

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 : BELLAHCENE Meriem

BELGAID Nihed

Sujet

Planification radio d'un réseau 5G selon la taille d'une cellule

Soutenu publiquement, le 12 / 06 /2024 , devant le jury composé de :

M/ A.DJEMAI	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mme/Y. BOUCHENAK KHELLADI	MAB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M/ R.MERZOUGUI	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme/ K.BENHEDDI	Ingénieure	Ooredoo Alger	Co-encadrante

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicace

“

Je tiens à dédier ce projet de fin d'études à toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce parcours :

À ma mère, Pour sa patience, son soutien, son affectation et son sacrifice durant toutes ces années. Pour m'avoir poussé jusqu'au bout et pour avoir Été toujours Un confort moral dans les moments les plus difficiles, Partagé mes joies et mes peines.

À mon père, qu'Allah lui accorde le plus vaste de ses paradis.

À ma sœur Nadjet, Je te souhaite sincèrement le succès et le bonheur dans tous les aspects de ta vie. Aucune dédicace ne pourrait véritablement exprimer l'amour profond, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ta présence dans ma vie est une source de joie et d'inspiration, et je suis reconnaissante de t'avoir comme sœur. Que ton chemin soit parsemé de réussite, de bonheur et d'épanouissement. Avec tout mon amour et mon soutien.

À mes chers frères et sœurs, En leur souhaitant la réussite dans leurs projets de vie.

À ma petite nièce, Amira à qui je souhaite beaucoup de bonheur.

À tous mes proches, mes tantes, et tous ceux qui comptent pour moi et (pour qui je compte aussi), en espérant être toujours à la hauteur de leurs attentes.

À mon binôme, Meriem pour son encouragement durant toutes ces années.

À tous mes proches : Manel, Rania, Ines et Ihsen. À tous les membres de ma famille BELGAID. À toutes les personnes qui m'ont encouragé, merci d'être toujours là pour moi. Je vous dis merci.

”

- Nihed BELGAID

“

Je tiens à exprimer mes chaleureuses dédicaces

À mes chers parents, que Dieu les bénissent, qui ont su me guider par leurs précieux conseils, qui m'ont tout donné, qui ont été toujours là pour moi et leurs encouragements continuels ; merci maman et merci papa. J'espère qu'un jour, je serai capable de leurs donner au moins le minimum, car quoiqu'on face on arrivera jamais de leur rendre tout.

À ma chère sœur Ines et mes frères fathallah et charaf -Eddine qui m'ont encouragé sans cesse et cru en moi, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

À mes chères tantes Amina, Atika, Fatima sont mes deuxièmes mamans, votre présence encourageante et vos mots d'encouragement ont été une source de motivation constante pour moi

À ma cousine IHCEN, ce n'est ma cousine, c'est ma sœur, merci d'être toujours à mes côtés par ton amour.

À mon binôme Nihed, pour sa patience et sa Persévérance, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

À A mes amis, depuis toujours, Manel, Rania, khadidja, Marwa, merci d'être une source constante de soutien et d'encouragement.

À tous ceux qui m'ont prêté aide, soutien et encouragement de Près ou de loin.

”

- Meriem BELLAHCENE

Remerciements

“

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout-puissant et miséricordieux, qui nous a donné de la force et de la patience pour accomplir ce modeste travail, mais aussi nos parents pour tous leurs efforts depuis nos naissances à ce jour. Vous représentez tout pour nous.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Monsieur MERZOUGUI Rachide, notre encadreur, pour son soutien constant, ses conseils avisés et son expertise précieuse tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa patience, son dévouement et son encouragement ont été d'une importance capitale pour la réussite de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à Monsieur DJEMAI Abderrazak. pour avoir accepté de présider notre jury. Sa présence et son soutien ont été d'une valeur inestimable pour la réussite de ce projet. Nous souhaitons également adresser nos remerciements les plus chaleureux à Madame BOUCHENAK KHELLADI Yasmina, qui a accepté d'être examinatrice de ce travail. Sa contribution et son expertise ont enrichi cette expérience académique. Merci infiniment pour votre engagement et pour votre soutien.

Nous tenons également à remercier chaleureusement Madame BENHEDDI Khadidja, notre Co-encadrante, pour son soutien et ses précieuses contributions qui ont enrichi ce travail. Ses conseils éclairés et son engagement ont grandement contribué à l'avancement de ce projet.

Nous remercions également Monsieur HATHOUT Tahar, directeur de la CASNOS, pour son aide durant les phases difficiles rencontrées pendant la réalisation de ce mémoire de recherche

Enfin, nous tenons à remercier Monsieur « Mahmoud Sharara » Ingénieur Devops égyptien, pour son assistance technique et ses conseils pertinents qui ont enrichi notre travail et ont contribué à

son excellence.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

”

Résumé

Ce travail de fin d'études se concentre sur la planification d'un réseau **5G**, crucial dans le contexte de l'évolution des technologies mobiles. Face aux limites des réseaux **4G**, la technologie **5G** se positionne comme une réponse aux besoins en mobilité accrue, latence réduite, fiabilité améliorée et débits de données plus élevés. Cependant, l'expansion des réseaux radio et l'avancée des technologies sans fil rendent la planification de ces réseaux de plus en plus complexe. Pour cela, une analyse approfondie de la couverture et de l'optimisation des réseaux radio **5G** est indispensable avant leur déploiement.

En utilisant le logiciel **Atoll** (version **3.4.0**), nous analysons et simulons les paramètres clés de la planification des réseaux **5G**, notamment la couverture et la qualité.

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

Abstract

This thesis focuses on the planning of a **5G** network, crucial in the context of the evolution of mobile technologies. Faced with the limitations of **4G** networks, **5G** technology is positioning itself as a response to the need for greater mobility, reduced latency, improved reliability, and higher data rates. However, the expansion of radio networks and advances in wireless technologies are making network planning increasingly complex. For this reason, an in-depth analysis of the coverage and optimization of **5G** radio networks is essential prior to deployment.

Using **Atoll** software (version **3.4.0**), we analyze and simulate the key parameters of **5G** network planning, including coverage and quality.

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

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تخطيط شبكة الجيل الخامس، وهو أمر بالغ الأهمية في سياق تطور تقنيات الهاتف المحمول. في مواجهة القيود المفروضة على شبكات 4G، يتم وضع تقنية 5G كاستجابة لاحتياجات زيادة التنقل وتقليل زمن الوصول وتحسين الموثوقية ومعدلات بيانات أعلى. ومع ذلك، فإن توسع شبكات الراديو وتقدم التقنيات اللاسلكية يجعل تخطيط هذه الشبكات معقدًا بشكل متزايد. ولهذا السبب، يعد إجراء تحليل متعمق لتغطية شبكات الراديو 5G وتحسينها أمرًا ضروريًا قبل نشرها. باستخدام برنامج Atoll (الإصدار 3.4.0)، نقوم بتحليل ومحاكاة المعلمات الرئيسية لتخطيط شبكة 5G، بما في ذلك التغطية والجودة.

كلمات مفتاحية :

5G، تشكيل الحزم، التخطيط، التغطية، الشبكة الخلوية، الجودة، MiMo، SS-RSRP، BTS و Atoll.

Table des matières

Dédicace.....	II
Remerciements	V
Résumé	VI
Abstract.....	VII
IIIIV	ملخص
Table des matières.....	X
Listes des figures	XIII
Listes des tableaux.....	XV
Listes des sigles et acronymes	XVI
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux cellulaires et mobiles	3
1.1 Introduction	4
1.2 Concept cellulaire	4
1.2.1 Dimension d'une cellule	5
1.2.1.1 Macro cellules	6
1.2.1.2 Micro cellules	7
1.2.1.3 Pico cellules	7
1.2.2 Format hexagonal	7
1.3 Évolution des réseaux cellulaires	8
1.3.1 Première génération 1G	8
1.3.2 Transition entre les générations	8
1.3.2.1 GSM (2G)	9
1.3.2.2 GPRS (2.5 G)	9
1.3.2.3 EDGE	10
1.3.3 Troisième génération (3G)	11
1.3.4 Quatrième génération (4G)	12
1.3.4.1 LTE Advanced	13
1.3.5 Cinquième génération 5G	13
1.4 Conclusion	14

2	Technologie 5^{ème} génération	15
2.1	Introduction	16
2.2	Introduction à la 5G	16
2.3	Catégories d'usages de la 5G	16
2.4	Exigences techniques et bandes de fréquences	17
2.5	Techniques d'accès	19
2.5.1	OFDMA	19
2.5.2	SC-FDMA	20
2.6	Principe et architecture des réseaux de la 5 ^{me} génération	21
2.6.1	Ondes millimétriques	21
2.6.2	Petites cellules	22
2.6.3	MIMO	23
2.6.4	Massive MIMO	23
2.6.4.1	SU-MIMO	23
2.6.4.2	MU-MIMO	24
2.6.5	Beamforming	25
2.6.6	Full duplex	25
2.7	Architecture de réseau 5G et ses services	26
2.7.1	Réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN)	27
2.7.2	Réseau central 5G (5GC)	28
2.8	Modèle de propagation	29
2.8.1	Modèle de propagation standard	30
2.8.2	Modèle 3GPP TR 38.901	31
2.9	Comparaison entre la 4G et la 5G	31
2.10	Présence mondiale de la 5G	32
2.11	Conclusion	33
3	Planification d'un réseau 5G selon la variation des rayons de cellules	34
3.1	Introduction	35
3.2	Planification	35
3.2.1	Définition	35
3.2.2	Étapes de la planification du réseau	35
3.3	Planification avec Atoll	36
3.4	Déroulement de la simulation	36
3.4.1	Planification radio pour une pico-cellule	37
3.4.1.1	Délimitation de la zone à couvrir	37
3.4.1.2	Localisation des sites	38
3.4.2	Planification radio pour une micro-cellule	39
3.4.2.1	Délimitation de la zone à couvrir	39
3.4.2.2	Localisation des sites	40
3.4.3	Planification radio pour une macro-cellule	40
3.4.3.1	Délimitation de la zone à couvrir	40
3.4.3.2	Localisation des sites	41
3.5	Prédiction de la couverture radio	42
3.5.1	Prédiction pour une pico-cellule	44
3.5.2	Prédiction pour une micro-cellule	47
3.5.3	Prédiction pour macro cellule	49
3.6	Comparaison des résultats	51

3.7 Simulation	56
3.8 Conclusion.....	58
Conclusion et perspectives	59
Bibliographie	62
Annexes	65
A PRÉSENTATION DE LOGICIEL ATOLL	66
B Tableau Atoll	73

Listes des figures

1.1	Concept cellulaire.....	4
1.2	Exemple de motif cellulaire (k =12)	5
1.3	Différents types des cellules	7
1.4	Evolution des réseaux cellulaires.....	8
1.5	Architecture du réseau GSM.....	9
1.6	Architecture du réseau GPRS	10
1.7	Architecture de réseau 3G (UMTS)	12
1.8	Architecture de réseau 4G (LTE)	13
1.9	Les avantages de la technologie 5G	14
1.1	Présentation de logiciel Atoll.....	18
1.2	fenêtre de logiciel Atoll.).....	19
1.3	Nouveau document Atoll avec le modèle 5G Multi-RAT	20
1.4	Réglage des paramètres de projection et de formats	21
1.5	choix de clutter.....	22
1.6	choix de height.....	22
1.7	choix de vectors	23
1.8	Affichage de la carte d'Algérie.	23
1.9	Insertion d'une mappe au niveau document	24
1.10	Superposition de la carte de l'Algérie sur la carte en ligne.....	25
2.1	Catégories de la 5G.....	16
2.2	Attribution de sous-porteuses en OFDMA	20
2.3	Attribution de sous-porteuses en SC-FDMA	20
2.4	Techniques employées dans la technologie 5G	21
2.5	Ondes millimétriques	22
2.6	Distribution des BTS en Petite cellule	22
2.7	Principe de MIMO.....	23
2.8	Différence entre SU-MIMO et MU-MIMO	24
2.9	Massive MIMO & Beamforming.....	25
2.10	Full Duplex	26
2.11	Architecture de réseau 5G.....	26
2.12	Plan utilisateur (UP) pour la session PDU et le flux QOS	27
2.13	Architecture de NG-RAN.....	28
2.14	Architecture du système 5G.....	28
2.15	Comparaison entre la 4G et la 5G	31
2.16	Déploiement de la 5G dans le monde	33

3.1	Processus de planification	35
3.2	Zone à couvrir à Atoll.	37
3.3	Propriétés de la surface.....	37
3.4	Positionnement des sites Pico-cellule	38
3.5	Propriétés de modèle de propagation SPM.....	38
3.6	Zone à couvrir sous Atoll.	39
3.7	Propriétés de la surface.....	39
3.8	Positionnement des Sites Micro-cellule	40
3.9	Zone sur Atoll.....	40
3.10	Propriétés de la surface.....	41
3.11	L'emplacement des sites macro-cellule	41
3.12	Propriétés de modèle 3GPP 38.900.....	42
3.13	Différents types de prédictions	43
3.14	Prédiction de la couverture par SS-RSRP d'Oran	44
3.15	Histogramme sur le niveau de SS-RSRP	45
3.16	Prédiction par niveau de signal	46
3.17	Histogramme sur le niveau de signal.	46
3.18	Prédiction de la couverture par SS-RSRP	47
3.19	Histogramme sur le niveau de SS-RSRP	47
3.20	Prédiction par niveau de signal	48
3.21	Histogramme sur le niveau de signal.	48
3.22	Prédiction de la couverture par SS-RSRP	49
3.23	Histogramme sur le niveau de SS-RSRP	49
3.24	Prédiction par niveau de signal	50
3.25	Histogramme sur le niveau de signal.	50
3.26	Comparaison du niveau de SS-RSRP entre scénario 1 et 2.....	51
3.27	Comparaison du niveau de signal entre scénario 1 et scénario 2.	52
3.28	Comparaison de niveau de SS-RSRP entre Scénario 2 et Scénario 3.	53
3.29	Comparaison de niveau de signal entre Scénario 2 et Scénario 3.....	54
3.30	Comparaison de niveau de SS-RSRP entre Scénario 1 et Scénario 3.	55
3.31	Comparaison de niveau de signal entre Scénario 1 et Scénario 3.....	56
3.32	Distribution des utilisateurs 5G sur les zones Oran, Tlemcen, EL Aricha respec- tivement	57
3.33	Propriétés de simulation.....	57

Listes des tableaux

2.1	Exigences minimales de rendement technique pour la IMT-2020	17
2.2	Bandes d'exploitation pour NR dans FR1 et FR2.....	18
2.3	Comparaison entre la 4G et la 5G	32
3.1	Prédiction de la couverture dans ATOLL.....	43

Liste des sigles et acronymes

1G	First generation.
2G	Second generation.
3G	Third generation.
3GPP	Third Generation Partnership Project.
4G	Fourth generation.
5G	Fifth generation.
5GC	5G Core

A

AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
AUC	Authentication Center
AUSF	Authentication Server Function

B

BRAN	Broadband Radio Access Network
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station

C

CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	Coordinated Multi-Point

D

DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DL	Downlink

E

EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution
EIRP	Effective Isotropic Radiation Power
eMBB	enhanced Mobile Broadband.
EPS	Evolved Packet System
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access

F

FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	frequency division multiple access.
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
FSPL	Free-Space Path Loss

G

GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
gNB	Nexte Generation Node Base Station
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications.

H

HeTNets	Heterogeneous Networks
HLR	Home Location Register

I

IMT-2000	International MobileTelecommunications
IMT-A	International Mobile Telecommunications-Advanced
IOT	Internet Over Thing
IP	Internet protocol

K

KPI	Key Performance Indicators
------------	----------------------------

L

LTE	Long-Term Evolution
LTE-A	Long-Term Evolution-Advanced

M

MEC	Mobile Edge Computing
MHZ	Mega Hertz
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mMTC	massive Machine Type Communication
MSC	Mobile Switching Center
MU-MIMO	Multi-User MIMO

N

NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function NSSF Network Slice Selection Function
NFV	Network Function Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
NSS	Network Switching Subsystem
NSSF	Network Slice Selection Function

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

P

PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCF	Policy Control Function
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PSK	Phase Shift Keying

Q

QOS	Quality of Service
------------	--------------------

R

RAB	Radio Access Bearer
RAN	Radio Access Network
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controlle
RRH	Remote Radio Head
RSRP	Reference Signal Received Power

S

SC-FDMA	Single Carrier- Frequency Division Multi-Access
SMF	Session Management Function
SPA	Service-Based Architecture
SS-RSRP	Synchronization Signal Reference Signal Received Power
SUL	Supplimentary Upnlink
SU-MIMO	Single User MIMO

T

TDD	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access

U

UDM	Unified Data Management
UE	User Equipment
UHF	Ultra High Frequency
UIT	International Telecommunications Union
UL	Uplink
UMI	User Management Identity
UP	User Plane
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network

Introduction générale

Contexte et justification

Au fil des décennies, la technologie des communications mobiles a évolué pour répondre aux demandes croissantes des utilisateurs, en explorant de nouveaux scénarios d'utilisation. Cette évolution a commencé avec la voix analogique dans les années 80 (**1G**), puis a progressé vers la voix numérique dans les années **90 (2G)**, le haut débit mobile au début des années **2000 (3G)**, et la téléphonie mobile haut débit avec la **4G** et la **LTE** vers **2010**.

Aujourd'hui, avec l'avènement de la cinquième génération de communications mobiles (**5G**), l'objectif est de répondre à la demande croissante de haut débit avec des débits de données allant jusqu'à plusieurs Gbit/s, tout en permettant de nouveaux cas d'utilisation tels que les communications à grande échelle connectant des milliers d'appareils, de capteurs et de caméras. La **5G** offre également des services ultra-fiables et à faible latence pour des applications critiques comme la sécurité publique, la télémédecine, la communication entre véhicules, etc.

Pour soutenir ces nouveaux scénarios d'utilisation, la technologie **5G** intègre des fonctionnalités clés telles que le beamforming, le MIMO massif et l'utilisation d'ondes millimétriques, qui améliorent la couverture, la capacité, la robustesse et la fiabilité des communications.

Avant le déploiement commercial de la **5G**, une phase de planification est essentielle. Cette phase implique des aspects d'ingénierie radio tels que la localisation des stations de base, l'estimation de la capacité et de la taille des cellules en termes de couverture et de capacité, l'attribution des fréquences, ainsi que l'étude de la propagation radio et des interférences dans l'environnement. Pour cela, les opérateurs utilisent des outils comme **Atoll**, une plateforme de conception et d'optimisation de réseaux sans fil développée par la société Forsk.

Objectifs

L'objectif de cette étude est de planifier la mise en place de la technologie **5G** dans trois zones : **Oran**, **Tlemcen** et **El Aricha**, en utilisant l'outil **Atoll**. Le but est de prouver que la **5G** est capable de rivaliser avec les générations précédentes en termes de couverture, de qualité et de fiabilité.

Structure du document :

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre portera sur les concepts fondamentaux des réseaux mobiles ainsi que sur l'évolution de ces réseaux.

Le deuxième chapitre se concentre sur les bases essentielles du système 5G, en couvrant des aspects tels que son architecture et son mode de fonctionnement.

Le dernier chapitre de ce mémoire décrit le déroulement de notre travail, mettant en lumière les résultats obtenus à partir des simulations réalisées. Nous y examinons en détail les performances de la technologie 5G NR, notamment en ce qui concerne la couverture et la qualité. À la fin du chapitre, nous avons effectué une comparaison entre les simulations.

Enfin, une conclusion sera présentée qui regroupe une synthèse générale et des perspectives comme suites logiques de ce travail. De plus, deux annexes fournissent des informations supplémentaires sur l'outil et la simulation.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux cellulaires et mobiles

1.1 Introduction

De nos jours, les systèmes de communications mobiles ont connu plusieurs évolutions majeures, ce qui entraîné un déploiement important des réseaux cellulaires pour garantir une meilleure **qualité de service (QoS)** aux utilisateurs. Ces réseaux ont fait l'objet de nombreuses générations (**1G, 2G, 3G, 4G et la 5G**), offrant un débit en constante augmentation et une bande passante de plus large afin de supporter un nombre croissant d'utilisateurs. Dans ce chapitre, nous examinerons les concepts fondamentaux des réseaux mobiles et leurs évolutions.

1.2 Concept cellulaire

Le concept fondamental des réseaux mobiles repose sur la subdivision d'une vaste zone en plusieurs régions distinctes, appelées cellules, et de partager les fréquences radio entre celles-ci. Ces fréquences ne peuvent pas être utilisées dans les cellules adjacentes afin d'éviter le problème des interférences.

Ainsi, on définit des motifs ou clusters, constitués de plusieurs cellules, dans lesquels chaque fréquence est utilisée une seule fois. À titre d'exemple, on peut se référer à la figure (FIG. 1.1) [1].

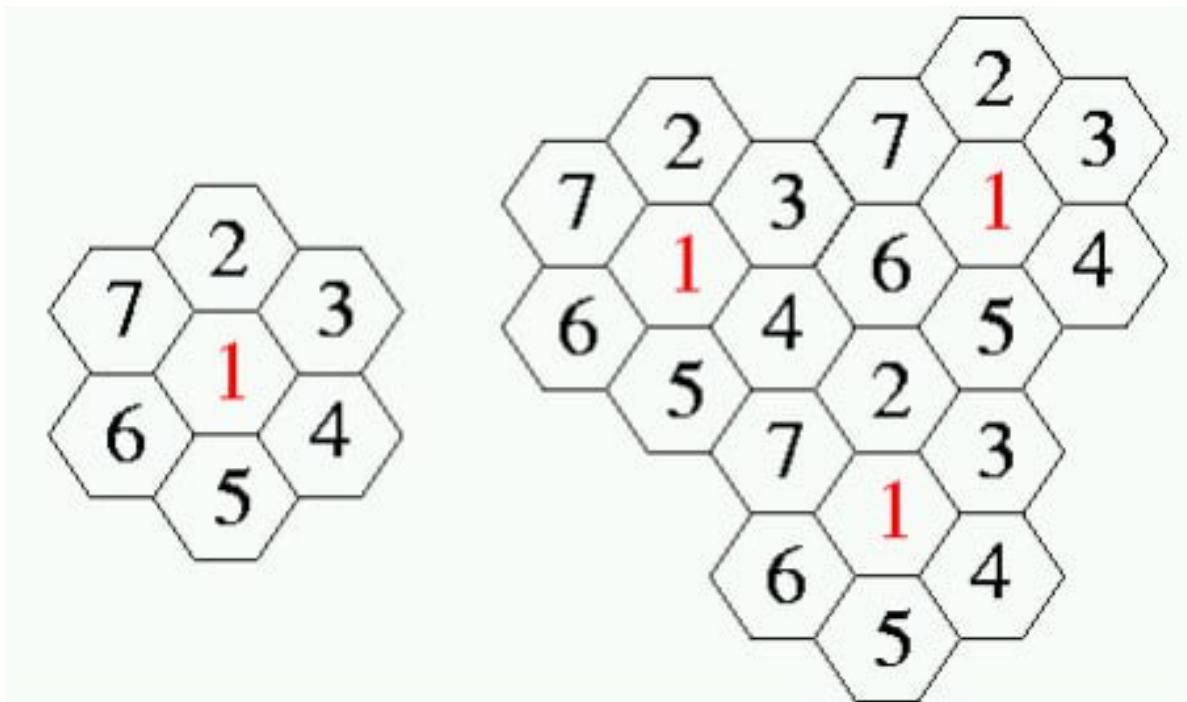


FIG. 1.1 : Concept cellulaire [2].

Donc les fréquences utilisées par une cellule peuvent également être utilisées par une autre cellule qui est suffisamment éloignée, grâce à la propriété d'atténuation des ondes radioélectriques. Cette stratégie permet une utilisation plus efficace de la bande passante. Plutôt que d'avoir une seule antenne pour couvrir l'ensemble du réseau, la taille du motif est déterminée par le système utilisé.

Chaque cluster se voit attribuer un ensemble de canaux du système. Les cellules qui partagent les mêmes fréquences, appelées Co-cellules, doivent être séparées par une distance suffisante pour éviter les interférences, connues sous le nom d'interférences Co-canal. La distance minimale requise est appelée distance moyenne de réutilisation (FIG. 1.2) [2].

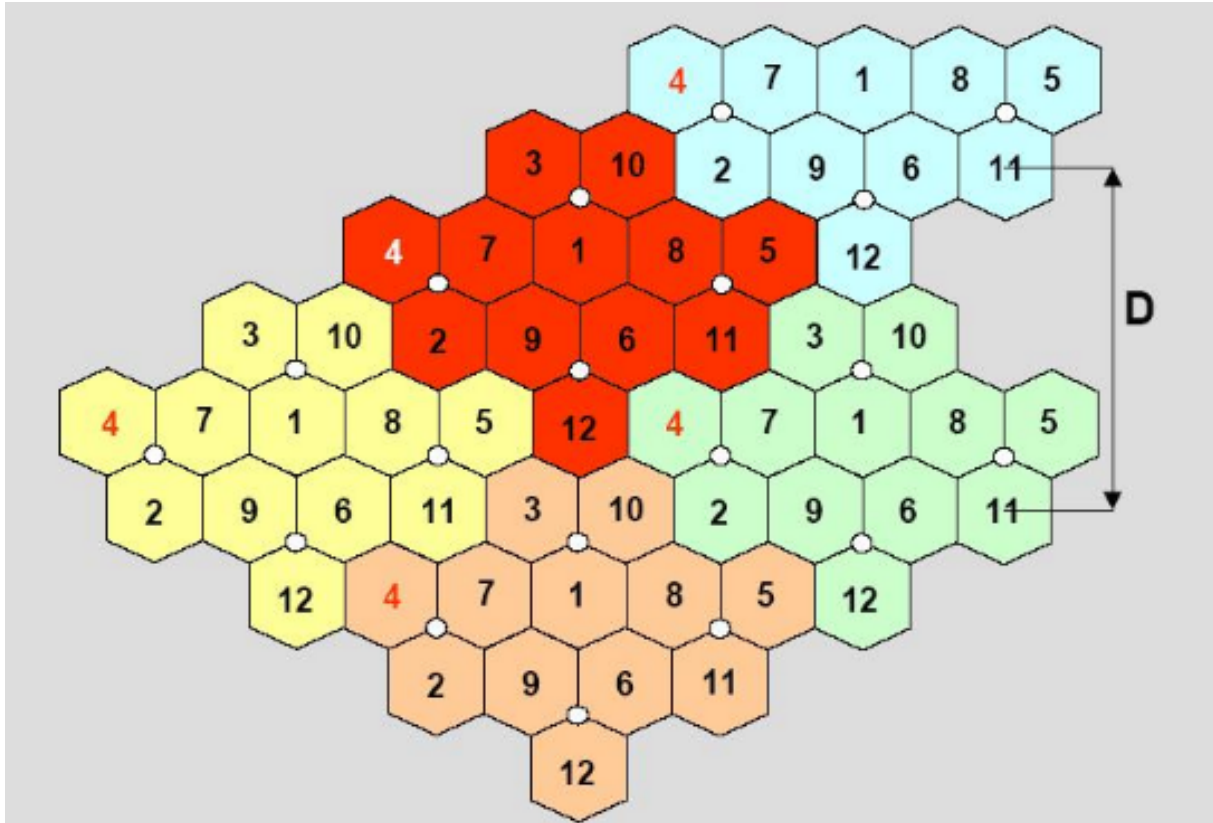


FIG. 1.2 : Exemple de motif cellulaire ($k = 12$) [3].

Cette distance est calculée par la formule (1.1).

$$D = \sqrt{3KR} \quad (1.1)$$

- K est la taille du motif.
- Terme K : est appelé le facteur de réutilisation (ou reuse factor ou reuse).
- R est le rayon de la cellule.

1.2.1 Dimension d'une cellule

La configuration et les dimensions de ces cellules sont déterminées par divers facteurs, notamment la topographie de la zone couverte, comme les plaines, les collines, les zones urbaines ou les bâtiments, qui influent sur la portée des signaux radio en raison des obstacles rencontrés. Chaque cellule est desservie par une station de base (BS) équipée d'une antenne assurant la transmission des signaux radio et des données à l'intérieur de cette cellule.

La hauteur et le type d'antenne utilisés sont également des paramètres cruciaux, car une antenne plus haute permet une couverture plus étendue.

L'azimut de l'antenne est également important pour garantir une couverture efficace de la région environnante. Lorsque l'antenne est omnidirectionnelle, la forme de la cellule est théoriquement circulaire, mais cette forme peut être altérée par la présence d'obstacles sur le chemin du signal.

En pratique, les cellules se chevauchent partiellement pour assurer une couverture totale de la zone géographique.

La taille de chaque cellule dépend également de la densité de la population dans la région concernée : plus le nombre d'abonnés est élevé, plus la taille de la cellule est réduite.

Cette réduction de taille est nécessaire, car les antennes ont une capacité limitée, ce qui impose une limite au nombre d'abonnés pouvant être desservis par chaque antenne afin de garantir une bande passante minimale pour chaque utilisateur [3].

La dimension d'une cellule est étroitement liée à la puissance de son émetteur-récepteur. Un émetteur-récepteur puissant peut englober une vaste zone, mais il risque rapidement de saturer la bande de fréquence disponible en raison du nombre élevée de communications.

