.2 : Description des composants du cœur [25].

1.4.7 Bande de fréquence

L'amélioration de la couverture et la garantie de répondre à tous les cas d'utilisation figurent parmi les objectifs principaux de la cinquième génération de réseaux (**5G**). Pour cela, cette technologie peut nécessiter l'utilisation de trois fréquences réparties dans trois plages différentes : **basse**, **moyenne** et **élevée**.

Les fréquences sont divisées en fonction de ces plages comme suit :

- Fréquences **basses** : qui sont celles inférieures à **1 GHz**, sont utilisées pour couvrir de vastes zones, offrant ainsi une bande passante maximale de **100 MHz** par utilisateur.
- Fréquences **moyennes** : qui vont de **1 GHz** à **6 GHz**, sont utilisées dans les zones urbaines et péri-urbaines, avec une largeur de bande pouvant atteindre **100 MHz** par utilisateur.
- Fréquences millimétriques ou **élevées** : situées au-dessus de **24 GHz**, sont utilisées dans les grandes villes caractérisées par une densité urbaine élevée.



FIG. 1.7 : Bande de fréquences [26].

À partir de cela, on peut déduire que la technologie **5G** (FIG. 1.7) se distingue par :

- **FR1** : qui comprend les fréquences inférieures à **6 GHz**, également connues sous le nom de **sub-6**.
- **FR2** : qui comprend les fréquences entre **24** et **100 GHz** et est appelée la bande millimétrique [26].

1.5 Caractéristiques de la couche physique

1.5.1 Accès multiple

La modulation de la 5^{ème} génération est basée essentiellement sur l'utilisation de la technologie **OFDMA** dans la liaison descendante et le **SC-FDMA** dans la liaison montante, facilitant ainsi l'accès simultané de plusieurs utilisateurs au réseau sans fil [27].

1. **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) : est une technologie de modulation clé utilisée dans la norme de communication sans fil **5G** [28].

Principalement utilisée dans la liaison descendante, elle permet de partager efficacement la bande passante entre plusieurs utilisateurs en utilisant des sous-porteuses orthogonales (voir FIG. 1.8).

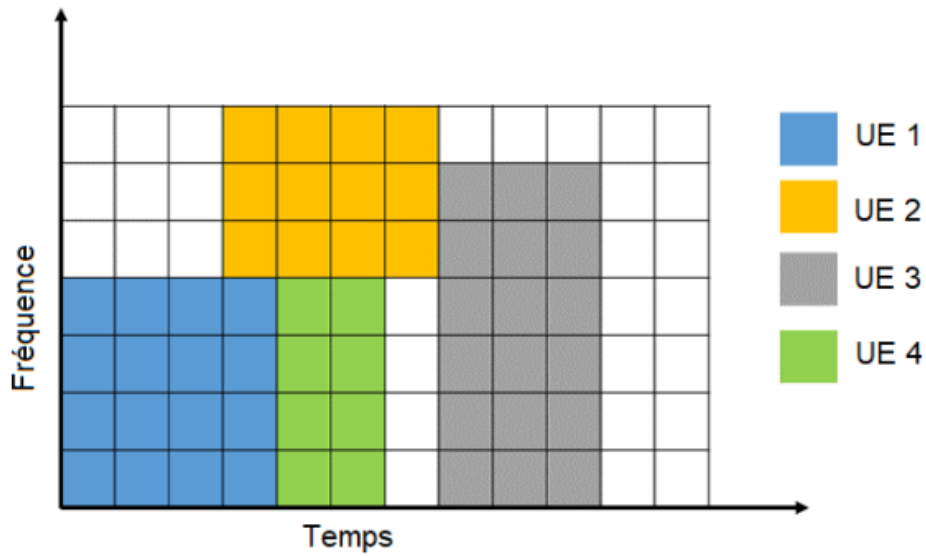


FIG. 1.8 : Allocation de sous-porteuses en OFDMA [29].

Cela améliore l'utilisation de la bande passante tout en réduisant les interférences et en améliorant les performances et la capacité des réseaux **5G**.

2. **SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)** : est une technique de modulation utilisée dans les réseaux de communication sans fil, notamment dans la norme **5G**, pour transmettre les données des appareils mobiles vers la station de base [28].

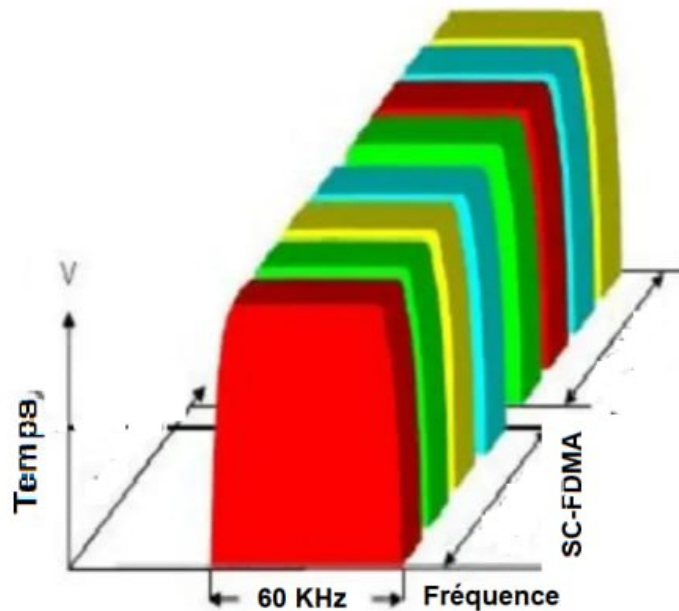


FIG. 1.9 : Allocation de sous-porteuses en SC-FDMA [29].

Contrairement à l'**OFDMA**, qui répartit les données sur plusieurs sous-porteuses (FIG. 1.9), le **SC-FDMA** étale les données sur une seule porteuse, principalement dans la liaison montante.

Cette méthode réduit le rapport **PAPR** (le rapport entre la puissance crête et la puissance moyenne est une valeur sans dimension exprimée en dB), améliore l'efficacité énergétique [29].

1.5.2 Numérologie

La numérologie dans la norme **5G** se réfère à la largeur de bande attribuée à une sous-porteuse, ou à l'intervalle entre deux sous-porteuses successives dans l'espace des fréquences. Contrairement au **LTE** qui utilise un seul type d'espacement de sous-porteuses (**15 kHz**), la **5G** offre une variété de types d'espacement de sous-porteuses, tels que **15, 30, 60, 120 et 240 kHz** [30].

Chaque type de numérologie est associé à une durée de symbole et à un préfixe cyclique différent. Par exemple, la numérologie **0** ($N=0$) correspond à un espacement de sous-porteuses de **15 kHz**, similaire à celui utilisé dans le **LTE** [30]. Les différents types de numérologie **NR** sont résumés avec leur espacement de sous-porteuses (f), leur durée de symbole et leur préfixe.

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. 1.3 : Numérologies de transmission prises en charge [31].

Pour les basses fréquences, des valeurs faibles de f (**15 kHz, 30 kHz et 60 kHz**) sont préférables, car elles permettent l'utilisation de préfixes cycliques plus longs, ce qui aide à contrer la propagation des retards des cellules plus grandes. En revanche, pour les hautes fréquences, l'utilisation de valeurs élevées de f (**60 kHz, 120 kHz et 240 kHz**) est avantageuse pour réduire les erreurs de fréquence et le bruit de phase. En général, la propagation des retards n'est pas un problème, car les fréquences plus élevées sont utilisées dans des cellules plus petite [31].

1.5.2.1 Structure de trame temporelle

Dans le cadre temporel, les transmissions de la couche physique sont organisées en trames radio. Chaque trame radio, d'une durée de **10 ms**, est divisée en **10 sous-trames**, chacune d'une durée de **1 ms**.

Chaque sous-trame est composée d'un ou plusieurs créneaux, chaque créneau comporte **14 symboles**.

Cette structure de trame simplifie le contrôle des transmissions et garantit une organisation optimale des données échangées [32].

Les différents intervalles entre les sous-porteuses (Δf), la durée des slots et le nombre de slots par sous-trame sont définis dans le tableau (TAB. 1.4) :

Espacement sous-porteur (Δf)	Durée du slot	Nombre de slot par sous-trame
15 kHz	1 ms	1
30 kHz	0,5 ms	2
60 kHz	0,25 ms	4
120 kHz	0,125 ms	8
240 kHz	0,0625 ms	16

TAB. 1.4 : Caractéristiques de la numérologie en 5G [32].

Un schéma représentant la corrélation temporelle entre les trames, les sous-trames et les intervalles de temps sont présentés dans la Figure (FIG. 1.10).

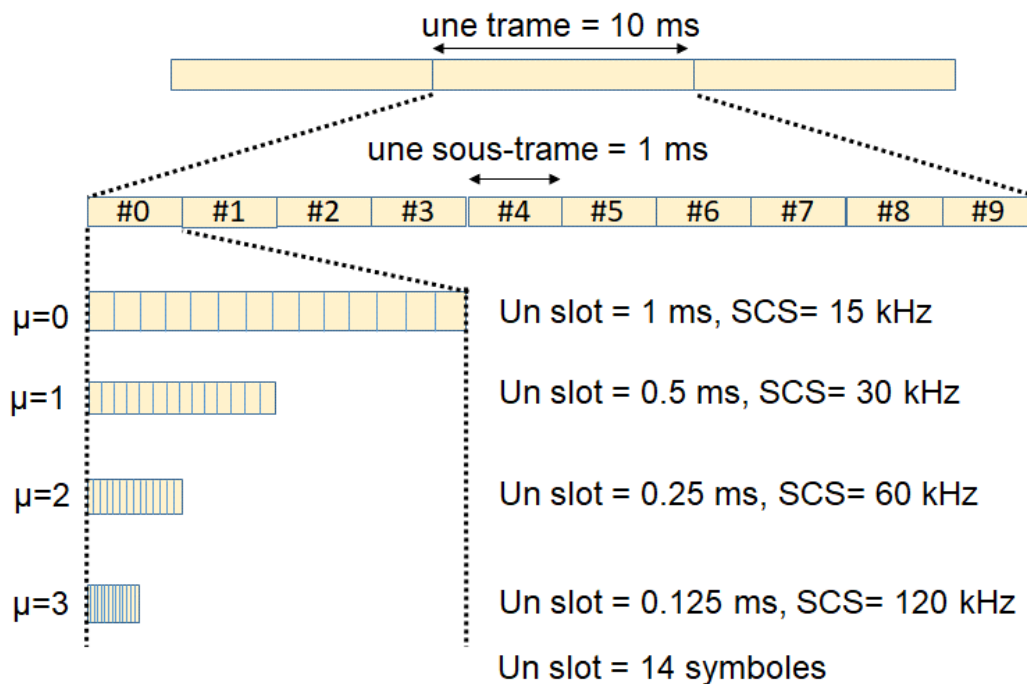


FIG. 1.10 : Structure temporelle dans les trames 5G NR [32].

Cette illustration schématique est précieuse pour comprendre la structure temporelle de la **5G** et pour visualiser la manière dont les données sont organisées et transmises dans le domaine temporel.

1.5.2.2 Structure de trame fréquentielle

La technologie **5G NR** est conçue pour opérer dans plusieurs gammes de fréquences, qui peuvent être subdivisées en deux gammes de fréquences principales (**FR1** et **FR2**).

La gamme de fréquences initiale (**FR1**) englobe les bandes de fréquences qui sont en dessous de **6 GHz** et la seconde (**FR2**) commence à **24 GHz** et se termine à **100 GHz**.

Ces bandes NR ainsi que leurs plages de fréquences respectives et leur mode duplex pour les liaisons montantes et descendantes sont listées dans les tableaux suivants (voir TAB. 1.5, TAB. 1.6) :

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. 1.5 : Bandes d'exploitation pour NR dans FR1 [8].

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. 1.6 : Bandes d'exploitation pour NR dans FR2 [8].

Les spécifications de la **3GPP** pour **NR** comprennent un total de **50** bandes de fréquences, avec **45** bandes dans la plage de FR1 et **5** bandes dans la plage de FR2. Les bandes de fréquences dans lesquelles **NR** fonctionne se situent à la fois dans des spectres appariés et non appariés, ce qui nécessite une certaine flexibilité dans l'aménagement duplex. C'est pourquoi **NR** prend en charge à la fois les modes FDD et TDD. En outre, certaines plages sont également désignées pour **SDL** ou **SUL**, déterminant ainsi la manière dont les données sont envoyées sur les liaisons descendantes et montantes.

1.5.3 Techniques utilisées

Les réseaux de la cinquième génération reposent sur plusieurs techniques afin d'offrir des performances améliorées par rapport aux générations précédentes des réseaux sans fil. Voici les principales de ces techniques (FIG. 1.11) :



FIG. 1.11 : Technique utilisée dans 5G NR [33].

1.5.3.1 Ondes millimétriques (mmWave)

Les fréquences **mmWave** sont utilisées dans la technologie **5G** pour offrir des vitesses de données élevées et une faible latence. Elles se situent généralement entre **24** et **100 GHz**, ce qui permet un débit plus élevé que les bandes de fréquences inférieures utilisées dans les générations précédentes de réseaux mobiles.

Cependant, les ondes **mmWave** ont une portée plus courte et sont plus facilement atténuées par les obstacles physiques, ce qui nécessite des infrastructures de réseau plus denses pour une couverture efficace [28].

1.5.3.2 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Le **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*) est une technologie utilisée dans les réseaux de communication sans fil, y compris la **5G**, pour améliorer les performances du réseau en augmentant la capacité et la fiabilité des transmissions (FIG. 1.12).

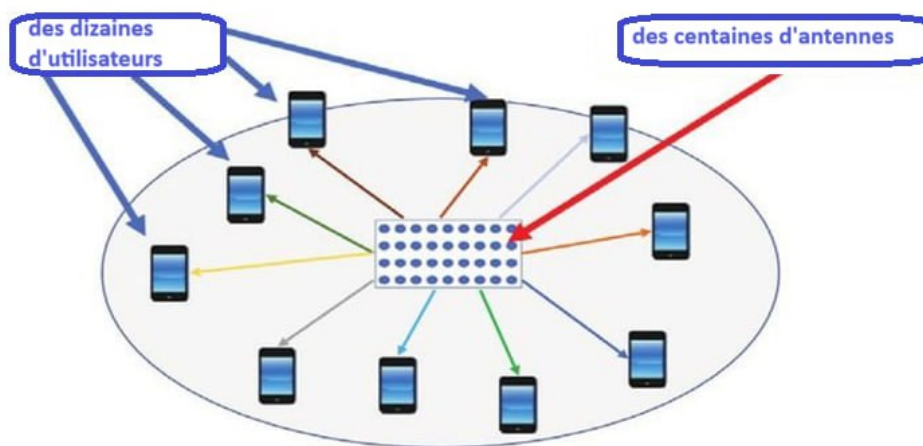


FIG. 1.12 : Technique utilisée dans 5G NR [34].

Il permet d'envoyer et de recevoir plusieurs flux de données simultanément sur le même canal radio en utilisant plusieurs antennes à la fois du côté de l'émetteur et du récepteur [36].

1.5.3.3 Beamforming

Le **beamforming**, également appelé formation de faisceau, est une technique utilisée dans les réseaux de communication sans fil, y compris la **5G**, pour optimiser la transmission des signaux en concentrant la puissance dans une direction spécifique.

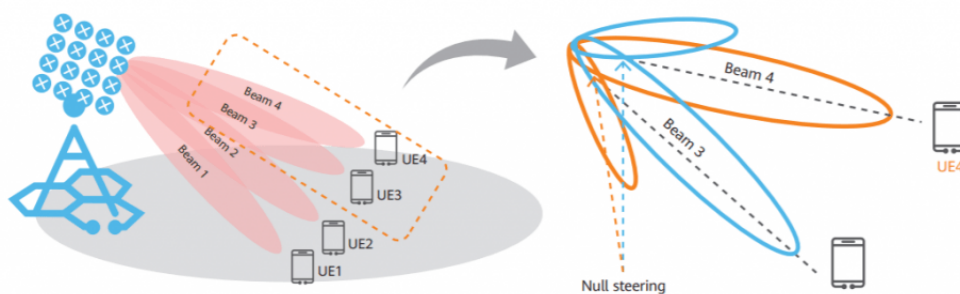


FIG. 1.13 : Beamforming [36].

La Figure (voir FIG. 1.13) présente le système de **beamforming**. Cette technologie améliore la qualité du signal, réduit les interférences et augmente la portée des communications [37].

1.5.3.4 Petites cellules

Les **Petites Cellules** sont des éléments essentiels des réseaux **5G**, car ils permettent d'améliorer la couverture et la capacité du réseau, en particulier dans les zones à forte densité de trafic comme les zones urbaines denses.

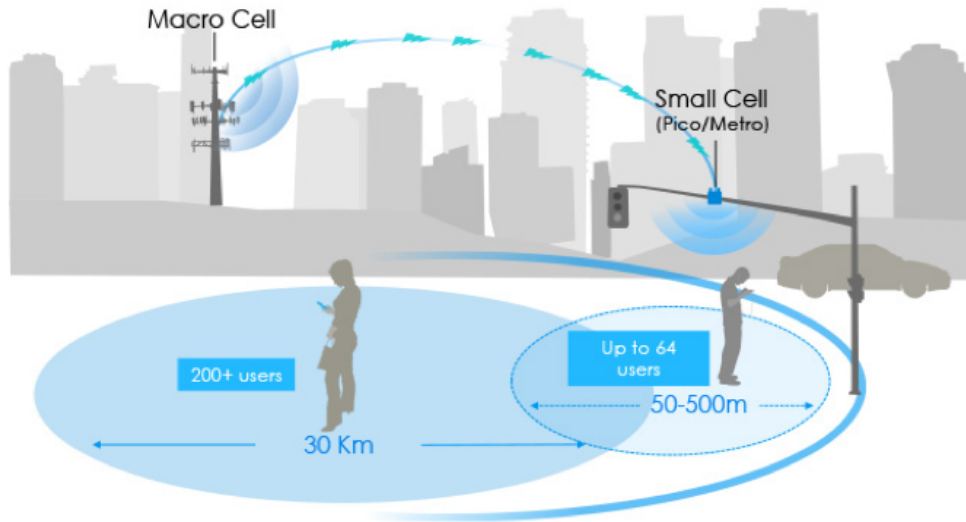


FIG. 1.14 : Petite cellule [38].

Contrairement aux grandes tours cellulaires, les **Small Cells** sont de petite taille (FIG. 1.14) et peuvent être installées dans des endroits plus proches des utilisateurs finaux, ce qui permet une meilleure connectivité et une expérience utilisateur améliorée [39].

1.5.3.5 Full Duplex

Dans la **5G**, le **Full Duplex** est une avancée technologique qui permet à un terminal de transmettre et de recevoir des données simultanément sur la même fréquence radio (FIG. 1.15).

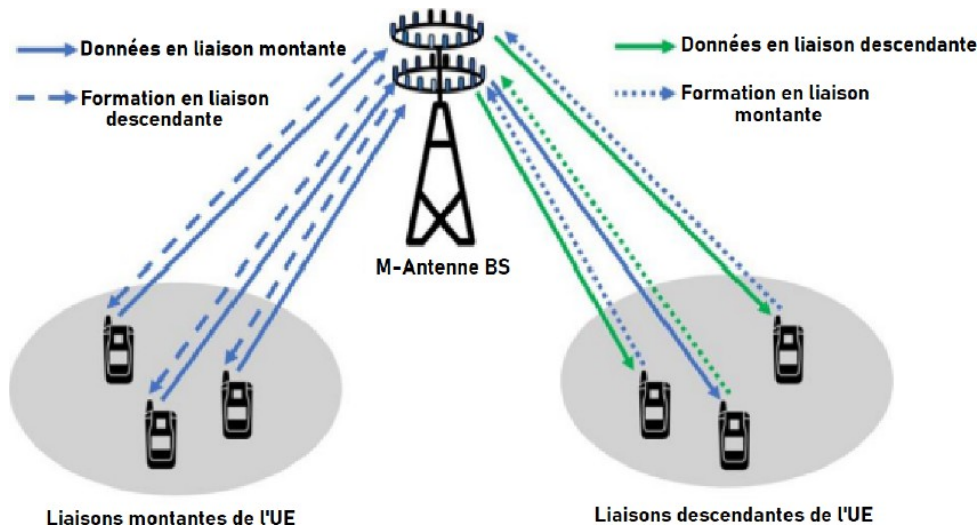


FIG. 1.15 : Technologie Full Duplex [40].

Cela signifie qu'un appareil peut envoyer et recevoir des informations en même temps, améliorant ainsi l'efficacité du spectre radioélectrique et augmentant la capacité du réseau.

Cette technologie réduit également les délais de transmission et améliore les performances globales des communications sans fil [41].

1.6 Avantages

L'importance et les avantages techniques de la 5G peuvent être résumés en trois principales caractéristiques [42] :

1. **Débit** : La technologie 5G permet d'atteindre des vitesses de connexion à Internet bien plus rapides que celles disponibles avec la 4G. En effet, le débit de données de la 5G peut-être jusqu'à **10** fois supérieur à celui de la **4G**. On estime que la 5G peut atteindre des débits allant jusqu'à **1 Gb/s** en réception et **300 Mb/s** en émission, mais il convient de noter que ces vitesses sont théoriques.
2. **Latence** : Un autre avantage majeur de la 5G réside dans sa faible latence. La latence, qui correspond au délai entre le moment où une commande est passée et son affichage à l'écran, serait réduite de **10 à 1 ms** avec la **5G**. Cette réactivité est essentielle pour de nombreuses applications de la **5G**, où des échanges rapides et constants sont nécessaires pour introduire de nouvelles utilisations.
3. **Densité** : La densité représente le dernier engagement majeur de la **5G**. L'ultra-connectivité permet une plus grande densité d'appareils connectés par kilomètre carré. Au minimum, la **5G** pourra supporter un million d'appareils par kilomètre carré, ce qui signifie une multiplication par **10** de la densité de connexion [7].

