

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 : CHEBOUROU Rayane Yassine et LARAB Fethallah

Sujet

Etude de Cas sur l'Optimisation de la Couverture et de la Capacité des Réseaux Mobiles 5G en Zone Urbaine à l'Aide d'Atoll

Soutenu publiquement, le 24/06/2025, devant le jury composé de :

Mr FEHAM Mohammed	Professeur émérite	Université de Tlemcen	Président
Mme BENOSMANE Hayat	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme GOURARI Fatima Zohra	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Avec une immense gratitude et une profonde affection, je dédie ce modeste travail à ceux qui ont été ma source d'inspiration, de soutien et d'encouragement tout au long de mon parcours.

A mes parents, piliers de ma vie, pour leur amour infini, leur soutien et leurs sacrifices, dont les paroles d'encouragement et les prières résonnent toujours dans mes oreilles.

A mes sœurs qui sont toujours été là pour me soutenir et me donner du courage dans les moments les plus difficiles de ma vie.

A mon collègue Fethallah et tous mes amis qui m'ont aidé et encouragé, merci pour tout le soutien pendant cette période.

A ma chère famille qui a toujours été là pour moi et m'a soutenu tout au long de mes études.

Merci à tous.

Chebourou Rayane Yassine

Dédicace

Je suis honoré et heureux de dédier ce projet de fin d'étude aux personnes qui me sont les plus chères :

A mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants et leurs sacrifices silencieux, qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

A ma grand-mère pour son soutien moral et ses prières qui ont été une lumière sur mon chemin.

A mon défunt grand-père, tu me manques tellement. J'aurais aimé que tu sois là maintenant.

A mes deux frères SEIF EDDINE et ABDERRAHMANE pour leur patience et leur inspiration tout au long de ce parcours.

A mon ami lointain, mon ami de cœur, 'OUSSAMA', mon ami fidèle et compagnon de toutes les années. Merci pour votre amitié précieuse, votre soutien infini, merci d'être toujours là pour moi. Vous avez rendu ce voyage beaucoup plus agréable. Je vous souhaite encore plus de succès et de réussite.

A mon binôme 'RAYANE' et tous mes amis pour leur compréhension, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de cette aventure académique.

A tous les membres de ma famille.

Merci.

Larab Fethallah

Remerciement

Avant tout, je tiens à remercier Allah le Tout-Puissant qui m'a accordé le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à Mme GOURARI Fatima Zohra, directrice du mémoire et maîtresse de conférences en classe B à l'Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, pour son milieu de travail inspirant et son soutien précieux.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury, Mr FEHAM Mohammed et Mme BENOSMANE Hayat pour leur intérêt à notre recherche et leur disposition à juger ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à tout le personnel du département de télécommunications de l'université pour leur aide constante et leur soutien pendant toute la durée de nos études.

En conclusion, j'aimerais exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

Résumé

Face aux avancées des technologies de télécommunication, les réseaux mobiles ont évolué de la 1G analogique jusqu'à la 4G LTE. Cependant, ils ne sont pas en mesure de satisfaire les attentes audacieuses des futurs réseaux sans fil, comme une mobilité élevée, une latence minimisée, une fiabilité renforcée et un taux de transfert de données supérieur à un coût réduit. Pour faire face à ces défis, le lancement de la 5G a été instauré, proposant une architecture novatrice. Le progrès de la technologie de communication sans fil complique de plus en plus la conception des réseaux radio. Dans le cadre de cette recherche, nous prévoyons d'analyser en détail l'architecture technique de la 5G et ses évolutions. Ensuite de représenter les éléments qui déterminent la planification du réseau radio 5G (zone de couverture, capacité, qualité du service, ...). Lors de la simulation réelle d'un réseau 5G, l'outil Atoll a été utilisé, permettant d'optimiser le déploiement en sélectionnant les emplacements, en assignant les fréquences et en modélisant la propagation.