En revanche, des cellules plus petites utilisant des émetteurs-récepteurs moins puissants permettent de réutiliser la même bande de fréquence à une plus grande distance, ce qui augmente la capacité du réseau en termes de nombre de communications possibles.

Les différentes dimensions et type de cellule doivent être appropriés en fonction de l'environnement spécifique et des technologies utilisées. Ainsi, pour définir un réseau efficace, un opérateur doit prendre en compte les particularités du relief topographique ainsi que pressions urbaines lors du dimensionnement des cellules, pour cela, on désigne :

1.2.1.1 Macro cellules

Une macro cellule est une cellule de réseau mobile d'un rayon de quelques dizaines de kilomètres, utilisée pour les liaisons en milieu suburbain et rural. Les antennes d'émission sont généralement installées en hauteur [3].

Il y a plusieurs types de macro cellules :

1. Macro cellule omnidirectionnelle

- Possède un seul secteur et un seul TRX (émetteur-récepteur) minimum ;
- Couverture à 360 degrés ;
- Utilisée principalement dans les zones rurales à faible densité d'abonnés.

2. Macro cellule bi-sectorielle

- Possède deux secteurs et deux TRX minimum ;
- Couverture directionnelle sur deux zones distinctes ;
- Convient aux environnements semi-urbains (densité d'abonnés moyenne) ;
- De moins en moins utilisée au profit des cellules tri-sectorielles ;

3. Macro cellule tri-sectorielle

- Possède trois secteurs et trois TRX minimum ;
- Couverture directionnelle sur trois zones distinctes ;
- Le type de macrocellule le plus utilisé, notamment en zones urbaines à forte densité de trafic.

1.2.1.2 Micro cellules

Les micro cellules sont des cellules de petite taille conçues pour les zones à forte densité d'utilisation, telles que les gares ou les rues très fréquentées. Elles visent à accroître la capacité des réseaux et à éviter la saturation des réseaux de cellules de grande envergure (macro cellules). Les antennes des micros cellules sont installées sur les façades des bâtiments et peuvent être de type omnidirectionnel ou directionnel [3].

1.2.1.3 Pico cellules

Les pico cellules sont des cellules de taille encore plus réduite que des micros cellules, couvrant des zones encore plus restreintes telles qu'un étage de bâtiment, une salle ou une station de métro.

Elles émettent un signal de faible puissance de manière omnidirectionnelle, avec une puissance très faible, généralement de quelques centaines de milliwatts [3].

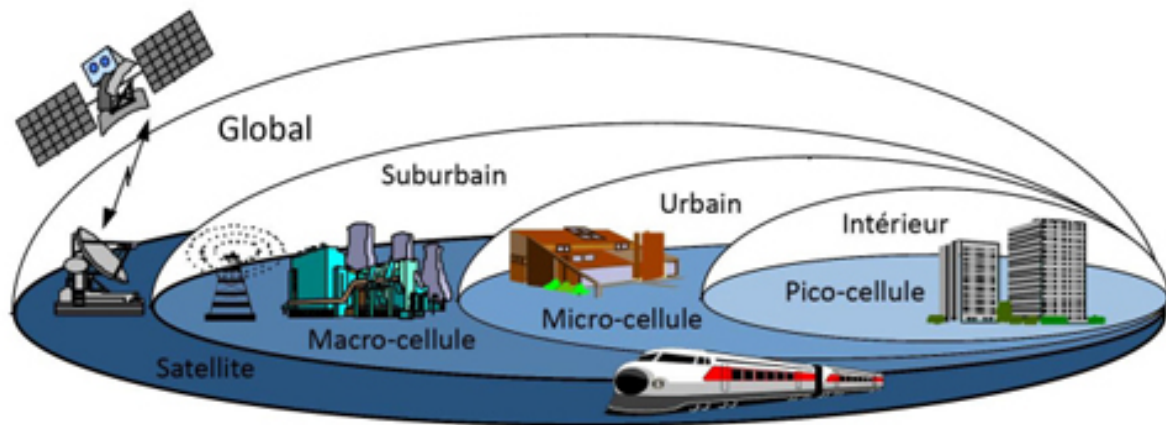


FIG. 1.3 : Différents types des cellules [4].

La figure (FIG. 1.3) montre les différents types des cellules.

1.2.2 Format hexagonal

Lorsque l'on examine un environnement homogène, la diminution du signal en fonction de la distance suit une loi proportionnelle à $r^{-\gamma}$, où r représente la distance entre les stations de base et les appareils mobiles, et γ est un coefficient d'atténuation généralement compris entre **2** et **4**, typiquement autour de **3,5**. Dans ce contexte, une cellule peut être envisagée comme un disque de rayon R , dont la valeur dépend de la puissance d'émission et du seuil de réception du système. Pour simplifier, on représente souvent une cellule par un hexagone, qui est le polygone le plus proche du cercle et permet de couvrir le territoire de manière efficace.

Dans le cadre de la mise en place de cellules de même taille sur un territoire donné, plusieurs hypothèses sont considérées :

1. La loi de propagation du signal s'applique uniformément sur l'ensemble du territoire.
2. Toutes les stations de base et tous les appareils mobiles ont une puissance nominale identique.

3. La demande en trafic est répartie de manière uniforme et l'opérateur alloue le même nombre de canaux à chaque station de base.

1.3 Évolution des réseaux cellulaires

Les progrès technologiques dans les systèmes mobiles ont entraîné plusieurs évolutions marquantes, notamment dans les techniques d'accès utilisées. Dans cette section, nous présenterons de manière succincte les différentes générations de réseaux mobiles ainsi que leurs architectures. Voir la figure (FIG. 1.4) :



FIG. 1.4 : Evolution des réseaux cellulaires [5].

1.3.1 Première génération 1G

La première génération des téléphones mobiles a vu le jour au début des années **70**. Elle a pour objectif de donner à l'utilisateur une plus grande mobilité avec son appareil.

Cependant, les technologies disponibles à cette époque étaient rudimentaires. La **1G** offrait donc un service de qualité médiocre, mais un coût élevé. Cette première génération présentait de nombreux défauts, notamment des normes incompatibles d'une région à une autre ou d'un opérateur à un autre, une transmission analogique non sécurisée des bandes des **450 MHz** et **900 MHz**, ainsi qu'une gestion insatisfaisante du roaming et du handover.

Bien que des tentatives d'amélioration aient été entreprises en introduisant le concept de cellules dans les réseaux, cette génération n'a pas rencontré un grand succès et a rapidement été remplacée par les systèmes de deuxième génération [6].

1.3.2 Transition entre les générations

La transition vers la deuxième génération (**2G**) a été une étape décisive, rompant avec les technologies analogiques de la **1G** pour adopter le numérique.

Cette évolution a permis la transmission simultanée de la voix et des données, tout en permettant aux utilisateurs de partager un même canal de communication.

Ceci a été réalisé grâce à l'utilisation de techniques telles que le **FDMA** (Frequency Division Multiple Access) et le **TDMA** (Time Division Multiple Access) pour la gestion des fréquences et du temps. Les normes les plus répandues de la **2G** sont le **GSM**, l'**IS-95** (Interim Standard-95) basé sur le **CDMA** (Code Division Multiple Access) et l'**IS-136** (Interim Standard-136) qui utilise le **TDMA**.

Le développement ultérieur des technologies a conduit à l'émergence du **GPRS** (General Packet Radio Service : **2.5G**) et de l'**EDGE** (Enhanced Data for **GSM** Evolution : **2.75G**) pour pallier les limitations de débit **GSM** initial, qui était d'environ **9.6kbps**. Le **GPRS** a augmenté ce débit théorique à **114kbps**, permettant ainsi une transmission plus efficace de la voix et des données.

L'**EDGE** a ensuite amélioré ces capacités en offrant des débits allant jusqu'à **384 kbps**, ouvrant ainsi la voie à l'utilisation d'applications multimédias, d'où l'apparition des autres technologies **3G**, **4G** et la cinquième génération [6].

1.3.2.1 GSM (2G)

Le **GSM**, abréviation de « Global System for Mobile Communications », représente le système de téléphonie mobile cellulaire de la deuxième génération (**2G**) voir la figure (FIG. 1.5).

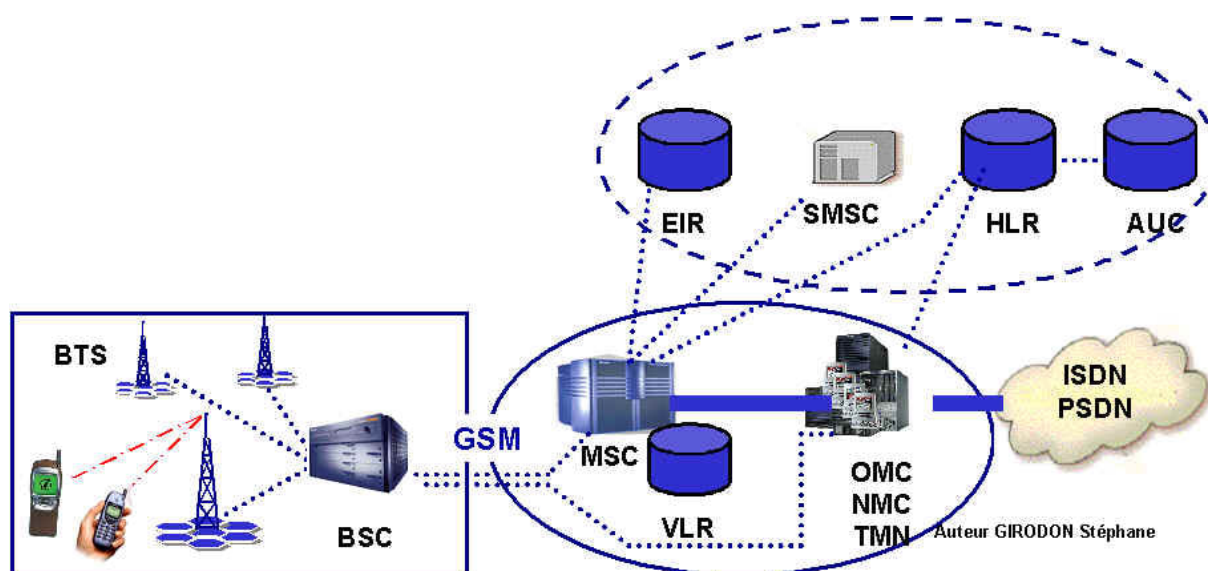


FIG. 1.5 : Architecture du réseau **GSM** [7].

Contrairement à ses prédécesseurs de la première génération (**1G**) tels que le système Nordic Mobile Téléphone (**NMT**) et le système Advanced Mobile Phone System (**AMPS**) qui étaient analogiques, le **GSM** est basé sur une norme numérique. Il utilise la modulation numérique **GMSK** (Gaussian Minimum Shift Keying) et le multiplexage temporel **TDMA** comme technologie d'accès multiple [8].

1.3.2.2 GPRS (2.5 G)

La norme **GPRS** représente une évolution du standard **GSM**. Étant une technologie de téléphonie de deuxième génération qui facilite la transition vers la troisième génération (**3G**), elle est généralement classée comme **2.5G**. Le **GPRS** étend l'architecture du **GSM** pour permettre

le transfert de données par paquets, offrant des débits théoriques maximums Voir la figure (FIG. 1.6) .

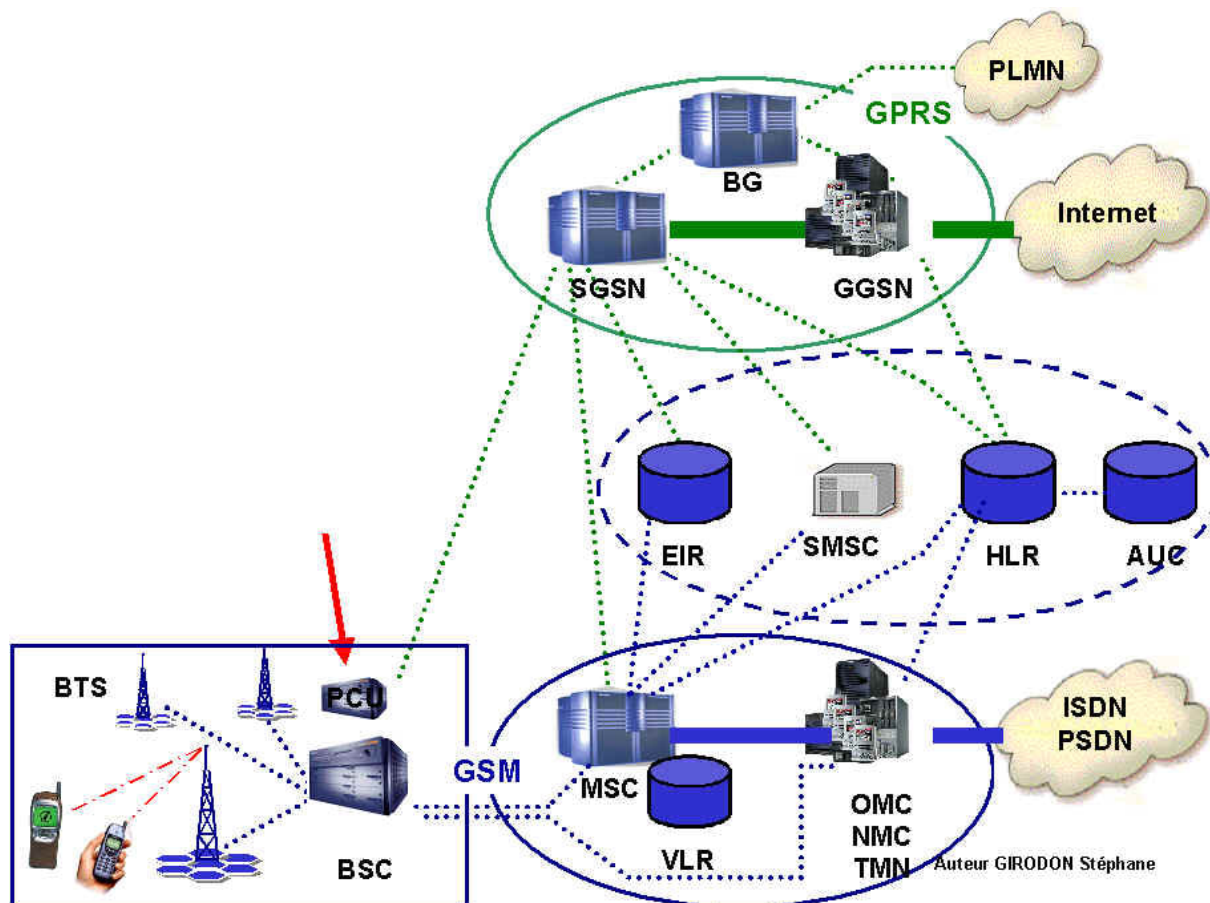


FIG. 1.6 : Architecture du réseau GPRS [7].

Grâce à ce mode de transfert, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque nécessaire, ce qui permet une utilisation plus efficace des ressources. Le standard GPRS présente l'avantage de facturer l'utilisateur selon le volume de données échangé plutôt que de la durée de connexion. Cela implique que l'utilisateur peut rester connecté sans encourir de frais supplémentaires, ce qui favorise une utilisation plus flexible et continue du réseau [8].

1.3.2.3 EDGE

La norme **EDGE** est une évolution de la norme **GSM**, tout comme la norme **GPRS**. Elle apporte une modification importante en introduisant la modulation **8-PSK**, ce qui nécessite des adaptations au niveau des stations de base et des terminaux mobiles. Cette évolution est considérée comme une transition vers la troisième génération de téléphonie mobile (**3G**), d'où son classement en tant que **2.75G**.

L'**EDGE** permet d'augmenter le débit des données jusqu'à trois fois par rapport au GPRS, bien que cela soit détriment d'une couverture un peu plus limitée. Théoriquement, L'**EDGE** peut atteindre des débits allant jusqu'à **384 kbit/s** pour les utilisateurs stationnaires (piétons et véhicules lents) et jusqu'à **144 kbit/s** pour les utilisateurs en déplacement (véhicules rapides) [8].

1.3.3 Troisième génération (3G)

Les normes utilisées pour développer les réseaux de communication variaient selon différentes régions du monde. Ainsi, il a été décidé de créer un réseau offrant des services indépendants des technologies ou normes utilisées. C'est ainsi que la **3G** (troisième génération de la téléphonie mobile) a vu le jour.

En Europe, elle est connue sous le nom d'**UMTS** (Universal Mobile Terrestrial System), tandis que l'**IMT-2000** est le nom du système de troisième génération tel que défini par l'UIT (Union Internationale des Télécommunications). D'autres parts, le **CDMA2000** désigne la version américaine de la troisième génération.

L'architecture du réseau **UMTS** se compose de trois domaines principaux : le domaine utilisateur, le domaine d'accès radio ou réseau d'accès (Access Network), et le domaine du réseau cœur (Core Network) :

- Le domaine utilisateur est semblable à celui défini pour le **GSM**, composé d'un terminal capable de gérer l'interface radio et d'une carte à puce, la carte **USIM** (Utilisateur Subscriber Identity Module), qui stocke les informations de l'utilisateur et de son abonnement.
- Le domaine du réseau cœur, hérité de l'architecture **NSS** du **GSM**, comprend une partie de commutation de circuits (**MSC-GSM**). Les nœuds de signalisation, la gestion de mobilité, les services de réseau intelligents, ainsi que les **HLR**, **AUC**, **EIR**, *etc.*, doivent évoluer pour intégrer les spécificités de l'**UMTS**.
De plus, ce réseau cœur peut être connecté à d'autres réseaux radio que l'**UTRAN**, tels que le **GERAN** ou le **BRAN** (Broadband Radio Access Network), utilisant des technologies telles que Hiperlan 2 ou **IEEE802.11**.

L'interface **Iu**, qui sépare le réseau d'accès du réseau cœur, a été définie de manière aussi générique que possible pour permettre la connexion de divers réseaux d'accès au réseau cœur. De plus, afin de garantir l'indépendance de l'interface lue vis-à-vis de la technologie d'accès, une notion appelée Radio Access Bearer (**RAB**) a été introduite. Cela permet de décrire de manière générique le canal de communication utilisé dans le réseau d'accès [9].

Le **RAB** est défini par des attributs de qualité de service négociés entre l'utilisateur et le réseau cœur, notamment :

- La classe de service, déterminée en fonction des exigences en temps réel de l'application ;
- Le débit maximal des données et leur débit garanti ;
- La taille des blocs de données de la couche **RLC** ;
- Le taux d'erreur résiduel ;
- Le délai de transfert ;
- La priorité relative du **RAB** par rapport à d'autres **RAB** ;
- La capacité de préemption et la vulnérabilité à la préemption.

Le réseau **UMTS** est composé de deux sous-réseaux distincts (FIG. 1.7) :

le réseau cœur (**UMTS Core Network**) et l'**UTRAN**.

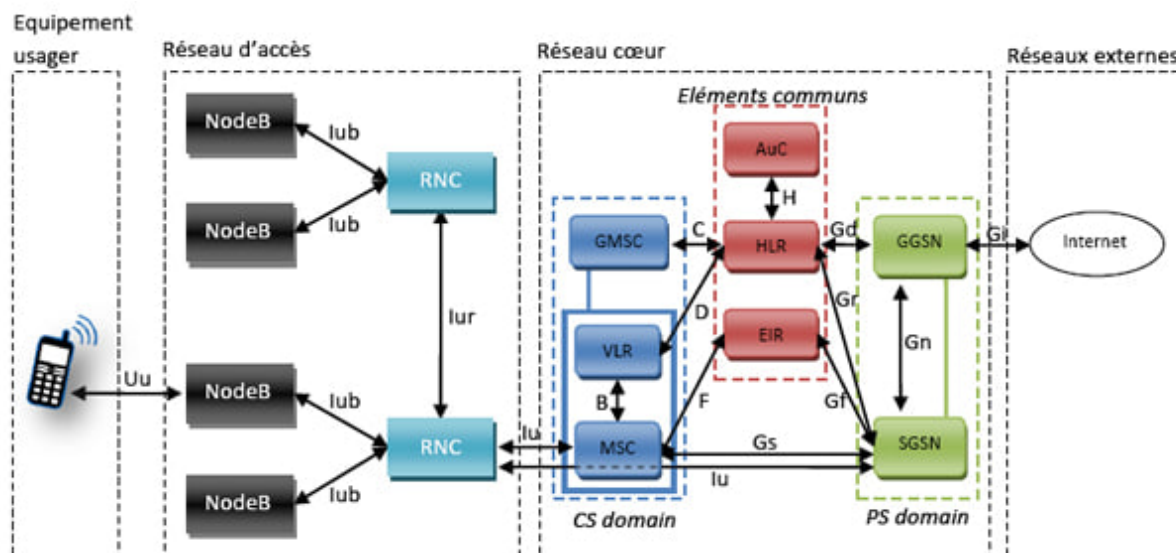


FIG. 1.7 : Architecture de réseau 3G (UMTS) [7].

L'**UTRAN** est complètement distinct et différent du **BSS** du **GSM**. Il est constitué d'un ou plusieurs **RNC** (Radio Network Controller), sur lesquels dépendent les **Nodes B**.

Les **RNC** jouent un rôle similaire à celui des **BSC** du **GSM**, tandis que les **Nodes B** ont un rôle similaire à celui des **BTS** en **GSM**. Un **UTRAN** peut donc être relié au réseau cœur par plusieurs liens **Un** par **RNC**.

1.3.4 Quatrième génération (4G)

La quatrième génération de réseau, qui a lancé en **2008**, permet l'accès au web mobile comme la **3G**, tout en offrant également des services avancés tels que les jeux en ligne, la télévision mobile en haute définition, la vidéoconférence, la télévision **3D** et d'autres fonctionnalités nécessitant des vitesses élevées.

En déplacement, la vitesse maximale d'un réseau **4G** est de **100 Mbps**, tandis que pour les connexions à faible mouvement, elle peut atteindre **1 Gbps**.

La norme **LTE** (Long Term Evolution) permet d'atteindre des vitesses de transmission de données très élevées dans les communications sans fil à large bande.

LTE permet la transmission de données vocales et les images sur des cellules pouvant couvrir une zone allant jusqu'à **100 km**, ce qui permet de contenir une station de base (**BS**).

Elle utilise la technologie et le codage **OFDM** pour assurer des liaisons descendantes efficaces, ce qui améliore la flexibilité du spectre et la rentabilité pour les opérateurs de télécommunications Voir la figure (FIG. 1.8) [10].

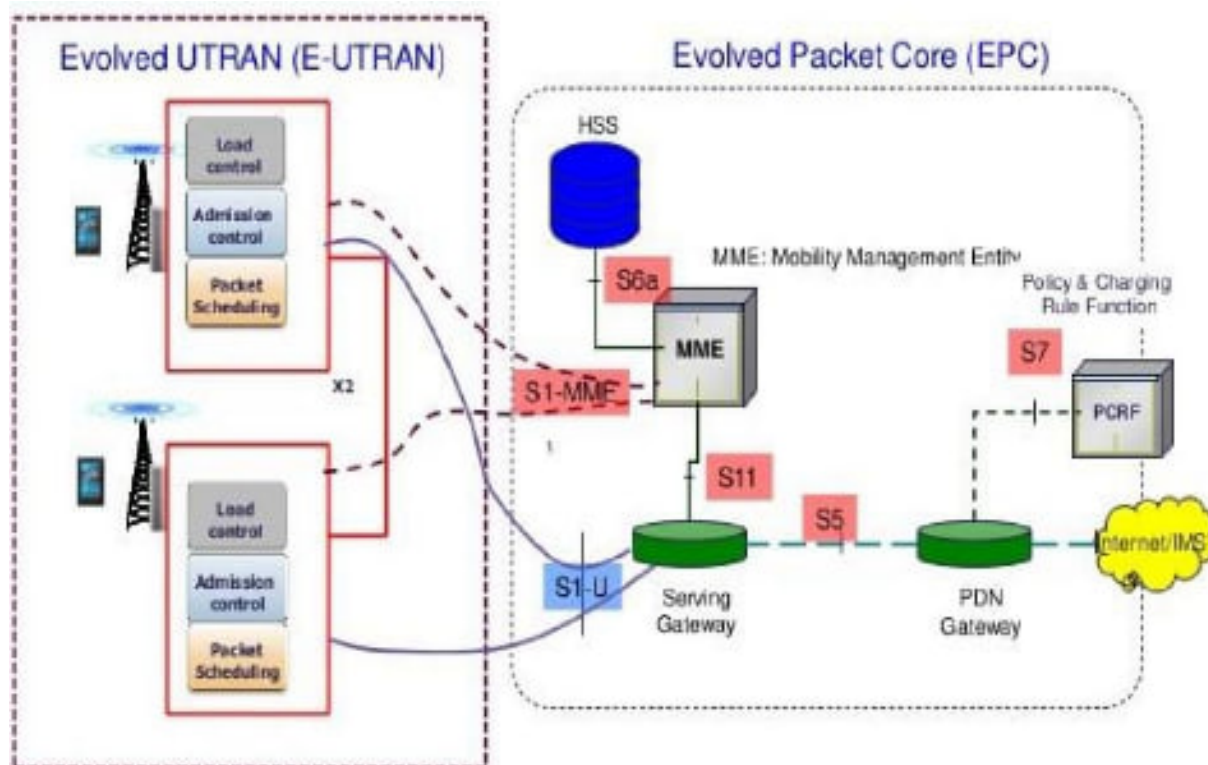


FIG. 1.8 : Architecture de réseau 4G (LTE) [11].

Les réseaux LTE utilisent une bande de fréquence de **800 MHz**, **1800 MHz** et **2600 MHz**, ce qui leur donne la possibilité d'offrir des vitesses plus élevées et une couverture plus étendue. Le débit offert par la **4G** est supérieur, avec des objectifs de **100 Mbps** en liaison descendante et jusqu'à **75 Mbps** en liaison montante.

1.3.4.1 LTE Advanced

LTE est développé par de nouvelles technologies ainsi que des améliorations apportées aux technologies existantes, telles que l'agrégation de l'ajout des opérateurs, **MIMO** (Multi-input Multi-output), **CoMP** (Coordination Multi-Point) et **HetNets** (réseaux hétérogènes). L'objectif de la **3GPP** pour LTE Advanced (**LTE-A**) a été de développer ces aspects afin de répondre aux exigences fixées par l'**UIT** pour les télécommunications mobiles avancées (**IMT-A**) :

- Augmentation du nombre d'utilisateurs actifs en simultané ;
- Optimisation du débit de données maximal ;
- Optimisation de l'utilisation du spectre ;
- Amélioration des performances aux limites des cellules [12].

1.3.5 Cinquième génération 5G

La **5G** est la nouvelle technologie développée par le **3GPP** en **2020**, qui est un système de données ultra haute capacité et ultra haute vitesse, avec de nouvelles exigences de conception pour réduire les coûts énergétiques et opérationnels pour les opérateurs [13].

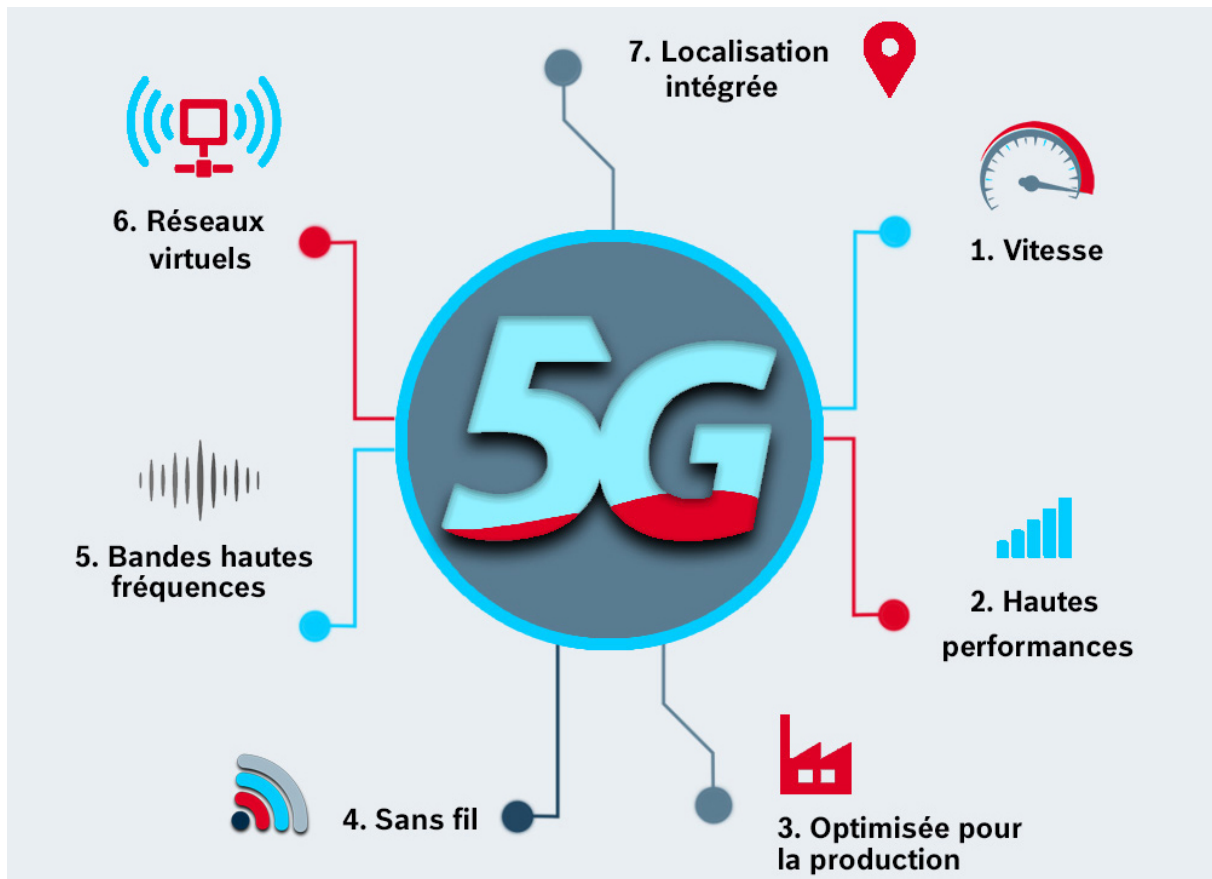


FIG. 1.9 : Les avantages de la technologie 5G [13].