1.7 Conclusion

La technologie **5G** représente une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil, offrant des vitesses de transmission ultra-rapides, une latence extrêmement faible et une capacité considérable à connecter simultanément un grand nombre d'appareils. L'étude technique de cette génération met en lumière l'importance capitale de l'architecture réseau et de la couche physique. L'architecture intelligente permet une gestion efficace des ressources et du trafic, tandis que la couche physique garantit une transmission de données rapide et fiable grâce à des techniques de pointe telles que la modulation d'ondes millimétriques. Ces avancées ouvrent de vastes horizons d'innovation et de transformation dans divers secteurs, allant de la santé à l'industrie, et promettent d'améliorer considérablement l'expérience utilisateur à l'échelle mondiale.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les étapes de la planification suivies d'une phase d'optimisation afin d'obtenir une couverture et une capacité excellentes.

Chapitre 2

Dimensionnement et planification de réseaux 5G NR

2.1 Introduction

L'optimisation de la couverture et de la capacité du réseau **5G NR** est un élément crucial pour garantir des performances optimales dans les déploiements de réseaux de nouvelle génération.

Dans ce chapitre, nous explorerons les stratégies de dimensionnement et de planification qui permettent de maximiser l'efficacité spectrale, d'améliorer la qualité de service et de répondre aux besoins croissants en connectivité.

En analysant les techniques d'optimisation de la couverture et de la capacité, nous visons à fournir des recommandations pratiques pour concevoir et déployer des réseaux **5G NR** performants et robustes.

2.2 Déploiement

Contrairement aux précédentes itérations des réseaux mobiles, le déploiement de la **5G** ne nécessite pas une synchronisation immédiate entre le cœur de réseau **5GC** et le réseau d'accès radio **NG-RAN**. Ce réseau se caractérise par deux modes de déploiement distincts, à savoir :

2.2.1 Non-autonome (NSA)

La **5G NSA** consiste à utiliser le réseau central 4G LTE de l'opérateur tout en ajoutant graduellement des antennes **5G**, ce qui facilite l'utilisation des fréquences élevées en **5G NR**. L'architecture **5G NSA** représente la première itération du mode **SA 5G NR** et constitue une phase importante dans le déploiement du réseau, en soutenant les réseaux via l'infrastructure existante de la **LTE** [43].

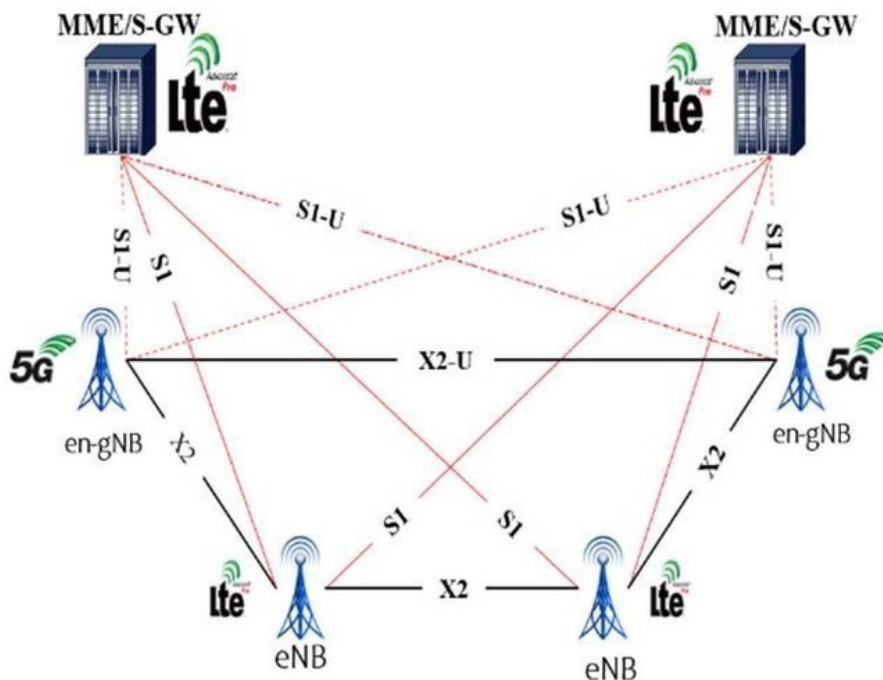


FIG. 2.1 : Architecture NSA pour système 5G [44].

Dans ce mode, la station de base **5G NR** (gNB) établit une connexion avec la station de base LTE (eNB) via l'interface **X2**, comme illustré dans la figure (FIG. 2.1).

2.2.2 Autonome (SA)

La **5G SA** représente l'optimum du déploiement de la **5G**, où les appareils peuvent profiter des technologies **5G** sur une large gamme de fréquences, sans dépendre de la **4G LTE**, grâce à un cœur de réseau entièrement migré vers la **5G NR**.

Cette transition nécessite des investissements considérables et sera réalisable uniquement à long terme [45].

L'architecture autonome (SA) (FIG. 2.2) de la **5G** exclut toute composante de la **4G**.

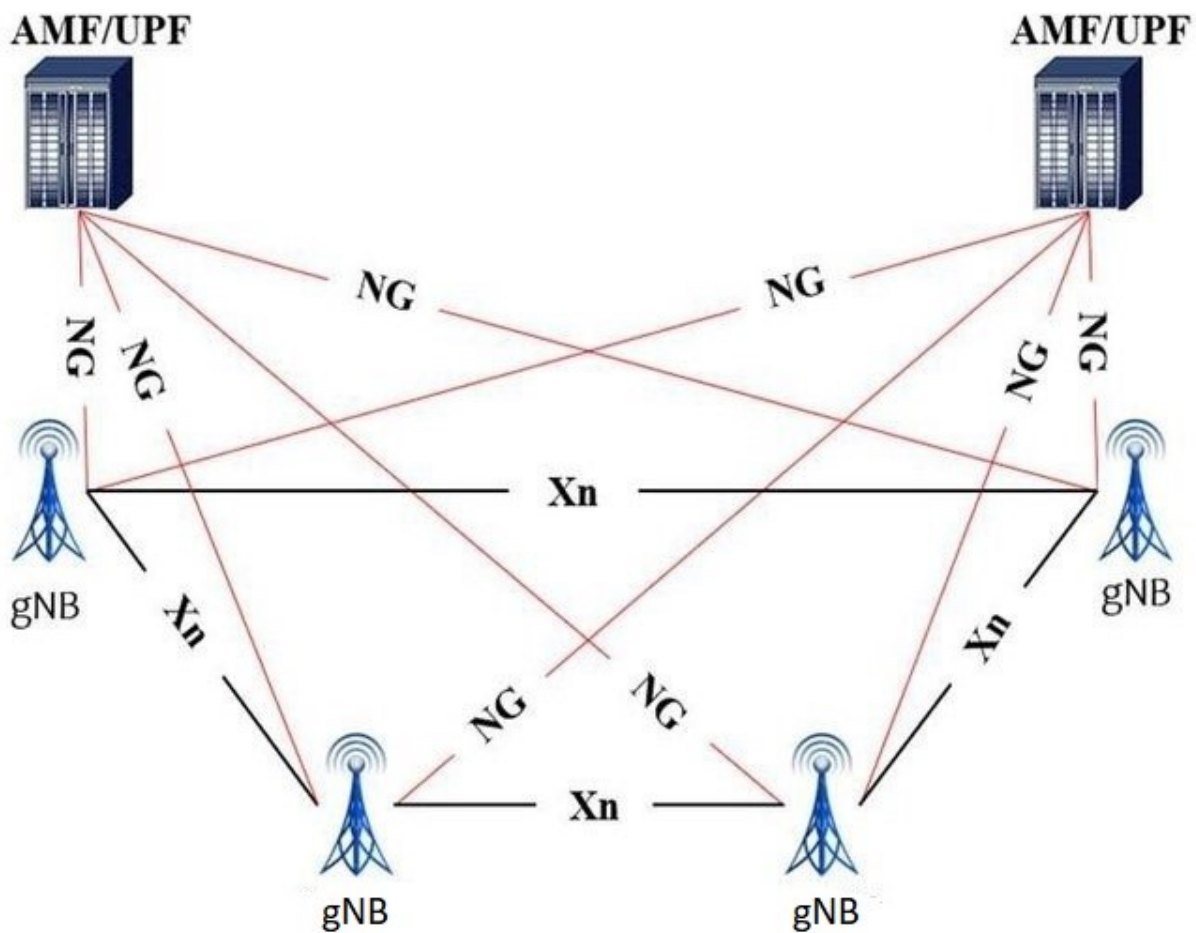


FIG. 2.2 : Architecture SA pour système 5G [46].

Dans ce contexte, Les stations de base **5G NR** (gNB) sont connectées entre elles via l'interface Xn, tandis que ce dernier est relié au cœur de réseau 5G (5GC) via l'interface NG [47].

2.2.3 Option de déploiement

Les catégories **SA** et **NSA** offrent diverses options de configuration et de déploiement (FIG. 2.3), que nous examinerons dans les options à venir.

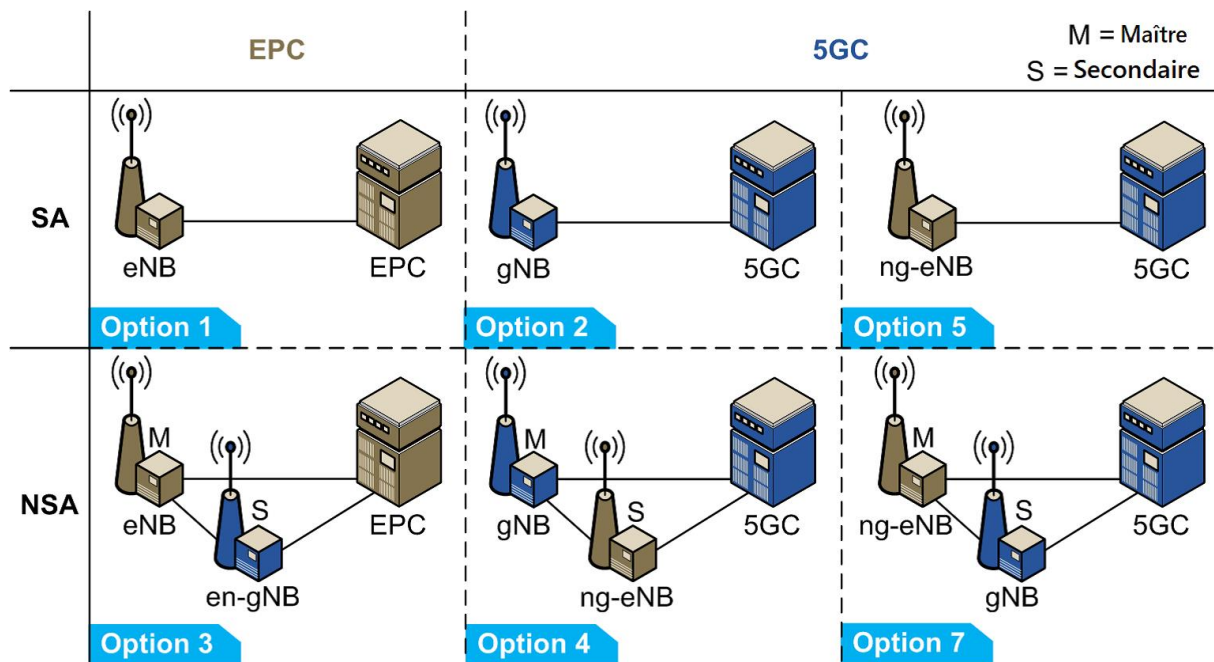


FIG. 2.3 : options de déploiement de la NSA et SA [48].

1. **Option 1** : qui est, un **déploiement autonome (SA)**, correspond aux configurations actuelles de la **4G (LTE+EPC)** (voir FIG. 2.4).

Il s'agit essentiellement de la méthode traditionnelle de déploiement de la technologie **LTE** associée à l'**EPC**, sans aucune intégration avec la 5G.

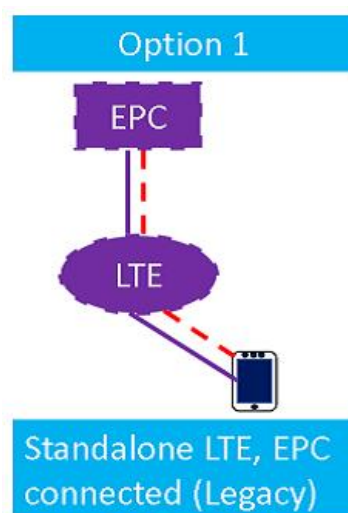


FIG. 2.4 : Option 1 de déploiement SA 5G[42].

Actuellement, la plupart des opérateurs à travers le monde déploient leurs réseaux selon ce mode.

2. **Option 2** : C'est effectivement une option SA qui nécessite l'utilisation d'un gNB et d'un réseau central 5GC (FIG. 2.5) [28].



FIG. 2.5 : Option 2 de déploiement SA 5G [42]

De plus, tous les équipements utilisateurs (**UE**) doivent être compatibles avec la **5G** pour profiter pleinement des fonctionnalités offertes par cette technologie [28].

3. **Option 3** : Cette option est subdivisée en trois tâches distinctes (options) : 3, 3a et 3x (FIG. 2.6) :

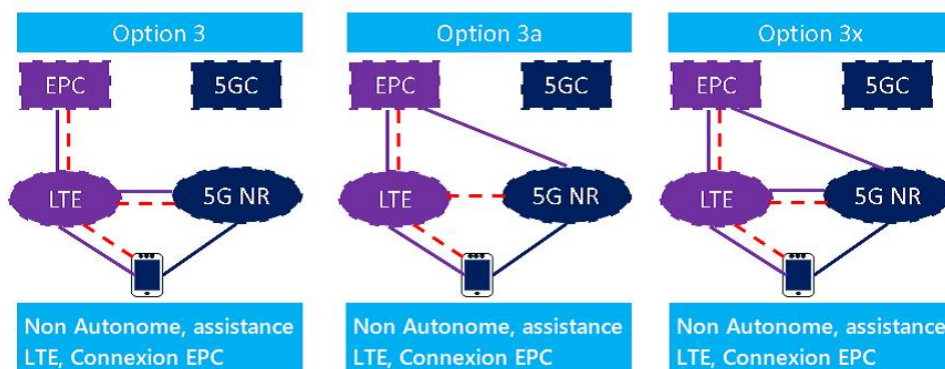


FIG. 2.6 : Option 3 de déploiement SA 5G [42].

- L'option 3 : exploite le réseau RAN LTE pour transférer les données utilisateur vers la **5G**.
 - l'option 3a : les données sont transmises directement de l'EPC à la **5G**.
 - l'option 3x : une combinaison est réalisée où une partie des données utilisateur est transférée directement de l'EPC à la **5G**, tandis qu'une autre partie est acheminée via le RAN LTE [28].
4. **Option 4** : Offre une alternative pour le déploiement en mode **NSA**, où les technologies d'accès radio LTE et **5G** sont implémentées ensemble (voir FIG. 2.7) et contrôlées via le **5GC** [28].

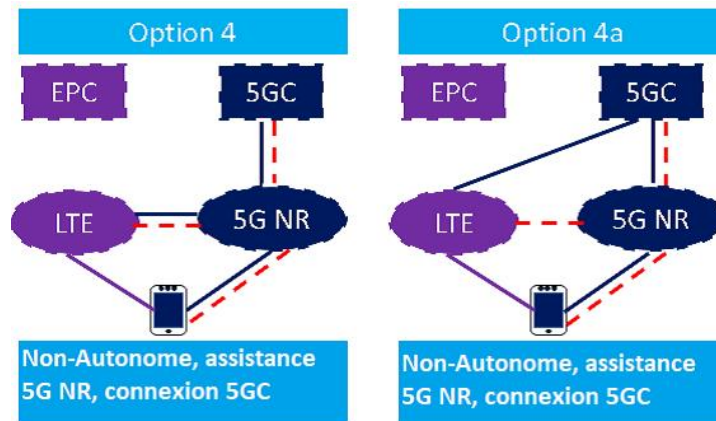


FIG. 2.7 : option 4 de déploiement NSA 5G [42].

Dans cette option de déploiement, la signalisation de contrôle du **LTE RAN** est acheminée vers le **5GC** via le réseau **5G**. La différence principale entre l'option 4 et 4a réside dans le cheminement des connexions de plan utilisateur LTE :

Dans l'option 4, elles passent par le **5G**, tandis que dans l'option 4a, le trafic de plan utilisateur est directement dirigé du **5GC** vers le LTE RAN.

5. **Option 5 :** Dans ce scénario de déploiement en mode **SA**, un réseau d'accès radio LTE autonome est connecté au **5GC** (FIG. 2.8). Dans cette configuration, le LTE doit être un réseau d'accès radio LTE évolué (eLTE) intégrant la nouvelle signalisation **5GC** [28].

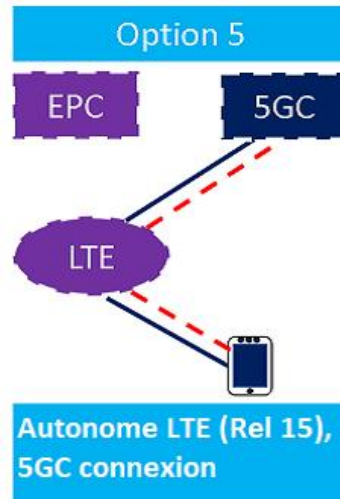


FIG. 2.8 : option 5 de déploiement SA 5G [42].

Il est peu probable qu'un opérateur de réseau adopte cette option, car la plupart des avantages de la **5G** découlent de la transition vers un réseau d'accès **5G** complet.

6. **Option 6 :** a été exclue des options proposées (FIG. 2.3) et n'est pas mentionnée dans la spécification 3GPP Rel 15. Ainsi, les appareils **5G** ne sont pas compatibles avec cette configuration de déploiement [28].

7. **Option 7** : Les options 7, 7a et 7x représentent des déploiements **NSA** de la **5G** (FIG. 2.9), exploitant le nouveau cœur de réseau (**5GC**) avec une combinaison de radios LTE et 5G [28].

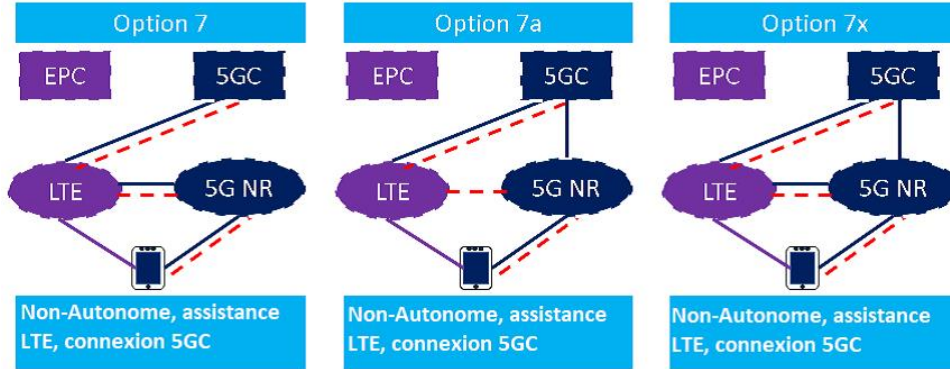


FIG. 2.9 : option 7 de déploiement NSA 5G [42].

Leur distinction réside dans la méthode de transfert des données utilisateur vers l'UE.

2.3 Modèle de propagation

Le modèle de propagation peut estimer la valeur de l'affaiblissement de trajet.

Il est important de noter que les modèles de propagation dépendent du type de zone tel que **urbaine**, **suburbaine** et **rurale** [49].

2.3.1 Modèle OKUMURA-HATA

Il s'agit du modèle le plus couramment utilisé, fondé sur les mesures effectuées d'Okumura prises dans la zone de Tokyo.

Ce modèle prend en compte la fréquence, la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que la hauteur de la station de base et du dispositif mobile [50].

L'affaiblissement selon le modèle OKUMURA-HATA est donné par la formule (2.1) :

$$L_0 = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b)] \log_{10}(d) \quad (2.1)$$

Avec :

- f : la fréquence en MHz.
- d : la distance en km.
- h_m : la hauteur de mobile en m.
- h_b : la hauteur de la station de base en m.
- $a(h_m)$: est le facteur de correction en dB.

$$\mathbf{a}(\mathbf{h}_m) = \begin{cases} [1.1 \log_{10}(f) - 0.7] h_m - [1.56 \log_{10}(f) - 0.8], & \text{si } f \leq 300 \text{ MHz et} \\ \left[8.29 [\log_{10}(1.54 h_m)]^2 - 1.1 \right] & \\ \left[3.2 [\log_{10}(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \right] & \text{si } f > 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2.2)$$

La première ligne correspond à la zone urbaine, tandis que les deux autres lignes correspondent à la zone urbaine dense. La plage de validité du modèle **Okumura-Hata** est la suivante :

- Fréquence : **150 à 1500 MHz**.
- Distance : **1 à 20 km**.
- Hauteur de l'antenne de la station de base : **30 à 200 m**.
- Hauteur de l'antenne mobile : **1 à 10 m**.

2.3.2 Modèle COST 231-HATA

Le modèle COST 231-Hata aux mêmes conditions que le modèle d'Okumara-Hata excepté qu'il est élaboré afin d'élargir l'utilisation de ce modèle pour les bandes allant de 1500 à 2000 MHz [50].

Ce modèle est employé pour calculer l'affaiblissement sur le trajet dans trois types d'environnements distincts (urbain, suburbain et rural) [51].

L'affaiblissement selon le modèle **COST 231-Hata** est donné par la formule (2.3) :

$$\mathbf{L}_0(\text{dB}) = 46, 33 + 33, 9 \log(f) - 13, 82 \log(h_b) - \mathbf{a}(\mathbf{h}_m) + [44, 9 - 6, 55 \log(h_b)] \log(d) \quad (2.3)$$

Avec :

- f : la fréquence en MHz.
- d : la distance en km.
- h_b : la hauteur de la station de base en m.
- h_m : la hauteur de mobile en m.
- $a(h_m)$: est le facteur de correction en dB.
- C_M : est le facteur de correction pour les différentes zones urbaines.

La formule de $a(h_m)$ est définie comme suit :

Pour les zones urbaines :

$$\mathbf{a}(\mathbf{h}_m) = [1, 11 \log_{10}(f) - 0, 7] h_m - [1, 56 \log_{10}(f) - 0, 8] \quad (2.4)$$

Pour les zones urbaines denses :

$$\mathbf{a}(\mathbf{h}_m) = \begin{cases} 3.2(\log_{10}(11.5 h_m))^2 - 4.97 & \text{pour } f_c > 300 \text{ MHz} \\ 8.29(\log_{10}(1.54 h_m))^2 - 1.1 & \text{pour } f_c \leq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2.5)$$

La valeur de C_M est :

$$C_M = \begin{cases} 0 \text{ dB pour les villes de taille moyenne.} \\ 3 \text{ dB pour les grandes villes.} \end{cases}$$

2.3.3 Modèle de propagation standard

Le modèle de propagation standard (SPM) repose sur les formules de Hata et est conçu pour prédire les atténuations dans la plage de fréquences de **150 à 3500 MHz** sur des distances allant de **1 à 20 km**. Il est particulièrement adapté aux technologies radio **GSM 900, GSM 1800, UMTS, CDMA 2000, WiMAX et LTE** [52].

Ce modèle repose sur la formule (2.6) :

$$\begin{aligned} \text{Pr} = \text{Pt} (K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(h_t) + K_4 \text{DiffractionLoss} &+ K_5 \log(d) \log(h_t) + K_6 h_r + \\ K_7 \log(h_r) + K_{\text{clutter}} f_{\text{clutter}} + K_{\text{hill,los}}) & \quad (2.6) \end{aligned}$$

Où :

- Pr : Puissance reçue en dBm.
- Pt : Puissance transmise (EIRP) en dBm.
- K_1 : Décalage constant en dB.
- K_2 : Facteur de multiplication pour $\log(d)$.
- d : Distance entre le récepteur et l'émetteur en m.
- K_3 : Facteur de multiplication pour $\log(d)$.
- ht : Hauteur effective de l'antenne de l'émetteur en m.
- K_4 : Facteur de multiplication pour le calcul de la diffraction.
- DiffractionLoss : pertes dues à la diffraction sur un chemin obstrué (dB).
- K_5 : Facteur de multiplication pour $\log(d), \log(ht)$.
- K_6 : Facteur de multiplication pour hr .
- K_7 : Facteur de multiplication pour $\log(hr)$.
- hr : Hauteur effective de l'antenne du récepteur mobile en mètres.
- K_{clutter} : Facteur de multiplication f_{clutter} .
- f_{clutter} : Facteur de correction pour les régions vallonnées.

2.3.4 Planification de réseau radio

La planification d'un réseau de télécommunications est une étape essentielle dans sa conception et son déploiement.

Elle consiste à déterminer les caractéristiques et la disposition du réseau pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et des applications.

2.3.4.1 Processus de planification

Le processus de planification d'un réseau cellulaire est constitué de cinq étapes principales, dont quatre sont accomplies avant le lancement du réseau, tandis que la dernière intervient après son lancement. Les cinq étapes principales sont : la pré-planification, la planification, la planification détaillée, la vérification et l'acceptation ainsi que l'optimisation (FIG. 2.10) [53].

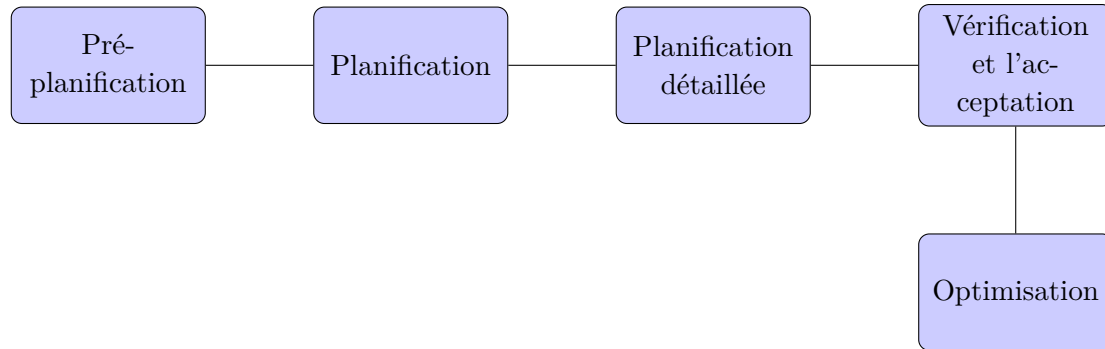


FIG. 2.10 : Processus de planification.

1. **Pré-planification** : Nous allons étudier une zone d'une superficie estimée à 7,785 km² dans la wilaya de Tlemcen, comme illustré dans la figure (FIG. 2.11) :

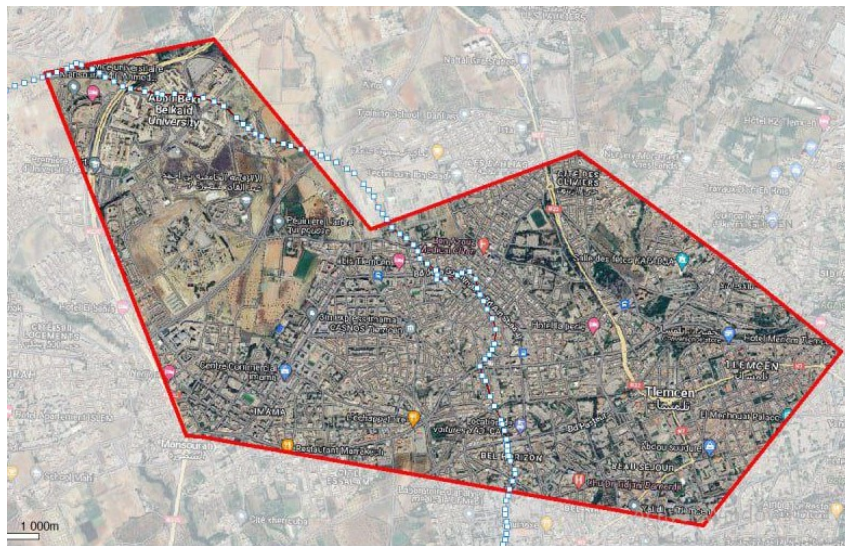


FIG. 2.11 : Zone de Mansourah, Tlemcen.

Et qui se distingue par les caractéristiques suivantes (TAB. 2.1) :

Caractéristique	Valeur
La zone	Mansourah, Tlemcen
Morphologie de la zone	Urbaine
Bande de fréquence	3,5 GHz
Probabilité de couverture	92%
Type de multiplexage	TDD

TAB. 2.1 : Caractéristiques de la zone.

2. **Planification** : La planification du réseau utilise les données de dimensionnement et de configuration initiale afin de définir la couverture et la capacité du réseau radio à l'aide d'un outil dédié. Le plan nominal fournit une première idée des emplacements et des distances entre les sites, sans préciser les positions exactes de ces sites [53].
3. **Planification détaillée** : Une fois la phase de planification est terminée et les emplacements ainsi que les configurations des sites sont connues, il est possible de commencer la planification détaillée. Cette phase comprend la planification des fréquences, des adjacences et des paramètres caractéristiques de déploiement du réseau, afin d'assurer la couverture et la capacité optimales du réseau [53].
4. **Vérification et l'acceptation** : La vérification est la phase qui suit l'installation du site. Son objectif est d'assurer un fonctionnement optimal du réseau grâce à des réglages de paramètres visant à corriger les erreurs éventuelles survenues lors de l'installation. Elle implique également des tests Drive, une méthode d'essai pour vérifier la fonctionnalité du réseau, que ce soit en termes de couverture, de capacité ou de qualité des services [53].
5. **Optimisation** : C'est la dernière étape qui permet de vérifier si les clients sont satisfaits et de résoudre leurs éventuelles plaintes. Comme il est bien connu, l'optimisation est un processus qui se déroule de manière continue. Toutes les informations disponibles sur le réseau et son état sont nécessaires en entrée pour l'optimisation. Certains éléments fondamentaux, tels que les données statistiques, les alarmes et le trafic, doivent être surveillés attentivement [53].

2.4 Dimensionnement de réseau 5G

Le dimensionnement d'un réseau est essentiel pour assurer sa performance optimale en fournissant une couverture adéquate, une capacité suffisante pour le trafic et une haute qualité de service.

Sans dimensionnement approprié, des problèmes tels que des zones mal couvertes, des embouteillages et des délais élevés peuvent survenir, entraînant une expérience utilisateur insatisfaisante et des coûts supplémentaires.

En résumé, le dimensionnement du réseau est indispensable pour un fonctionnement efficace, économique et performant des télécommunications.

2.4.1 Processus de dimensionnement

Le dimensionnement des gNB est crucial, et nécessite une attention particulière. Pour cela, il doit être réalisé de manière approfondie .

Il existe deux méthodes à suivre. La première prend en compte les exigences de capacité, tandis que la deuxième prend en compte les exigences de couverture, afin de déterminer le rayon de chaque cellule et le nombre de sites nécessaires [53].

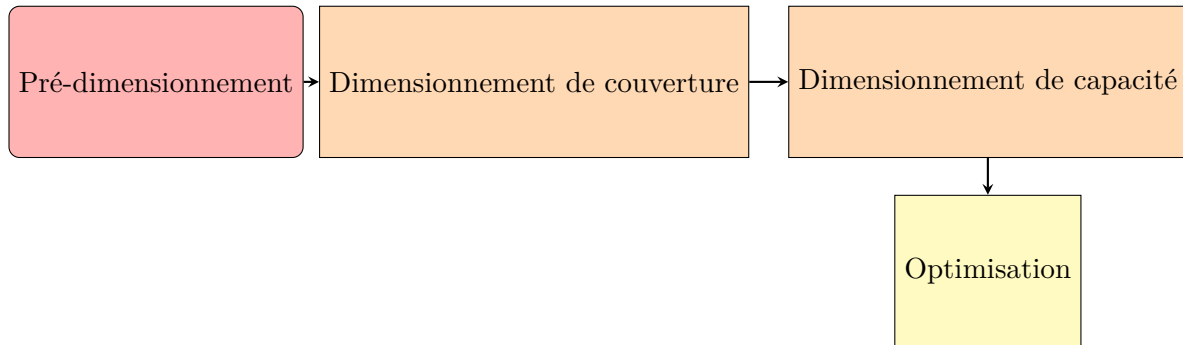


FIG. 2.12 : Schéma du processus de dimensionnement et d'optimisation [54].

D'après le schéma de la Figure (FIG. 2.12), le processus de dimensionnement comprend quatre étapes :

2.4.1.1 Pré-dimensionnement

Pour commencer le dimensionnement, il convient recueillir des données concernant la zone de déploiement, notamment :

1. Des informations approfondies sur les **gNB** et **UE**.
2. Des données sur la zone de déploiement, telles que sa superficie et ses caractéristiques démographiques, ainsi que des données géographiques telles que des cartes, la répartition de la population, les zones à couvrir et le taux de pénétration des abonnés, en prenant en compte les services requis et le trafic généré.
3. Les services à offrir, incluant la voix et les données.
4. Une liste des sites potentiels pour l'installation des gNB.
5. Le choix du type d'antenne adapté à la configuration [55].

2.4.1.2 Dimensionnement de couverture

L'analyse de la couverture demeure une étape cruciale. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur le bilan de liaisons (**RLB**) afin d'estimer le taux de perte du trajet. Le choix d'un modèle de propagation approprié est nécessaire à cette fin. Le résultat final de cette analyse sera la détermination de la taille de la cellule à couvrir, ce qui permettra d'estimer le nombre total de sites requis. Cette estimation, basée sur les exigences de couverture, devra également être vérifiée en tenant compte des besoins en capacité [56].

1- Le bilan de liaison

Le but du calcul du budget de liaison est d'évaluer la perte maximale de chemin admissible (**MAPL**) ou l'atténuation du signal reçu entre l'antenne mobile et l'antenne de la station de base, aussi bien pour la liaison descendante que pour la liaison montante. En réalité, cela implique d'ajouter tous les éléments de l'augmentation ou la diminution de la puissance du signal radio

entre chaque extrémité (voir FIG. 2.13). Ce bilan est crucial pour identifier si deux nœuds peuvent communiquer entre eux tout en préservant une qualité de connexion suffisante [57].

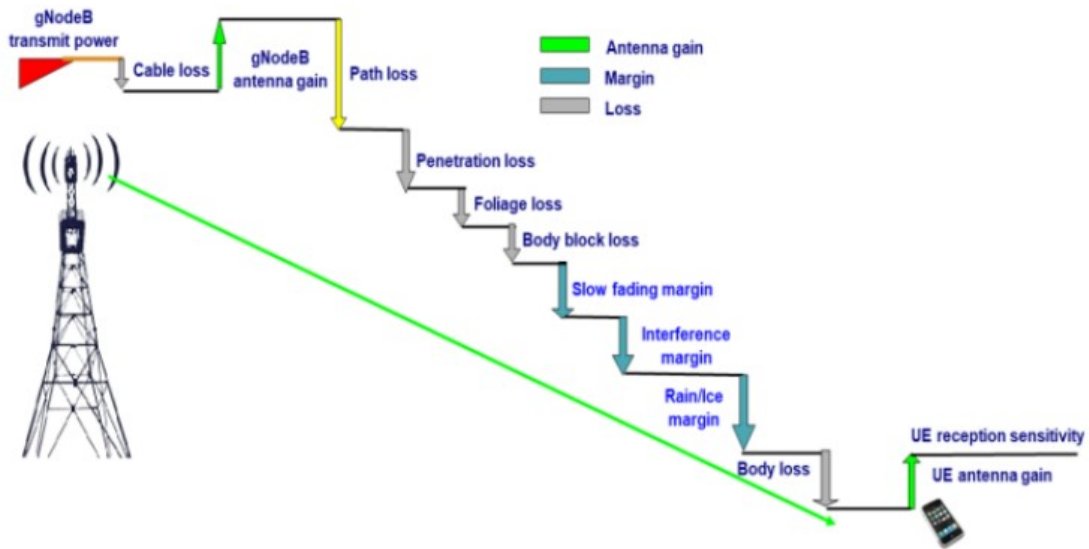


FIG. 2.13 : Bilan de liaison [58].

Pour calculer le niveau du signal reçu du bilan de liaison 5G, on utilise la formule (2.7) :

Niveau du signal reçu au niveau du récepteur (dBm) = puissance d'émission gNodeB (dBm) – $10\log_{10}(\text{quantité de sous-porteuse})$ + gain d'antenne gNodeB – Perte de câble gNodeB (dB) – Perte de trajet (dB) – Perte de pénétration (dB) – perte de feuillage (dB) – perte de bloc corporel (dB) – marge d'interférence (dB) – marge pluie/glace (dB) – marge d'évanouissement lent + gain d'antenne UE (dB) (2.7)

Les paramètres	UL
Puissance d'émission gNB (dBm)	60
Gain d'antenne gNB (dBi)	24
Perte de pénétration (dB)	22
Perte de câble gNB (dB)	0
Perte de bloc corporel (dB)	3
Perte de feuillage (dB)	11
Marge pluie / glace (dB)	0
Marge d'interférence (dB)	6
Marge d'évanouissement lent (dB)	4
Gain d'antenne UE (dB)	0
Facteur de bruit UE (dB)	7
Seuil de démodulation SINR (dB)	-63
Puissance de bruit thermique (dBm)	-174.22

TAB. 2.2 : Principe du budget de liaison radio montante 5G NR.

Les paramètres	DL
Puissance d'émission gNB (dBm)	71
Gain d'antenne gNB (dBi)	24
Perte de pénétration (dB)	22
Perte de câble gNB (dB)	0
Perte de bloc corporel (dB)	3
Perte de feuillage (dB)	11
Marge pluie / glace (dB)	0
Marge d'interférence (dB)	6
Marge d'évanouissement lent (dB)	4
Gain d'antenne UE (dB)	0
Facteur de bruit UE (dB)	7
Seuil de démodulation SINR (dB)	-65
Puissance de bruit thermique (dBm)	-173.22

TAB. 2.3 : Principe du budget de liaison radio descendante 5G NR.

Les tableaux (TAB. 2.2 et TAB. 2.3) exposent les principes de la nouvelle radio 5G pour les budgets des liaisons radio en liaison montante et descendante successivement.

2- Calcul MAPL :

La formule (2.8) est utilisée pour calculer la perte de trajet d'un signal dans un réseau de télécommunications :

$$\begin{aligned} \text{perte de trajet (dB)} = & \text{puissance d'émission gNB} + \text{gain d'antenne gNB} - \text{Perte de} \\ & \text{câble gNB} - \text{Perte de pénétration} - \text{perte de feuillage} - \text{perte de bloc corporel} - \\ & \text{marge d'interférence} - \text{marge pluie/glace} - \text{marge d'évanouissement lent} + \text{gain d'a-} \\ & \text{ntenne UE} - \text{Puissance de bruit thermique} - \text{facteur de bruit UE} - \text{seuil de démod-} \\ & \text{ulation SINR} \quad (2.8) \end{aligned}$$

Nous obtenons que le MAPL lorsque nous substituons ces données dans l'équation (2.8) :

$$\text{MAPL}_{\text{UL}} = 282,22 \text{ dB.} \quad (2.9)$$

$$\text{MAPL}_{\text{DL}} = 280,22 \text{ dB.} \quad (2.10)$$

3- Choix du modèle de propagation

Il est possible de déterminer le rayon de la cellule en utilisant à la fois le chemin de liaison descendante (**DL**), le chemin de liaison montante (**UL**), le modèle de propagation sélectionné ainsi que les valeurs de MAPL en liaison montante et descendante (MAPL **UL** et **DL**).

Le rayon effectif sera déterminé par le plus petit des deux rayons de chemin en liaison descendante (**DL**) et en liaison montante (**UL**) et le MAPL du budget de liaison radio descendante.

Okumura-Hata présente une perte de chemin minimale à mesure que la distance augmente depuis l'émetteur, donc pour cette recherche, nous avons sélectionné le type clutter urbain (grande ville) avec le modèle de propagation d'Okumura-Hata.

4- Calcul du rayon de la cellule

Il est possible de déterminer le rayon de la cellule à la fois dans le chemin UL et le chemin DL, comme démontrer dans les équations (2.11, 2.12) :

$$d_{\text{UL}} = 10^{\left(\frac{\text{PL}-298,81}{35,23}\right)} = 0,338 \text{ km.} \quad (2.11)$$

$$d_{\text{DL}} = 10^{\left(\frac{\text{PL}-298,81}{35,23}\right)} = 0,297 \text{ km.} \quad (2.12)$$

Le rayon effectif sera le plus petit des rayons de chemin DL et UL.

Donc :

$$\begin{aligned} R_{\text{eff}} &= \min(d_{\text{DL}}, d_{\text{UL}}) \\ &= \min(0,297 \text{ km}, 0,338 \text{ km}) \\ &= 0,297 \text{ km.} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau (TAB. 2.4) :

Paramètre	Liaison montante	Liaison descendante
Fréquence (MHz)	3500	
MAPL (dB)	282,22	280,22
Rayon de cellule (km)	0,338	0,297
Rayon de cellule effectif (km)	0,297	

TAB. 2.4 : Résultats de calcul.

5- Calcul la surface couverte

Pour déterminer la superficie couverte par un seul site, deux équations sont disponibles en fonction du type d'antenne utilisé :

- Pour une antenne omnidirectionnelle, l'équation est la suivante :

$$A_{\text{site}} = \frac{3}{2} \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2 \quad (2.14)$$

- Pour une antenne à deux secteurs, l'équation est la suivante :

$$A_{\text{site}} = \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2 \quad (2.15)$$

- Pour une antenne à trois secteurs, l'équation est la suivante :

$$A_{\text{site}} = \frac{9}{8} \sqrt{3} R_{\text{eff}}^2 \quad (2.16)$$

Puisque la zone cible est une zone urbaine (TAB. 2.1), nous considérerons que tous les gNBs sont des antennes à trois secteurs (Tri-sector).