La **5G** n'est pas seulement une nouvelle technologie, mais un écosystème où diverses technologies sans fil travaillent en dialogue afin d'offrir une connectivité transparente à l'utilisateur final. Ainsi, passer de la **4G** à la **5G** représente un changement de modèle, passant d'un système à domaine unique à un système multi-domaine.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons abordé de manière générale les différentes générations de téléphones mobiles ainsi que les principales caractéristiques des réseaux cellulaires. Nous avons ainsi offert un aperçu de l'évolution des réseaux cellulaires, à savoir la **1G**, **2G**, **3G**, **4G** et la **5G**, qu'ils soient filaires ou sans fil, et de leurs caractéristiques qui impactent notre vie quotidienne. En ce qui concerne les réseaux **5G**, nous avons fait un bref résumé, et nous allons approfondir ses techniques de fonctionnement dans le deuxième chapitre.

Chapitre 2

Technologie 5^{ème} génération

2.1 Introduction

Comme il a été mentionné auparavant (**Chapitre 1**), le développement de la **4G** a atteint son point culminant et ses limitations, devenant ainsi incapable de satisfaire les exigences actuelles. Cela souligne le besoin impérieux d'une nouvelle génération de réseaux mobiles capable de répondre aux diverses évolutions technologiques et à l'impératif de connecter tout ce qui est humain et machine.

Dans cette section, nous aborderons la **5G**, le nouveau réseau mobile qui promet une connectivité totale.

2.2 Introduction à la 5G

La technologie **5G** est conçue pour offrir des performances améliorées par rapport aux générations précédentes, y compris la **4G**. Il vise à répondre à la demande croissante de connectivité à haut débit, à faible latence et à haute capacité pour une large gamme d'applications, des smartphones aux véhicules autonomes en passant par les villes intelligentes.

2.3 Catégories d'usages de la 5G

La **5G** marque une évolution significative dans le domaine de la téléphonie mobile, étant la première génération conçue pour répondre à une variété de cas d'utilisation au-delà de la voix et des données. Les cas d'utilisation de la **5G** peuvent être classés en trois catégories distinctes (FIG. 2.1) :

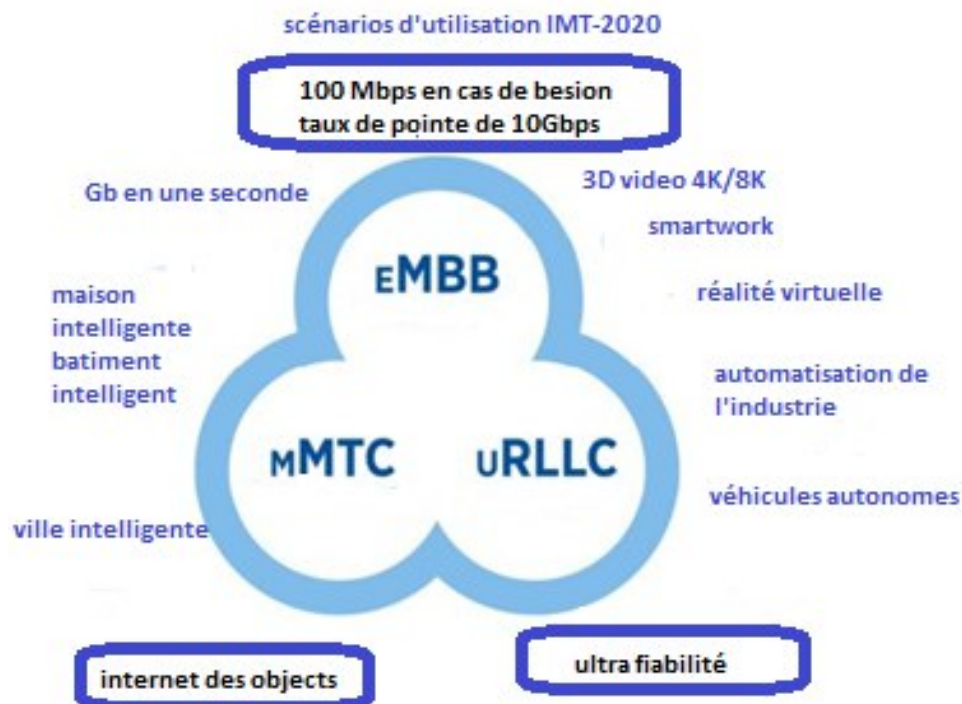


FIG. 2.1 : Catégories de la 5G [14].

- **Large bande mobile améliorée (eMBB)** : Cette catégorie de haut débit mobile amélioré a pour but de traiter un nombre considérablement élevé de données mobiles en offrant des débits ultra-rapides.
Cette catégorie permet des applications diverses et notamment la diffusion de vidéos en qualité supérieure, l'accès à la réalité augmentée et toute application nécessitant une transmission rapide de grandes quantités de données.
- **Communications massives de type machine (mMTC)** : Cela signifie la communication massive entre objets faisant l'Internet des objets (**IoT**). Cette catégorie vise à gérer un grand nombre de connexions simultanées, avec des volumes de données par communication généralement limités et des exigences de vitesse de transfert moins contraignantes.
Les applications typiques incluent les réseaux de capteurs pour les villes intelligentes.
- **Communication à latence ultra-faible et à fiabilité ultra-élevée (uRLLC)** : Cela veut dire les communications ultra-fiables à faible latence. Une catégorie particulièrement cruciale pour les applications critiques où la fiabilité et la rapidité de réponse sont primordiales.
Ces applications comprennent les véhicules autonomes et les services de sécurité et d'urgence, exigeant des communications sans failles et une transmission ultra-rapide [14].

2.4 Exigences techniques et bandes de fréquences

Dans le cadre du processus de normalisation de la **5G**, l'**UIT** a publié le document International Mobile Telecommunications-2020 (**IMT-2020**) qui regroupe une série d'exigences pour les réseaux **5G** [15].

Le tableau (TAB. 2.1) résume les exigences minimales relatives aux performances techniques des interfaces radio **IMT-2020**, qui sont basées sur un ensemble de capacités nécessaires pour prendre en charge les cas d'utilisation et les scénarios d'utilisation de la **5G**.

TAB. 2.1 : Exigences minimales de rendement technique pour la IMT-2020 [16].

Paramètre	Exigence minimale de rendement technique
Débit de données maximal	Downlink : 20Gbit/s Uplink : 10Gbit/s
Efficacité spectrale maximale	Downlink : 30Gbit/s Uplink : 10Gbit/s
Débit de données utilisateur	Downlink : 100Gbit/s Uplink : 50Gbit/s
Efficacité spectrale des utilisateurs du cinquième centile	3×IMT-Advanced
Efficacité spectrale moyenne	3×IMT-Advanced
Capacité de trafic régional	10Mbits/s/m ² (hotspot intérieur pour eMBB)
Latence du plan utilisateur	4ms pour eMBB 1ms pour URLLC
Contrôle de la latence du plan	20ms
Densité de connexion	1 000 000 appareils par km ²

Efficacité énergétique	Relatif à deux aspects pour eMBB : Transmission efficace des données dans un boîtier chargé. Faible consommation d'énergie lorsqu'il n'y a pas de données, la technologie doit avoir la capacité de supporter un taux de sommeil élevé et une longue durée de sommeil.
Fiabilité	$1 - 10^{-5}$ probabilité de succès de transmission de la couche 2PDU (Unité de données de protocole) de 32octets dans les 1ms, au bord de la couverture Urban Macro pour URLLC
Mobilité	Taux de données normalisés des canaux de trafic définis pour 10, 30 et 120 km/h à 1,5 'IMT-Nombres avancés. Exigence de véhicule à grande vitesse défini pour 500 km/h (contre 350 km/h pour IMT-Advanced)
Interruption de la mobilité	0ms
Bande passante	Au moins 100MHz et jusqu'à 1 GHz dans les bandes à haute fréquence. La bande passante évolutive doit être soutenue

Selon la **3GPP**, il existe deux critères de performance radio distincts pour deux plages de fréquences (FR) : **FR1** et **FR2**. **FR1** se situe en dessous de la bande des **7 GHz (410 - 7125 MHz)**, tandis que **FR2** se trouve dans la plage des ondes millimétriques (**24250 - 52600 MHz**) [17].

Parallèlement, la **3GPP** a défini les bandes de fonctionnement correspondant à différentes gammes de fréquences pour la liaison descendante et montante, comme illustré dans le tableau (TAB. 2.2) :

TAB. 2.2 : Bandes d'exploitation pour NR dans FR1 et FR2 [18].

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
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

2.5 Techniques d'accès

La technologie **5G** utilise l'**OFDMA** dans la voie descendante et le **SC-FDMA** en voie montante, permettant à plusieurs utilisateurs de se connecter simultanément au réseau sans fil.

2.5.1 OFDMA

OFDMA est une technique de modulation cruciale dans la norme de communication sans fil **5G**. Principalement déployée dans la liaison descendante, elle facilite la communication entre la station de base (**gNB**) et les terminaux mobiles.

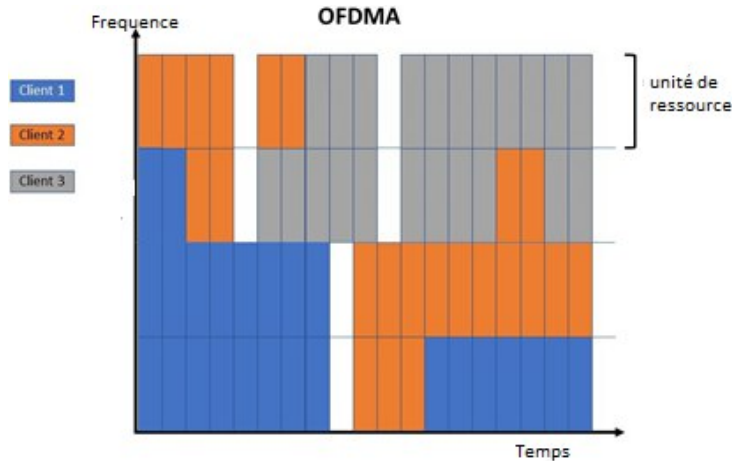


FIG. 2.2 : Attribution de sous-porteuses en OFDMA [19].

Cette méthode divise la bande passante entre plusieurs utilisateurs en exploitant des sous-porteuses orthogonales lors de la liaison descendante (FIG. 2.2). L'**OFDMA** garantit une allocation dynamique [20] de la bande passante, une gestion efficace des interférences et une adaptation en temps réel aux besoins des utilisateurs. En outre, elle optimise l'utilisation de la bande passante tout en réduisant au minimum les interférences entre les transmissions.

2.5.2 SC-FDMA

La méthode **SC-FDMA** (Single Carrier- Frequency Division Multi-Access) est principalement employée dans la voie montante de la **5G** afin d'acheminer les données du terminal mobile vers la station de base. Contrairement à l'**OFDMA** où les données sont réparties sur plusieurs sous-porteuses, dans le **SC-FDMA**, les données sont étalées sur une seule porteuse (FIG. 2.3).

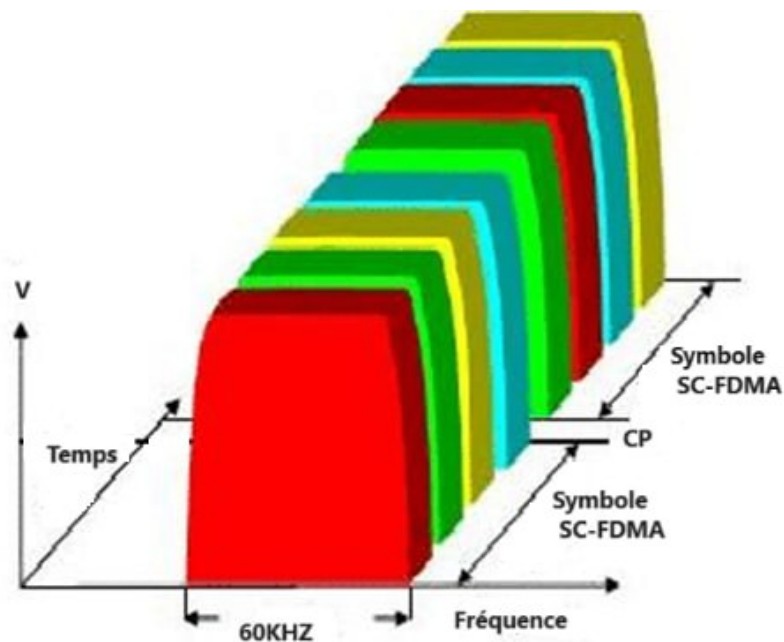


FIG. 2.3 : Attribution de sous-porteuses en SC-FDMA [21].

Cette approche permet une optimisation de l'utilisation de la bande passante limitée de la liaison montante tout en maintenant un **PAPR** (le rapport entre la puissance crête et la puissance moyenne, exprimé en dB) plus bas [20].

Cela revêt une importance cruciale pour garantir une amplification de puissance efficace dans les appareils mobiles.

2.6 Principe et architecture des réseaux de la 5^{me} génération

La **5G** exploite la bande des fréquences de diffusion ultra-hautes (**UHF**), situées entre **6 et 300 GHz**, notamment les ondes millimétriques. Cependant, ces fréquences ont une portée limitée, ce qui pose des problèmes. La solution est l'utilisation de la technique de **Beamforming** et plus particulièrement via le **MU-MIMO** (multi-utilisateur MIMO).

Cette technique permet une diffusion continue de donner sur plusieurs terminaux.

De plus, le processus de transfert intercellulaire multicellules est utilisé pour assurer des connexions solides à des débits de l'ordre du gigabit, même lors de déplacement de l'utilisateur final.



FIG. 2.4 : Techniques employées dans la technologie 5G [22].

2.6.1 Ondes millimétriques

Les ondes millimétriques (**mmWave**) désignent les fréquences radio comprises entre **30 GHz** et **300 GHz**. Ces fréquences sont plus élevées que les fréquences traditionnellement utilisées dans les communications cellulaires sans fil [23].

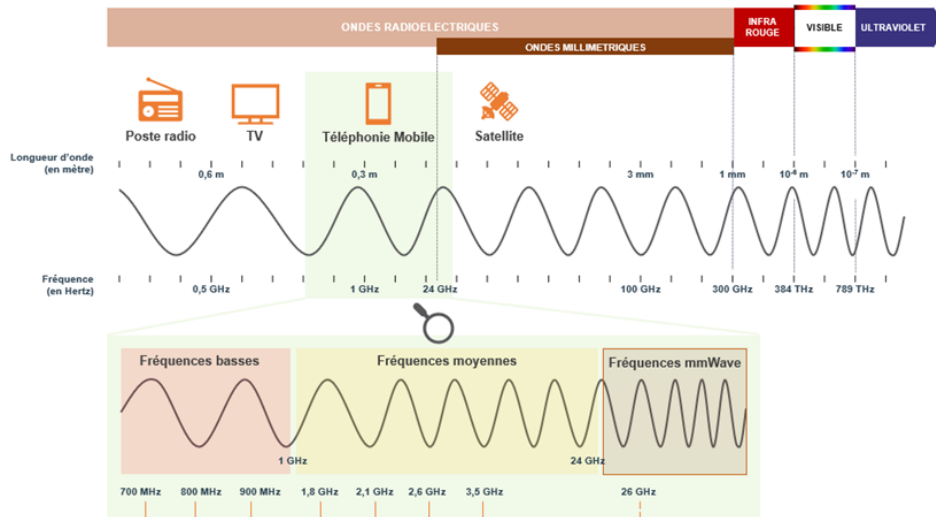


FIG. 2.5 : Ondes millimétriques [24].

Les **ondes millimétriques** se trouvent sur la tranche des plus hautes fréquences des ondes radioélectriques, avec une longueur d'onde s'étalant de **1 à 10 mm** et une fréquence allant de **24 à 300 GHz** [24] comme montre la figure (FIG. 2.5).

2.6.2 Petites cellules

Les **Petites cellules** sont des stations de base adaptées à la **5G**, offrant des débits élevés pour le haut débit mobile et l'**IoT**, ainsi qu'une gestion efficace des densités élevées de dispositifs à faible vitesse et consommation.

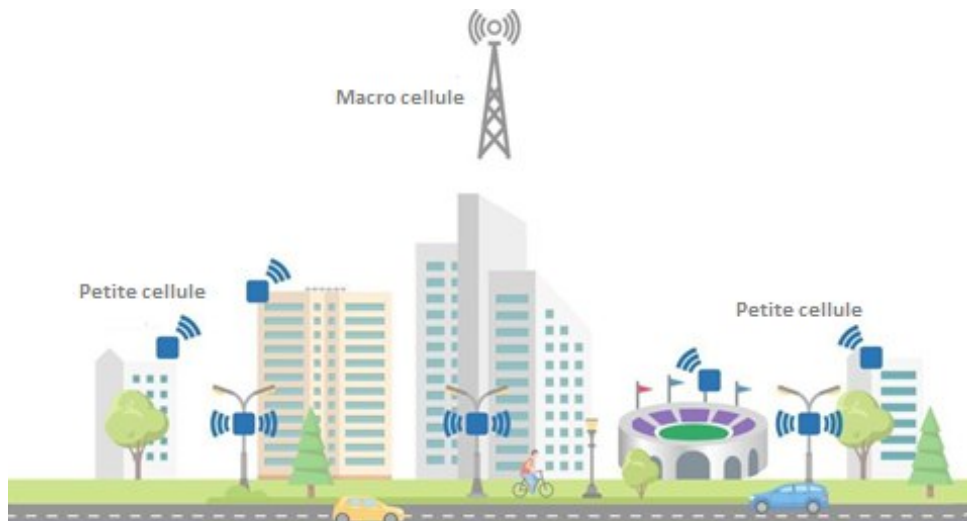


FIG. 2.6 : Distribution des BTS en Petite cellule [25].

Leur déploiement est idéal pour répondre aux exigences de la **5G**, notamment des vitesses ultra-élevées, une densité élevée d'appareils par kilomètre carré, et des latences très faibles [25].

2.6.3 MIMO

Le **MIMO** est une technologie d'antenne utilisée dans les communications sans fil, où plusieurs antennes sont utilisées à la fois à la source (émetteur) et à la destination (récepteur). Son objectif est de minimiser les erreurs et d'optimiser le débit des données en combinant les signaux reçus par les antennes, ce qui permet de surmonter les problèmes liés à la propagation d'ondes par trajets multiples [26].

MIMO est utilisé pour améliorer la qualité et la force du signal dans les systèmes de communications numériques, notamment dans les réseaux sans fil, les réseaux métropolitains et les communications mobiles [27].

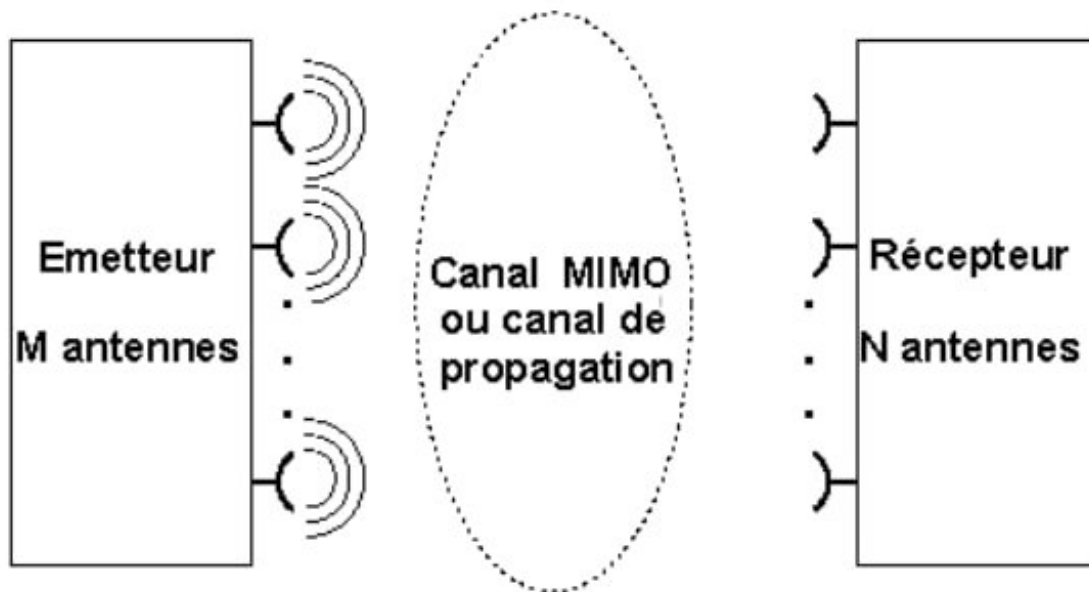


FIG. 2.7 : Principe de MIMO [28].

La figure (FIG. 2.7) montre le principe de fonctionnement de MIMO.

2.6.4 Massive MIMO

Les antennes **Massive MIMO** sont installées dans le cadre du déploiement de la **5G**. Il s'agit d'une véritable rupture par rapport aux antennes communément utilisées avec la **4G**. Le développement de la 5G nécessite de nouvelles infrastructures, comme les antennes adaptatives **Massive MIMO**. Plus performantes que les antennes installées jusqu'à présent, elles permettent d'utiliser le réseau uniquement lorsque les utilisateurs en ont besoin.

Grâce à un logiciel, ces antennes intelligentes sont en effet capables de diriger le signal d'un réseau mobile vers les utilisateurs qui en ont besoin, à un moment précis. Le signal radio n'est plus dirigé en continu vers tous les utilisateurs comme avec la **4G** [29].

2.6.4.1 SU-MIMO

Le **SU-MIMO** (Single User Multiple Input Multiple Output) est le type le plus courant de technologie **MIMO**. Il permet d'envoyer des données à un seul utilisateur à la fois en utilisant différentes antennes pour augmenter le débit de transmission.

Pour utiliser le **SU-MIMO**, il est nécessaire d'avoir plusieurs antennes à la fois dans l'émetteur et le récepteur [30].

2.6.4.2 MU-MIMO

Dans les systèmes **MU-MIMO**, le point d'accès peut simultanément communiquer avec plusieurs terminaux mobiles en exploitant la dimension spatiale.

Cela est possible grâce à la connaissance précise de chaque canal reliant les antennes de transmission aux antennes de réception, obtenue via une méthode de "Feedback" explicite [31].

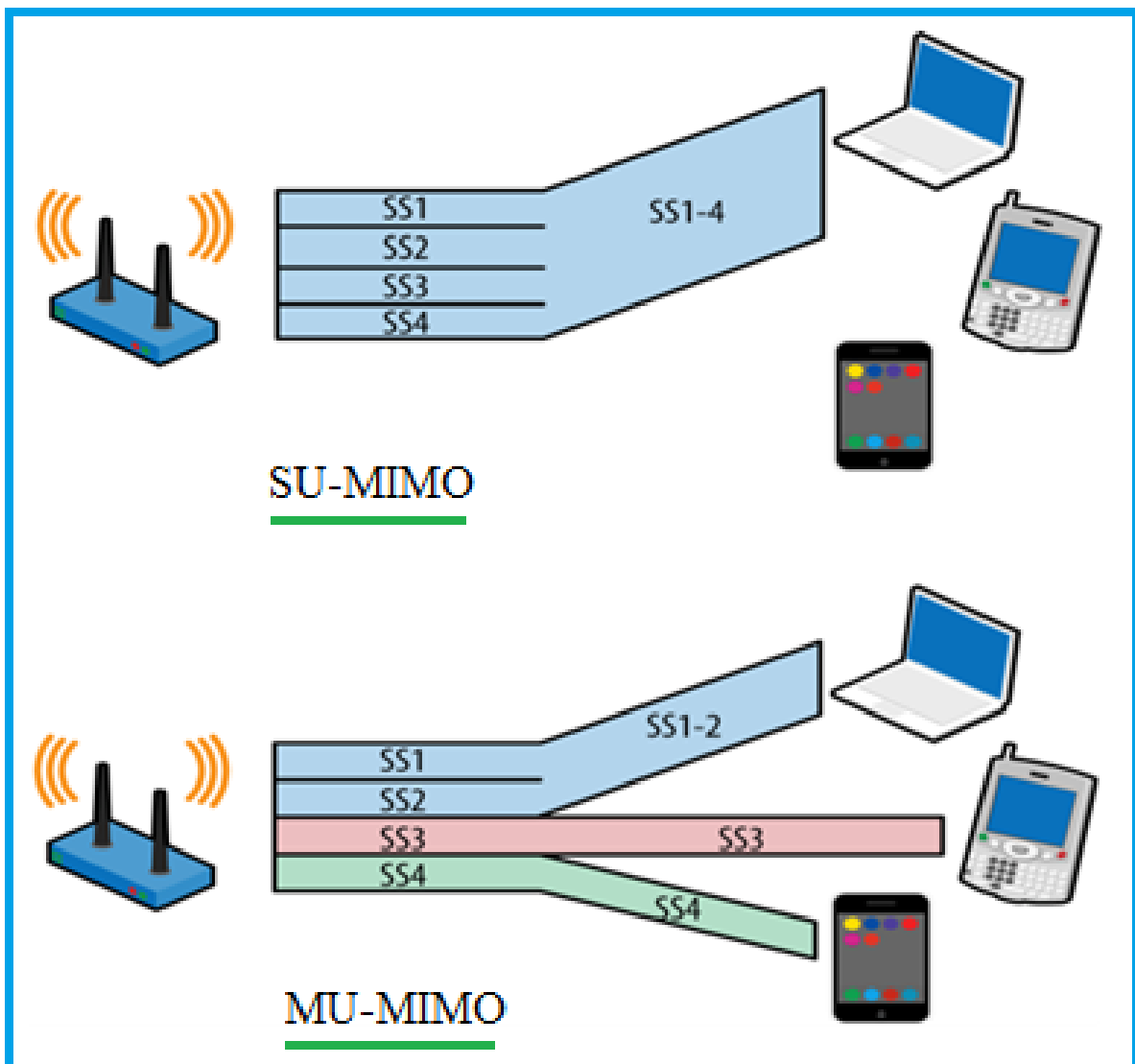


FIG. 2.8 : Différence entre SU-MIMO et MU-MIMO [31].

La figure (FIG. 2.8) illustre la différence entre le **SU-MIMO** et le **MU-MIMO**, permettant ainsi de visualiser clairement les distinctions entre ces deux technologies.

2.6.5 Beamforming

Le **beamforming**, également connu sous le nom de filtrage spatial ou formation de faisceau, exploite les ondes électromagnétiques pour améliorer la précision des connexions **Wifi** et **5G**. Cette technique consiste à focaliser un signal sans fil vers un dispositif de réception spécifique, au lieu de le diffuser dans toutes les directions à partir d'une antenne radio [32], comme c'est habituellement le cas. En concentrant le signal vers le dispositif cible, la connexion devient plus directe, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse et de la fiabilité par rapport à une diffusion sans formation de faisceau.

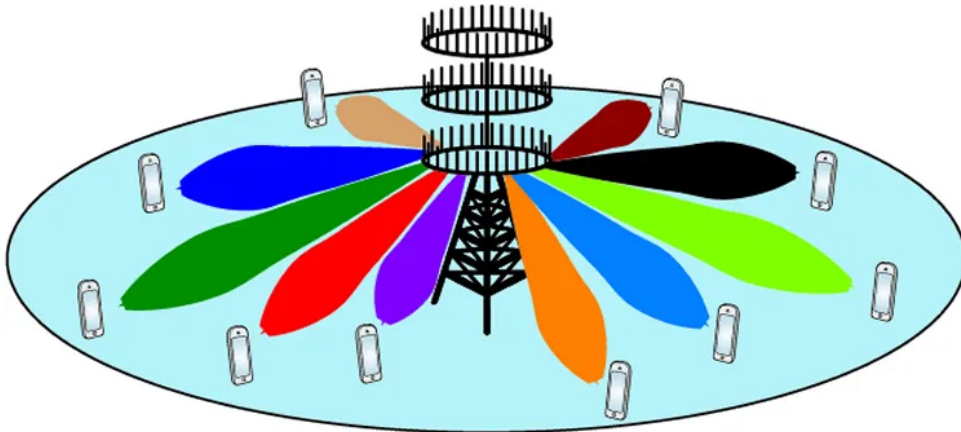


FIG. 2.9 : Massive MIMO & Beamforming [33].

Dans les systèmes massifs **MIMO**, la station centrale peut utiliser diverses voies pour transmettre des données à l'utilisateur, tandis que le **beamforming** organise le déplacement des paquets et la durée d'arrivée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données en même temps (FIG. 2.9). Le **beamforming** facilite l'envoi de faisceaux concentrés vers les utilisateurs, car les ondes millimétriques ne peuvent pas franchir les obstacles ni se propager sur de longues distances en raison de leur courte longueur d'onde. En utilisant le **beamforming**, un utilisateur peut recevoir un signal fort sans interférer avec d'autres utilisateurs [33].