Nous avons déterminé la superficie du site en intégrant R_{eff} de l'équation (2.13) dans l'équation (2.16), obtenant ainsi la valeur de A_{site} :

$$A_{\text{site}} = \frac{9}{8} \sqrt{3} (0,297)^2 = 0,172 \text{ km}^2. \quad (2.17)$$

6- Détermination du Nombre de Sites

Le nombre de sites est donné par l'expression (2.18) :

$$N = \frac{\text{Surface totale}}{\text{Surface couverte par un site}} \quad (2.18)$$

Nous obtenons le nombre de sites requis en substituant la surface couverte par un seul site dans l'équation (2.19) :

$$N = \frac{\text{Surface totale}}{\text{Surface couverte par un site}} = \frac{7,785 \text{ km}^2}{0,172} \text{ km}^2 = 45,26 \approx 45 \text{ gNBs}. \quad (2.19)$$

Pour calculer la distance inter-site, nous utilisons l'équation (2.20) :

$$D = 1,5R \quad (2.20)$$

En substituant la valeur de R_{eff} , on obtient :

$$D = 0.445 \text{ km}. \quad (2.21)$$

2.4.1.3 Dimensionnement de capacité

L'examen de la dimension des cellules et du nombre de sites déterminés par l'analyse de la couverture sera réalisé en fonction de la capacité du système. On s'assurera que le réseau peut supporter la demande de trafic ; sinon, l'ajout de nouveaux sites sera envisagé.

1- Catégorie de service de l'utilisateur

Il existe trois forfaits de livraison différents parmi lesquels choisir : Doré, Argenté et Bronze. Chaque forfait de livraison a sa propre qualité, son forfait de service mensuel, ses débits de données maximaux en DL et UL, et son pourcentage de forfait. Les informations (TAB. 2.5) sont basées sur l'utilisation des données dans les systèmes mobiles en Algérie (MOBILIS) et l'utilisation actuelle de la LTE.

Types	Forfait (Go/mois/U)	Ratio d'utilisation (%)	Ratio BH (%)
Doré	50	60	16.67
Argent	30	25	
Bronze	10	15	

TAB. 2.5 : Catégorie de service de l'utilisateur.

1- Le débit moyen total par abonné pendant l'heure de pointe (BH)

$$\text{Débit moyen (kbps)} = \frac{\text{Forfait de service mensuel (8 bit/octet)}}{\text{Nombre de jours} * \text{Temps en secondes}} \text{BH ratio} \quad (2.22)$$

Pour le client Doré :

$$\text{Débit moyen par abonné à BH (kbps)} = \frac{50 * 10^9 * 8 \text{ bit/octet}}{30 * 3600} 16.67\% = \mathbf{617,407} \text{ kbps.} \quad (2.23)$$

Pour le client Argent :

$$\text{Débit moyen par abonné à BH (kbps)} = \frac{30 * 10^9 * 8 \text{ bit/octet}}{30 * 3600} 16.67\% = \mathbf{370,444} \text{ kbps.} \quad (2.24)$$

Pour le client Bronze :

$$\text{Débit moyen par abonné à BH (kbps)} = \frac{10 * 10^9 * 8 \text{ bit/octet}}{30 * 3600} 16.67\% = \mathbf{123,481} \text{ kbps.} \quad (2.25)$$

Pour le débit total moyen par abonné pendant une heure de pointe

$$\begin{aligned} \text{Débit moyen total par abonné à BH} &= \sum_i (\text{Le débit moyen par abonné à BH} \\ &\quad * \text{Ratio d'utilisation du forfait de service}) \\ &= (617.407 * 0.6) + (370.444 * 0.25) + (123.481 \\ &\quad * 0.15) \\ &= \mathbf{490.8375} \text{ kbps.} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Maintenant, nous allons calculer les débits de données du nouveau réseau 5G en utilisant l'équation (2.27). Dans cette conception d'étude, veuillez prendre en considération les valeurs de tableaux (TAB. 2.6) :

$$\text{Débit de données (Mbps)} = 10^{-6} \sum_j \left(V_{\text{Layer}}^j Q_M^{(j)} f^{(j)} R_{\text{max}} \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j)} \mu}{T_s^\mu} 12(1 - \text{OH}^{(j)}) \right) \quad (2.27)$$

Parameter	Valeur
largeur de bande (MHz)	100
plage de fréquences	FR1
Bits par symbole provenant du schéma de modulation (Q_M)	8
facteur d'échelle/signalé par bande (f)	0.5
Durée moyenne du symbole OFDM (T_s^μ)	$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{142\mu} = 3.57710^{-5}$
Nombre de couches (V)	2
surcharge (OH)	0.14 (UL) et 0.08 (DL)
numérologie (μ)	1
Espacement entre sous-porteuses	30 kHz
Sous-porteuses par bloc de ressources	12
Nombre maximum de blocs de ressources	273
Nombre de porteuses (J)	1
Débit de codage maximal (R_{max})	$\frac{948}{1024}$

TAB. 2.6 : Paramètres utilisés pour calculer les débits pour la nouvelle radio 5G.

Pour le débit de données en liaison montante :

$$\begin{aligned}
 \text{Débit de données (ul) (Mbps)} &= 10^{-6} \sum_j \left(V_{\text{Layer}}^j Q_M^{(j)} f^{(j)} R_{\text{max}} \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j)} \mu}{T_s^\mu} 12(1 - \text{OH}^{(j)}) \right) \\
 &= 10^{-6} * 1 * 2 * 8 * 0.5 \frac{948}{1024} * \left(\frac{273 * 12 * (14 * 2^1)}{10^{-3}} \right) \\
 &\quad * (1 - 0.14) \\
 &= \mathbf{584.25 \text{ Mbps.}}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Pour le débit de données en liaison descendante :

$$\begin{aligned}
 \text{Débit de données (dl) (Mbps)} &= 10^{-6} \sum_j \left(V_{\text{Layer}}^j Q_M^{(j)} f^{(j)} R_{\text{max}} \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j)} \mu}{T_s^\mu} 12(1 - \text{OH}^{(j)}) \right) \\
 &= 10^{-6} * 1 * 2 * 8 * 0.5 \frac{948}{1024} * \left(\frac{273 * 12 * (14 * 2^1)}{10^{-3}} \right) \\
 &\quad * (1 - 0.08) \\
 &= \mathbf{625.01 \text{ Mbps.}}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

- Le calcul du nombre maximal d'abonnés par site est effectué de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Max d'abonnés par site (ul)} &:= \frac{\text{Débit de données (ul)}}{\text{Débit total moyen par abonné à BH}} \\
 &= \frac{584.25 \text{ Mbps}}{490.8375 \text{ kbps}} \\
 &= \mathbf{1190 \text{ (valeur la plus proche).}}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Max d'abonnés par site (dl)} &:= \frac{\text{Débit de données (dl)}}{\text{Débit total moyen par abonné à BH}} \\
 &= \frac{625.01 \text{ Mbps}}{490.8375 \text{ kbps}} \\
 &= \mathbf{1273 \text{ (valeur la plus proche).}}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Par conséquent, les deux équations (2.32) et (2.33) peuvent être utilisées pour calculer le nombre de gNBs nécessaires pour accueillir la zone cible d'un nombre total projeté d'abonnés de 57 120.

$$\begin{aligned}
 \text{Nombre de sites basés sur la capacité (UL)} &= \frac{\text{Total des abonnés de la zone cible}}{\text{Max d'abonnés par site}} \\
 &= \frac{57120}{1190} \\
 &= 48 \text{ gNBs (valeur la plus proche).}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Nombre de sites basés sur la capacité (DL)} &= \frac{\text{Total des abonnés de la zone cible}}{\text{Max d'abonnés par site}} \\
 &= \frac{57120}{1273} \\
 &= 45 \text{ gNBs (valeur la plus proche).}
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

Le nombre maximum de sites sera choisi parmi le nombre de sites basé sur la capacité de liaison descendante et de liaison montante (TAB. 2.7). Ainsi, dans ce cas, 48 gNBs sont sélectionnés.

Nombre de sites basé sur la capacité (DL, UL)		
gNBs en UL	gNBs en DL	Meilleurs gNBs sélectionnés
48	45	48

TAB. 2.7 : Meilleurs gNBs sélectionnés à partir du nombre de sites basé sur la capacité.

Par conséquent, en se basant sur la couverture, nous avons identifié 45 gNBs nécessaires pour englober la zone cible, tandis qu'en se basant sur la capacité, nous avons calculé 48 gNBs (TAB. 2.8). Selon le principe de sélection du nombre maximum de sites basé sur la capacité ou la couverture, en utilisant la méthode de planification nominale, il est impératif de choisir le nombre maximum de sites capable de répondre aux besoins de couverture de la zone cible.

$$\begin{aligned}
 \text{Nombre de sites} &= \max(\text{gNBs_couverture}, \text{gNBs_capacité}) \\
 &= 48 \text{ gNBs.}
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

Meilleur nombre de gNBs sélectionnés		
Dimensionnement	Couverture	Capacité
Valeur calculée des gNBs	45	48
Les meilleurs gNBs sélectionnés	48	

TAB. 2.8 : Meilleur nombre de gNBs sélectionnés

Nombre de gNBs sélectionnés en fonction de la capacité et de la couverture pour la zone cible de la sous-ville de **Tlemcen**.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné le dimensionnement d'un réseau en considérant ses deux aspects essentiels : la couverture et la capacité.

Nous avons également abordé les étapes fondamentales pour réaliser une planification optimale, en effectuant les calculs nécessaires pour la partie pratique qui sera abordée dans le troisième chapitre.

Chapitre 3

Planification et optimisation de la couverture et la capacité

3.1 Introduction

Dans le cadre de l'évolution continue des technologies de communication, le déploiement et l'amélioration des réseaux de cinquième génération (**5G**) sont devenus des défis majeurs pour répondre aux besoins croissants en matière de communication et de performance.

Ce chapitre se focalise sur une étude pratique visant à examiner le déploiement et l'amélioration de la couverture et de la capacité du réseau 5G dans une zone urbaine spécifique de la wilaya de Tlemcen, couvrant une superficie de **7,785 km²**.

L'objectif principal de cette étude est d'utiliser le logiciel de planification de réseaux **Atoll**, l'un des principaux outils de planification et de déploiement des réseaux de téléphonie mobile. Ce programme vise à développer des stratégies efficaces pour le déploiement et l'amélioration du réseau 5G dans cette zone géographique spécifique. **Atoll**, avec ses fonctionnalités avancées et ses capacités d'analyse précises, fournit un cadre idéal pour mener une analyse détaillée de la couverture et de la capacité du réseau **5G**.

3.2 Étapes de planification avec atoll

Les travaux avec Atoll suivent un ensemble d'étapes fondamentales, à savoir :

1- Création de nouveau projet

Atoll permet de gérer différentes technologies de communication telles que GSM, UMTS, LTE, 5G et CDMA (voir annexe A).

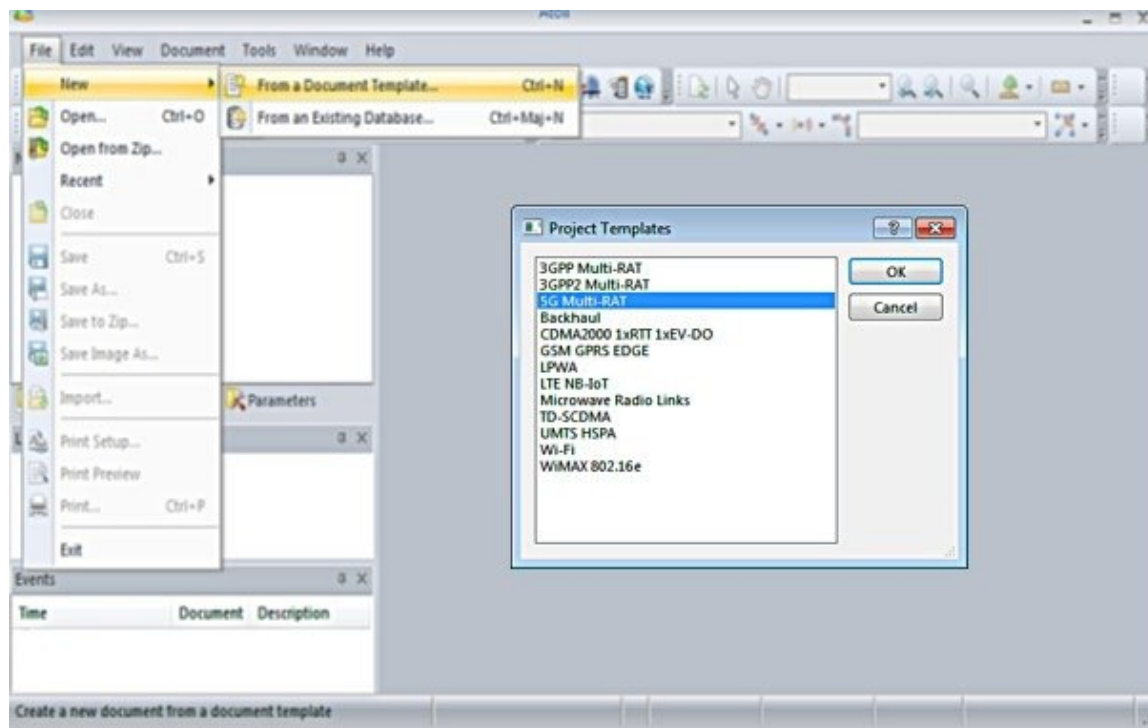


FIG. 3.1 : Étapes nécessaires pour créer un nouveau projet.

Dans notre cas, nous avons choisi le système 5G Multi-RAT (FIG. 3.1) car il constitue le fondement de notre sujet.

2- Échelle des coordonnées et l'importation de la carte

1. Premièrement, nous choisissons l'échelle des coordonnées pour la présentation de la carte et de la simulation (FIG. 3.2).

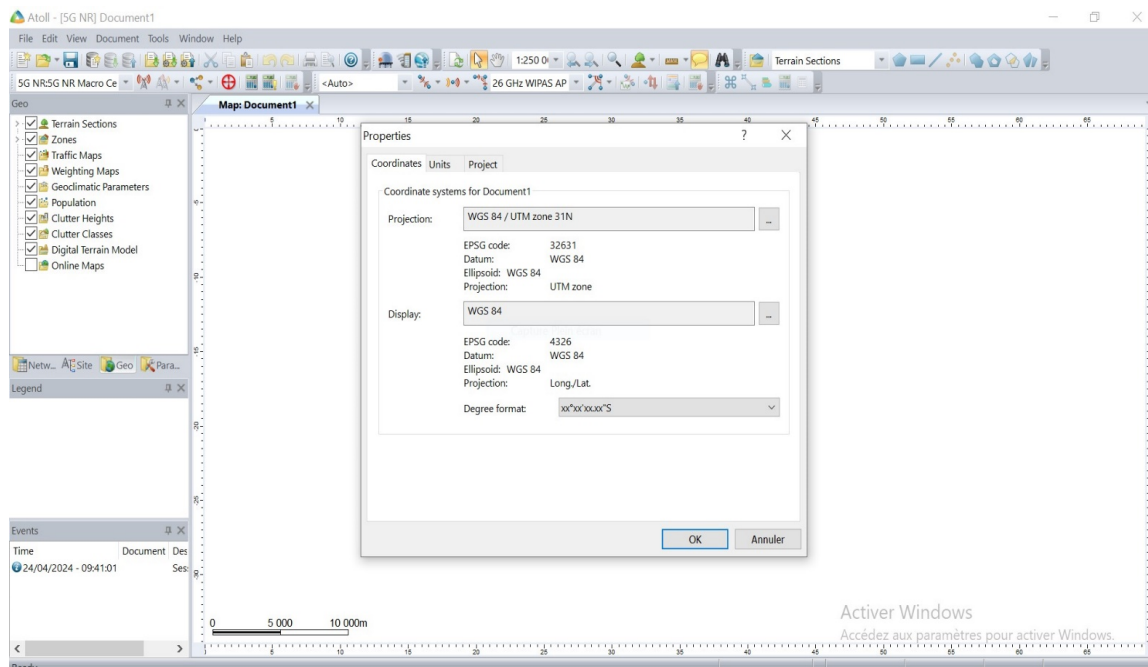


FIG. 3.2 : Échelle des coordonnées.

2. Deuxièmement, pour réaliser une étude sur la zone concernée (FIG. 2.11), nous commencerons par importer la carte générale d'Algérie (voir FIG. 3.3).

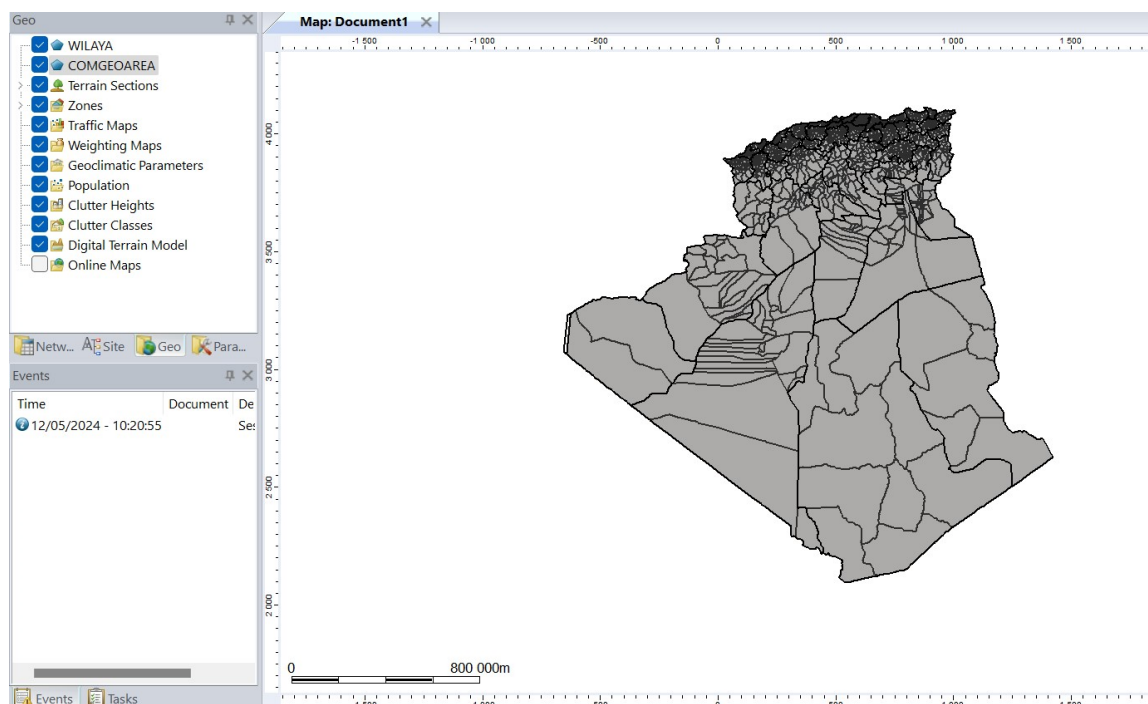


FIG. 3.3 : Le système de coordonnées.

- Ensuite, nous avons modifié l'utilisation du système de couleurs sur la carte pour mettre en évidence les différentes caractéristiques de la région, et nous effectuerons un zoom sur la wilaya de Tlemcen (FIG. 3.4).

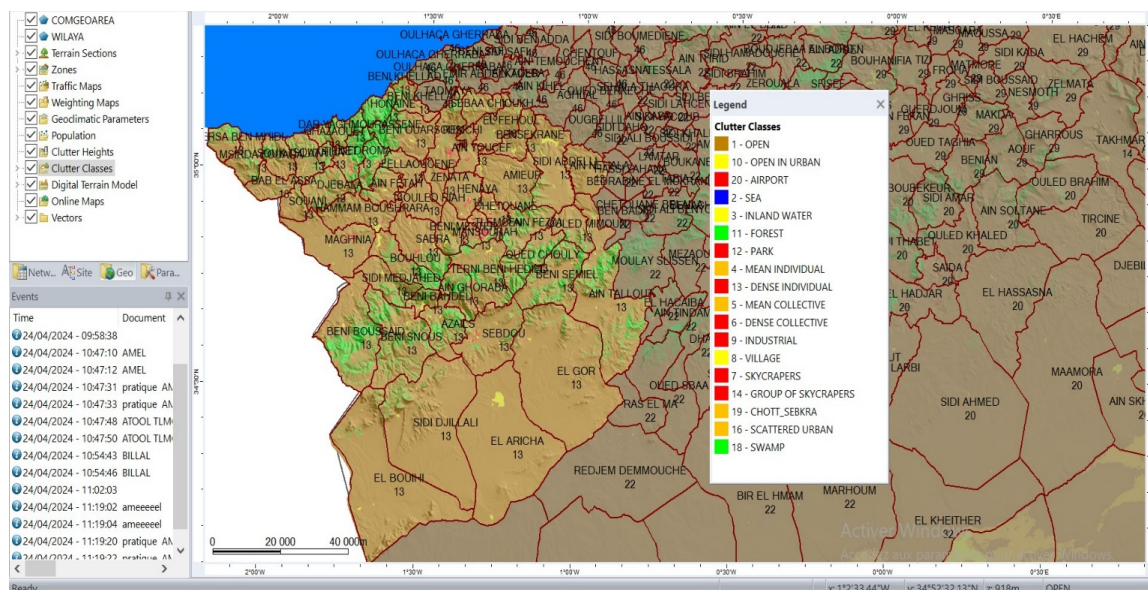


FIG. 3.4 : Wilaya de Tlemcen.

- Ensuite, nous importerons la carte en ligne via Google Earth afin de bien visualiser la zone d'étude située entre la région de Tlemcen et Mansourah, avec une superficie de 7.785 km² (voir FIG. 3.5).

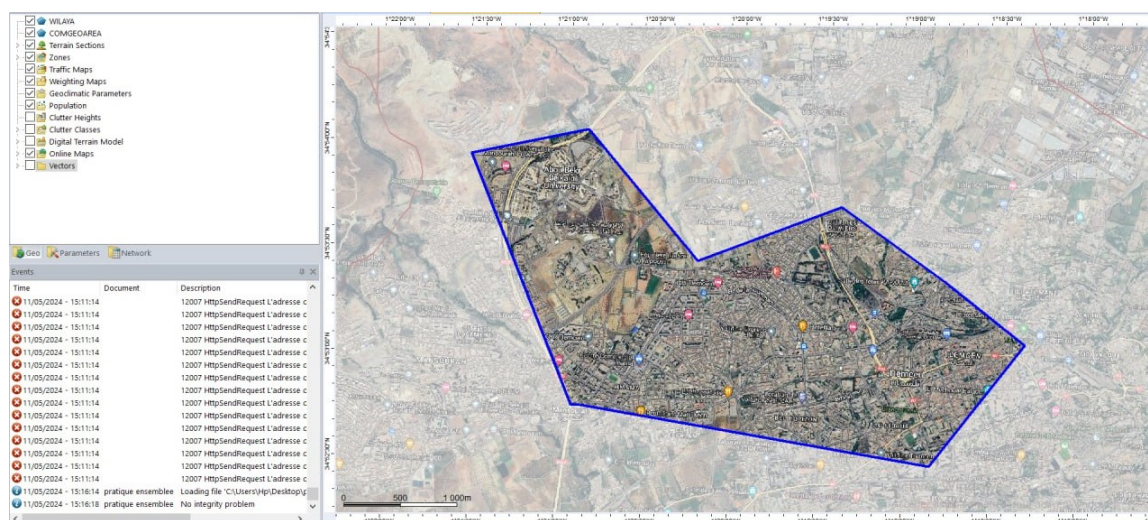


FIG. 3.5 : Zone d'étude.

3.3 Déploiement des sites

Le déploiement et la distribution corrects des sites de réseau de la 5G de manière réfléchie sont parmi les éléments les plus importants qui nous permettent d'obtenir une large couverture et une grande capacité. À partir des informations du chapitre précédent et sur la base des données obtenues par les ingénieurs réseau, nous allons distribuer un nombre de sites dans cette région selon les informations suivantes :

En ajoutant **48 sites** dans cette zone (FIG. 3.6), avec une distance inter-sites de 445. En prenant en considération l'étude de la densité de population et du relief géographique avant d'installer chaque site, nous utilisons Google Earth pour cela.

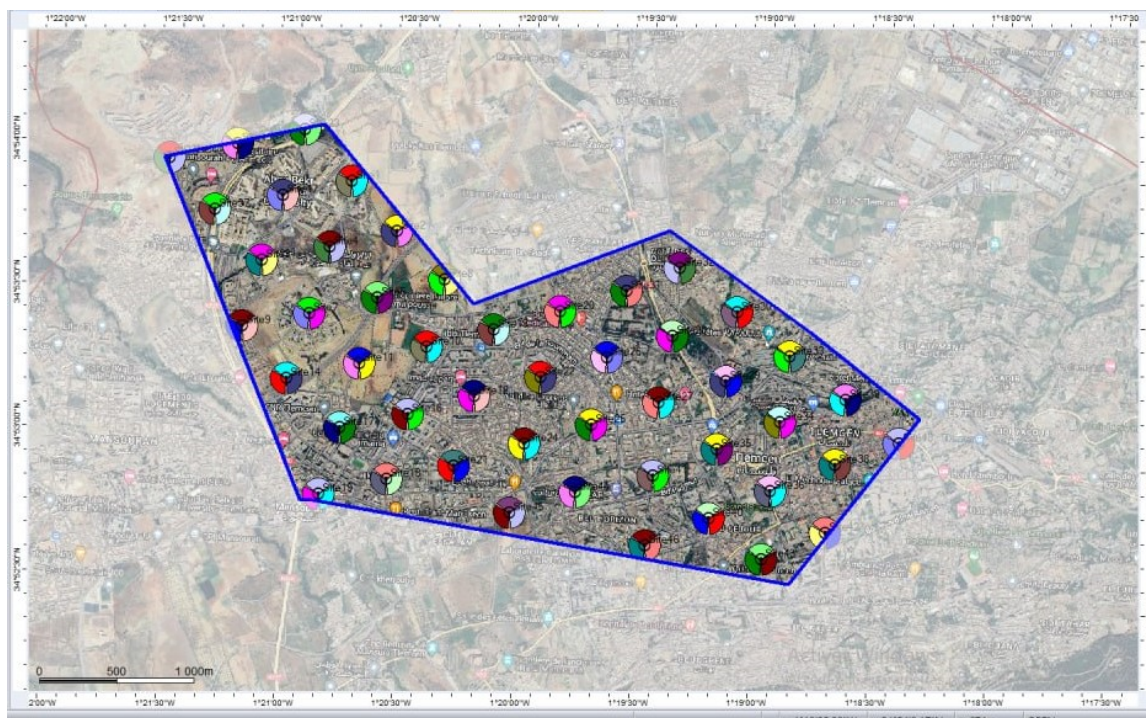


FIG. 3.6 : Réalisation de la cartographie des sites sur Google Earth.

Le tableau (TAB. 3.1) présente les détails de quelques sites, en prenant en considération l'utilisation d'une hauteur de support de 50 mètres, du modèle de propagation Okumura-Hata, et de la fréquence n78 (FIG. 3.7), et pour les autres sites (voir annexe B).

site	Transmitter	Main Propagation Model	Frequency
Site1	Site1_1	Okumura-Hata	n78
Site1	Site1_2	Okumura-Hata	n78
Site1	Site1_3	Okumura-Hata	n78
Site10	Site10_1	Okumura-Hata	n78
Site10	Site10_2	Okumura-Hata	n78
Site10	Site10_3	Okumura-Hata	n78
Site11	Site11_1	Okumura-Hata	n78
Site11	Site11_2	Okumura-Hata	n78
Site11	Site11_3	Okumura-Hata	n78

FIG. 3.7 : Caractéristiques des sites.

Nom	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Site1	1°20'45,85"W	34°53'53,88"N	[693]
Site10	1°20'25,07"W	34°53'19,93"N	[734]
Site11	1°20'41,89"W	34°53'15,89"N	[734]
Site12	1°20'12,36"W	34°53'10,02"N	[746]
Site13	1°20'8,27"W	34°53'24,05"N	[730]
Site14	1°21'0,13"W	34°53'12,07"N	[743]
Site15	1°21'15,18"W	34°54'0,6"N	[678]
Site16	1°20'29,09"W	34°53'5,72"N	[750]
Site17	1°20'46,13"W	34°53'2,37"N	[753]

TAB. 3.1 : Exemples des données des coordonnées utilisées pour localiser les sites.

3.3 Prédiction avant l'optimisation

3.3.1 Prédiction du niveau de signal pour la couverture 5G

On peut appeler "la couverture réseau" l'espace environnant la station de base ou le site cellulaire, facilitant ainsi l'envoi des requêtes de service par les utilisateurs et leur connexion au site cellulaire.

Le rayon de la cellule est calculé en fonction de la distance maximale entre le site cellulaire et l'utilisateur, à partir de laquelle ce dernier peut émettre et recevoir des requêtes de service sans arrêt.

La Figure (FIG. 3.8) illustre les résultats de la prédiction de couverture, avec la zone cible couverte par un bon signal ≥ -63.97 dBm.

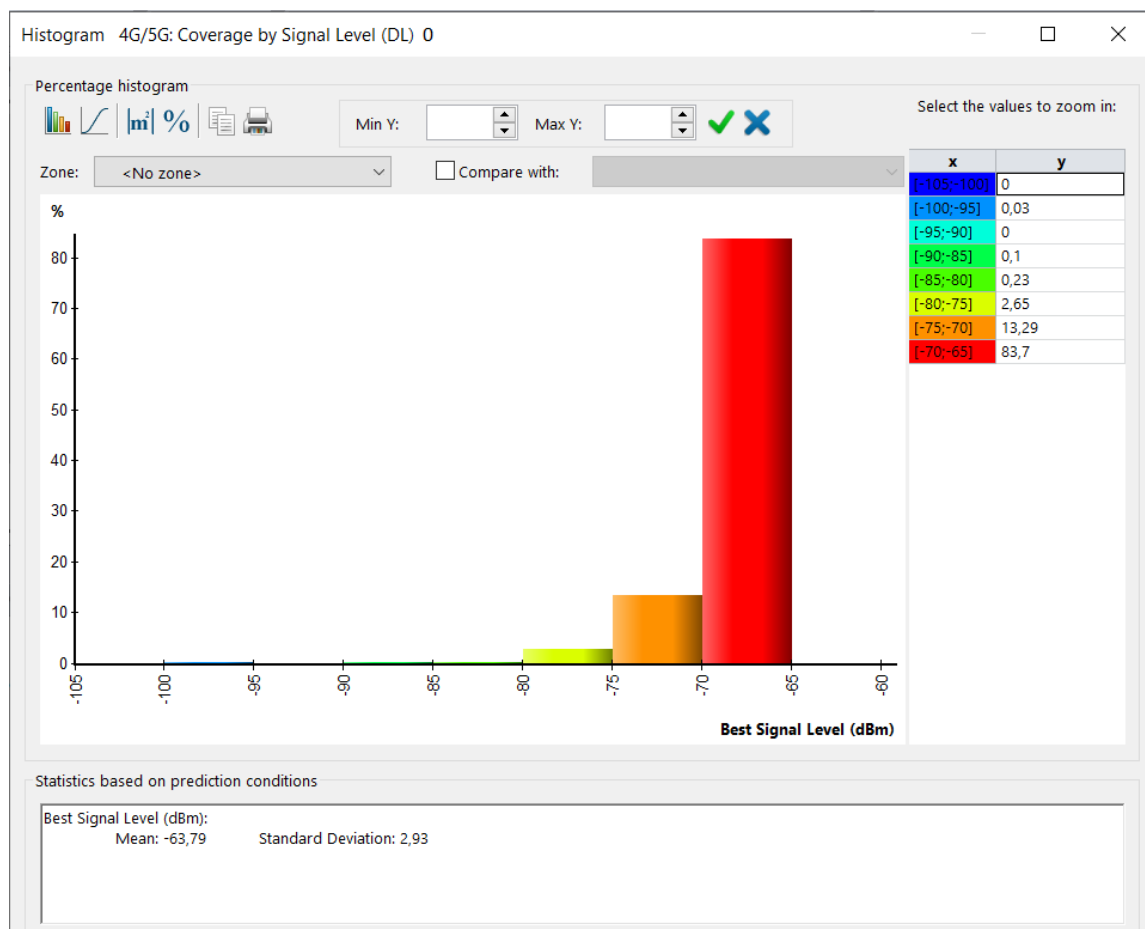


FIG. 3.8 : Réalisation de la cartographie des sites.

Les zones étudiées bénéficient d'une bonne couverture, ce qui signifie que la plage de valeurs $[-70;-65]$ couvre **83,7%** de la zone.

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

La Figure (FIG. 3.9) représente la prédiction de qualité par PDSCH C/(I+N) en fonction de la zone (en %), on observe que les pourcentages de signal de qualité sont : **très bonne (0,12) %**, **bonne(11,64) %** et **faible(88,24) %**.

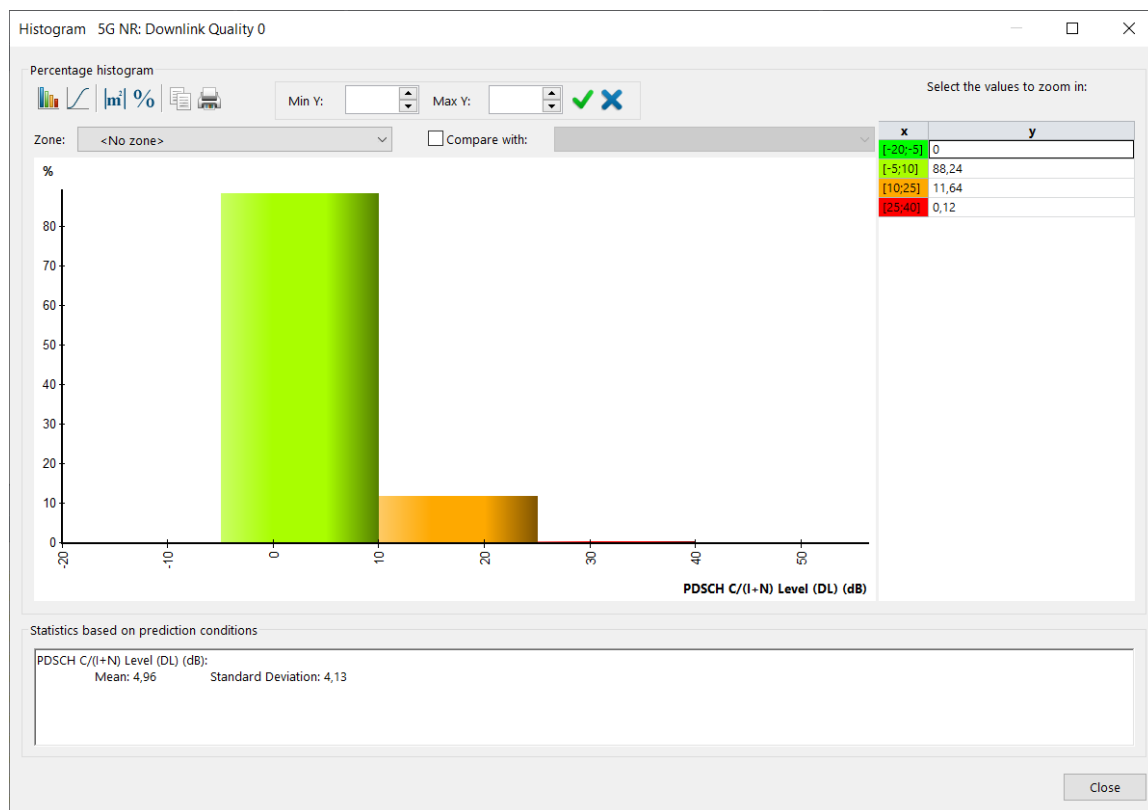


FIG. 3.9 : Prédiction de la qualité par PDSCH C/(I+N) de la liaison descendante.

3.3.1.2 Couverture 5G par SS-RSRP

Dans un réseau 5G, le SS-RSRP (Reference Signal Received Power) signifie la puissance du signal émis par la station de base (la cellule de service) à laquelle l'appareil utilisateur est actuellement relié.

D'après les directives de la 3GPP concernant le SS-RSRP (Reference Signal Received Power), l'évaluation de la couverture repose sur des résultats de simulation. Un $SS-RSRP \geq 90$ dBm est classé comme une condition RF (Radio Frequency) excellente, entre **-90 dBm et -100 dBm** est estimée comme une condition RF bonne, la condition RF de la cellule est considérée comme moyenne dans la plage **-100 dBm à -110 dBm**, et inférieure à **-110 dBm** est considérée comme une condition RF faible.

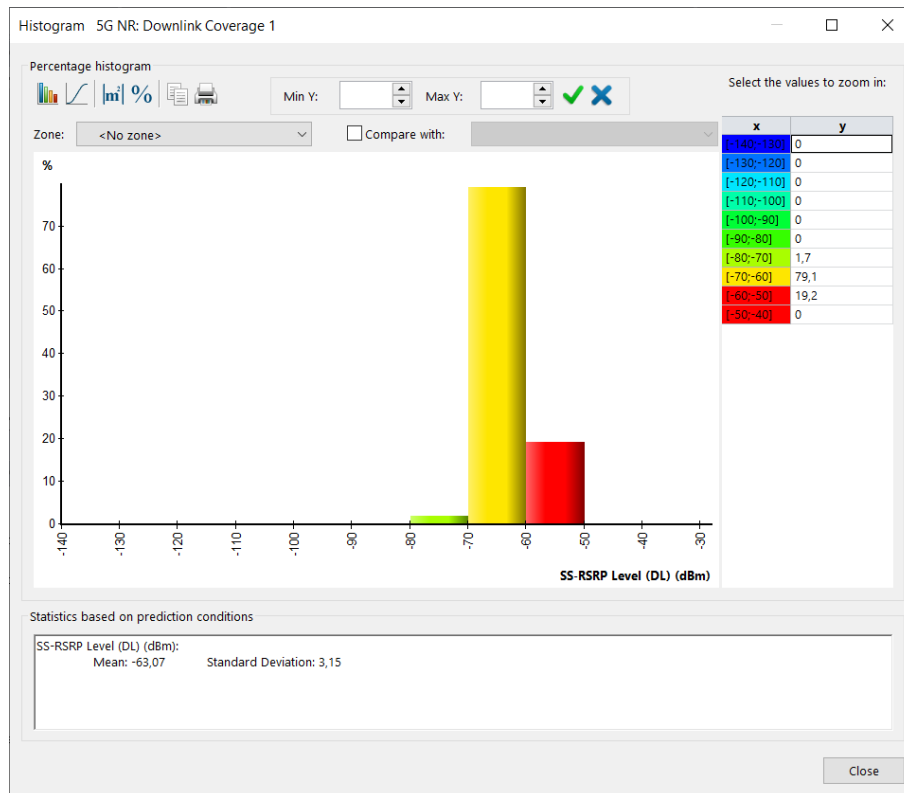


FIG. 3.10 : Prédiction de la Couverture par SS-RSRP.

Le résultat statistique présenté dans un histogramme indique que le SS-RSRP est de **-63,07 dBm** (FIG. 3.10), où cette valeur nous montre que la zone cible à une couverture moyenne.

3.3.1.3 Qualité de la liaison montante

Le résultat statistique fourni par l'histogramme (FIG. 3.11) indique que **100%** de la zone cible est couverte par un niveau de signal de **10,41 dBm**.

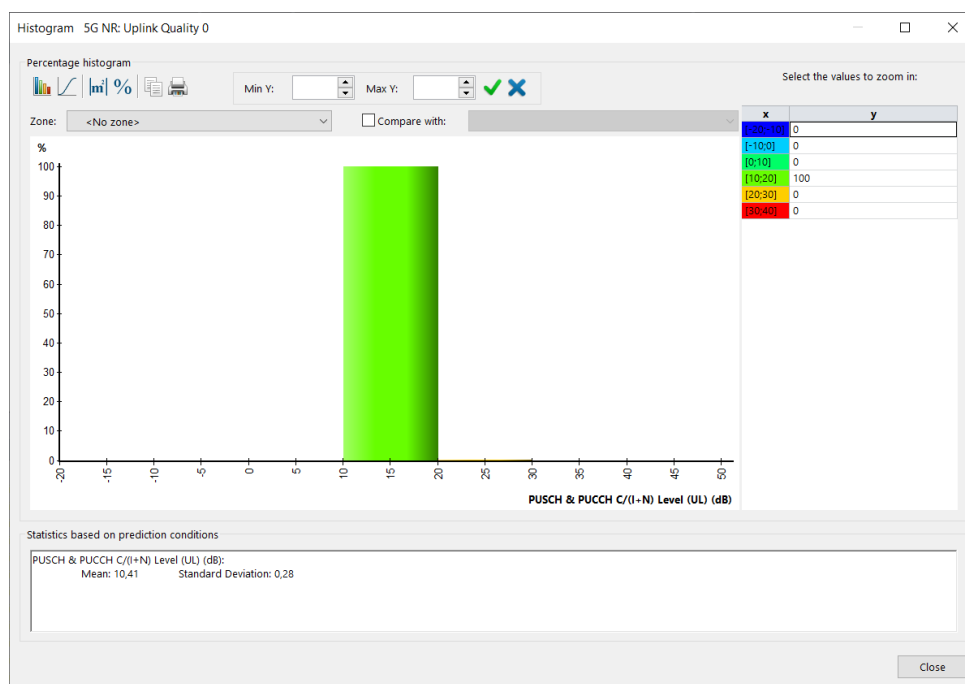


FIG. 3.11 : Prédiction de la qualité de la liaison montante.

3.3.1.4 Capacité 5G pour liaison descendante

La prédiction de la capacité 5G par débit pour les liaisons descendantes est un élément important dans la planification et l'amélioration de communication sans fil, ce qui permet aux opérateurs d'assurer des performances supérieures.

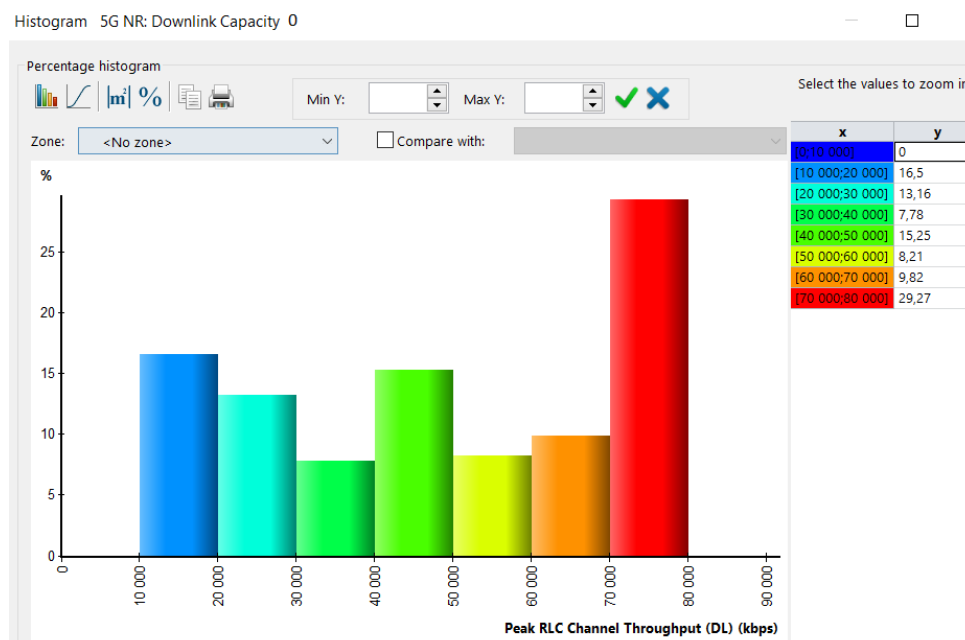


FIG. 3.12 : Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.