2.6.6 Full duplex

Les canaux de communication utilisés pour la **5G** seront **full-duplex**, ce qui signifie que tant l'antenne que l'appareil mobile connecté pourront envoyer ou recevoir des informations simultanément [34]. Cette capacité permet une utilisation beaucoup plus efficace de chaque canal en termes de transmission d'informations, comme indique la figure (FIG. 2.10) :

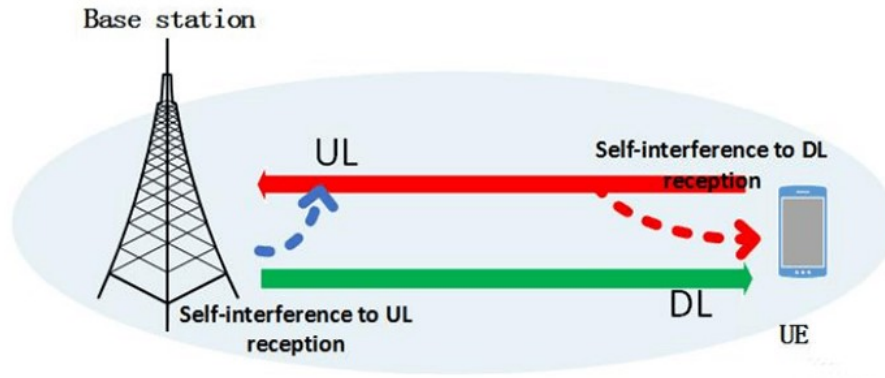


FIG. 2.10 : Full Duplex [35].

2.7 Architecture de réseau 5G et ses services

Un réseau **5G** se compose d'un réseau d'accès **5G** (**AN**) et d'un réseau cœur **5G**. Le réseau d'accès comprend la nouvelle génération de réseau d'accès radio (**NG-RAN**), qui utilise la nouvelle interface radio **5G NR**, et/ou un **AN non 3GPP** connecté au réseau cœur **5G**. Les différentes entités du réseau sont reliées par un réseau de transport **TCP/IP** sous-jacent qui prend en charge les flux **QoS**.

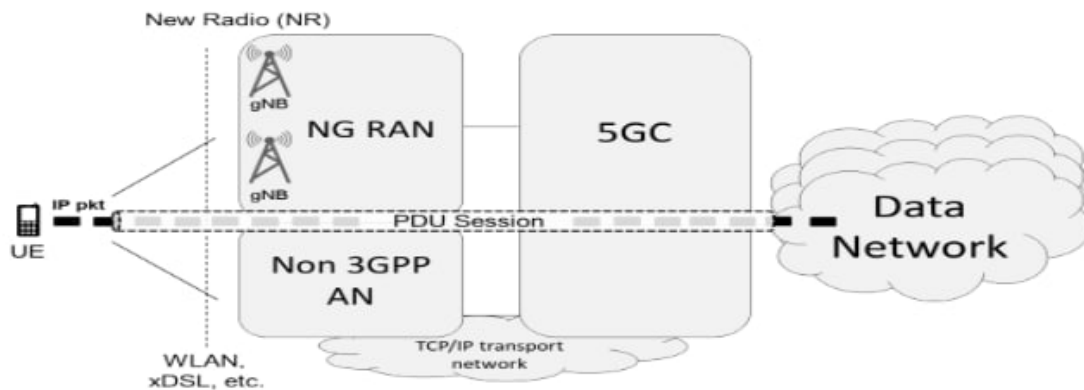


FIG. 2.11 : Architecture de réseau 5G [30].

Comme illustré dans la figure (FIG. 2.11), le réseau **5G** relie l'équipement utilisateur (**UE**) à des réseaux de données externes. La session **PDU** (Protocol Data Unit) représente le service de connectivité **5G**, elle est constituée par une séquence de tunnels **NG** dans le **5GC** plus un ou plusieurs supports radio sur l'interface radio. Cet ensemble de "tubes" relie étroitement l'UE à ses fonctions de contrôle ainsi qu'au réseau de données externe pour l'échange de trafic utilisateur [30].

Une session **PDU** est très similaire à un porteur **EPS** (Evolved Packet System) à **LTE**, à l'exception du modèle de **QoS** et des unités de données utilisateur prises en charge.

En effet, une session **PDU** peut transporter non seulement les paquets **IP** de l'utilisateur, mais aussi les trames Ethernet non encapsulées, permettant ainsi une communication de couche **2** entre les groupes d'**UE**. Le modèle **5G** repose sur le nouveau concept de flux **QoS**, où un flux représente la plus grande granularité de la différenciation **QoS**. Les divers flux de **QoS** peuvent être rattachés à une seule session **PDU** [30].

La figure (FIG. 2.12) illustre les divisions entre les fonctions **5G** exécutées dans le **NG-RAN** et le cœur **5G**.

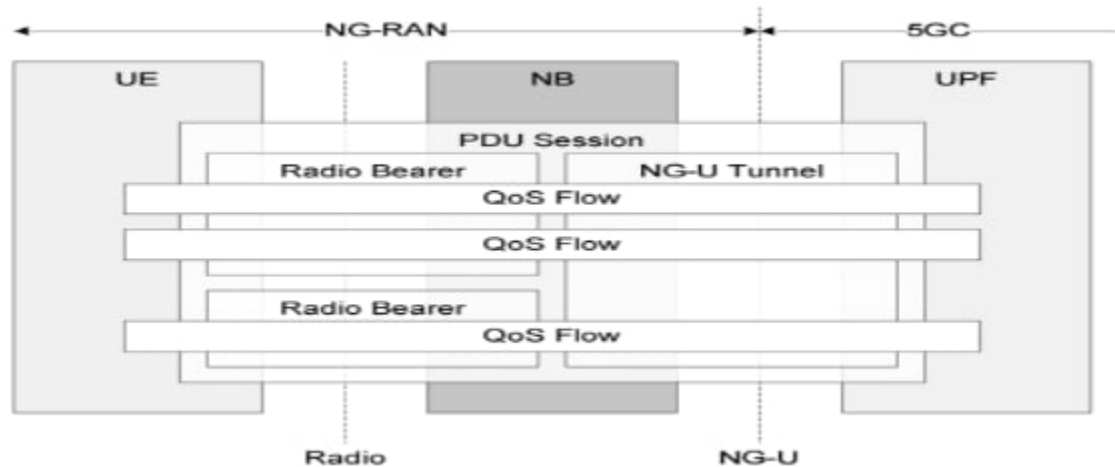


FIG. 2.12 : Plan utilisateur (UP) pour la session PDU et le flux QoS [36].

En bordure, le **NG-RAN** est responsable de l'établissement, de la maintenance et de la libération des parties des sessions **PDU** qui traversent l'interface radio.

Il fait face à des problèmes tels que l'insuffisance physique (par exemple, les interférences, la gestion de l'énergie, etc.), les handovers inter-**gNB**, et le multiplexage de session (planification). Les fonctions du **5GC** gèrent les parties restantes des sessions **PDU** ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio [30] (gestion de la mobilité, sécurité des adresses IP, allocation, etc.).

2.7.1 Réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN)

Comme montre dans la figure (FIG. 2.13), le **NG-RAN** est un ensemble de stations de base **5G**, appelées **gNBs**, qui sont connectées au **5GC** via un ensemble d'interfaces logiques.

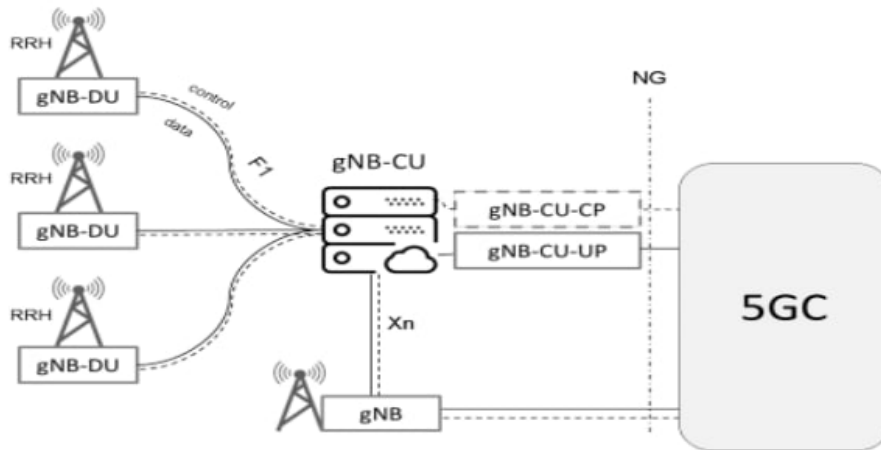


FIG. 2.13 : Architecture de NG-RAN [36].

Les gNBs peuvent être interconnectées via l'interface **Xn** pour améliorer les fonctions de mobilité (**handover**) et de gestion (**coordination d'interférences intercellulaires**). Le fonctionnement de la gNB est parfois distribué [36].

Dans ce cas, l'architecture résultante comprend une unité centrale (gNB-CU) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) connectées à une carte radio distante (RRH). L'unité centrale est ensuite divisée en deux parties, l'une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions de plan utilisateur (gNB-CU-UP).

2.7.2 Réseau central 5G (5GC)

L'architecture du cœur 5G occupe une place centrale dans la nouvelle spécification 5G, répondant ainsi aux exigences de débit plus élevé que la 5G doit prendre en charge. Conformément à la norme 3GPP, ce nouveau cœur 5G adopte une architecture de services (SBA) qui englobe toutes les fonctions et interactions de la 5G, notamment l'authentification, la sécurité, la gestion de sessions et l'agrégation du trafic provenant des appareils terminaux. Il met en avant la virtualisation des fonctions réseau (NFV), avec des fonctions logicielles virtualisées pouvant être déployées sur l'infrastructure MEC (Multi-Access Edge Computing), essentielle aux principes architecturaux de la 5G [37].

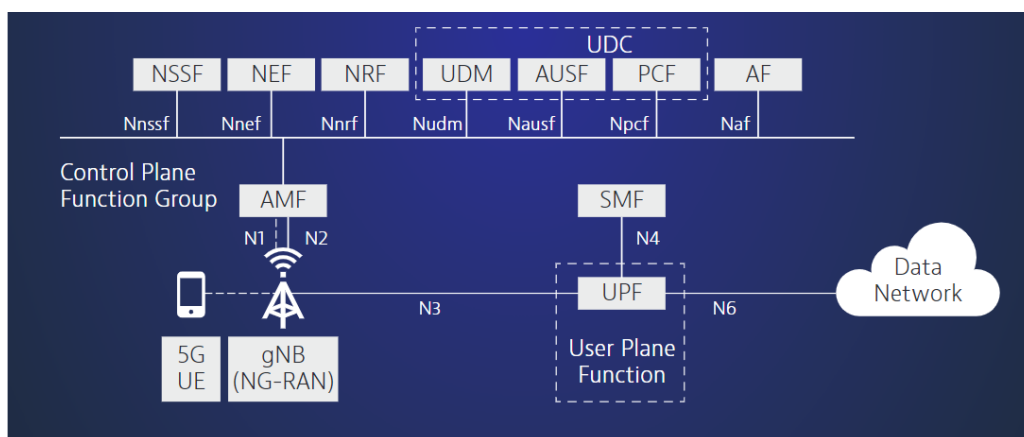


FIG. 2.14 : Architecture du système 5G [36].

La figure (FIG. 2.14) montre l'architecture du système 5G :

- **NSSF (Network Slice Selection Function)** : Permet de choisir les tranches de réseau qui desservent l'UE ainsi que l'AMF optimal pour cette tâche.
- **NEF (Network Exposure Function)** : Autorise l'accès aux capacités des réseaux ainsi qu'aux événements liés au réseau UE pour la 3^e partie pour des fonctions d'application, de l'informatique en périphérie et d'autres utilisations. Contrairement à la technologie 4G, cette fonctionnalité n'est pas disponible dans cette dernière.
- **UDM (Unified Data Management)** : Peut-être considéré comme une référence pour les informations telles que les identifiants, les détails de l'AMF et l'affectation SMF pour la session en cours.
- **AUSF (Authentication Server Function)** : Il s'agit d'un serveur d'authentification qui occupe un rôle crucial dans le réseau 5G. Il facilite l'enregistrement de l'équipement mobile en réalisant une double authentification, impliquant à la fois l'entité AMF et l'UE, à partir de vecteurs d'authentification fournis par l'AUSF.
- **PCF (Policy Control Function)** : Il s'agit d'une entité unifiée qui fournit des règles (QoS, filtrage, charge, etc.) à d'autres fonctions de plan de contrôle telles que le SMF.
- **AF (Application Function)** : Cette fonction agit comme une entité semblable à un serveur d'application, facilitant l'interaction avec d'autres fonctions réseau du plan de contrôle. Les fonctions applicatives peuvent être exploitées pour divers services d'application et associées à l'opérateur de réseau ou à des tiers de confiance.
- **AMF (Access and Mobility Management Function)** : Il gère toutes les signalisations du 5GC, provenant et allant à l'UE. Contrairement au SMF, il s'agit d'une seule fonction présentée dans plusieurs tranches. Il prend en charge l'accès de l'utilisateur au réseau et la gestion de la mobilité en interagissant avec l'UE et d'autres NF.
- **SMF (Session Management Function)** : Elle est une fonction du réseau de communication 5G (5GC) qui permet de gérer et de contrôler les sessions utilisateur. Elle est chargée de la configuration et de la gestion des tunnels NG, de l'attribution des adresses IP via DHCP, de la gestion de la qualité de service (QoS) et de la redirection du trafic en fonction des politiques de sécurité et des exigences des applications [30].

2.8 Modèle de propagation

La modélisation de la propagation est essentielle pour la conception et l'optimisation des réseaux sans fil, y compris la 5G. Elle simule le canal de propagation entre un émetteur et un récepteur, ce qui conduit à calculer l'affaiblissement du trajet et de prédire les niveaux de signal à différentes positions [38]. Le modèle de propagation prend en compte des facteurs tels que la puissance transmise, le gain d'antenne, la perte de câble, la perte de pénétration dans les bâtiments et les marges d'interférence. Le choix du modèle de propagation dépend du scénario spécifique et de la bande de fréquence [39].

Il existe plusieurs types de modèles de propagation, notamment [40] :

1. **Modèle de perte de chemin en espace libre (FSPL)** : Ce modèle suppose qu'il n'y a pas d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur et que le signal se propage en ligne droite.

La perte sur le trajet est inversement proportionnelle au carré de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

2. Modèle de réflexion sur le sol à deux rayons : Ce modèle de propagation tient compte à la fois du trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que du trajet réfléchi par le sol. L'affaiblissement du signal sur le trajet est calculé en additionnant l'affaiblissement sur le trajet direct et l'affaiblissement sur le trajet réfléchi. Ce dernier est influencé par la hauteur de l'émetteur et du récepteur, ainsi que par la fréquence du signal. En prenant en considération ces différents paramètres, le modèle peut fournir une estimation précise de la puissance du signal reçu à une certaine distance de l'émetteur.

3. Modèle d'évanouissement par multiples trajets : Ce modèle prend en compte les interférences entre plusieurs signaux qui arrivent au récepteur par des chemins différents. La perte de chemin est affectée par le nombre et la force des chemins réfléchis, ainsi que par la fréquence du signal.

4. Modèles empiriques : Ces modèles sont basés sur l'analyse statistique des données de mesure et sont spécifiques à certaines bandes de fréquences ou à certains environnements.

Parmi les différents types de modèles de propagation, nous avons :

2.8.1 Modèle de propagation standard

Le modèle de propagation standard (**SPM**) est un modèle de propagation utilisé dans la planification des réseaux sans fil. Il est basé sur des formules empiriques et un ensemble de paramètres qui peuvent être ajustés pour régler le modèle de propagation en fonction des conditions de propagation réelles [41]. Le modèle de propagation standard est spécialement conçu pour prédire la propagation des ondes dans la plage de fréquences allant de **150 MHz** à **3500 MHz** sur de longues distances, généralement de **1 km** à **20 km**.

La formule SPM est exploitée pour calculer l'affaiblissement sur le trajet entre l'émetteur et le récepteur, et elle est basée sur la formule (2.1) [42] :

$$P_r = P_t (K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(h_t) + K_4 \text{DiffractionLoss} + K_5 \log(d) \log(h_t) + K_6 h_r + K_7 \log(h_r) + K_{\text{clutter}} f_{\text{clutter}} + K_{\text{hill,los}}). \quad (2.1)$$

Où :

- **P_r** : Puissance reçue en **dBm**.
- **P_t** : 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 **mètres**.
- **K_3** : Facteur de multiplication pour $\log(d)$.
- **h_t** : Hauteur effective de l'antenne de l'émetteur en **mètres**.
- **K_4** : Facteur de multiplication pour le calcul de la diffraction.

- **Diffraction Loss** : Diffraction Lors de pertes dues à la diffraction sur un chemin obstrué (dB).
- **K₅** : Facteur de multiplication pour $\log(d)$, $\log(h_t)$.
- **K₆** : Facteur de multiplication pour h_r .
- **K₇** : Facteur de multiplication pour $\log(h_r)$.
- **h_r** : Hauteur effective de l'antenne du récepteur mobile en **mètres**.
- **K_{clutter}** : Facteur de multiplication pour Moyenne des pertes pondérées dues à l'encombrement.
- **f_{clutter}** : Facteur de correction pour les régions vallonnées.

2.8.2 Modèle 3GPP TR 38.901

Le modèle **3GPP TR 38.901** est un rapport technique de la 3rd Generation Partnership Project (3GPP) qui vise à définir les modèles de canal pour les fréquences allant de **0,5 GHz** à **100 GHz**. Ce modèle est spécifiquement conçu pour les systèmes de communication mobiles de cinquième génération (**5G**) qui est utilisé pour simuler les conditions de transmission radioélectrique dans ces fréquences. Le modèle inclut des paramètres tels que la perte de signal, la distorsion et les effets de propagation pour représenter les conditions réelles de transmission radioélectrique dans ces fréquences [43].

2.9 Comparaison entre la 4G et la 5G

Par rapport à la **4G** et à la **4G LTE**, la **5G** n'est pas évolutive, mais révolutionnaire par le nombre et le type de cas d'utilisation qui ne peuvent pas être pris en charge par les générations cellulaires précédentes [44].

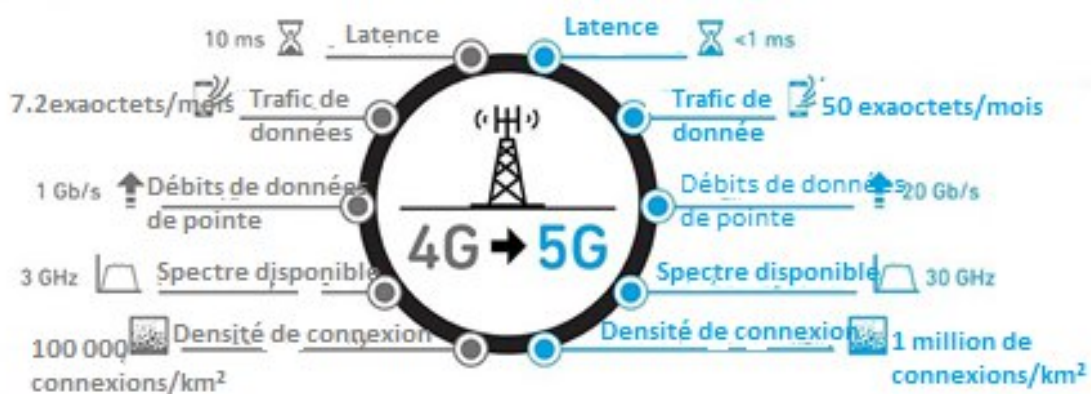


FIG. 2.15 : Comparaison entre la 4G et la 5G [44].

La figure (FIG. 2.15) et le tableau (TAB. 2.3) comparent les deux générations en termes de latence, de débits de pointe et de densité de connexion.

Les besoins technologiques pour les appareils **5G** peuvent être examinés en tenant compte des besoins spécifiques dans les deux domaines de fréquences : en dessous de **6 GHz** et les ondes millimétriques [45].

TAB. 2.3 : Comparaison entre la 4G et la 5G [46].

Caractéristique	4G	5G
Latence	60 à 98 ms	Moins que 1 ms
Vitesses de téléchargement potentielles	100 Mbps-1 Gbps	10 Gbps
Stations de base	Tours de téléphonie cellulaire	Petites cellules
Encodage OFDM	Canaux de 20 MHz	Canaux de 100-800 MHz
Densité cellulaire	200-400 utilisateurs par cellule	100 fois supérieur à la 4G

2.10 Présence mondiale de la 5G

Plus de **64 pays** ont déjà accès à la **5G**, mais certaines zones, comme l’Afrique, l’Asie du Sud, la Russie et l’Amérique centrale, peinent à la déployer. Voici quelques exemples de pays qui ont mis en place la **5G** [47] (FIG. 2.16) :

- **États-Unis** : Les États-Unis sont parmi les premiers pays à avoir mis en place la **5G**, avec des opérateurs comme **ATT**, **Sprint** et **Verizon** qui ont lancé leurs services **5G** en **2019**.
- **Chine** : La Chine a également été un leader dans le déploiement de la **5G**, avec des opérateurs comme **China Mobile**, **China Unicom** et **China Telecom** qui ont lancé leurs services **5G** en **2019**.
- **Corée du Sud** : La Corée du Sud a également été l’un des premiers pays à mettre en place la **5G**, avec des opérateurs comme **KT**, **SK Telecom** et **LG Uplus** qui ont lancé leurs services **5G** en **2019**.
- **Royaume-Uni** : Le Royaume-Uni a également lancé ses services **5G** en **2019**, avec des opérateurs comme **EE**, **Vodafone** et **O2**.

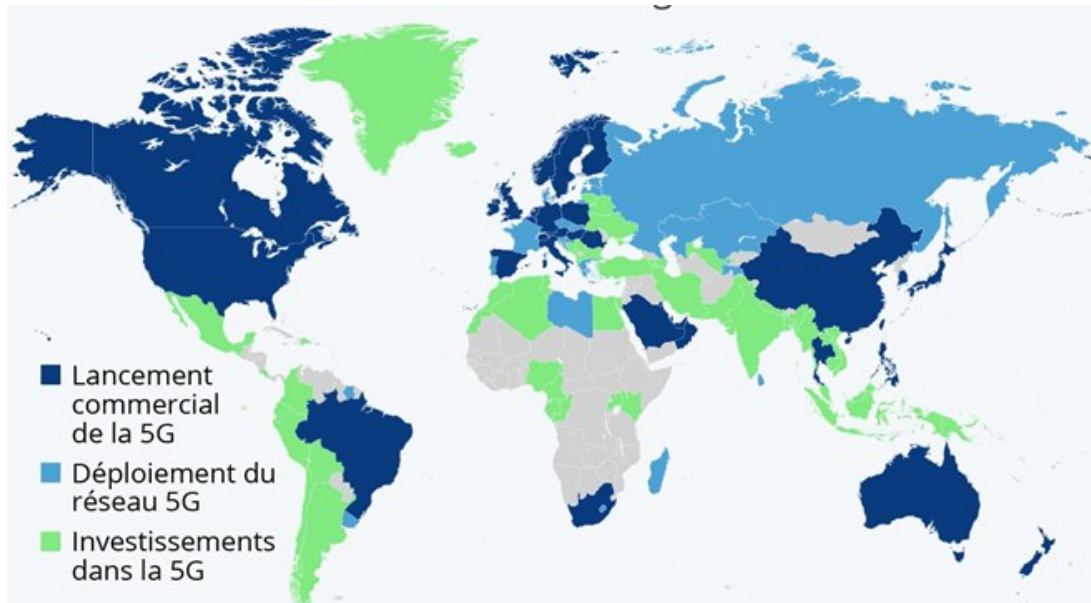


FIG. 2.16 : Déploiement de la 5G dans le monde [48].

Ces pays sont parmi les premiers à avoir mis en place la **5G**, mais d'autres pays sont également en train de déployer la technologie, marquant ainsi une avancée significative dans le domaine des réseaux mobiles à l'échelle mondiale.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les principaux éléments théoriques liés à notre étude sur la 5G, une nouvelle technologie d'accès radio qui diffère considérablement de la LTE en termes de ses caractéristiques. Nous avons également observé que ces caractéristiques clés ont un impact très positif sur cette technologie, ce qui facilite une planification adéquate. Dans le dernier chapitre, nous explorons la partie pratique de ce travail, où nous découvrirons l'outil de planification radio exploité dans le processus de planification.

Chapitre 3

Planification d'un réseau 5G selon la variation des rayons de cellules

3.1 Introduction

La simulation des réseaux mobiles est une méthode utilisée par les simulateurs (logiciels) pour reproduire le fonctionnement d'un réseau. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des outils informatiques spécifiques, également appelés logiciels de planification ou planificateurs. Il existe de nombreux planificateurs réseau disponibles, tels qu'**Atoll**, **Nokia Planer**, **Siemens Planer**, **Ericsson Planer**, etc.

Le but de ces logiciels est de concevoir des réseaux tout en garantissant la compatibilité avec les normes des télécommunications.

Ce chapitre vise à présenter la planification de la couverture d'un réseau **5G** sur trois types de cellules distinctes à l'aide du logiciel **Atoll**. Pour cela, nous allons analyser les paramètres calculés de la prédiction et la simulation.

3.2 Planification

3.2.1 Définition

La planification radio est une étape essentielle dans la conception des réseaux de télécommunications, notamment les réseaux **3G UMTS**, **4G LTE** et **5G**. Elle englobe un ensemble de procédures et d'approches visant à assurer une **couverture** optimale, à maintenir et améliorer la **qualité de service**, à étendre la portée du réseau et à gérer efficacement les ressources radio. Les trois principaux objectifs sont : la **couverture**, la **qualité** et la **capacité**.

Les objectifs de la **5G** ciblent les limitations posées par les anciennes générations des réseaux mobiles en termes de débit, qualité et services.

3.2.2 Étapes de la planification du réseau

Le processus de planification d'un réseau radio est divisé en quatre étapes principales qui sont : **Pré-planification**, **Planification**, **Vérification** et **Optimisation**.

l'enchaînement des étapes est illustré dans la figure (FIG. 3.1) :

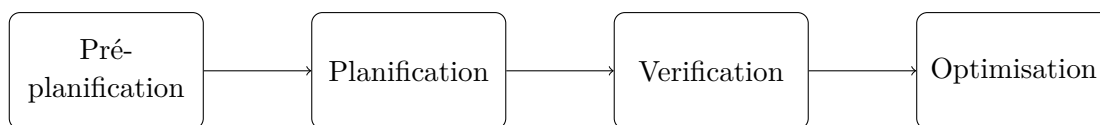


FIG. 3.1 : Processus de planification

1. **Pré-planification** : La phase de planification préliminaire est essentielle pour commencer la planification effective du réseau tel que :[49]

- (1) Les cartes de morphologie et de topographie.
- (2) La zone géographique à planifier.
- (3) Les détails sur les abonnés, comme le nombre d'utilisateurs.
- (4) Le nombre d'utilisateurs et les heures de pointe de ce trafic.
- (5) Les services demandés.

2. **Planification** : La phase de planification repose sur le dimensionnement et la configuration initiale du réseau. C'est la première étape pour établir la valeur nominale de la planification, qui concerne la couverture du réseau radio et la planification des capacités à l'aide d'un outil dédié [50].

Le plan nominal ne précise pas encore les emplacements précis des sites, mais il donne une première idée des emplacements potentiels et des distances entre eux.

3. **Vérification** : La vérification est la phase qui suit l'installation du site, mais avant sa mise en service pour les utilisateurs. Son objectif est d'assurer le bon fonctionnement du réseau en effectuant les actions suivantes :[50]

(1) Correction des paramètres RF afin de corriger les éventuelles erreurs survenues lors de l'installation.

(2) Évaluation de la fonctionnalité du réseau en termes de couverture, de capacité et de qualité à travers des tests de conduite.

(3) Vérification des indicateurs de performance KPI.

4. **Optimisation** : L'optimisation du réseau est la dernière étape pour évaluer la satisfaction des clients et résoudre leurs réclamations [50].

Cette étape implique deux mesures au niveau du réseau et du contrôle de terrain.

3.3 Planification avec Atoll

Cette section vise à présenter le déroulement de la simulation qui sera divisée en trois parties en utilisant le processus d'importation des sites **4G** qui sont automatiquement définis par *Atoll*. C'est-à-dire que pour la mise en place d'un site avec *Atoll*, plusieurs techniques sont disponibles. On peut utiliser la méthode "Hexagonal Design" pour créer des sites en groupe, ou la méthode "sites" pour créer des sites un par un. Une autre option consiste à importer une liste de sites pré-étudiés.

Pour toutes les planifications effectuées dans ce chapitre, nous utiliserons la méthode "Hexagonal Design", permettant à *Atoll* de placer automatiquement les sites sur la carte. Pour cela, on a effectué les étapes nécessaires pour les adapter et les optimiser pour une utilisation dans le contexte de la **5G**.

Les modèles de propagation choisis pour l'étude sont le modèle 3GPP TR 38.901 et le modèle de propagation standard, en raison de leur adaptation à la **5G NR** et à la bande de fréquence de **3,5 GHz** parmi tous les modèles de propagation disponibles dans *Atoll*, ces deux modèles sont adaptés à la **5G NR** et à la bande de fréquence de **3,5 GHz**.

3.4 Déroulement de la simulation

La simulation se divisera en 3 grandes parties :

- Planification pour une pico-cellule ;
- Planification pour une micro-cellule ;
- Planification pour une macro-cellule .

3.4.1 Planification radio pour une pico-cellule

3.4.1.1 Délimitation de la zone à couvrir

- Zone à couvrir

Une fois la carte de l'Algérie importée, nous allons définir les limites des zones à couvrir comme montre la figure (FIG. 3.2). Pour cette première partie de la simulation, la zone d'étude englobe quelques régions de la wilaya d'Oran, avec une superficie totale de **5,17 km²**.

Cette zone est densément peuplée avec principalement des habitations résidentielles, caractérisant ainsi une zone suburbaine.



FIG. 3.2 : Zone à couvrir à Atoll.

Cette zone est délimitée par les points indiqués sur la figure (FIG. 3.3) :

Propriétés	
Surface:	5.17 km ²
0,618012378W	35,692265509N
0,654070131W	35,691174948N
0,654720497W	35,705409801N
0,61865636W	35,70650093N
0,618012378W	35,692265509N

FIG. 3.3 : Propriétés de la surface.

3.4.1.2 Localisation des sites

La figure (FIG. 3.4) représente l'emplacement des sites pico-cellule.

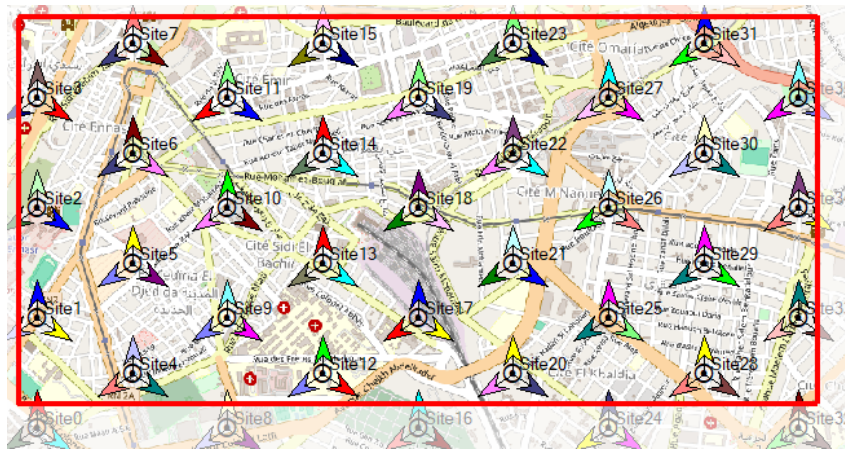


FIG. 3.4 : Positionnement des sites Pico-cellule.

- Paramétrage d'un modèle de propagation

Pour cette première planification, nous allons utiliser le modèle de propagation SPM (FIG. 3.5), parfaitement adapté aux données spécifiques de cette ville.

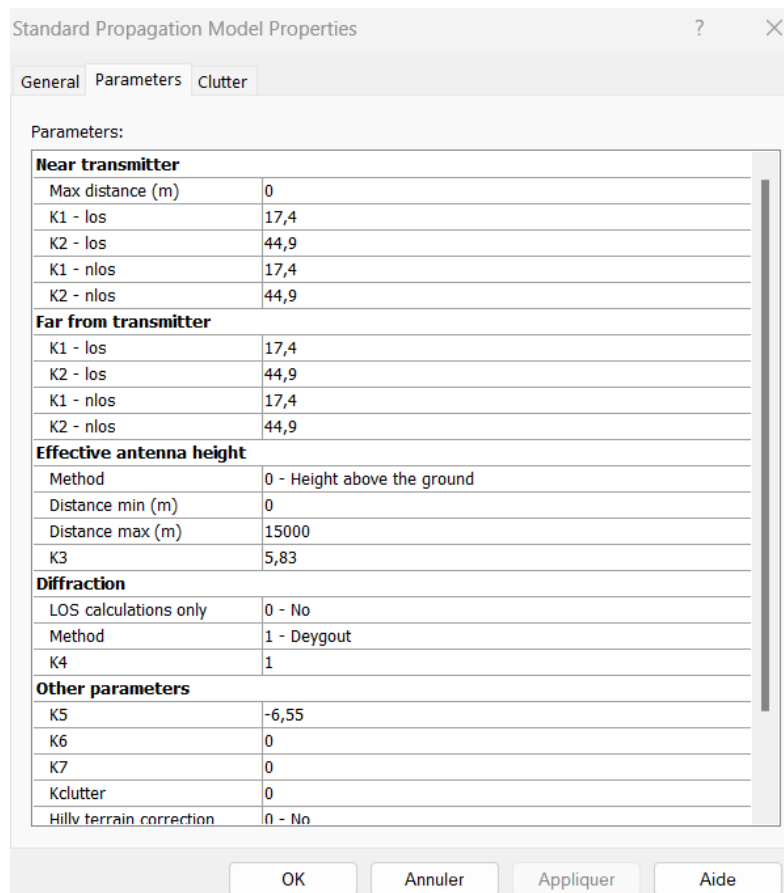


FIG. 3.5 : Propriétés de modèle de propagation SPM.

3.4.2 Planification radio pour une micro-cellule

3.4.2.1 Délimitation de la zone à couvrir

- Zone à couvrir

La zone étudiée dans cette seconde partie concerne la ville de **Tlemcen** comme illustré dans la figure (FIG. 3.6), qui s'étend sur une superficie totale de **14,56 km²**. Cette zone est considérée comme **urbaine** en raison de sa densité de population.

Par conséquent, il est possible d'installer des sites couvrant des **microcellules** dans cette zone.



FIG. 3.6 : Zone à couvrir sous Atoll.

Cette zone est délimitée par les points spécifiés dans la figure (FIG. 3.7) :

Propriétés

Surface: 14.56 km²

1,292115346W	34,874629568N
1,347694616W	34,872651161N
1,349050923W	34,898349084N
1,293454446W	34,900329372N
1,292115346W	34,874629568N

FIG. 3.7 : Propriétés de la surface.

3.4.2.2 Localisation des sites

La figure (FIG. 3.8) illustre localisation des sites micro-cellule.

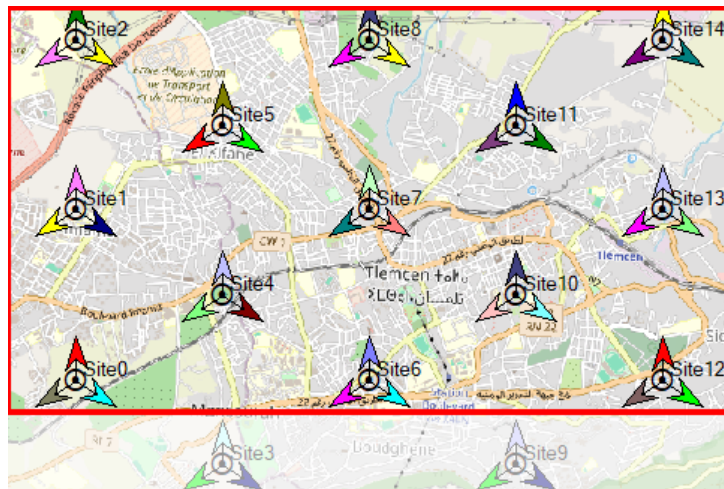


FIG. 3.8 : Positionnement des Sites Micro-cellule.

Pour cette deuxième phase de planification, aussi, nous utilisons le modèle de propagation SPM.

3.4.3 Planification radio pour une macro-cellule

3.4.3.1 Délimitation de la zone à couvrir

- Zone à couvrir

Pour cette dernière, la région concerne la zone **d'El Aricha** (FIG. 3.9), c'est une zone désertique de surface **51,34 km²** et commence à s'éloigner de la ville, ce qui se traduit par une diminution du nombre d'abonnés, une faible densité de logements et une mobilité limitée.

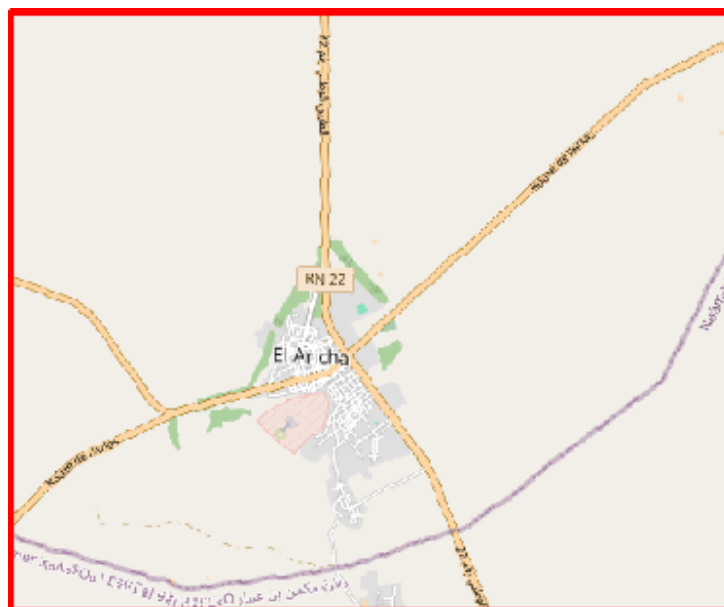


FIG. 3.9 : Zone sur Atoll.

Cette zone est délimitée par les points suivants :

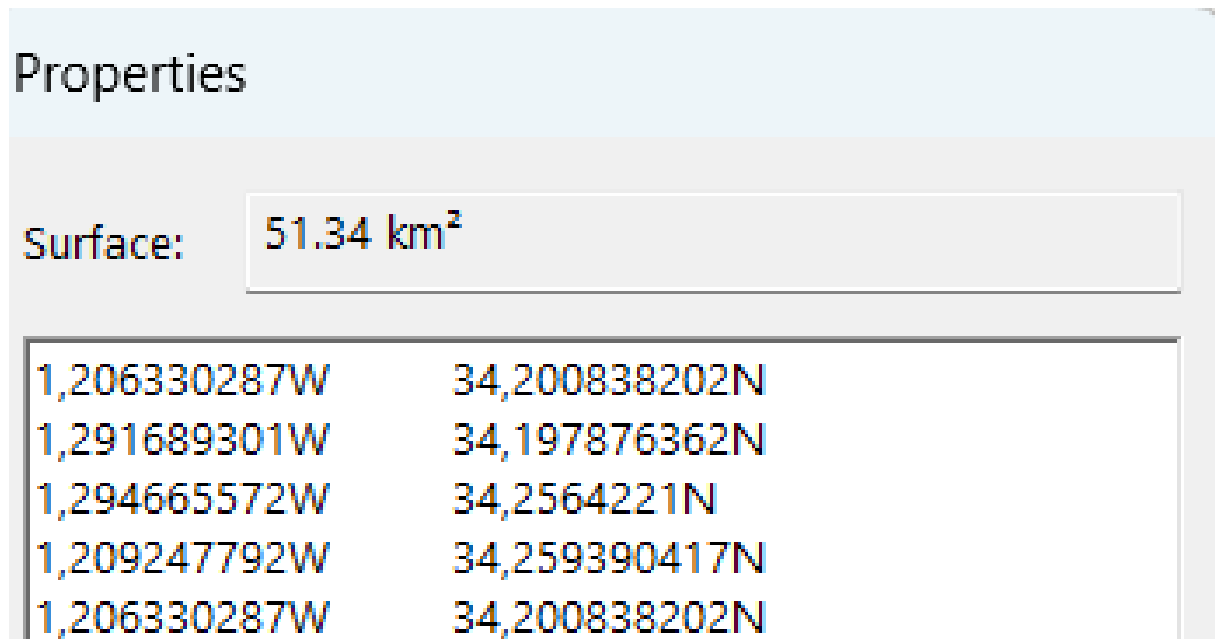


FIG. 3.10 : Propriétés de la surface.

3.4.3.2 Localisation des sites

La figure (FIG. 3.11) montre l'emplacement des sites macro-cellule.

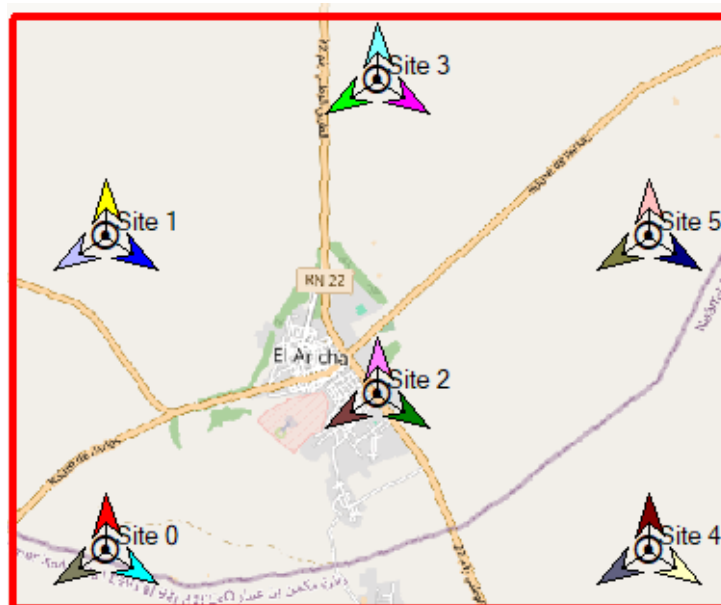


FIG. 3.11 : L'emplacement des sites macro-cellule.

- Paramétrage d'un modèle de propagation

Pour cette dernière planification, nous allons utiliser le modèle de propagation 3GPP 38.900 (FIG. 3.12).

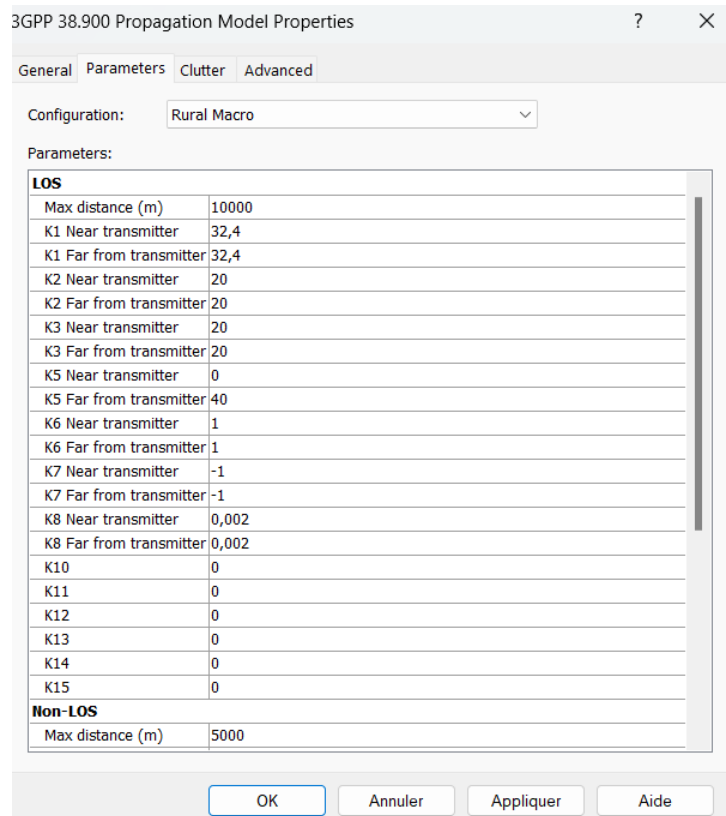


FIG. 3.12 : Propriétés de modèle 3GPP 38.900.

3.5 Prédiction de la couverture radio

ATOLL permet de réaliser de multiples prédictions telles que la **couverture du réseau**, la **qualité du réseau**, la **capacité du réseau**, les **zones de service**, etc (FIG. 3.13). Ces prédictions peuvent être adaptées selon les besoins spécifiques, en prenant en compte le type de zone, le type de transmetteur, le type d'abonnés et les services requis (**Qualité de service**, **QoS**, débit, etc.).

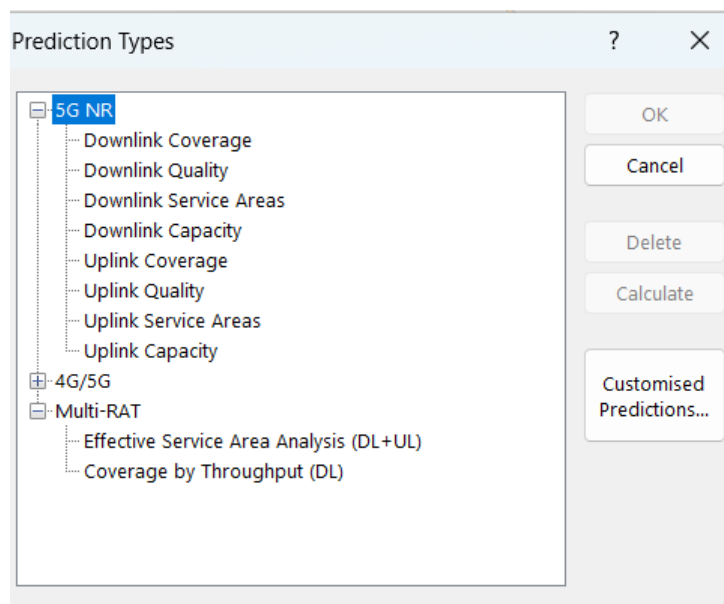


FIG. 3.13 : Différents types de prédictions.

Le tableau (TAB. 3.1) résume les différentes prédictions de couverture dans Atoll :

TAB. 3.1 : Prédiction de la couverture dans Atoll [51].

Prédiction de la couverture	Description
Couverture du réseau	Prévoit les niveaux de signal effectifs de différents types de signaux 5G NR pour la liaison descendante et la liaison montante. Cette prédiction inclut le niveau SS-RSRP, le niveau des signaux PDSCH et PUSCH, le faisceau du meilleur canal de contrôle et le faisceau du meilleur canal de trafic.
Qualité du réseau	Prévoit les niveaux d'interférence. Cette prédiction comprend les niveaux PDSCH et PUSCH C/ (I+N) et le niveau SS-SIRN.
Capacité du réseau	Pour les scénarios 5G NR, il montre le débit maximal de la bande passante allouée par RLC pour la liaison descendante et la liaison montante.
Domaines de service	Affiche les supports radio 5G NR en fonction du niveau C/ (I+N) pour chaque pixel pour la liaison descendante et la liaison montante. Affiche également les schémas de modulation utilisés.

Dans cette étude, nous intéressons sur les prédictions de : **couverture du réseau** (couverture par SS-RSRP) et la **prédiction de la couverture par niveau de signal**.

- Scénario 1

3.5.1 Prédiction pour une pico-cellule

1- Couverture 5G par SS-RSRP

SS-RSRP [52] est défini comme la moyenne linéaire des niveaux des signaux de synchronisation secondaires reçus.

Ces signaux sont spécifiques à chaque cellule qui transmet en utilisant les éléments sources. En **SS-RSRP** ≥ -80 dBm est le signal le plus fort qui donne des vitesses de données maximales, ≤ -100 dBm est le plus mauvais signal ou pas de connexion du tout.

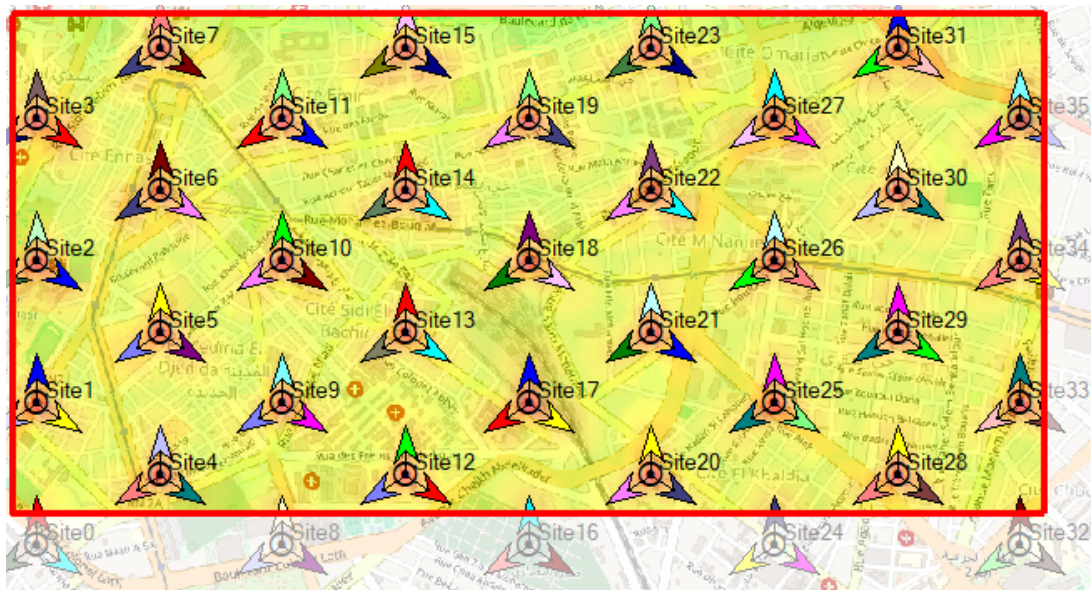


FIG. 3.14 : Prédiction de la couverture par SS-RSRP d'Oran.

La figure (FIG. 3.14) montre la couverture SS-RSRP sur la carte par 1 km^2 pour les sites couvrant des pico-cellules.

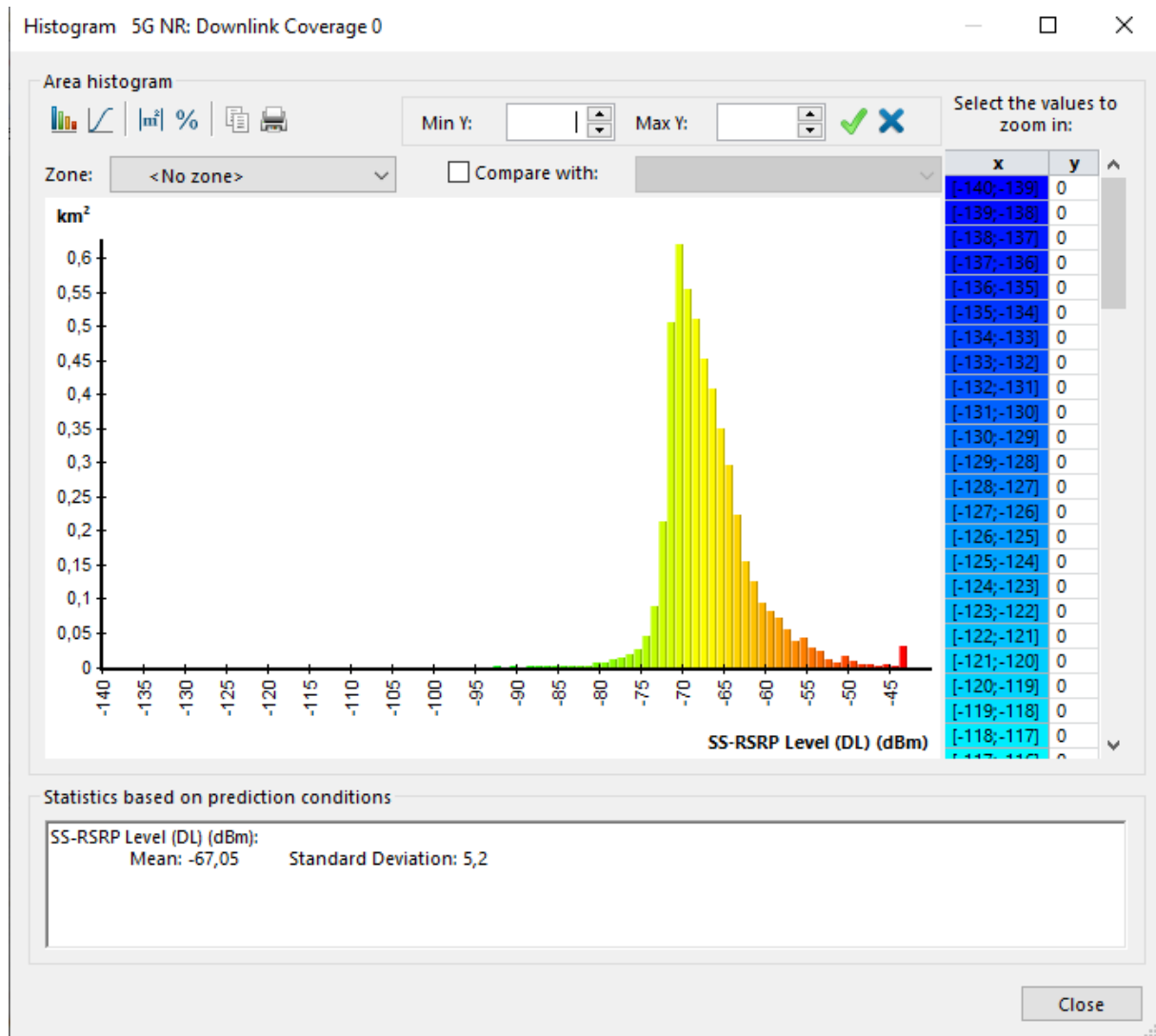


FIG. 3.15 : Histogramme sur le niveau de SS-RSRP.

D'après le résultat présenté dans l'histogramme (FIG. 3.15), il apparaît que la zone cible est couverte par un signal fort de **-67.05 dBm**.

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

L'évaluation de la couverture par le niveau de signal, ou **Coverage by signal level**, permet de déterminer la surface couverte par le réseau d'accès radio.

Selon la figure (FIG. 3.16), nous notons une couverture satisfaisante de la zone, bien que présentant des variations de couleur. Chaque couleur définit un niveau de signal : la majorité de la zone est couverte par le rouge, ce qui montre une valeur bien importante (**-70 dBm**), le reste de la zone est de couleur orange et jaune, également avec de bonnes valeurs.

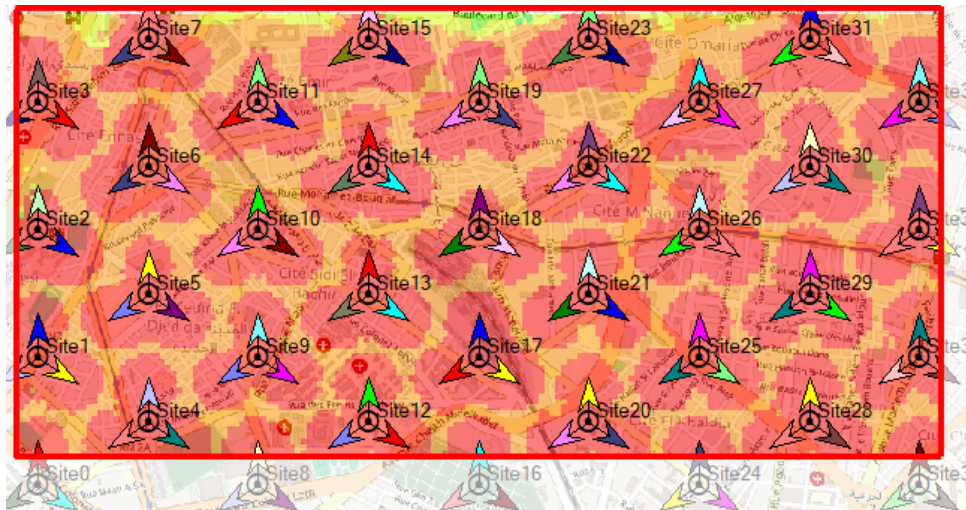


FIG. 3.16 : Prédiction par niveau de signal.