D'après les résultats de la simulation de réseau 5G, nous remarquons que le débit est élevé, atteignant **80 Mb/s** (FIG. 3.12).

3.3.1.5 Couverture dans les zones de chevauchement

Les zones de chevauchement sont utilisées pour prévoir la couverture dans la zone spécifiée. Comme nous pouvons le déduire de la figure (FIG. 3.13), une plus grande proportion de la zone cible est couverte par un ou deux serveurs, Une plus grande proportion de la zone visée est couverte par un ou deux serveurs, cela démontre une progression des performances lorsque la zone est couverte par plus de deux serveurs.

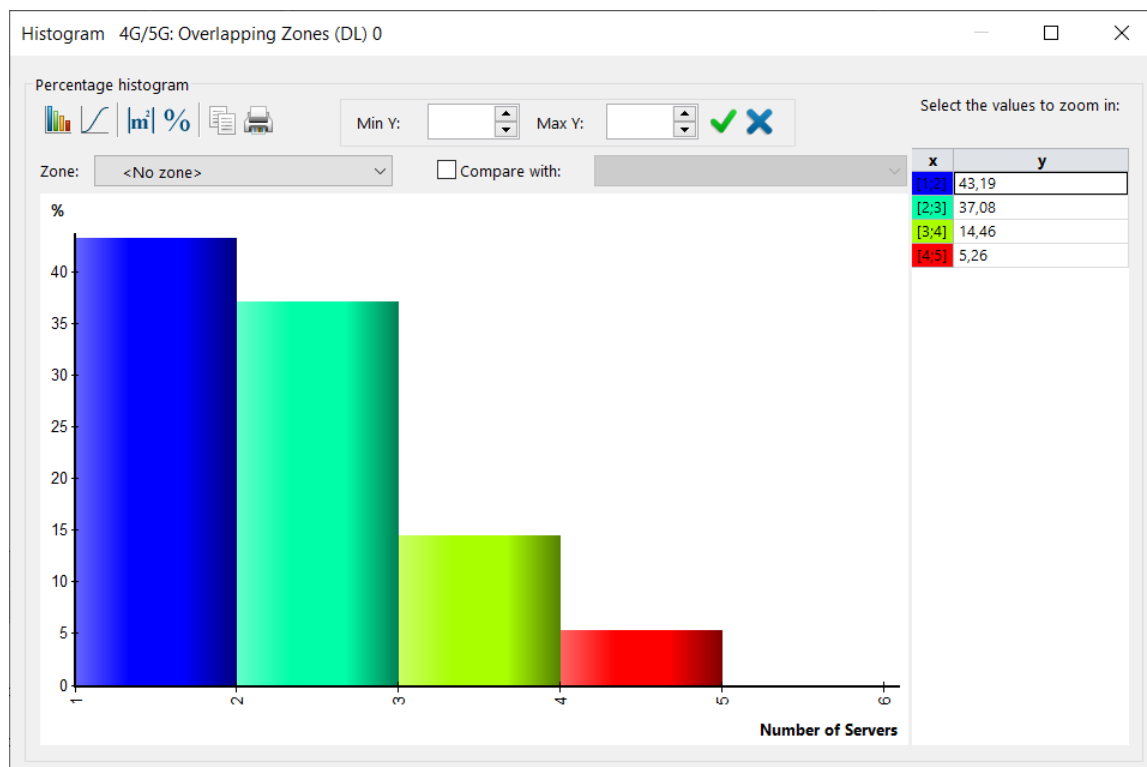


FIG. 3.13 : Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.

3.3.2 Optimisation

Dans cette partie, notre objectif sera d'optimiser la couverture et la capacité du réseau 5G dans la zone précédente afin d'atteindre les meilleurs résultats possibles.

Nous nous concentrerons sur le renforcement des points faibles en utilisant une variété de méthodes. Ces différentes approches seront mises en œuvre de manière efficace pour atteindre nos objectifs d'optimisation.

3.3.2.1 Changement de la hauteur des sites

La hauteur des sites a un impact significatif sur la couverture et la capacité d'un réseau 5G. Une hauteur peut améliorer la couverture, mais elle doit être équilibrée avec les considérations de capacité pour garantir des performances optimales du réseau. Une planification précise est nécessaire pour trouver le bon compromis entre la couverture étendue et la capacité suffisante pour répondre à la demande croissante des utilisateurs.

En fonction de ces informations et après avoir examiné les caractéristiques géographiques de la région, nous avons décidé de réduire la hauteur de ces sites de 50 m à 30 m, car cette hauteur

est la plus adaptée.

3.3.3 Planification automatique des cellules

L'ACP (Analyse de Composantes Principales) dans Atoll peut fournir des informations précieuses pour optimiser la couverture et la capacité du réseau 5G en identifiant les facteurs clés et en guidant les ajustements nécessaires pour améliorer les performances du réseau.

Cependant, il est important de compléter l'analyse par d'autres méthodes et outils d'optimisation pour obtenir une optimisation complète et efficace du réseau[59].



FIG. 3.14 : Optimisation de la couverture et de la capacité du réseau avec l'ACP.

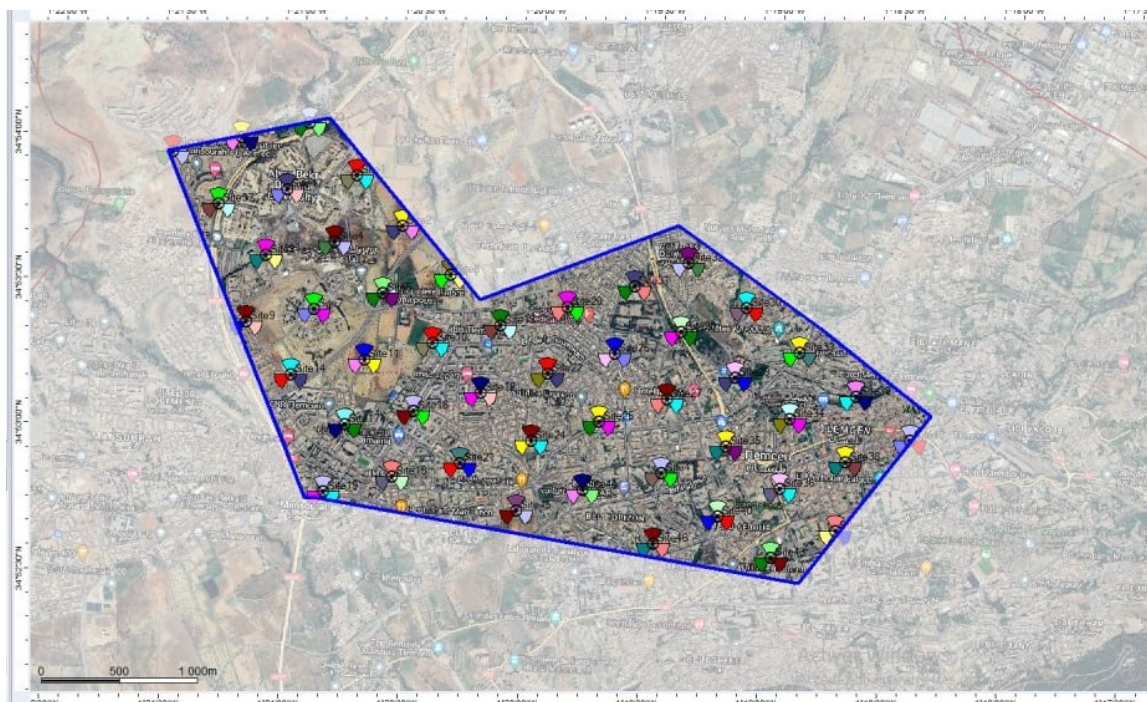


FIG. 3.15 : Résultat après l'optimisation.

Après le changement de hauteur des sites et l'activation de l'ACP (FIG. 3.14), nous pourrions obtenir les résultats dans la figure (FIG. 3.15).

3.3.4 Après optimisation

3.3.4.1 Prédiction du niveau de signal pour la couverture 5G

Après avoir effectué des améliorations à l'aide de l'ACP et en diminuant la hauteur des sites, nous remarquons que la zone cible est couverte par un signal très fort $\geq -61,99$ dBm.

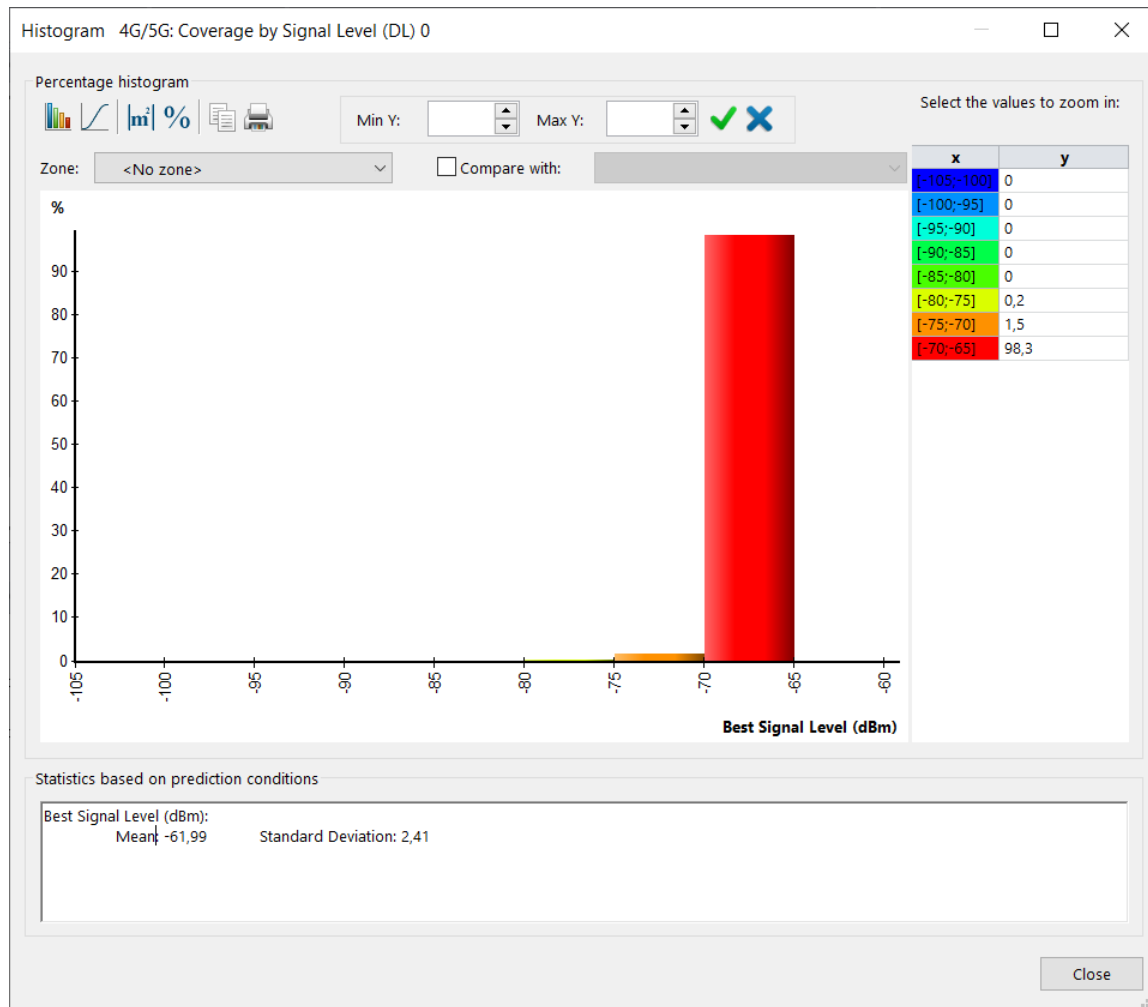


FIG. 3.16 : Résultat après l'optimisation.

D'après l'histogramme (FIG. 3.16), la zone examinée bénéficie d'une couverture excellente et suffisante, où la plage de valeurs $[-70;-65]$ couvre 98,3% de la zone.

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

Après l'optimisation, nous avons réussi à améliorer le niveau du PDSCH.

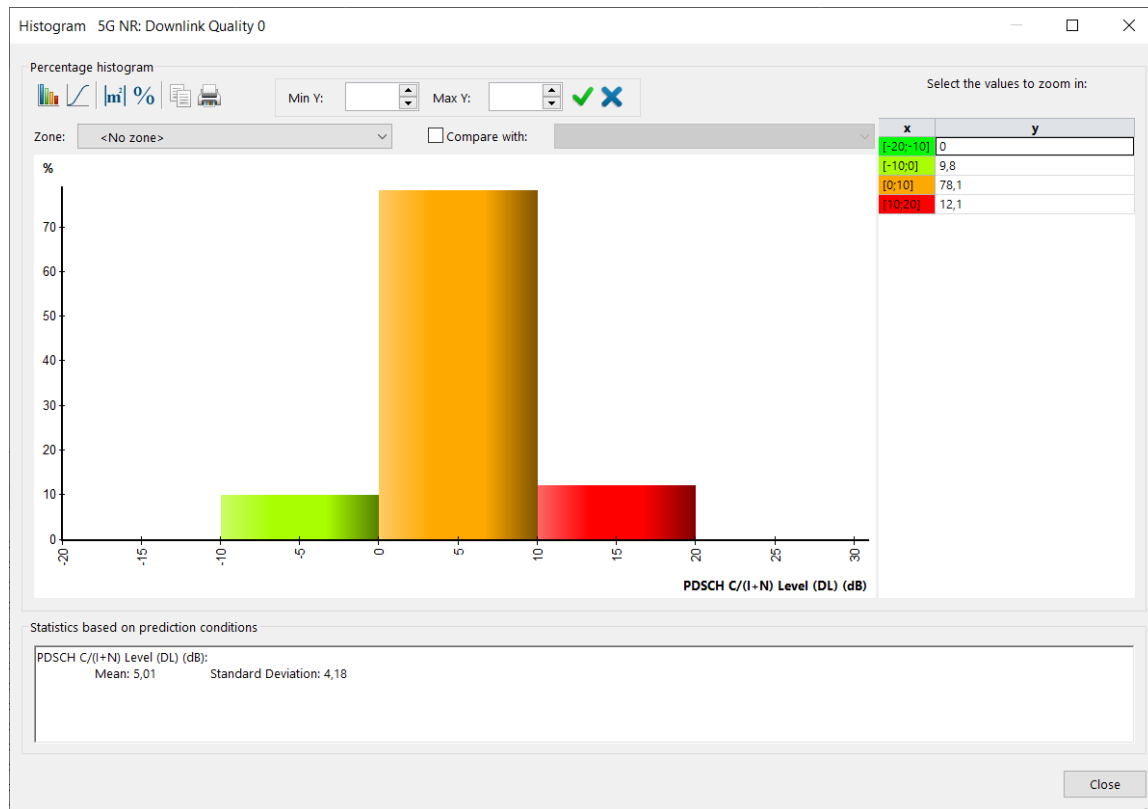


FIG. 3.17 : Prédiction de la qualité par PDSCH C/(I+N) de la liaison descendante.

D'après l'histogramme (voir FIG. 3.17), il couvrait 0,12% de la zone et maintenant, il couvre 12,1% (amélioration de 11,98%) dans l'intervalle [10,20].

3.3.4.3 Couverture 5G par SS-RSRP

Après avoir apporté des améliorations à l'aide de l'ACP et en diminuant la hauteur des sites, nous avons réussi à augmenter le niveau de SS-RSRP à -63,1 dBm comme le montre la Figure (FIG. 3.18).

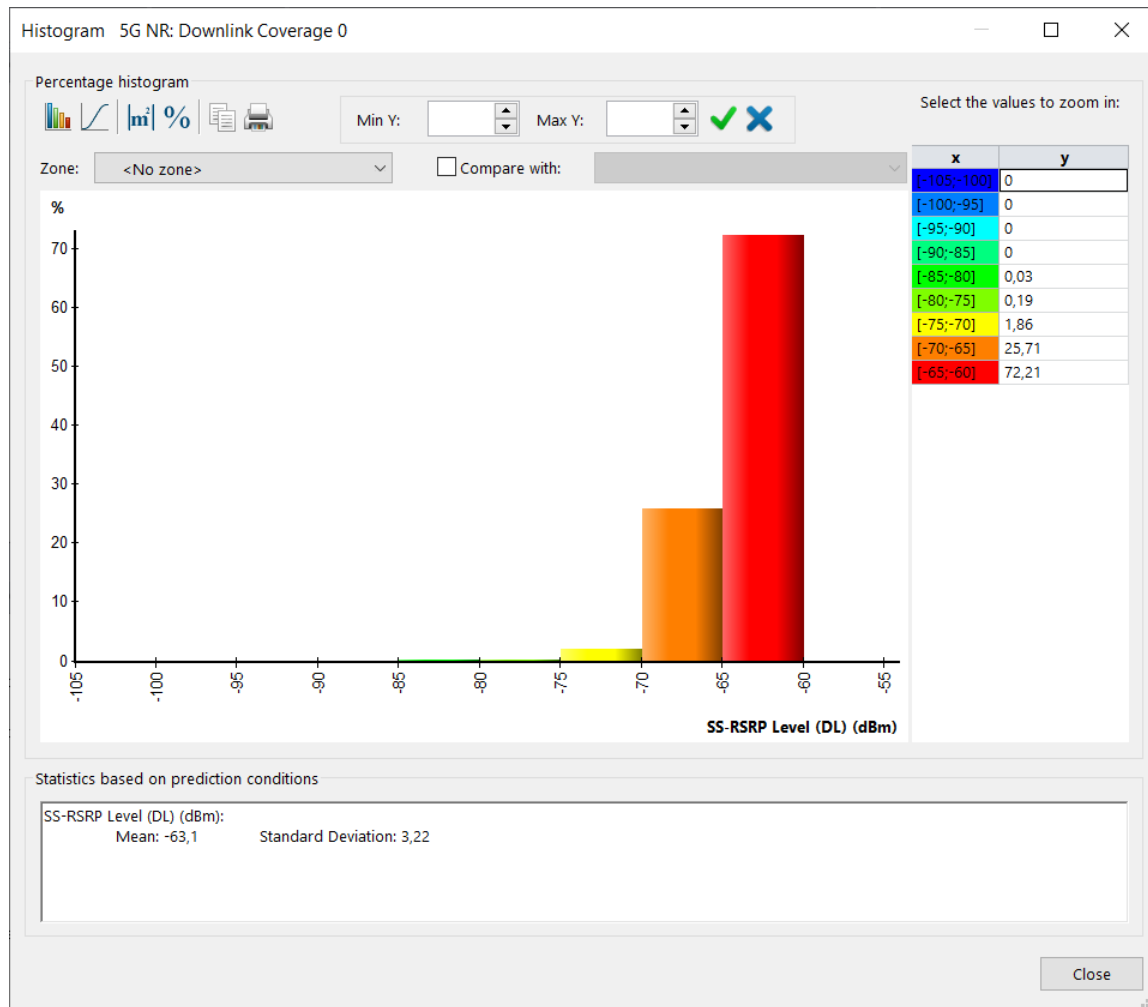


FIG. 3.18 : Prédiction de la Couverture par SS-RSRP.

D'après l'histogramme, le niveau de couverture est passé de 19,2% à 72,21% (amélioration de 53,01%) dans l'intervalle [-65;-60], ce qui montre que la zone cible à une couverture très élevée.

3.3.4.4 Qualité de la liaison montante

Les résultats statistiques fournis par l'histogramme (FIG. 3.19) indiquent que nous avons obtenu les mêmes résultats qu'avant l'optimisation.