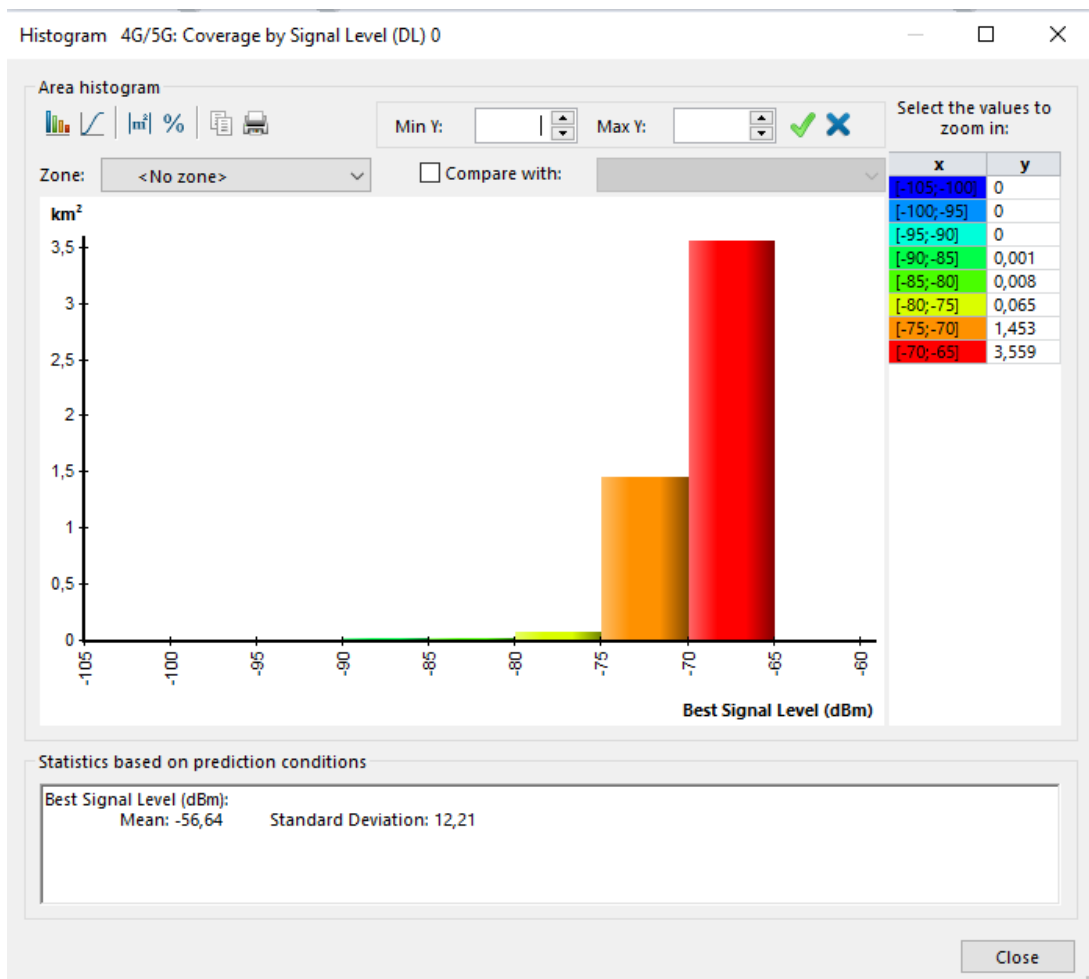


FIG. 3.17 : Histogramme sur le niveau de signal.

Pour qu'une zone soit couverte, il faut avoir un niveau du signal entre **-70 et -100 dBm**. D'après l'historgramme (FIG. 3.17), nous constatons un très bon niveau de signal (**-56.64 dBm**).

- Scénario 2

3.5.2 Prédiction pour une micro-cellule

1- Couverture 5G par SS-RSRP

la figure (FIG. 3.18) illustre la couverture **SS-RSRP** sur la carte par 1 km² pour les sites couvrant des microcellules.

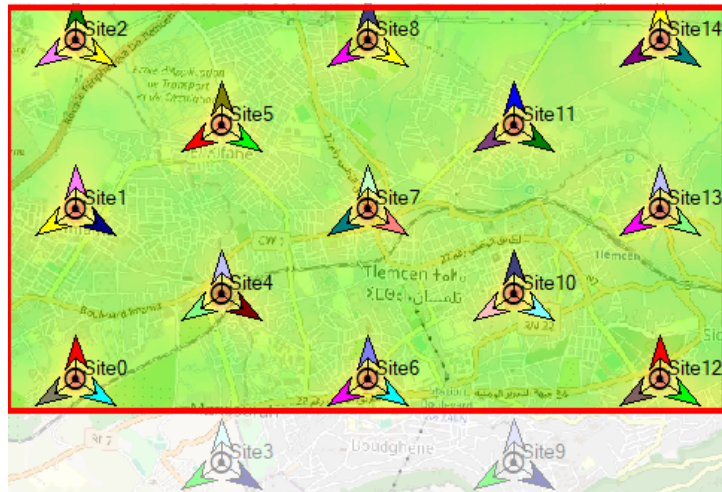


FIG. 3.18 : Prédiction de la couverture par SS-RSRP.

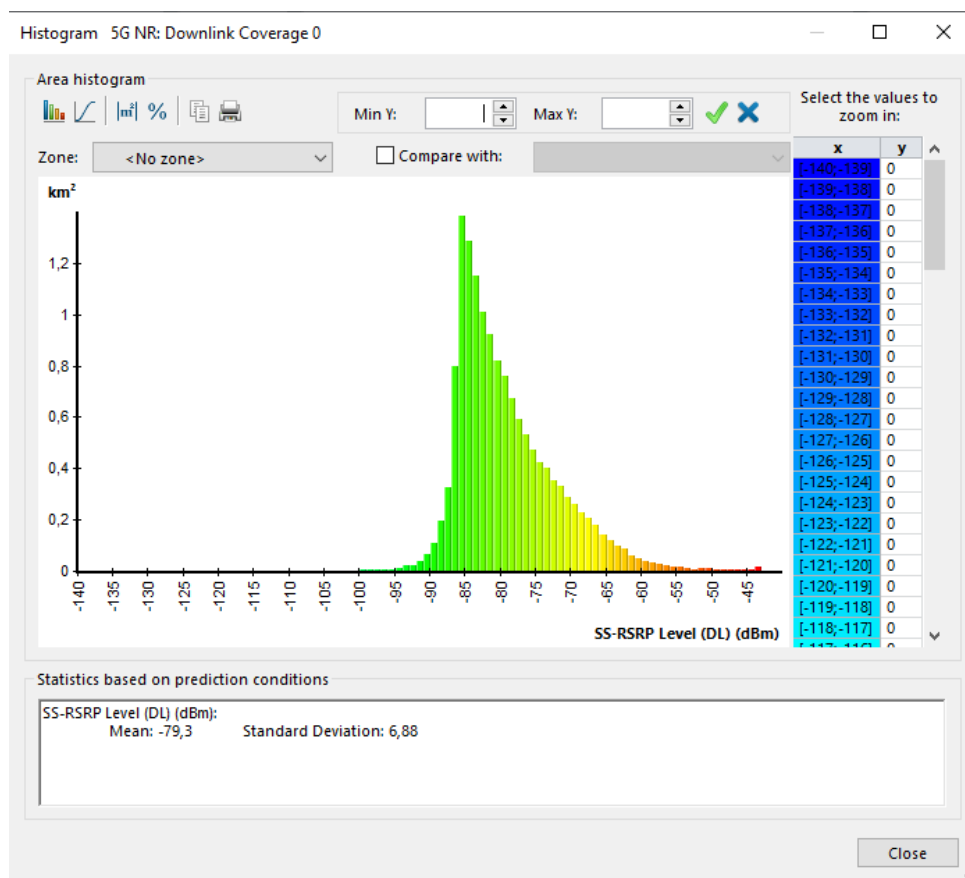


FIG. 3.19 : Histogramme sur le niveau de SS-RSRP.

D'après les résultats présentés dans l'histogramme (FIG. 3.19), il apparaît que la zone cible est couverte avec une moyenne de **-79,3 dBm**.

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

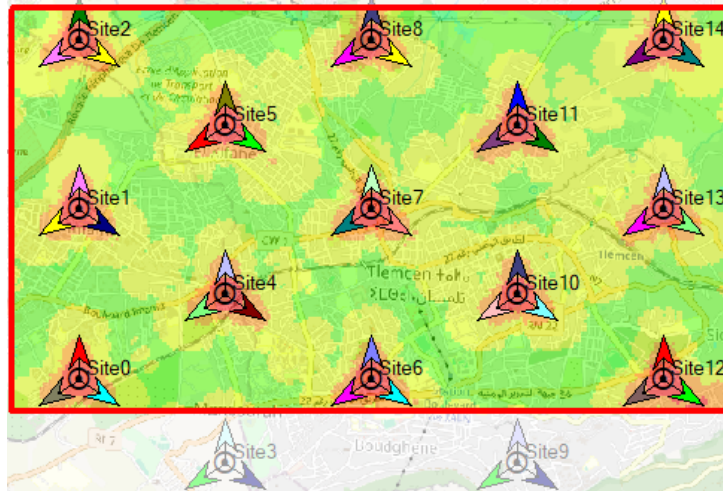


FIG. 3.20 : Prédiction par niveau de signal.

la figure (FIG. 3.20) illustre que la zone est entièrement couverte avec un niveau de signal moyen de réception.

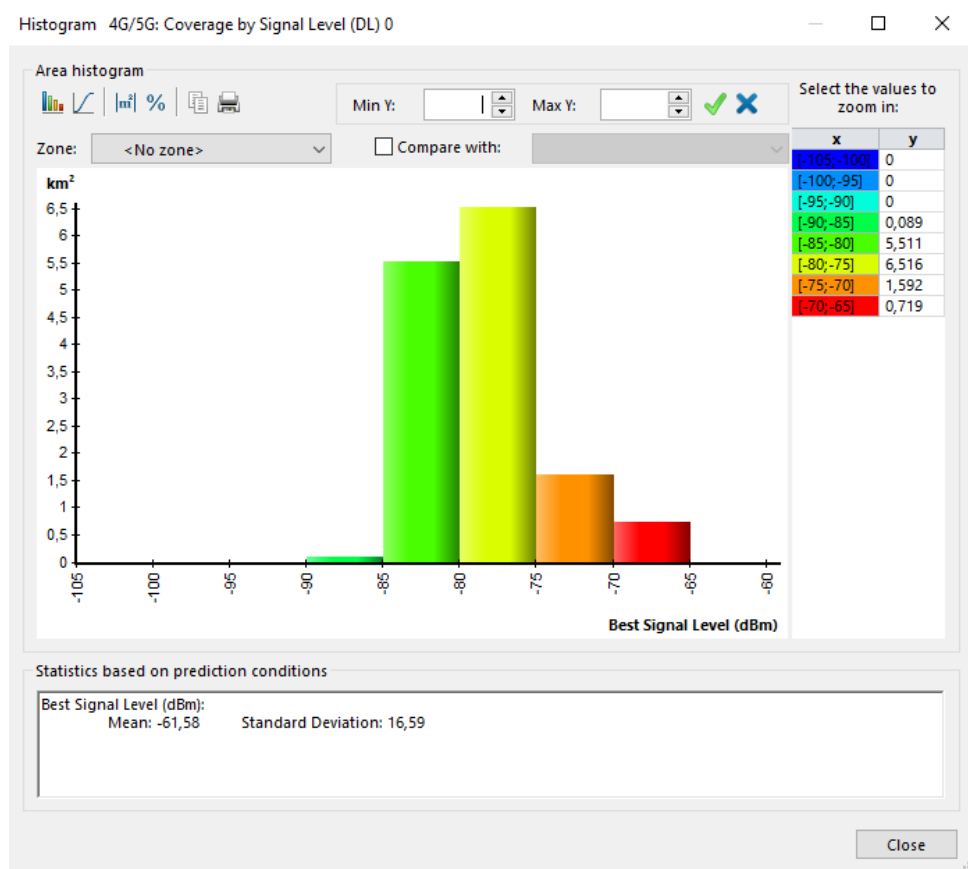


FIG. 3.21 : Histogramme sur le niveau de signal.

D'après l'histogramme (FIG. 3.21), la zone reçoit un signal entre $]-70 ; -65]$ dBm.

- Scénario 3

3.5.3 Prédiction pour macro cellule

1- Couverture 5G par SS-RSRP

la figure (FIG. 3.22) illustre la couverture **SS-RSRP** sur la carte pour les sites couvrant des macrocellules.

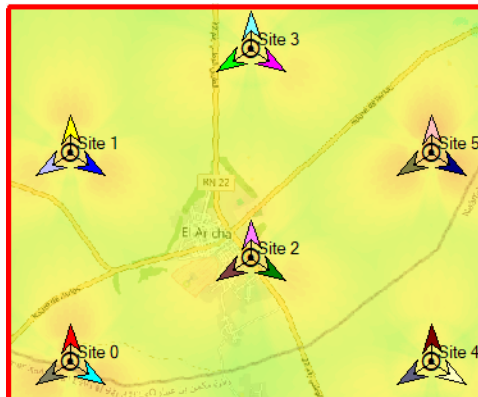


FIG. 3.22 : Prédiction de la couverture par SS-RSRP.

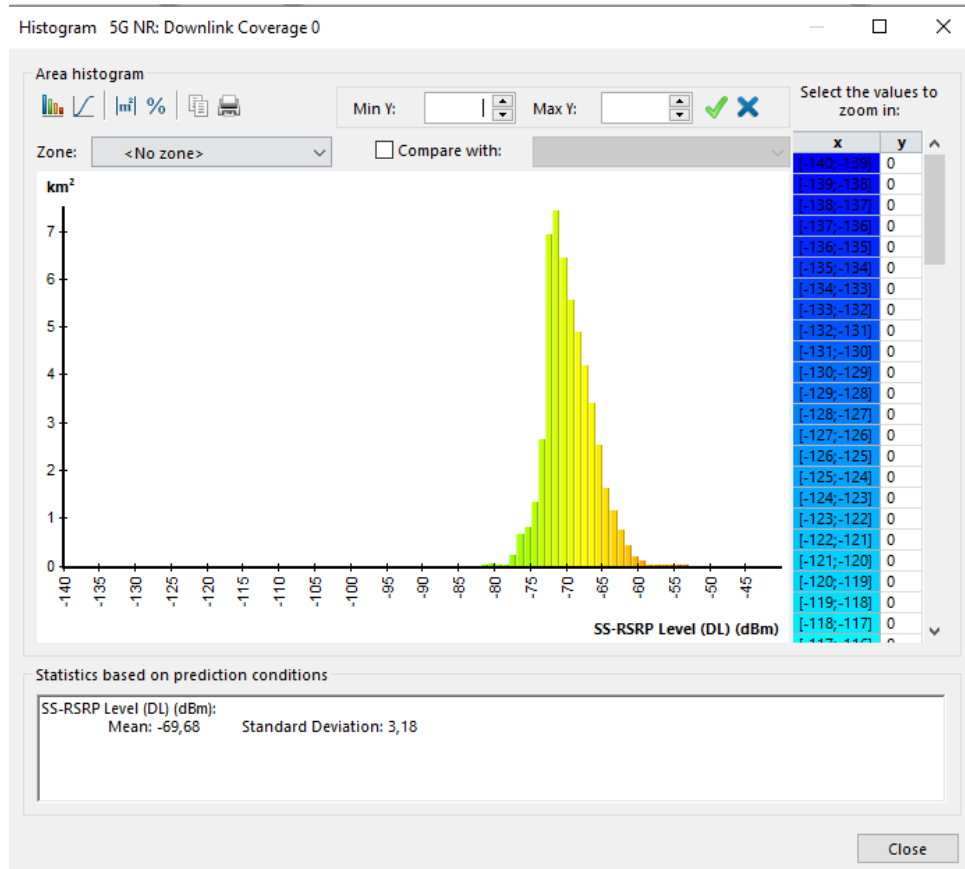


FIG. 3.23 : Histogramme sur le niveau de SS-RSRP.

D'après le résultat présenté dans l'histogramme (FIG. 3.23), il apparaît que la zone cible est couverte par un signal fort (-69.68 dBm).

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

la figure (FIG. 3.24) représente la prédiction par niveau de signal sur la carte graphique.

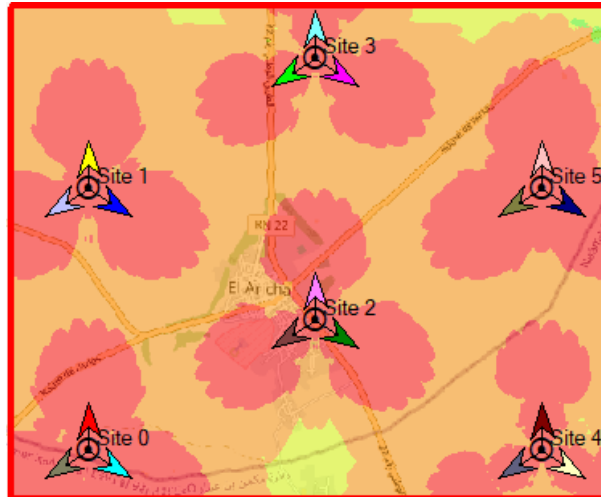


FIG. 3.24 : Prédiction par niveau de signal.

Nous observons que les valeurs de niveau de signal les plus élevées sont concentrées autour des sites (indiquées par les zones rouges), et que ces valeurs diminuent progressivement à mesure que nous nous éloignons des sites en raison de l'atténuation, comme le reflètent les couleurs utilisées (orange, jaune).

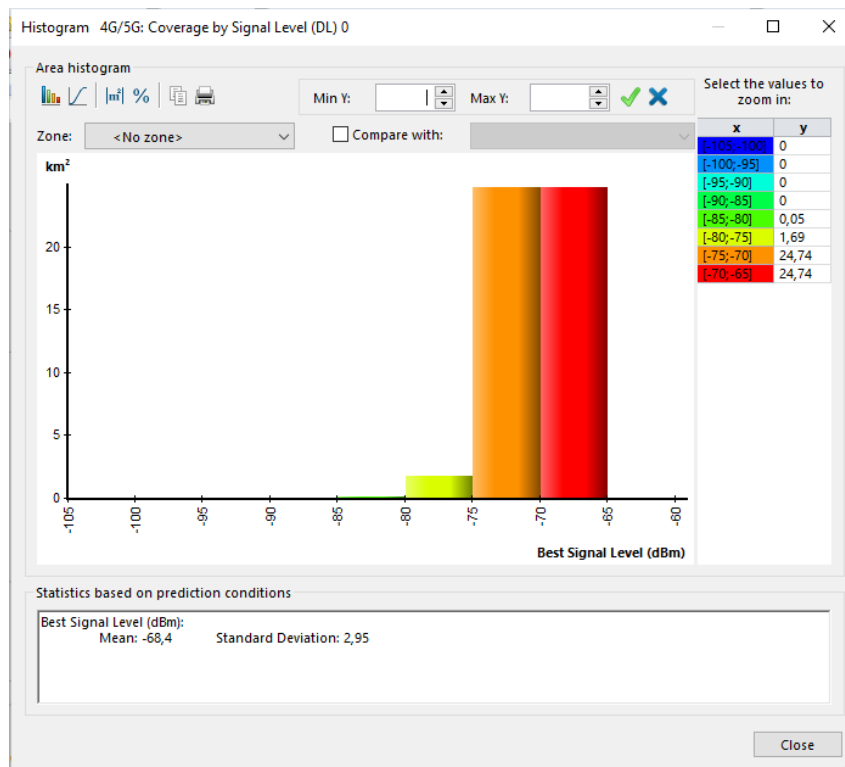


FIG. 3.25 : Histogramme sur le niveau de signal.

Selon l'histogramme (FIG. 3.25), le niveau de signal reçu dans la zone se situe entre **-70 et -65 dBm**.

3.6 Comparaison des résultats

- Scénario1 & scénario 2

Les histogrammes montrent la distribution des niveaux de **SS-RSRP**, meilleur niveau de signal pour le cas d'une pico-cellule, représentés par les barres en couleurs, et pour le cas d'une micro-cellule, représentés par les lignes noires.

1- Couverture 5G par SS-RSRP

En comparant les deux scénarios, nous pouvons observer que la zone couverte par les pico cellules (les barres en couleurs) offre un signal légèrement plus fort (**-67.05dBm**) par rapport à la couverture micro (**-79.3dBm**) (les barres en noires) (FIG. 3.26).

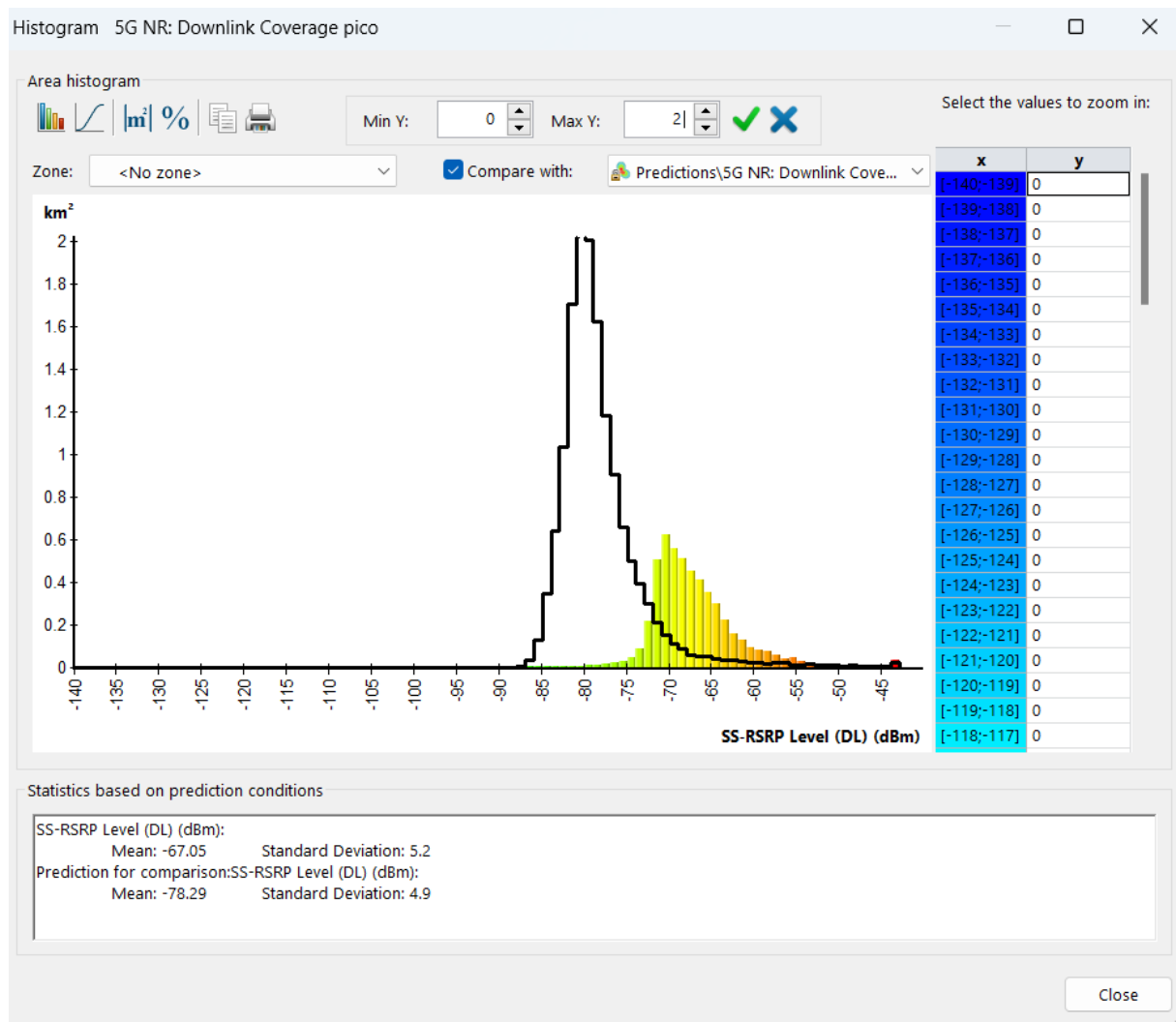


FIG. 3.26 : Comparaison du niveau de SS-RSRP entre scénario 1 et 2.

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

La couverture pico, avec un niveau de signal de (**-56.64 dBm**), offre un signal plus fort et des

performances légèrement supérieures comparées à la couverture micro de (-61.58 dBm)(FIG. 3.27).

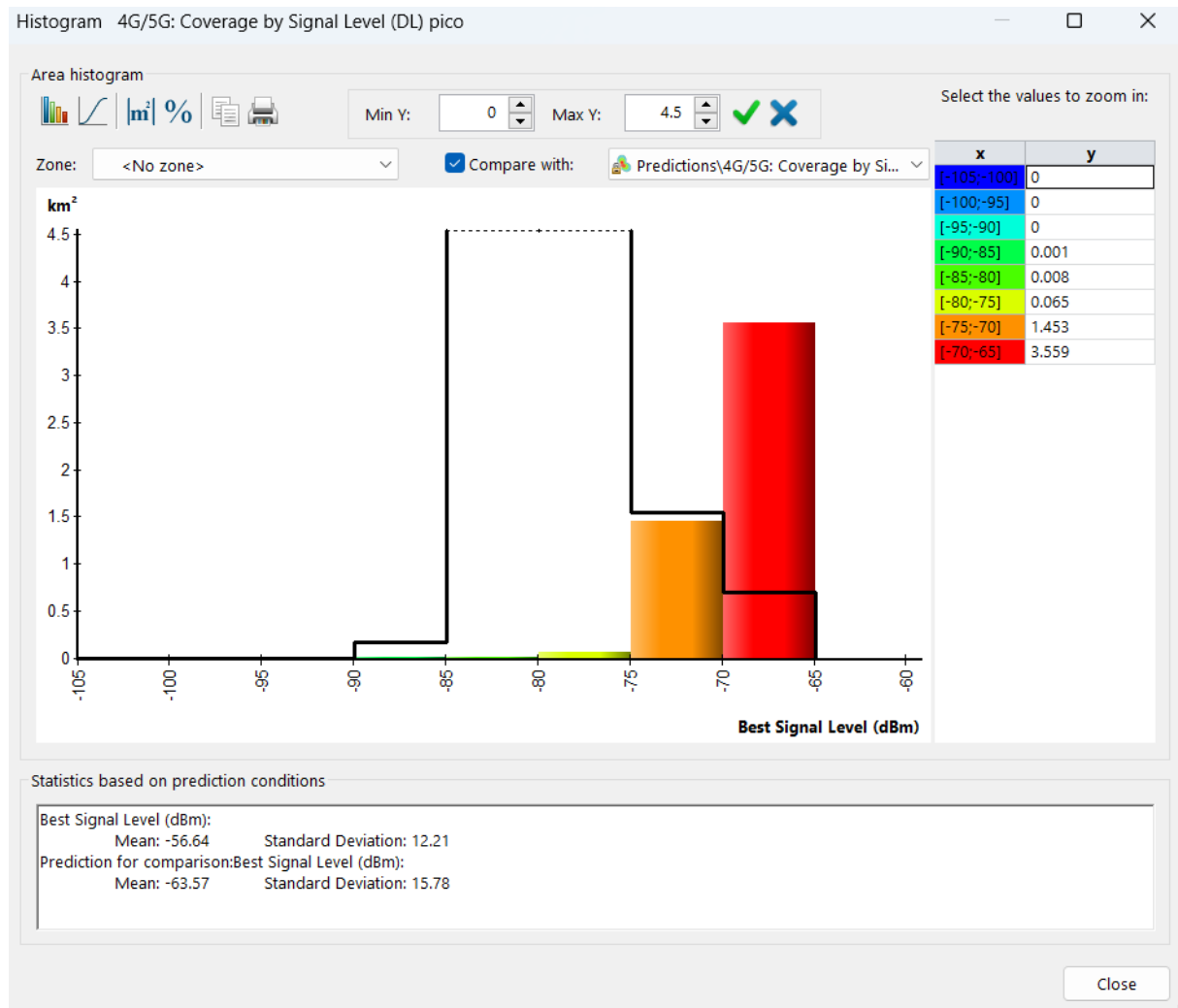


FIG. 3.27 : Comparaison du niveau de signal entre scénario 1 et scénario 2.

- Scénario 2 & Scénario 3

Les histogrammes montrent la distribution des niveaux de **SS-RSRP**, meilleur niveau de signal pour le cas d'une micro-cellule, représentés par les barres en couleurs, et pour le cas d'une macro-cellule, représentés par les lignes noires.

1- Couverture 5G par SS-RSRP

Avec un SS-RSRP de (-69.68 dBm), la couverture macro offre un signal nettement plus fort et des performances réseau supérieures à la couverture micro, qui a un RSRP de (-79.3 dBm). Les macro cellules couvrent de vastes zones avec une excellente qualité de service, tandis que les micro cellules sont mieux adaptées aux zones plus petites avec une bonne couverture (FIG. 3.28).

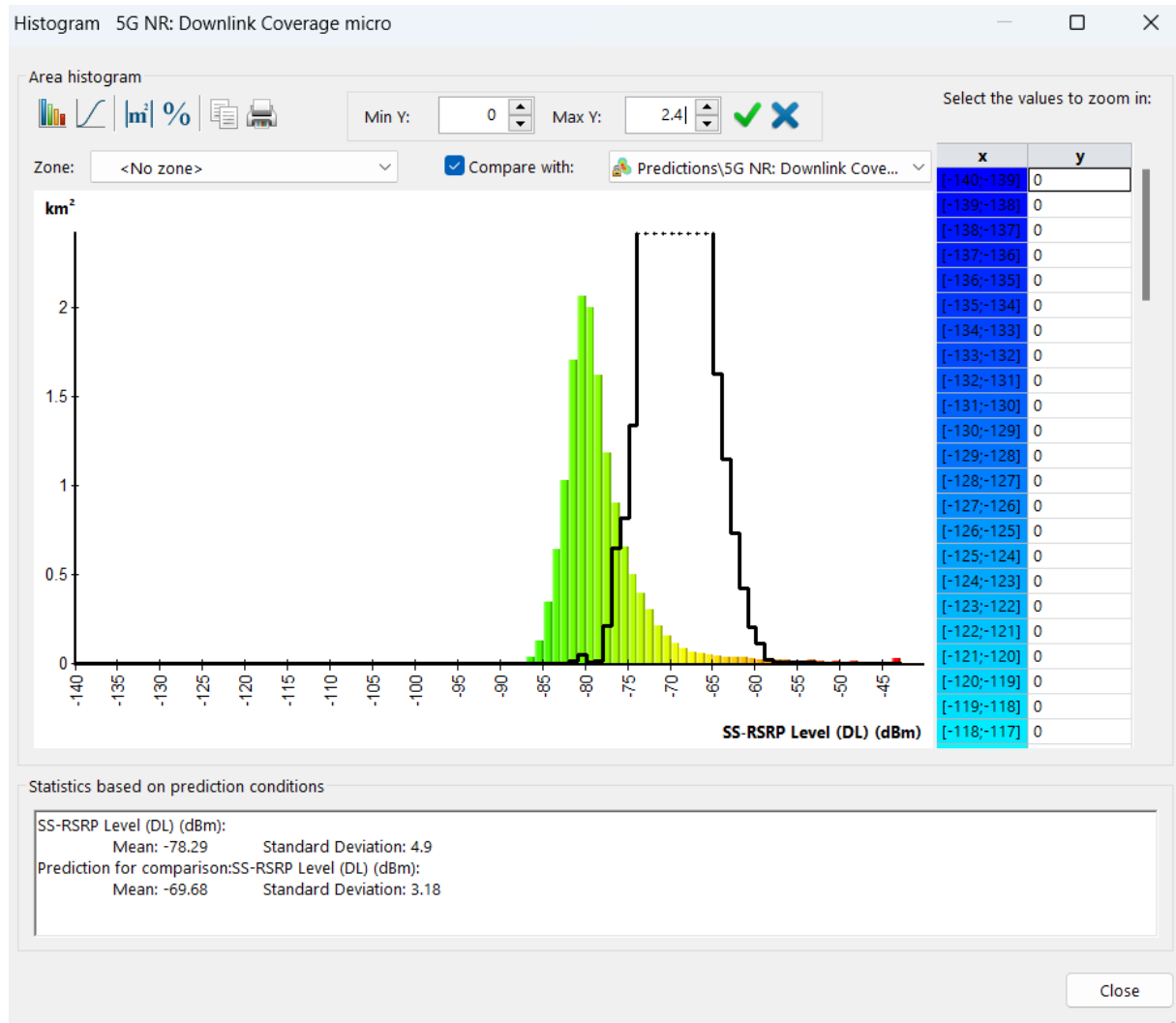


FIG. 3.28 : Comparaison de niveau de SS-RSRP entre Scénario 2 et Scénario 3.

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

Dans le deuxième scénario, le signal émis par la cellule micro est mesuré à **(-61.58 dBm)**, tandis que dans le troisième scénario, celui de la cellule macro est de **(-68.4 dBm)**.

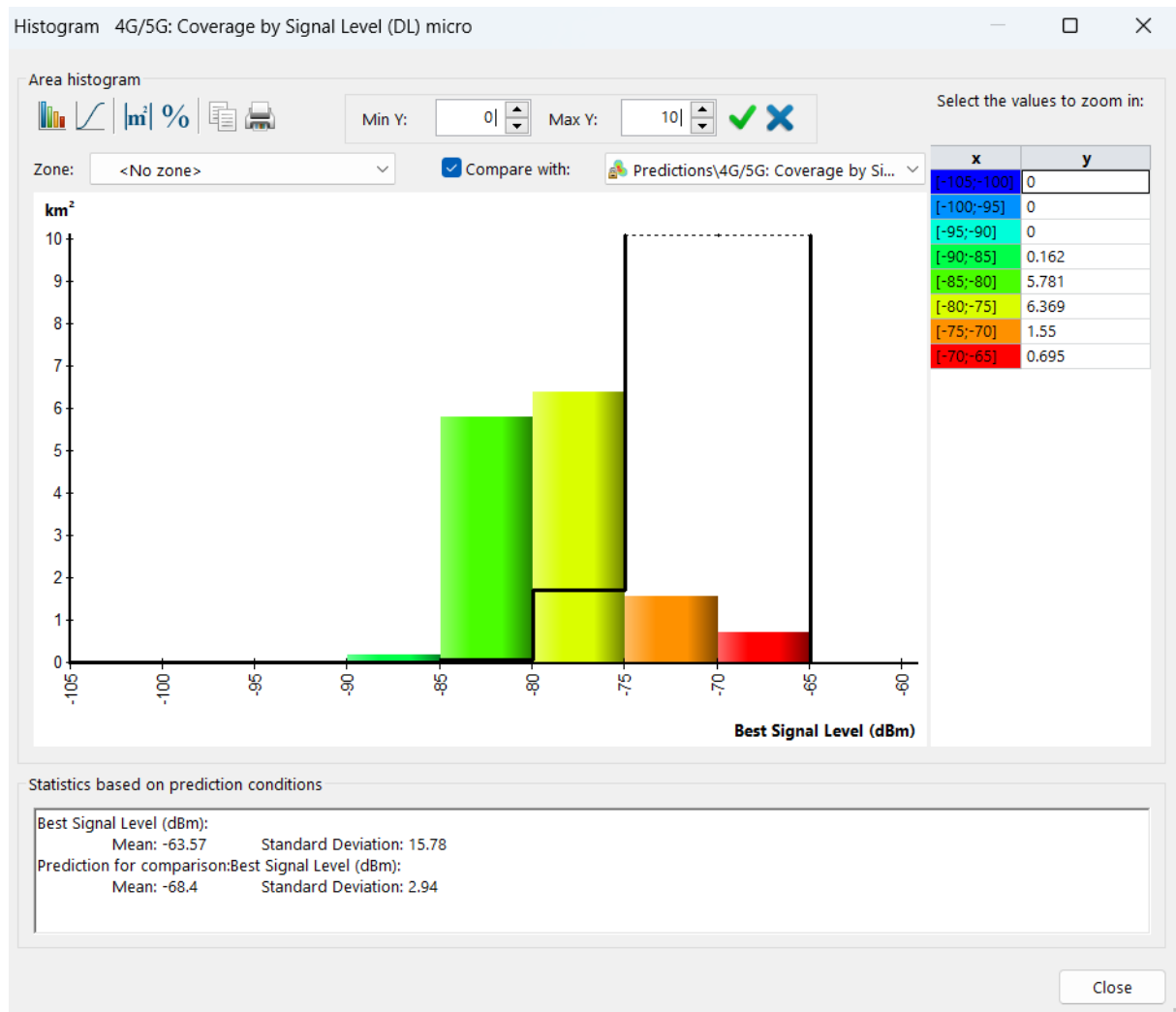


FIG. 3.29 : Comparaison de niveau de signal entre Scénario 2 et Scénario 3.

- Scénario 1 & Scénario 3

Les histogrammes indiquent comment les niveaux de **SS-RSRP** ainsi que le meilleur niveau de signal pour une pico-cellule sont représentés par des barres en couleur, tandis que pour une macro-cellule, ils sont indiqués par des lignes noires.

1- Couverture 5G par SS-RSRP

Comparativement, le niveau de **SS-RSRP** pour la cellule pico (**-67,05 dB**) est légèrement plus élevé que celui de la cellule macro (**-69,6 dB**), avec une différence d'environ **2,3 dB** entre les deux.

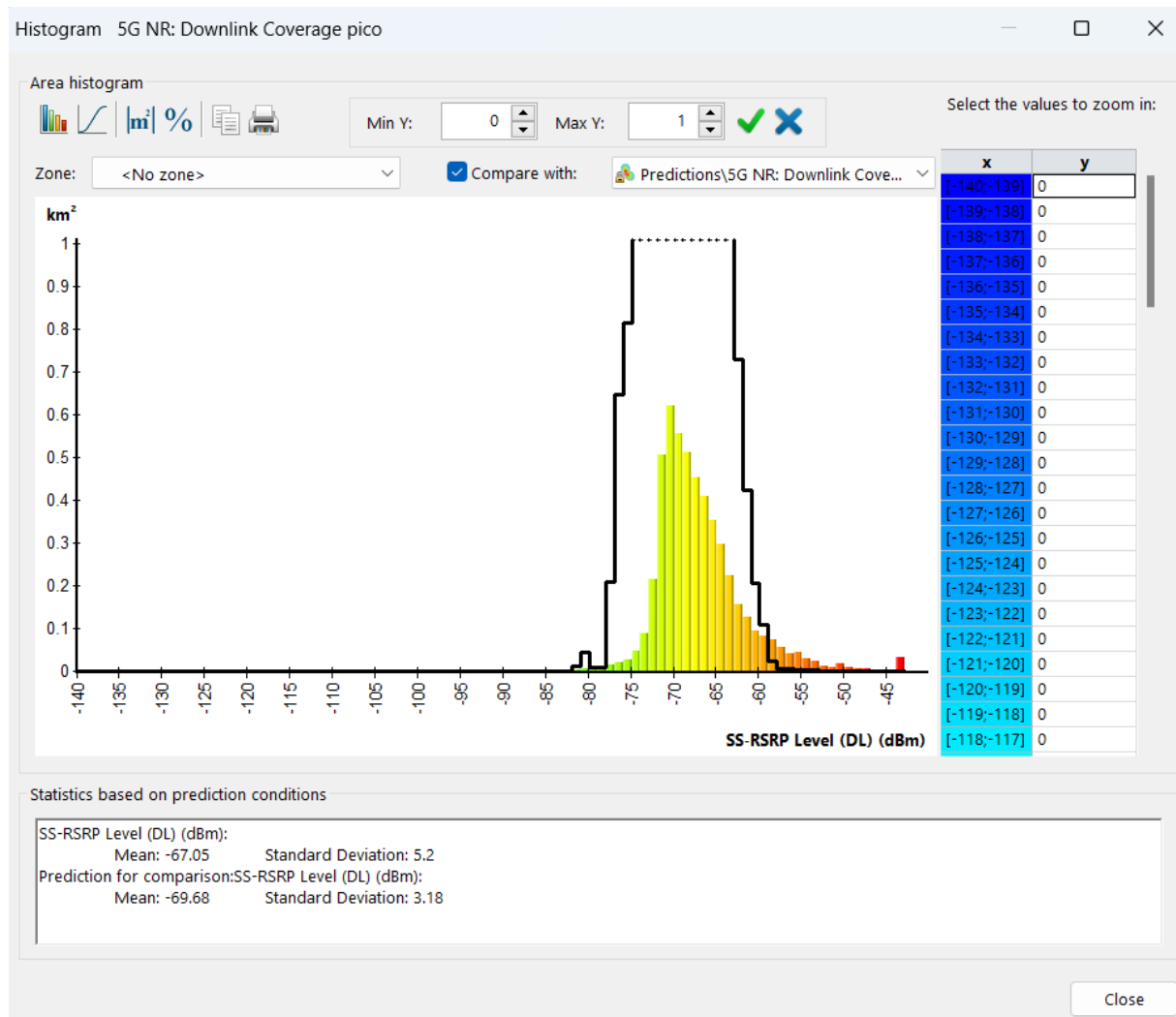


FIG. 3.30 : Comparaison de niveau de SS-RSRP entre Scénario 1 et Scénario 3.

Cela suggère que la cellule pico offre un signal légèrement plus fort que la cellule macro.

2- Niveaux de signal pour la couverture 5G

La mesure du signal de la cellule pico indique un signal de **(-56,64 dBm)** dans le premier scénario, alors que dans le troisième scénario, il est de **(-61,58 dBm)** pour la cellule macro.

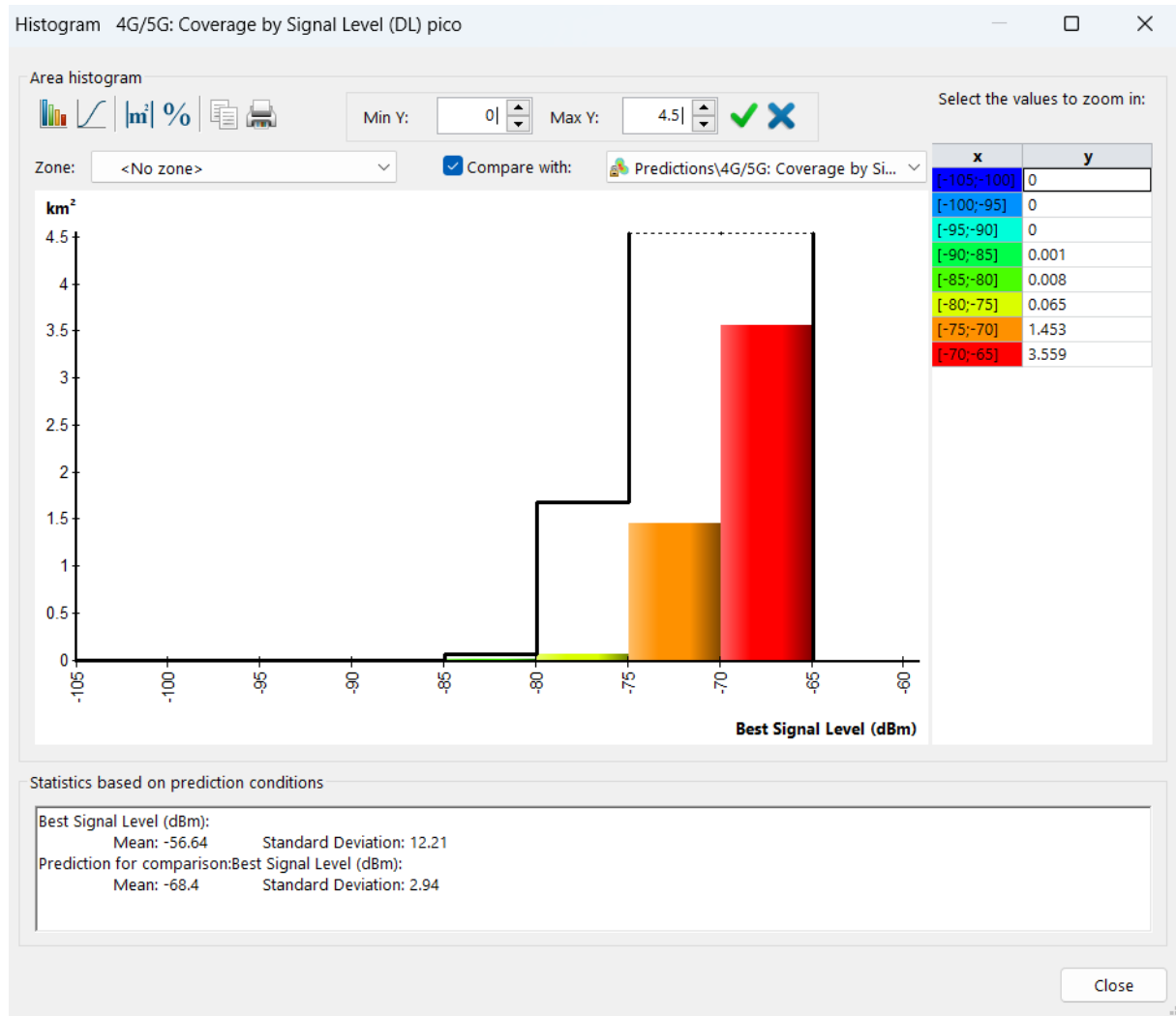


FIG. 3.31 : Comparaison de niveau de signal entre Scénario 1 et Scénario 3.

Les utilisateurs dans des zones couvertes par la cellule pico peuvent s'attendre à des vitesses de données plus élevées et à une stabilité de connexion accrue, tandis que ceux dans des zones couvertes par la cellule macro pourraient rencontrer des résultats relativement moins favorables.

3.7 Simulation

La figure (FIG. 3.32) illustre la répartition de la mobilité des équipements utilisateurs selon le service utilisé.

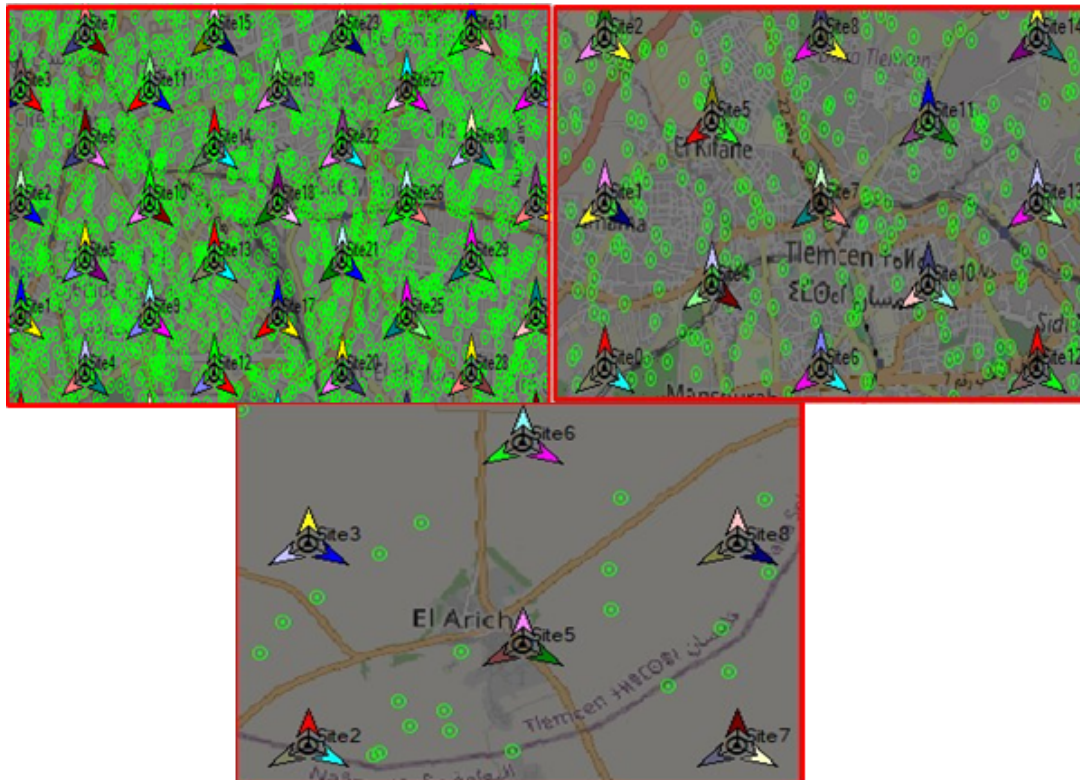


FIG. 3.32 : Distribution des utilisateurs 5G sur les zones Oran, Tlemcen, EL Aricha respectivement.

la figure (FIG. 3.33) présente l'état de l'abonné par rapport au site. Lorsqu'il est connecté, il est symbolisé en vert, sinon il est représenté en rouge.

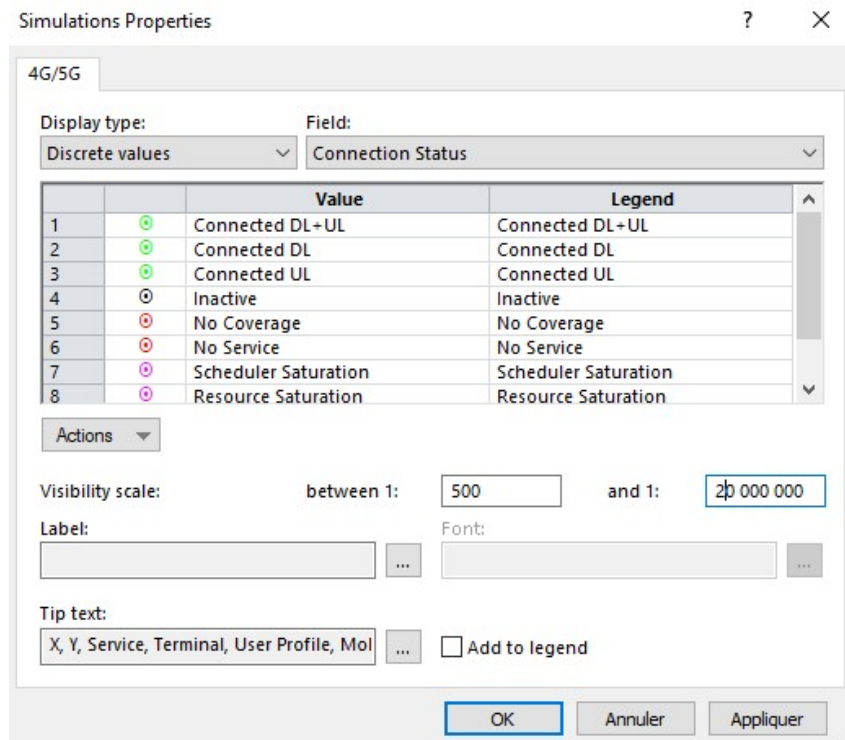


FIG. 3.33 : Propriétés de simulation.

3.8 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de planification sous Atoll pour les paramètres de la couverture et la qualité. La simulation comporte trois scénarios qui regroupent les différents types de cellules. Nous avons analysé les résultats des différentes étapes de simulation, en particulier la prédiction des niveaux de SS-RSRP et de signal, avec une étude comparative entre ces scénarios.

En conclusion, cette étude a fourni des résultats utiles pour la planification des réseaux de communication 5G.

Conclusion Generale

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire représente le résultat d'une étude approfondie sur la planification d'un réseau 5G dans les zones d'Oran, Tlemcen et El Aricha.

En examinant l'évolution des réseaux mobiles jusqu'à la 5G, nous avons pu comprendre les progrès technologiques et les besoins croissants des utilisateurs qui ont conduit à l'émergence de cette nouvelle génération de réseau.

Nous avons ensuite exploré en détail les caractéristiques et les innovations de la 5G, ainsi que ses divers cas d'utilisation. Cette compréhension approfondie de la technologie nous a fourni la base nécessaire pour entreprendre la planification du réseau 5G dans les zones spécifiques mentionnées.

Ce projet nous a également donnée l'occasion de mettre en pratique les compétences acquises au cours de notre cursus universitaire en Master Réseaux de Télécommunications, mais aussi d'appréhender le fonctionnement du logiciel Atoll exploité par divers opérateurs mobiles. Nous avons été accompagnées donc ce processus par un ingénieur télécom au sein des opérateurs téléphoniques.

À l'aide de cet outil Atoll, nous avons effectué trois simulations distinctes pour les zones d'Oran, Tlemcen et El Aricha, en utilisant respectivement des pico cellules, des micros cellules et des macros cellules. Les résultats de ces simulations ont permis de prédire avec précision les performances du réseau en termes de couverture et qualité dans chaque zone.

En comparant les résultats des simulations, nous avons pu identifier les avantages et les inconvénients de chaque type de cellule dans des contextes spécifiques.

En résumé, ce mémoire représente une contribution significative à la planification des réseaux 5G, en mettant en lumière les défis et les opportunités liés à l'implémentation de cette technologie innovante dans des environnements géographiques variés. Alors que la 5G continue de se déployer à travers le monde, cette étude offre des perspectives précieuses pour garantir des réseaux mobiles rapides, fiables et adaptés aux besoins spécifiques des utilisateurs dans les zones étudiées.

Perspectives

Cette étude de planification du réseau 5G avec le logiciel Atoll ouvre des perspectives innovantes en explorant de nouveaux scénarios de déploiement et en intégrant l'Internet des objets (IoT) tout en évaluant l'efficacité énergétique.

Il serait intéressant, par exemple, de simuler et analyser l'impact de la technologie MIMO sur la capacité et la couverture du réseau 5G, en comparant les performances avec et sans MIMO.

De plus, il est pertinent d'analyser la coexistence de la 5G avec d'autres technologies sans fil comme le Wi-Fi et le Bluetooth à l'aide d'Atoll, et de planifier des mesures pour minimiser les interférences.

Enfin, utiliser Atoll pour planifier et intégrer des réseaux IoT (Internet des objets) permettrait d'évaluer la couverture et la capacité nécessaires pour supporter une large gamme de dispositifs connectés, contribuant ainsi à une infrastructure plus intelligente et efficace.

Bibliographie

- [1] Y. SORIA et S. YACINE, “Contrôle d’admission d’appels dans la 3G.”, thèse de doct., Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [2] P. GODLEWSKI et P. MARTINS, *Les Concepts Cellulaires*. Telecom ParisTech, Février 1999.
- [3] O. BOUSHAKI et A. E. MOSBAH, “Dimensionnement et planification d’un réseau LTE”, mém. de mast., Université Saad Dahlab de Blida, Year.
- [6] D. ALEXVALERY, “Etude de l’évolution du Cœur Paquet vers L’EPC : Cas d’Orange coté d’ivoire”, Ecole Supérieure d’industrie, Cote D’ivoire, 2014.
- [8] A. MONCEF et Z. AMRAOUI, “Conception de nouveau système d’antennes MIMO pour le standard 5G”, Mémoire de fin d’étude, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [9] S. KHOUNI, “Simulation et Optimisation D’un Réseau GSM en utilisant la Technologie OFDM”, Mémoire de fin d’étude, Université Ferhat Abbas - Sétif.
- [10] ENIGMATIC, *Introduction to Wireless Links for Digital Communications : Radio Link Budget*. nov. 2007, de la part Enigmatic.
- [11] Y. HAMZA et L. REDOUANE, “Étude des Performances des Réseaux 4G LTE”, thèse de doct., Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [12] A. BOUNAB et C. HADJAB, “Etude et dimensionnement d’un réseau de communication mobile”, Mémoire de fin d’étude, Université Mohamed Boudiaf-M’sila, 2022.
- [15] R. E. RIOS, “5G NETWORK PLANNING AND OPTIMIZATION USING ATOLL”, mém. de mast., Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, juill. 2019.
- [17] “Release 15, TR 21.915”, rapp. tech., sept. 2019.
- [18] E. DAHLMAN, S. PARKVALL et J. SKOLD, *5G NR : The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
- [20] 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.
- [28] A. NASRI et A. BENFETIMA, “Study and Simulation of the Transmit Diversity Technique in LTE Systems”, in *Proceedings of the Conference on [Insert Conference Name]*, [Insert organizing body if available], [Insert location of conference if available], [Insert month of conference if available] 2017, [Insert page numbers if available].
- [30] M. DEHEMCHI et A. BOUHAFER, “Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G”, mém. de mast., Université 8 Mai 1945 - Guelma, 2019.
- [32] J. FRUHLINGER, “Le beamforming pour accélérer les communications sans fil”, *Article*, oct. 2019.
- [34] P. SICSIK. “La 5G : Une disruption technologique”. Accessed on : Insert Date. ()

- [35] C&T RF ANTENNAS INC, “What Does The Duplex 5G Model Look Like?”, *C&T RF Antennas Inc Blog*, avr. 2022, [Online article].
- [36] A. DETTI, “Functional architecture”, CNIT - Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata, rapp. tech., Date.
- [38] R. LAMALI, “5G Propagation modeling”, fév. 2022.
- [40] SCRIPT, “Les Modèles de Propagation en Environnement Radio Mobile”, *Script*, 2016.
- [41] AUTHOR, “RF Planning – Standard Propagation Model Tuning in Atoll”, 2023.
- [42] M. K. CHERFI, “5G NR Planning : Influence of Advanced Antenna Systems Implementation on RF Planning Predictions”, mém. de mast., Nom de l’Université, 2022.
- [43] ETSI, “Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 Version 17.0.0 Release 17)”, ETSI, Sophia Antipolis Cedex, France, rapp. tech., version 17.0.0, 2022, Consulté le 12 mars 2024.
- [48] FUTURIBLES, “Le monde dans 20 ans. Une perspective prospective”, *Futuribles*, t. 496, p. 86, 2021.
- [49] G. FELLAHI, “Planification et optimisation d’un réseau de la 4G (LTE) pour la wilaya de Tlemcen”, mém. de mast., Nom de l’Université, 2015.
- [50] 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.
- [51] A. S. ELSAYED AHMED, A. H. ABU ALI ANAN, M. M. M. SHARARA, M. A. M. ATTIA, M. H. A. MOHAMED et M. T. M. ABASS, “5G Network Planning and Optimization Using Atoll Case Study (Dokki-Cairo)”, mém. de mast., Mansoura University, juill. 2022.
- [52] “5G NR Measurements : RSRP, RSSI, RSRQ, and SINR”. (juin 2019).

Webographie

- [4] *UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)*, https://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/eric_meurisse/umts.php, Consulté le 13 mars 2024.
- [5] *Réseau 5G : tout ce qui va changer, quels usages et pourquoi la technologie est importante*, Consulté le 25 février 2024. adresse : https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante.
- [7] *Cours sur GSM, GPRS et UMTS*, Consulté le 02 mars 2024. adresse : http://lewebdephilou.free.fr/RESEAUX-TELECOM/Cours-Telecom/Telephonie/GSM-GPRS-UMTS_Girodon.htm.
- [13] *L'apport de la 5G dans l'usine du futur*, Consulté le 09 mars 2024. adresse : <https://www.machinesproduction.fr/article/lapport-de-la-5g-dans-lusine-du-futur>.
- [14] AGENCE NATIONALE DES FRÉQUENCES (ANFR), *Évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 1 : présentation générale de la 5G*, 2019. adresse : <https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/lancement-du-premier-volet-du-rapport-sur-les-mesures-5g-de-l'exposition-du-public-aux-ondes-electromagnetiques/>.
- [16] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, *Requirements for IMT-2020*, Consulté le 04 mars 2024, 2020. adresse : https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/S01-1_Requirements%20for%20IMT-2020_Rev.pdf.
- [19] AUTHOR(S) OR ORGANIZATION, *OFDMA Improves Spectrum Use in Wi-Fi 6*, Accessed on : 9 mars 2024, Publication Year. adresse : <https://www.5gtechnologyworld.com/ofdma-improves-spectrum-use-in-wi-fi-6/>.
- [21] RESEARCHGATE, *Difference entre OFDMA et SC-FDMA*, Accessed on : 12 mars 2024, Publication Year. adresse : https://www.researchgate.net/figure/Difference-entre-OFDMA-et-SC-FDMA-6_fig4_308266132.
- [22] U. FREEBOX, *5G : Les technologies mises en œuvre expliquées dans une vidéo*, Consulté le 14 mars 2024. adresse : <https://www.universfreebox.com/article/50589/5G-les-technologies-mises-en-oeuvre-expliquees-dans-une-video>.
- [23] *5G Millimeter Wave Tutorial*, <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/5G-millimeter-wave-tutorial.html>, Accessed on 14th March 2024.
- [24] DIGITAL CORNER WAVESTONE, *Les ondes millimétriques et la 5G : une nouvelle dimension pour la téléphonie mobile*, Consulté le 24 février 2024., juin 2021. adresse : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2021/06/les-ondes-millimetriques-et-la-5g-une-nouvelle-dimension-pour-la-telephonie-mobile/>.
- [25] IOT INDUSTRIEL, *5G Small Cell*, Consulté le 04 mars 2024, Date de consultation. adresse : <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/5g-small-cell/>.