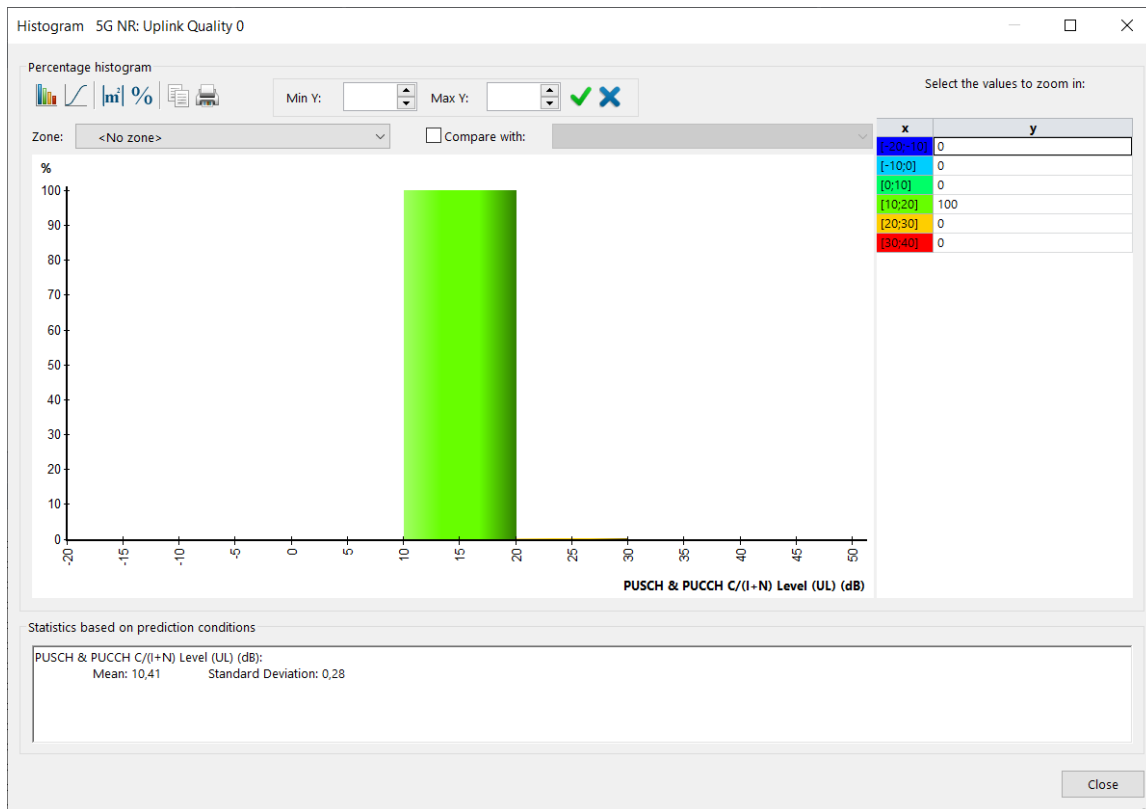


FIG. 3.19 : Prédiction de la qualité de la liaison montante.

3.3.4.5 Capacité 5G pour liaison descendante

Après l'optimisation, nous observons une augmentation du débit, atteignant 90 Mbit/s (FIG. 3.20).

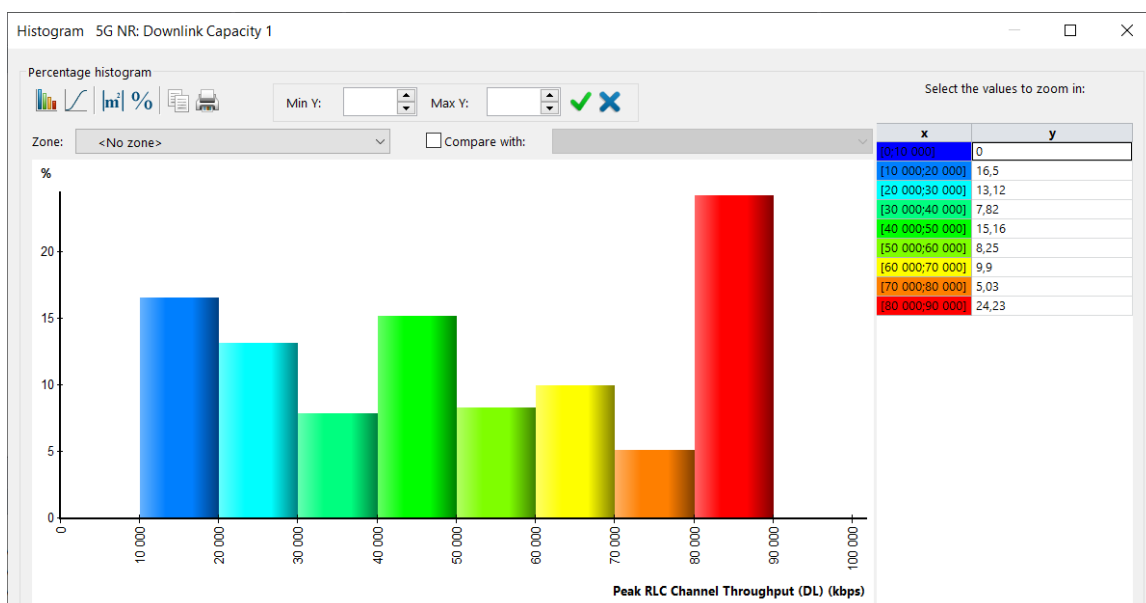


FIG. 3.20 : Prédiction de la capacité 5G pour liaison descendante.

3.3.4.6 Couverture dans les zones de chevauchement

Après l'optimisation, la couverture était de 5,26% de la zone, et maintenant, elle est de 5,61% dans l'intervalle $[4,5]$ (FIG. 3.21).

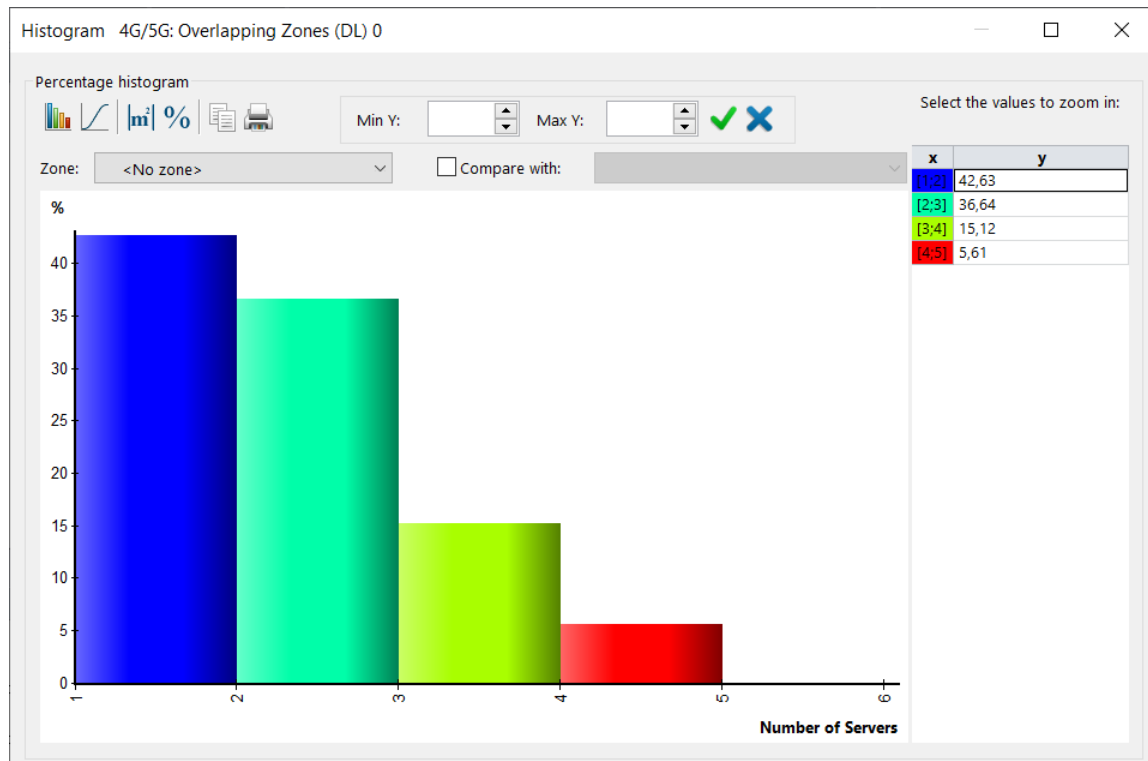


FIG. 3.21 : Prédiction de couverture 5G dans les zones de chevauchement.

3.3.5 Analyse de performance du réseau prévu

Le processus d'analyse de performance implique l'examen de points spécifiques tels que le profil utilisé, qui nous renseigne sur la perte de signal, les interférences et la réception des données. Dans cette mémoire, nous essayons d'examiner la perte de chemin et la réception du signal.

3.3.5.1 Perte de chemin 5G avec la distance

D'après les résultats de la planification de la couverture fondée sur le modèle de propagation d'Okumura-Hata et les estimations du budget de liaison, le diamètre de la cellule descendante est estimé à environ 0,338 km, tandis que celui de la cellule ascendante est estimé à environ **0,297 kilomètre**.

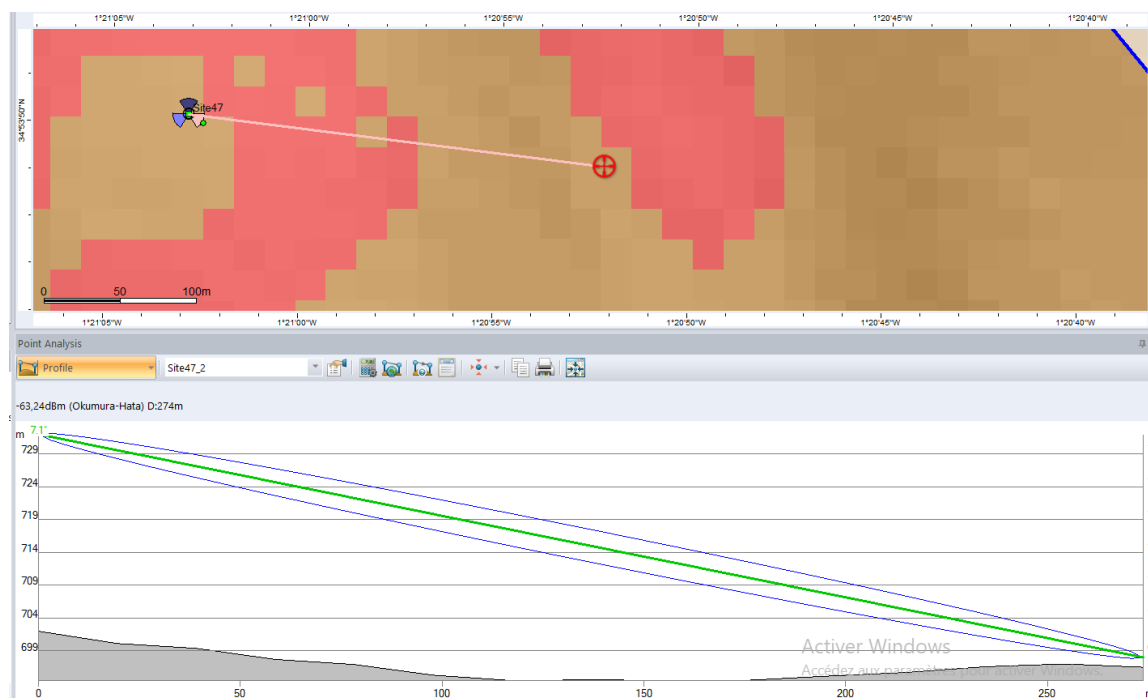


FIG. 3.22 : Perte de chemin 5G avec de la distance pour le site 47, secteur 2

Les résultats obtenus par l'outil de planification de réseau radio développé correspondent également davantage avec notre résultat de planification de 0,274 km. Cela indique que les résultats de la simulation dans la figure (FIG. 3.22) confirment l'obtention d'un niveau de signal approprié dans le rayon de cellule planifié, ce qui signifie que le signal peut servir pleinement l'utilisateur à cet emplacement.

3.3.5.2 Réception 5G

En se basant sur les résultats de simulation Atoll de l'analyse ponctuelle, l'UE peut capter différents signaux provenant de différents secteurs à un même point. Cependant, le signal le plus fort prévaudra à ce point et pourra servir l'utilisateur.

La Figure (FIG. 3.23) présente l'analyse ponctuelle du SS-RSRP dans la réception 5G :

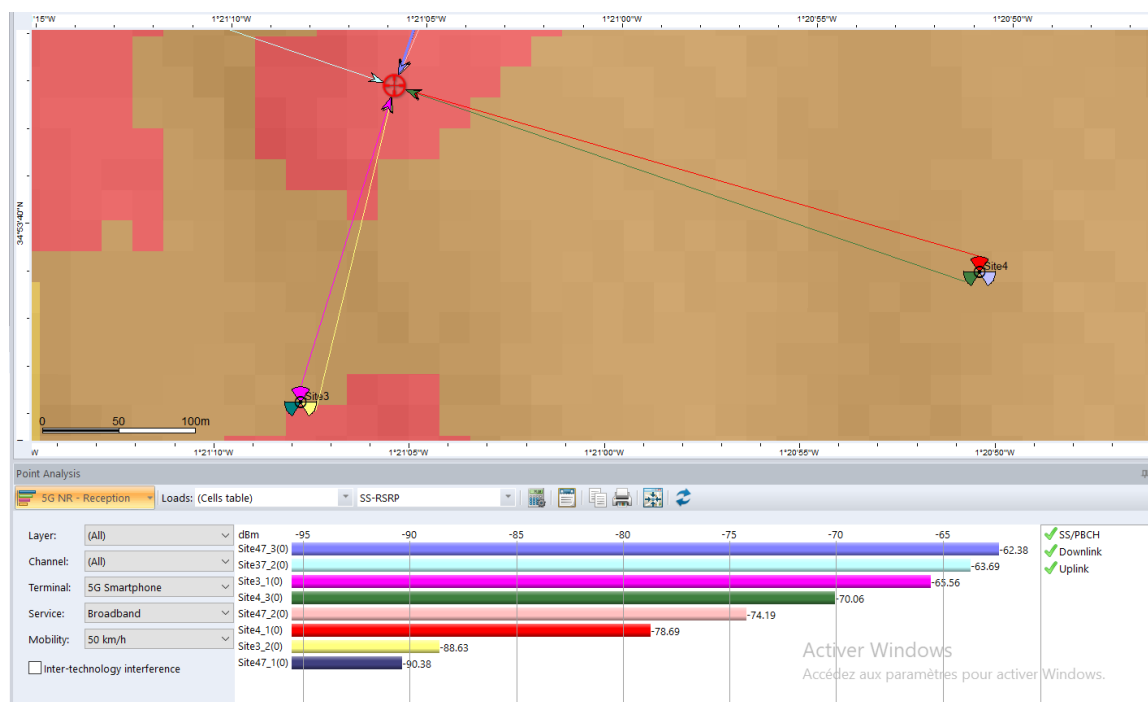


FIG. 3.23 : Présente l'analyse ponctuelle du SS-RSRP dans la réception 5G.

3.4 Simulation

La Figure (FIG. 3.24) indique la situation de l'abonné avec le site. S'il est connecté, il est affiché en vert ; sinon, il est affiché en rouge.

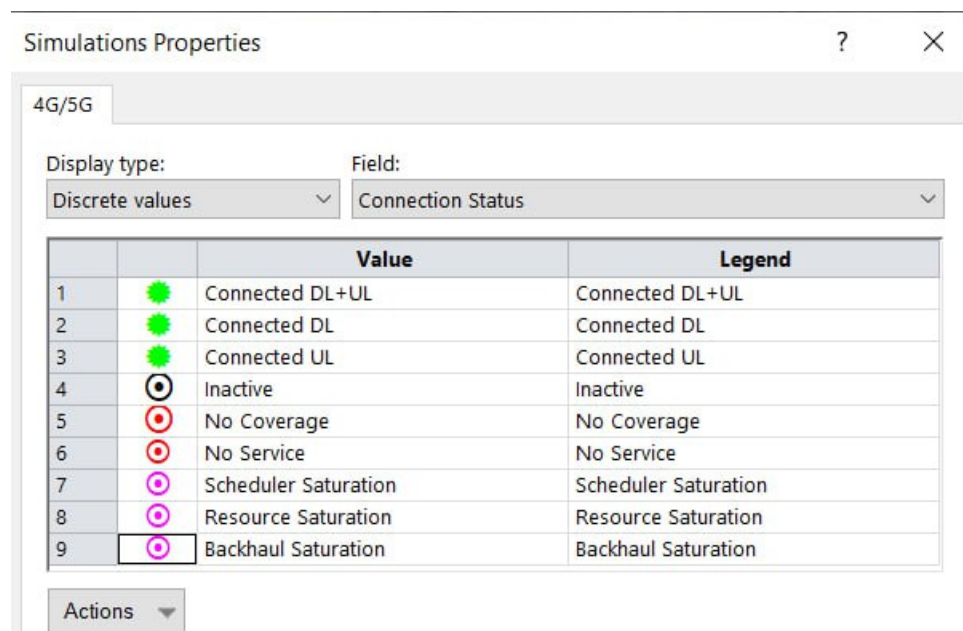


FIG. 3.24 : Répartition des utilisateurs de la 5G.

La Figure (FIG. 3.25) représente la distribution de la mobilité des équipements utilisateurs selon le service utilisé, à savoir la large bande, l'internet, l'appel vidéo et l'appel vocal.

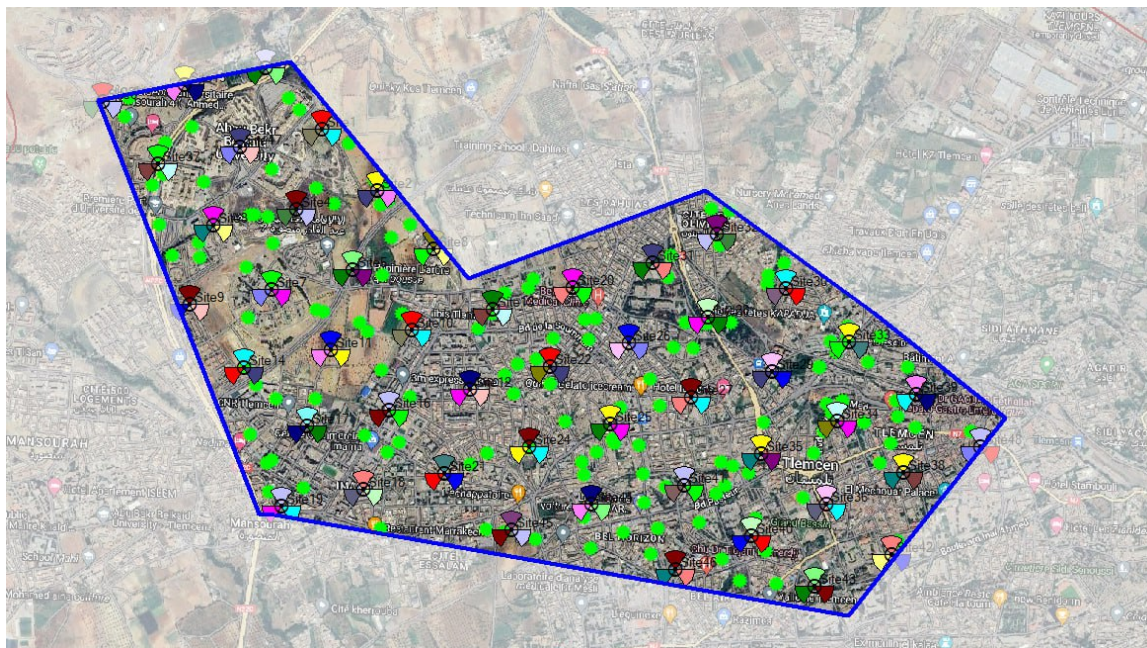


FIG. 3.25 : Répartition des utilisateurs de la 5G.

3.5 Comparaison

3.5.1 Comparaison avant et après l'optimisation

Le tableau (TAB. 3.2) récapitule nos résultats obtenus avant et après optimisation :

Métrique	Avant l'optimisation	Après l'optimisation
Le niveau de signal pour la couverture	83,7	98,3
PDSCH	0,12%	12,1%
SS-RSRP	19,2%	72,21%
Capacité 5G (DL)	80 Mb/s	90 Mb/s
Couverture dans les zones de chevauchement	5,26%	5,61%

TAB. 3.2 : Comparaison avant et après l'optimisation.

3.5.2 Comparaison avec les travaux connexes

Le tableau (TAB. 3.3) représente une comparaison des résultats finaux que nous avons obtenue en travaillant sur l'amélioration de la couverture et des performances du réseau 5G par rapport à d'autres travaux.

Projet	Région	Superficie (km ²)	Couverture (%)	Capacité (Mbit/s)
Notre projet	Tlemcen, man-sourah	7,785	98,3	90
projet 1 [28]	Chetouane	5,078	76	70
Projet 2 [60]	Lille	75,8363	82	50
Projet 3 [61]	Arada	9,91	97,7	59

TAB. 3.3 : Comparaison avec les travaux connexes

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déployé un réseau 5G dans la région mentionnée précédemment, en nous basant sur les calculs obtenus au chapitre précédent et sur les fonctionnalités d'Atoll pour ce réseau.

Ensuite, nous avons discuté des résultats obtenus pour les améliorer en utilisant les données recueillies lors de notre stage au centre de télécommunications de MOBILIS, en plus de l'utilisation de la technique d'optimisation automatique Atoll ACP.

Enfin, une étude comparative a été présentée pour valider nos résultats.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

En conclusion de ce mémoire, il convient de souligner les points clés et les informations que nous avons présentées, ainsi que les résultats auxquels nous sommes parvenus grâce à nos études théoriques et appliquées. Cela, sans oublier l'expansion de notre connaissance et de notre maîtrise de l'utilisation du programme Atoll, qui a été la pierre angulaire de ce mémoire.

Le premier point mis en avant dans ce mémoire à travers la partie théorique est la définition et la présentation du réseau de cinquième génération en tant que réseau moderne répondant à tous les besoins par rapport aux générations précédentes, capable de suivre les dernières technologies dans divers domaines, grâce aux technologies qui le soutiennent telles que la technologie massive MIMO, le beamforming, et l'utilisation des ondes millimétriques.

Le deuxième point tiré de notre étude dans la partie pratique que nous avons menée en utilisant le logiciel Atoll est l'exploration de la capacité d'Atoll dans le processus de planification et de simulation des différentes technologies de communication.

Nous avons également conclu que ce réseau est capable de couvrir la région de Tlemcen, de manière excellente et avec une très haute capacité. Ceci est basé sur les résultats de la simulation, où le niveau de signal de couverture de la zone cible a atteint -61.99 dBm, assurant ainsi la sécurité et la fiabilité de la connexion, en plus de fournir des services de haute qualité aux utilisateurs.

De plus, les prévisions de couverture en utilisant SS-RSRP ont confirmé une excellente qualité de signal estimée à -63.10 dBm.

Ensuite, les prévisions de capacité ont montré des taux très élevés, atteignant 90 Mbit/s dans une large plage, ce qui permet de fournir un excellent service aux utilisateurs, notamment en ce qui concerne l'accès à Internet, les appels vocaux et la vidéo.

Enfin, nous avons comparé notre recherche avec des études similaires qui ont contribué à s'assurer que notre projet offre des résultats allant de bons à excellents en termes de signal, de débit de données et de qualité.

Perspectives

Comme perspectives et pour des prochaines études et recherches, il peut être considéré l'étude de :

- Il serait intéressant d'envisager le déploiement d'un réseau 4G/5G qui intègre à la fois des macro cellules et des micro cellules, tout en augmentant la densité du réseau avec un nombre réaliste de sites et de cellules, afin d'obtenir des résultats plus significatifs.
- Il serait également intéressant d'explorer les fonctionnalités de la technologie beamforming et de la technologie massive MIMO offertes par Atoll.

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 éd. Pearson Education India, 2010.
- [3] SELECTRA, “Qu’est-ce qu’un réseau de téléphonie mobile?”, Year, Accessed : May 14, 2024.
- [4] L. GUEVARA et F. AUAT CHEEIN, “The role of 5G technologies : Challenges in smart cities and intelligent transportation systems”, *Sustainability*, t. 12, n° 16, p. 6469, 2020.
- [5] X. LIN et N. LEE, *Introduction to 5G and Beyond*. Springer, 2021, p. 1-25.
- [6] B. REZGUI, “Conception d’un système de communication sans fils multi-porteuses à base de Bancs de filtres FBMC”, 2019.
- [7] E. MOUTALY, “Etude d’une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G”, thèse de doct., Université Paris-Est ; Université de Nouakchott, 2019.
- [8] E. DAHLMAN, S. PARKVALL et J. SKOLD, *5G NR : The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
- [9] S. AGRAWAL, N. H. MOHAJER, D. BARRADAS, J. GIRÃO et R. L. AGUIAR, “5G Security and Privacy : A Research Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, t. 22, n° 1, p. 105-123, 2020.
- [10] S. WANG, M. HAENGGI et C. J. ZHANG, “5G Spectrum and Frequency Allocation : An Overview”, *IEEE Communications Magazine*, t. 55, n° 4, p. 68-75, 2017.
- [13] N. A. MOHAMMED, A. M. MANSOOR et R. B. AHMAD, “Mission-critical machine-type communication : An overview and perspectives towards 5G”, *IEEE Access*, t. 7, p. 127 198-127 216, 2019.
- [15] A. NGOM, “Conception de petits réseaux d’antennes reconfigurables ou” Small Cells” pour le standard 5G”, thèse de doct., COMUE Université Côte d’Azur (2015-2019) ; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2019.
- [16] 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.
- [18] X. ZHANG, A. KUNZ et S. SCHRÖDER, “Overview of 5G security in 3GPP”, in *2017 IEEE conference on standards for communications and networking (CSCN)*, IEEE, 2017, p. 181-186.
- [19] A. DERRIDJ et N. GHERRAS, *Conception et développement d’un outil de Dimensionnement de réseau Packet Core Virtualisé dédié pour la 4G et 5G*, Université Mouloud-Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

- [20] B. A. DEHEMCHI MARWA, “Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G”, 2019.
- [21] A. DETTI, “Functional architecture”, *MA Marsan, NB Melazzi and S. Buzzi, “5g Italy White Book : From Research To Market*, p. 59-68, 2018.
- [22] H. NAHIDA et H. SARRA, “Étude et conception d’un système d’antenne large bande pour les applications 5G”, Année universitaire : 2021-2022, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2022.
- [24] F. LAUNAY et A. PÉREZ, *LTE-Advanced Pro : une étape vers le réseau de mobiles 5G*. ISTE Group, 2019.
- [25] B. HAMAMI, “Intégration du système hybride RF/VLC dans les réseaux d’accès 5G”, 2023.
- [26] A. MOUSSAOUI, F. DAOUDI et A. GACEMI, “Etude et simulation de la transmission radio des réseaux 5G.”, 2020.
- [27] K. MOHAMDI, A. MAHDJOUBI, M. N. E. TEMMAR et Z. KECHIDI, “Étude du scénario de déploiement du réseau”, *Nom du journal*, 2023.
- [28] B. A. A. MOUMEN et W. HACHEMI, “Etude et déploiement de réseaux 5G via l’outil de planification radio <atoll>”, mém. de mast., Université Tlemcen, 2023.
- [29] Y. GUERSES, M. OUAZIZ, M. TOUNSI et AL., “Prédiction des performances de réseaux 5G”, thèse de doct., Université A. Mira-Bjaia, 2021.
- [31] M. MAS FERRER, “Network Deployment studies in 5G using ATOLL radio planning tool”, mém. de mast., Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [32] F. LAUNAY, *NG-RAN et 5G-NR : L’accès radio 5G et l’interface radioélectrique*. ISTE Group, 2021.
- [33] A. ADJDIR et H. AYAD, “Étude d’un réseau 5G pour la transmission de petits paquets dans l’internet des objets”, thèse de doct., Université (ou Institution).
- [34] F. RUSEK, D. PERSSON, B. K. LAU et al., “Scaling up MIMO : Opportunities and challenges with very large arrays”, *IEEE signal processing magazine*, t. 30, n° 1, p. 40-60, 2012.
- [35] V. INZILLO, F. DE RANGO, L. ZAMPOGNA et A. A. QUINTANA, “Smart Antenna Systems Model Simulation Design for 5G Wireless Network Systems”, *Array Pattern Optim*, p. 1-21, 2019.
- [37] T. S. RAPPAPORT, S. SUN, R. MAYZUS et al., “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular : It will work!”, *IEEE access*, t. 1, p. 335-349, 2013.
- [38] W. FERHI, “Réseaux d’accès multiples non orthogonaux NOMA pour la 5G”, thèse de doct., Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2019/2020.
- [39] H. HOLMA et A. TOSKALA, *LTE for UMTS : Evolution to LTE-advanced*. John Wiley & Sons, 2011.
- [40] 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.
- [41] T. RIHONEN, S. WERNER et R. WICHMAN, “Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays”, *IEEE transactions on signal processing*, t. 59, n° 12, p. 5983-5993, 2011.
- [42] J. G. PROAKIS et M. SALEHI, *Digital communications*. McGraw-hill, 2008.

- [43] K. KABORE et J. L. PEREIRA, “Etude de Passage de la 4 vers la 5G”, *Revue Scientifique et Technique de l’Ingénieur*, t. 22, n° 1, p. 25-34, 2021.
- [48] MPirical, “5G is almost here”, *MPirical*, avr. 2019, Consulté le 23 mai 2024.
- [49] K. RAMDANE, “Principe et méthodologie de planification d’un réseau de nouvelle génération”, mém. de mast., Université Larbi Tébessi, Tébessa, 2022.
- [50] H. TERDAYET et M. BOUJNAH, “Calibration de modèles de propagation pour les réseaux GSM, WCDMA et LTE”, t. 2013, mémoire de master, Sciences et technologies de l’Information et de la Communication, Tunisie, 2012.
- [51] A. ZAIZ, “Optimisation des modèles de perte dans un canal physique pour la communication mobiles”, Mémoire de Fin d’Études En vue de l’obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2019.
- [52] D. HICHAOUI et S. MOUDIR, “Dimensionnement d’un réseau 4G LTE”, mém. de mast., Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [53] 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.
- [54] I. ZENATI et O. BOUFERSAKHA, “Dimensionnement et planification d’un réseau LTE”, mém. de mast., Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen, juin 2017.
- [55] S. KHELIFI et A. HADDAD, “Dimensionnement et planification d’un réseau mobile 4G/LTE”, mém. de mast., Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2018.
- [56] Y. OUARI, “Modèle de propagation et de couverture de la 4G”, mém. de mast., Université A/Mira de Bejaïa, 2020.
- [57] 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.
- [58] ETSI, “138 901 v14.0.0, 5G ; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100GHz”, ETSI, 3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14, 2017, Technical Report, rapport technique.
- [59] J.-M. PICARD, Z. ALTMAN, S. B. JAMAA et al., “Automatic cell planning strategies for UMTS networks”, *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, t. 1, n° 1, p. 8-17, 2005.
- [60] T. W. EFREM, “5G New Radio Network Dimensioning and Optimization : A Case Study in Arada Sub-City Addis Ababa”, Thèse de doctorat, Université, 2022.
- [61] N. LAOUEL et A. OULDJA, “5G New Radio Network Dimensioning and Optimization : A Case Study in Arada Sub-City Addis Ababa”, Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, sept. 2020.

Webographie

- [11] A. MICHAUD, *Quelle est la différence entre la 3G, la 4G et la 5G ?*, Accessed : 2024-05-22, 2020. adresse : <https://untelephone.com/difference-3g-4g-5g/amp/>.
- [12] CADENCE, *5G eMBB, URLLC, and mMTC : Service Categories for a Smarter Tomorrow*, Accessed : INSERT_DATE, 2023. adresse : <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-5g-embb-urllc-and-mmtc-service-categories-for-a-smarter-tomorrow>.
- [14] TELCOMA GLOBAL, *Support of Ultra-reliable and Low-Latency Communications (URLLC) in NR*, <https://telcomaglobal.com/p/ultra-reliable-low-latency-communications-urllc-nr>, Accessed : 2024-05-22, 2024.
- [17] S. M. BLUST, *Ouvrir la voie à la 5G, En route vers les IMT-2020 (5G)*, Recommendation ITU, 2017.
- [23] IPLOOK 5GC - Solutions réseau 5G, <https://fr.iplook.com/produit/5gc/nrf.html>, Consulté le 5 avril 2023.
- [30] *Numérologie et bande de fréquences 5G : Principes de fonctionnement*, <https://youtu.be/dXbVGXjIzW8>.
- [36] STL TECH, *How Does Beamforming Improve Network Service ?*, <https://stl.tech/blog/how-does-beamforming-improve-network-service/>.
- [44] N. CVEJIC et S. KRCO, *NSA architecture for 5G system*, https://www.researchgate.net/figure/NSA-architecture-for-5G-system_fig1_352802141, Consulté le 23 mai 2024, 2021.
- [45] Alepo, <http://alepo.com/>, Consulté le 23 mai 2024.
- [46] *Stand-Alone (SA) architecture for 5G system : Overall 5G architecture*, https://www.researchgate.net/figure/Stand-Alone-SA-architecture-for-5G-system-Overall-5G-architecture_fig2_352802141, Consulté le 23 mai 2024.
- [47] *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, <https://www.3gpp.org/>, Consulté le 23 mai 2024.

Annexes

Annexe A

Présentation de logiciel atoll

A.1 Présentation de logiciel atoll

Atoll, un logiciel adaptable et évolutif, accompagne les opérateurs tout au long du cycle de vie de l'ingénierie. Il offre des fonctionnalités de planification et d'optimisation, ainsi qu'une prise en charge de diverses technologies, incluant la gestion de la plupart des systèmes cellulaires tels que GSM/GPRS/EDGE, TDMA, UMTS, CDMA, Wi-Fi, WiMAX, LTE et 5G.

En exploitant une variété de données en entrée, Atoll permet de sélectionner et de réaliser des projets en définissant des paramètres tels que le modèle de propagation, le type d'antennes, ou encore les caractéristiques du site. Une fois le réseau déployé, Atoll offre la possibilité d'effectuer différentes prédictions, parmi lesquelles :

- la couverture par niveau de champ,
- la couverture par émetteur,
- la prédiction de la capacité de la cellule,
- le débit moyen,
- la couverture par niveau de C/I ,
- la zone de recouvrement.

Parmi ses fonctionnalités clés :

- des options avancées de conception de réseau, comprenant des performances de calcul optimisées, une planification automatique de codes/fréquences, et le support de diverses technologies d'accès et de réseaux multi-technologies.

Elle se distingue par une architecture adaptable et ouverte, avec la capacité de prendre en charge les formats de fichiers standards et les bases de données d'autres logiciels.



Atoll

Wireless Network Engineering Software

Démarrage de l'application...

FIG. 1.1 : Interface de démarrage du logiciel ATOLL [3].

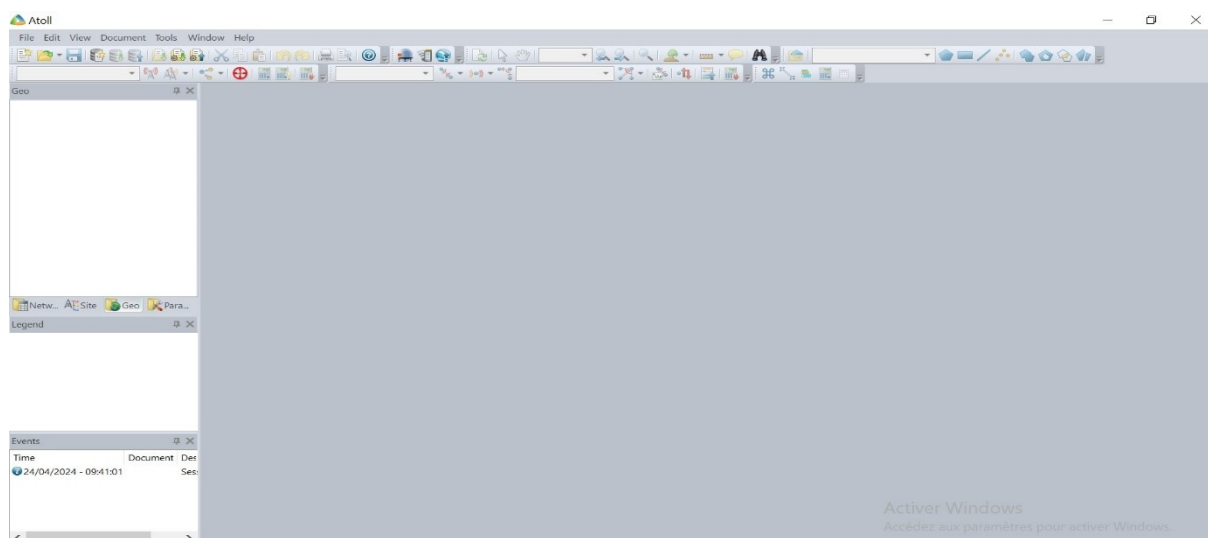


FIG. 1.2 : Page principale du logiciel Atoll.

Atoll est constitué d'une base centrale ainsi que de modules supplémentaires, comme le module LTE et le module de calibration des modèles de propagation. La figure (FIG. 1.1) présente l'interface de démarrage et l'environnement de travail d'Atoll est présenté dans la figure (FIG. 1.2).

Annexe B

Tableau

B.1 Sites

Nom	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Hauteur du support (m)
Site1	1°20'45,85"W	34°53'53,88"N	693	50
Site10	1°20'25,07"W	34°53'19,93"N	734	50
Site11	1°20'41,89"W	34°53'15,89"N	734	50
Site12	1°20'12,36"W	34°53'10,02"N	746	50
Site13	1°20'8,27"W	34°53'24,05"N	730	50
Site14	1°21'0,13"W	34°53'12,07"N	743	50
Site15	1°21'15,18"W	34°54'0,6"N	678	50
Site16	1°20'29,09"W	34°53'5,72"N	750	50
Site17	1°20'46,13"W	34°53'2,37"N	753	50
Site18	1°20'33,86"W	34°52'51,85"N	773	50
Site19	1°20'50,85"W	34°52'48,29"N	770	50
Site2	1°20'33,71"W	34°53'43,73"N	709	50
Site20	1°19'51,57"W	34°53'28,42"N	733	50
Site21	1°20'16,85"W	34°52'55,31"N	774	50
Site22	1°19'55,7"W	34°53'14,49"N	747	50
Site23	1°20'58,18"W	34°54'4,1"N	664	50
Site24	1°19'59,22"W	34°53'0,49"N	766	50
Site25	1°19'42,36"W	34°53'5,14"N	767	50
Site26	1°19'39,19"W	34°53'19,33"N	748	50
Site27	1°19'25,59"W	34°53'10,26"N	769	50
Site28	1°19'22,73"W	34°53'24,28"N	734	50
Site29	1°19'8,88"W	34°53'15,44"N	747	50
Site3	1°21'7,82"W	34°53'36,47"N	722	50
Site30	1°19'6,56"W	34°53'29,8"N	713	50
Site31	1°19'34,98"W	34°53'33,32"N	725	50
Site32	1°19'21,71"W	34°53'38,67"N	706	50
Site33	1°18'52,77"W	34°53'21,13"N	737	50
Site34	1°18'54,55"W	34°53'7,23"N	788	50
Site35	1°19'10,33"W	34°53'1,09"N	778	50

Site36	1°18'56,28"W	34°52'52,87"N	801	50
Site37	1°21'20,1"W	34°53'46,77"N	706	50
Site38	1°18'40,26"W	34°52'58,91"N	812	50
Site39	1°18'38,26"W	34°53'12,46"N	759	50
Site4	1°20'50,59"W	34°53'39,84"N	713	50
Site40	1°19'11,71"W	34°52'46,71"N	797	50
Site41	1°19'26,21"W	34°52'54,99"N	780	50
Site42	1°18'41,94"W	34°52'44,58"N	816	50
Site43	1°18'57,86"W	34°52'38,55"N	810	50
Site44	1°19'45,72"W	34°52'50,99"N	792	50
Site45	1°20'2,18"W	34°52'46,06"N	783	50
Site46	1°19'27,46"W	34°52'40,39"N	811	50
Site47	1°21'3"W	34°53'50,27"N	702	50
Site48	1°18'24,21"W	34°53'3,86"N	792	50
Site5	1°20'38,04"W	34°53'29,77"N	721	50
Site6	1°21'32,18"W	34°53'57,15"N	699	50
Site7	1°20'55,04"W	34°53'25,89"N	736	50
Site8	1°20'21,29"W	34°53'34,02"N	715	50
Site9	1°21'12,11"W	34°53'22,62"N	736	50

B.2 Emetteur

Site	Transmitter	Antenna	Azimuth(°)
Site1	Site1_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site1	Site1_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site1	Site1_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site10	Site10_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site10	Site10_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site10	Site10_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site11	Site11_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site11	Site11_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site11	Site11_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site12	Site12_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site12	Site12_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site12	Site12_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site13	Site13_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site13	Site13_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site13	Site13_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site14	Site14_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site14	Site14_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site14	Site14_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site14	Site14_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site15	Site15_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site15	Site15_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120

Site15	Site15_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site16	Site16_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site16	Site16_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site16	Site16_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site17	Site17_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site17	Site17_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site17	Site17_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site18	Site18_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site18	Site18_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site18	Site18_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site19	Site19_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site19	Site19_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site19	Site19_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site2	Site2_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site2	Site2_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site2	Site2_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site20	Site20_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site20	Site20_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site20	Site20_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site21	Site21_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site21	Site21_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site21	Site21_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site22	Site22_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site22	Site22_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site22	Site22_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site23	Site23_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site23	Site23_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site23	Site23_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site24	Site24_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site24	Site24_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site24	Site24_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site25	Site25_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site25	Site25_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site25	Site25_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site26	Site26_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site26	Site26_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site26	Site26_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site27	Site27_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site27	Site27_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site27	Site27_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site28	Site28_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site28	Site28_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site28	Site28_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site29	Site29_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site29	Site29_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120

Site29	Site29_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site3	Site3_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site3	Site3_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site3	Site3_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site30	Site30_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site30	Site30_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site30	Site30_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site31	Site31_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site31	Site31_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site31	Site31_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site32	Site32_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site32	Site32_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site32	Site32_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site33	Site33_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site33	Site33_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site33	Site33_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site34	Site34_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site34	Site34_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site34	Site34_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site35	Site35_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site35	Site35_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site35	Site35_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site36	Site36_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site36	Site36_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site36	Site36_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site37	Site37_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site37	Site37_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site37	Site37_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site38	Site38_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site38	Site38_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site38	Site38_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site39	Site39_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site39	Site39_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site39	Site39_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site4	Site4_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site4	Site4_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site4	Site4_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site40	Site40_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site40	Site40_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site40	Site40_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site41	Site41_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site41	Site41_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site41	Site41_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site41	Site41_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site42	Site42_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0

Site42	Site42_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site42	Site42_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site43	Site43_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site43	Site43_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site43	Site43_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site44	Site44_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site44	Site44_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site44	Site44_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site45	Site45_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site45	Site45_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site45	Site45_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site46	Site46_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site46	Site46_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site46	Site46_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site47	Site47_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site47	Site47_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site47	Site47_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site48	Site47_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site48	Site47_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site48	Site47_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site5	Site5_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site5	Site5_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site5	Site5_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site6	Site6_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site6	Site6_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site6	Site6_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site7	Site7_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site7	Site7_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site7	Site7_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site8	Site8_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site8	Site8_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site8	Site8_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240
Site9	Site9_1	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	0
Site9	Site9_2	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	120
Site9	Site9_3	65deg 18dBi 4Tilt 1900/2100MHz	240