- [26] MIMO, <https://www.lemagit.fr/definition/MIMO>, [Online ; accessed 09 mars 2024].
- [27] *Glossaire IIOT : MIMO*, <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/mimo/>, Consulté le 9 mars 2024.
- [29] ORANGE, *5G : des antennes Massive MIMO en France pour une expérience mobile révolutionnée*, 11mars 2024. adresse : <https://reseaux.orange.fr/actualites/5g-antennes-massive-mimo.html>.
- [31] YTD2525, *SU-MIMO vs. MU-MIMO : Difference Between SU-MIMO and MU-MIMO*, Consulté le 9 mars 2024, juin 2020. adresse : <https://ytd2525.wordpress.com/2020/06/13/su-mimo-vs-mu-mimo-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo/>.
- [33] *Google Image*, <https://images.app.goo.gl/M5A5WJdtYJQGAeSTA>, [Online image ; accessed 02 mars 2024].
- [37] V. SOLUTIONS, *Qu'est-ce que l'architecture 5G*, Consulté le 15 mars 2024, Year Accessed. adresse : <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/quest-ce-que-larchitecture-5g>.
- [39] *Propagation Modelling*, https://www.forsk.com/propagation-modelling?fbclid=IwAR3rCx4mCwMxfqL_MYB2d8bPigqTkY-rY6MONXKYD0wGHZDB6XKBGhA04ek, mars 2024.
- [44] *5G Communications*, <https://rebrand.ly/HIR-feedback>, Consulté le 17 février 2024., nov. 2021.
- [45] URTECH, *Solved : 5G vs 4G Simplified*, Consulté le 14 mars 2024. adresse : <https://www.urtech.ca/2019/06/solved-5g-vs-4g-simplified/>.
- [46] RAVE [PUBS], *What is the Difference Between 5G and 4G ?*, Consulté le 11 mars 2024. adresse : <https://www.ravepubs.com/what-is-the-difference-between-5g-and-4g/>.
- [47] *Réseau 5G : quels seront les premiers pays à en profiter ?*, Consulté le 13 mars 2024. adresse : <https://selectra.info/telecom/actualites/acteurs/reseau-5g-quels-seront-premiers-pays-a-profiter>.

Annexes

Annexe A

PRÉSENTATION DE LOGICIEL ATOLL

1.1 Présentation de logiciel Atoll

Atoll est une plate-forme de conception et d'optimisation de réseau sans fil multi-technologies qui soutient les opérateurs sans fil tout au long du cycle de vie du réseau, de la conception initiale à la densification et l'optimisation.



FIG. 1.1 : Présentation de logiciel Atoll.

Atoll comprend des capacités intégrées de conception de réseau RAN-RAT unique pour les technologies d'accès radio 3GPP et 3GPP2, y compris 5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM et CDMA. Il fournit aux opérateurs et aux fournisseurs un cadre puissant pour concevoir et optimiser les réseaux multi-technologies intégrés actuels et futurs.

Atoll prend en charge les dernières avancées technologiques telles que le MIMO massif, la formation de faisceaux 3D et la propagation mmWave pour la conception et le déploiement de réseaux 5G.

Les fonctionnalités d'intégration et de personnalisation d'Atoll aident les opérateurs à rationaliser en douceur les processus de planification et d'optimisation. Atoll prend en charge un large éventail de scénarios de mise en œuvre, des configurations autonomes aux configurations de serveurs à l'échelle de l'entreprise.

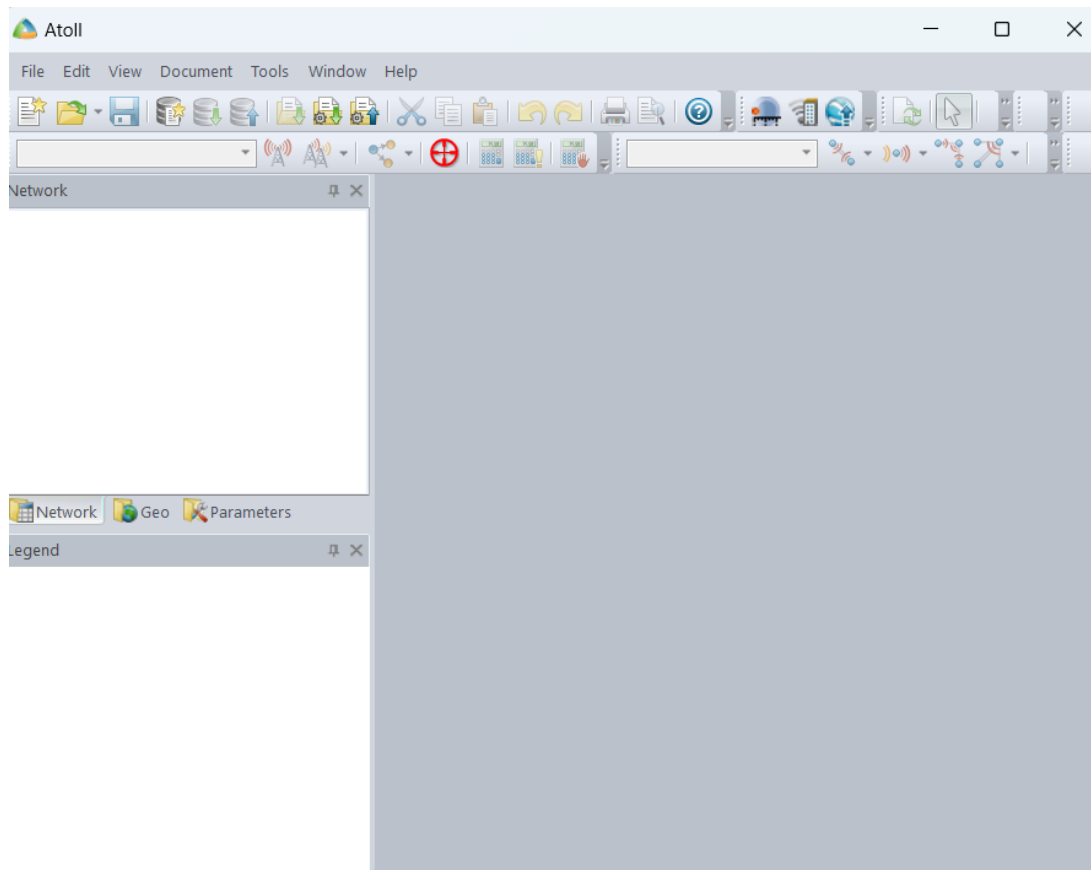


FIG. 1.2 : fenêtre de logiciel Atoll.

1.1.1 Démarrages d'un projet Atoll

1.1.1.1 Ouverture d'un nouveau projet

Lorsque vous lancez un nouveau projet sur Atoll en utilisant la commande "Fichier", la première étape consiste à créer un modèle. Ce modèle contient les données et la structure de fichiers nécessaires pour la technologie que vous souhaitez utiliser.

Une fois que vous ouvrez un nouveau projet Atoll, vous avez plusieurs options de modèles disponibles, notamment CDMA200 1xRTT, UMTS, HSPA, GSM, etc. Wi-Fi, WiMAX, LTE, GPRS EDGE, Microwave Radio Link, GPRS EDGE sont également parmi les options proposées.

Étant donné que les paramètres radio varient selon le type de projet, chaque modèle fournit des données spécifiques à la technologie appropriée. Pour notre projet, nous utiliserons le modèle 5G Multi-RAT, car il est conçu pour modéliser la cinquième génération (5G).

Grâce à la variété de modèles disponibles dans le logiciel Atoll pour chaque technologie, nous avons la possibilité de créer un document Atoll distinct pour chaque modèle utilisé. Pour créer un nouveau document à partir d'un modèle, suivez les étapes ci-dessous : Sélectionnez Fichier — Nouveau — À partir d'un modèle de document — 5G Multi-RAT.

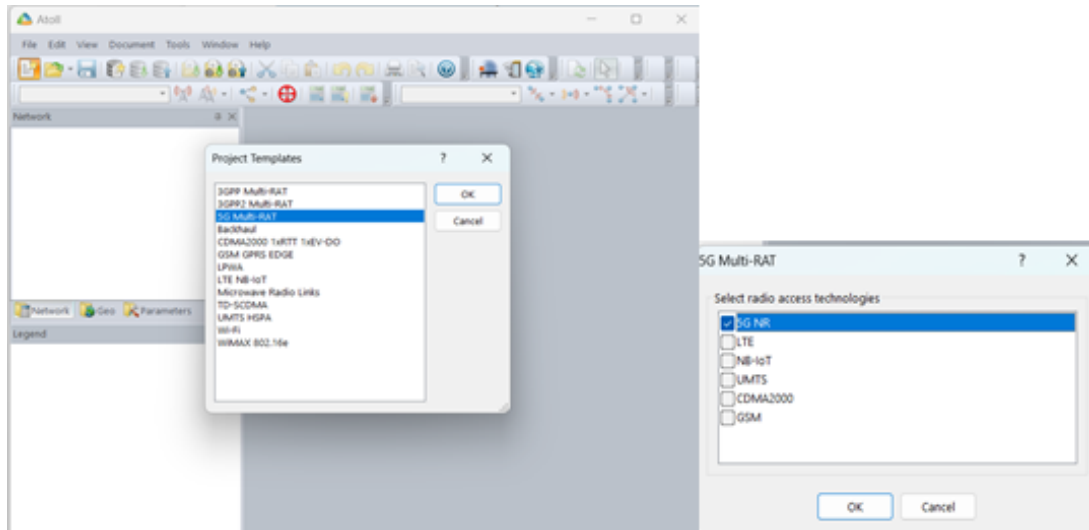


FIG. 1.3 : Nouveau document Atoll avec le modèle 5G Multi-RAT.

1.1.1.2 Réglage des paramètres de la zone

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

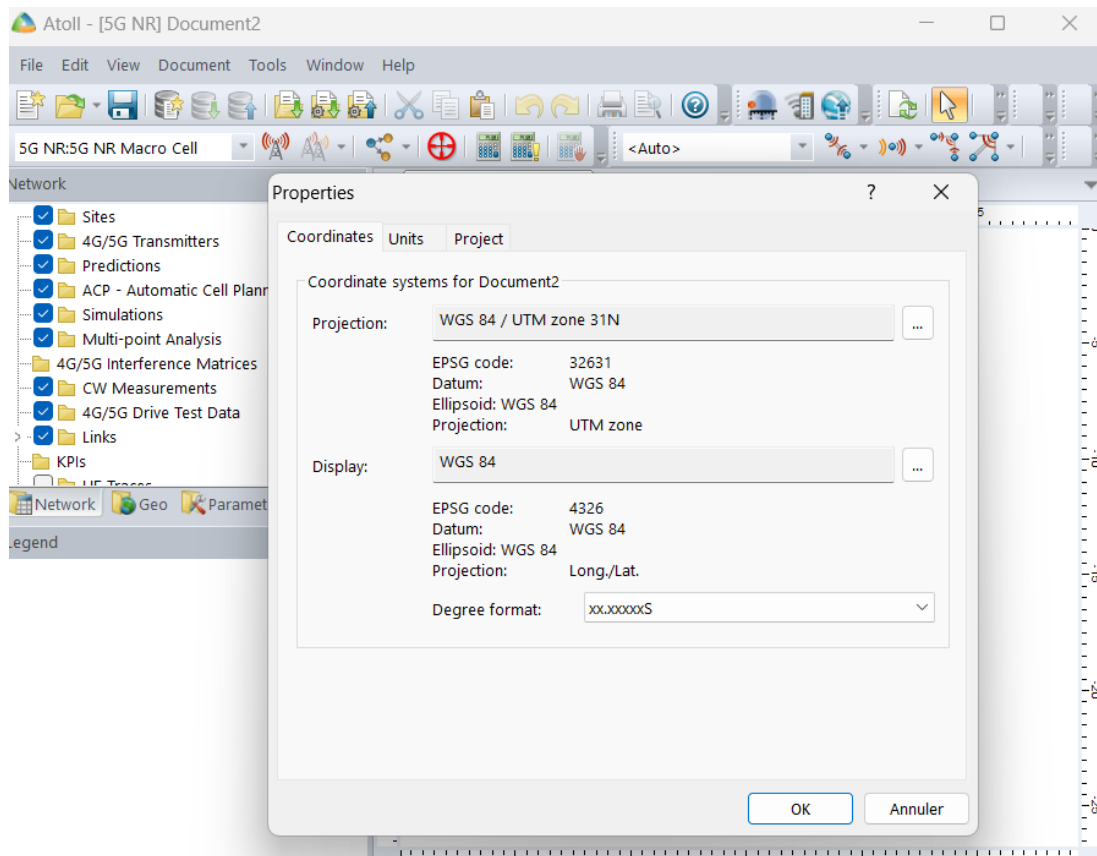


FIG. 1.4 : Réglage des paramètres de projection et de formats.

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

1.1.1.3 L'ajout des cartes

Pour ajouter la carte d'Algérie, suivez les étapes suivantes :

1. Sélectionnez **File** → **Importer**.
2. Sélectionnez le fichier de la carte **clutter** → **clutter classes**.

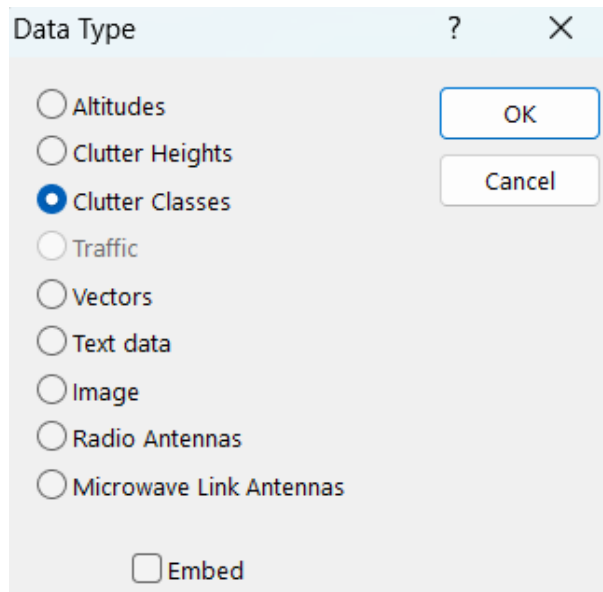


FIG. 1.5 : choix de clutter.

Pour sélectionner le fichier de la carte des hauteurs, suivez ces étapes :

1. Sélectionnez **File** → **Importer**.
2. Sélectionnez le fichier de la carte **height__Altitudes**.

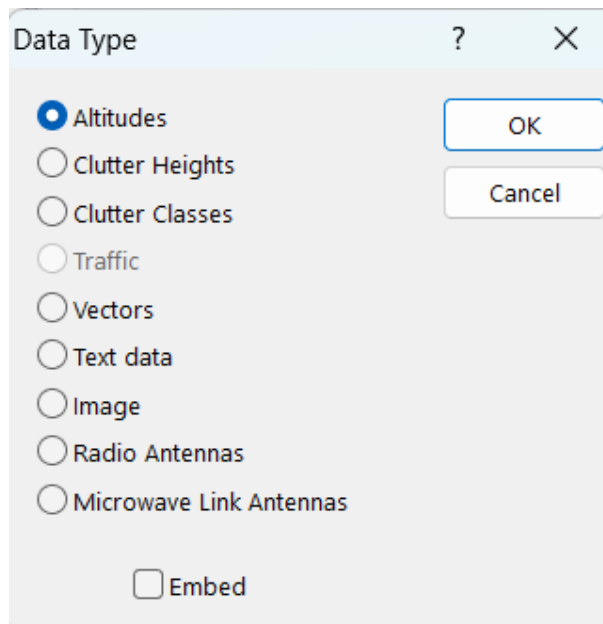


FIG. 1.6 : choix de height.

Pour importer le fichier de la carte vectorielle, suivez ces étapes :

1. Sélectionnez **File** → **Importer**.
2. Sélectionnez le fichier de la carte **vector** → **vectors** → **importer**.

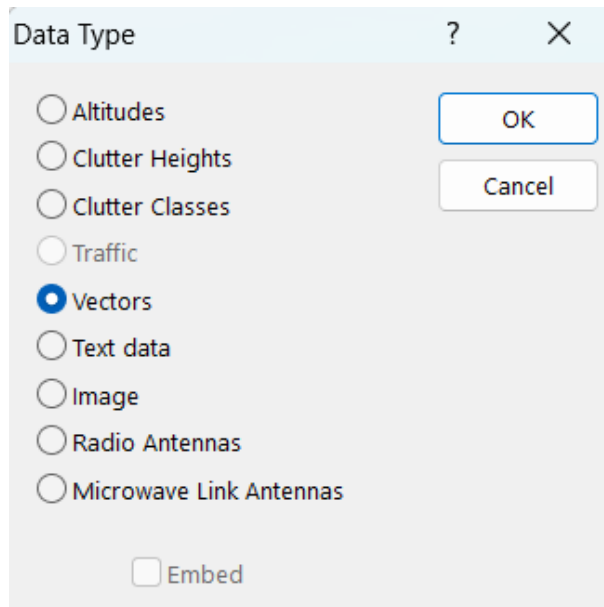


FIG. 1.7 : choix de vectors

La carte de l'Algérie sera affichée comme illustré dans la figure suivante :

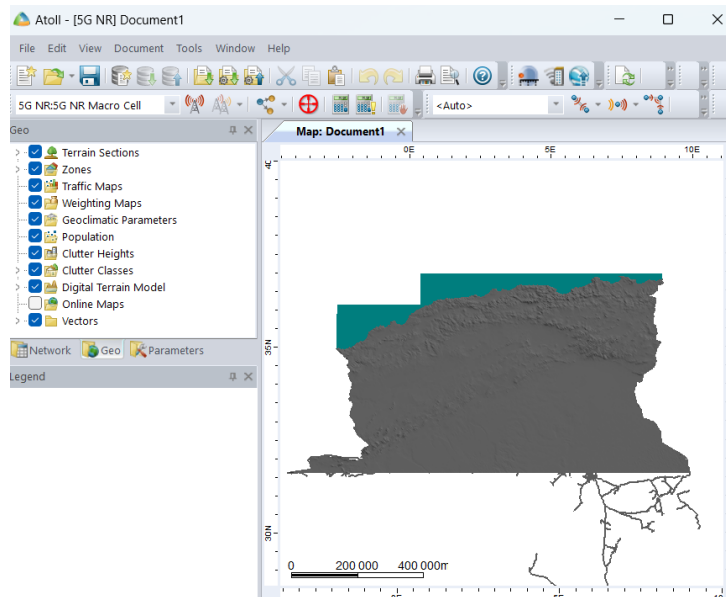


FIG. 1.8 : Affichage de la carte d'Algérie.

Pour importer une carte en ligne, suivez ces étapes :

1. Sélectionnez **Géo**.
2. Cochez **Carte en ligne**.
3. Insérez une nouvelle carte.

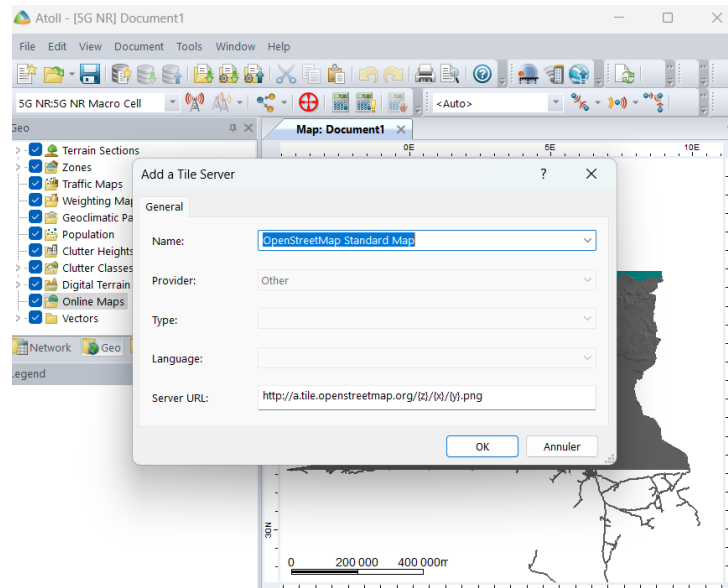


FIG. 1.9 : Insertion d'une mappe au niveau document.

Dans notre projet, nous allons importer une carte de l'Algérie et la superposer à la carte en ligne, comme indiqué dans la figure suivante :

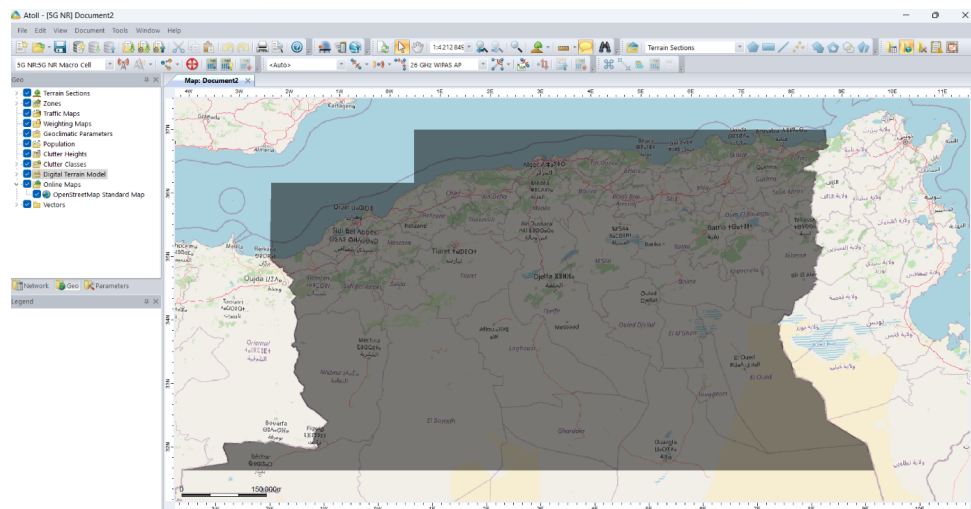


FIG. 1.10 : Superposition de la carte de l'Algérie sur la carte en ligne.

Annexe B

Tableau Atoll

2.1 Site pour Pico

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Site0	0.653200952W	35.69028229N	[122]
Site1	0.653385852W	35.694331404N	[119]
Site2	0.653570789W	35.698380514N	[103]
Site3	0.653755763W	35.702429621N	[50]
Site4	0.648991653W	35.692437496N	[121]
Site5	0.649176355W	35.696486627N	[112]
Site6	0.649361094W	35.700535755N	[89]
Site7	0.64954587W	35.704584879N	[71]
Site8	0.644597653W	35.690543414N	[109]
Site9	0.64478212W	35.694592566N	[118]
Site10	0.644966624W	35.698641715N	[107]
Site11	0.645151165W	35.702690861N	[80]
Site12	0.640399113W	35.692697998N	[115]
Site13	0.640583382W	35.696747168N	[117]
Site14	0.640767689W	35.700796335N	[84]
Site15	0.640952032W	35.704845498N	[58]
Site16	0.636005273W	35.690803591N	[110]
Site17	0.636189308W	35.694852782N	[112]
Site18	0.636373379W	35.69890197N	[112]
Site19	0.636557487W	35.702951154N	[75]
Site20	0.631795432W	35.692958223N	[117]
Site21	0.631979268W	35.697007431N	[117]
Site22	0.632163141W	35.701056636N	[101]
Site23	0.632347051W	35.705105838N	[66]
Site24	0.627412784W	35.691063157N	[111]
Site25	0.627596386W	35.695112386N	[115]
Site26	0.627780025W	35.699161612N	[116]
Site27	0.6279637W	35.703210835N	[89]
Site28	0.623202671W	35.693217501N	[111]

Site29	0.623386075W	35.697266748N	[116]
Site30	0.623569515W	35.701315992N	[111]
Site31	0.623752992W	35.705365232N	[80]
Site32	0,618809154W	35,691322443N	[110]
Site33	0,618992323W	35,695371711N	[112]
Site34	0,619175529W	35,699420975N	[122]
Site35	0,619358771W	35,703470236N	[101]

2.2 Site pour Micro

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Site0	1,342628753W	34,874841464N	[799]
Site1	1,343197407W	34,885631442N	[744]
Site2	1,343766362W	34,896421393N	[705]
Site3	1,33100909W	34,869851514N	[847]
Site4	1,331576119W	34,880641668N	[782]
Site5	1,33214345W	34,891431794N	[731]
Site6	1,319956154W	34,875650672N	[816]
Site7	1,320521861W	34,886440973N	[759]
Site8	1,321087869W	34,897231247N	[690]
Site9	1,308337512W	34,870658456N	[897]
Site10	1,308901596W	34,881448931N	[811]
Site11	1,30946598W	34,89223938N	[689]
Site12	1,297282654W	34,876455669N	[827]
Site13	1,297845414W	34,887246291N	[737]
Site14	1,298408474W	34,898036887N	[647]

2.3 Site pour Macro

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Site2	1.281039617W	34.204042129N	[1233]
Site3	1.282612293W	34.235069172N	[1251]
Site5	1.249475953W	34.220682901N	[1263]
Site6	1.251038028W	34.25171114N	[1268]
Site7	1.216350214W	34.206286774N	[1284]
Site8	1.217899299W	34.237316418N	[1292]

2.4 Transmission pico

Site	Transmitter	Height (m)	Azimuth (°)	Main Propagation Model	Frequency Band
Site1	Site1_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site1	Site1_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site1	Site1_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site15	Site15_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site15	Site15_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site15	Site15_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site16	Site16_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site16	Site16_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site16	Site16_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site17	Site17_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site17	Site17_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site17	Site17_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site18	Site18_1	30	0	Standard Propagation Model	n78

Site18	Site18_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site18	Site18_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site19	Site19_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site19	Site19_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site19	Site19_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site20	Site20_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site20	Site20_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site20	Site20_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site21	Site21_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site21	Site21_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site21	Site21_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site22	Site22_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site22	Site22_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site22	Site22_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site23	Site23_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site23	Site23_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site23	Site23_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site24	Site24_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site24	Site24_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site24	Site24_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site25	Site25_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site25	Site25_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site25	Site25_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site26	Site26_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site26	Site26_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site26	Site26_3	30	240	Standard Propagation Model	n78

Site27	Site27_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site27	Site27_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site27	Site27_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site28	Site28_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site28	Site28_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site28	Site28_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site29	Site29_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site29	Site29_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site29	Site29_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site30	Site30_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site30	Site30_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site30	Site30_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site31	Site31_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site31	Site31_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site31	Site31_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site32	Site32_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site32	Site32_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site32	Site32_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site33	Site33_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site33	Site33_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site33	Site33_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site34	Site34_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site34	Site34_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site34	Site34_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site35	Site35_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site35	Site35_2	30	120	Standard Propagation Model	n78

Site35	Site35_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_3	30	240	Standard Propagation Model	n78
Site9	Site9_1	30	0	Standard Propagation Model	n78
Site9	Site9_2	30	120	Standard Propagation Model	n78
Site9	Site9_3	30	240	Standard Propagation Model	n78

2.5 Transmission macro

Site	Transmitter	Height (m)	Azimuth (°)	Main Propagation Model	Frequency Band
Site0	Site0_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site0	Site0_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site0	Site0_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site1	Site1_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site1	Site1_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site1	Site1_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site10	Site10_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site11	Site11_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_2	100	120	Standard Propagation Model	n78
Site12	Site12_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site13	Site13_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site14	Site14_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site2	Site2_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site3	Site3_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site4	Site4_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_2	100	120	Standard Propagation Model	n78
Site5	Site5_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site6	Site6_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site7	Site7_3	160	240	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site8	Site8_3	160	240	Standard Propagation Model	n78

Site9	Site9_1	160	0	Standard Propagation Model	n78
Site9	Site9_2	160	120	Standard Propagation Model	n78
Site9	Site9_3	160	240	Standard Propagation Model	n78

2.6 Transmission macro

Site	Transmitter	Height (m)	Azimuth (°)	Main Propagation Model	Frequency Band
Site2	Site2_1	100	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site2	Site2_2	100	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site2	Site2_3	100	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site3	Site3_1	120	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site3	Site3_2	120	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site3	Site3_3	120	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site5	Site5_1	140	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site5	Site5_2	140	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site5	Site5_3	140	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site6	Site6_1	160	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site6	Site6_2	160	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site6	Site6_3	160	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site7	Site7_1	180	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site7	Site7_2	180	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site7	Site7_3	180	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site8	Site8_1	80	0	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site8	Site8_2	80	120	3GPP 38.900 Propagation Model	n78
Site8	Site8_3	90	240	3GPP 38.900 Propagation Model	n78