Mots clés : 5G, couverture, capacité, QoS, planification détaillée, gNB, SS-RSRP, ACP, Atoll Et réseau cellulaire

Abstract

In the face of advances in telecommunications technologies, mobile networks have evolved from analogue 1G to 4G LTE. However, they are unable to meet the bold expectations of future wireless networks, such as high mobility, minimised latency, enhanced reliability and higher data transfer rates at lower cost. To meet these challenges, 5G has been launched, offering an innovative architecture. The advancement of wireless communication technology is increasingly complicating the design of radio networks. In this research, we plan to analyse in detail the technical architecture of 5G and its developments, and then to represent the elements that determine 5G radio network planning (coverage area, capacity, quality of service, etc.). During the real simulation of a 5G network, the Atoll tool was used to optimize deployment by selecting locations, assigning frequencies and modelling propagation.

Keywords: 5G, coverage, capacity, QoS, detailed planning, gNB, SS-RSRP, ACP, Atoll And cellular network

في مواجهة التقدم في تقنيات الاتصالات السلكية واللاسلكية، تطورت شبكات الهاتف المحمول من الجيل الأول التماثلي إلى الجيل الرابع 4G. ومع ذلك، فهي غير قادرة على تلبية التوقعات الجريئة للشبكات اللاسلكية المستقبلية، مثل القدرة العالية على التنقل، وتقليل زمن الوصول إلى الحد الأدنى، والموثوقية المعززة، ومعدلات نقل البيانات الأعلى بتكلفة أقل. ولمواجهة هذه التحديات، تم إطلاق شبكات الجيل الخامس (5G) التي تقدم بنية مبتكرة. يؤدي تقدم تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية إلى تعقيد تصميم الشبكات اللاسلكية بشكل متزايد. في هذا البحث، نخطط في هذا البحث لتحليل البنية التقنية لشبكة الجيل الخامس وتطوراتها بالتفصيل، ومن ثم تمثيل العناصر التي تحدد تخطيط شبكة الجيل الخامس الراديوية (منطقة التغطية، والسعة، وجودة الخدمة، وما إلى ذلك). أثناء المحاكاة الحقيقية لشبكة 5G، تم استخدام أداة Atoll لتحسين النشر من خلال اختيار المواقع وتعيين الترددات ونمذجة الانتشار.

الكلمات المفتاحية: 5G، التغطية، السعة، جودة الخدمة، التخطيط التفصيلي، gNB، SS-RSRP، ACP،

Atoll والشبكة الخلوية

Table des matières

Dédicace	I
Remerciement	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Table des matières	VII
Liste des figures :	XI
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations	XV
Introduction générale	1
CHAPITRE I	3
L'évolution des réseaux mobiles	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Concept de base des réseaux mobiles :	4
I.3 Les différents types de cellules :	5
I.3.1 Une pico-cellule	6
I.4 Évolution des systèmes cellulaires :	6
I.4.1 La première génération (1G) :	7
I.4.1.1 Inconvénients de la première génération	7
I.4.2 La deuxième génération : GSM (2G)	8
I.4.2.1 GPRS :	9
I.4.2.2 L'EDGE :	9
I.4.2.3 CDMA en 2G:	10
I.4.3 La troisième génération UMTS (3G) :	10
I.4.3.1 Architecture de l'UMTS :	11

I.4.3.2 Le débit de l'UMTS :	12
I.4.4 La quatrième génération LTE (4G) :	13
I.4.4.1 Architecture de la LTE :	14
I.4.5 La cinquième génération 5G NR :	14
I.4.5.1 Comparaison des caractéristiques entre LTE et 5G NR :	15
I.4.5.2 Les Applications de la 5G :	15
I.5 Développement des communications mobiles en Algérie :	16
I.6 Conclusion :	17
Chapitre II	18
II.1 Introduction :	19
II.2 Architecture générale du réseau 5G NR :	20
II.2.1 Équipement utilisateur :	20
II.2.2 RAN de nouvelle génération (NG-RAN) :	20
II.2.2.1 Le rôle du gNB :	22
II.2.3 Réseau cœur 5G :	22
II.3 Les piliers de la 5G :	24
II.3.1 Évolution des RAT existants :	24
II.3.2 Déploiement hyperdense de petites cellules :	24
II.3.3 Réseau auto-organisé (SON) :	24
II.3.4 Communication de type machine (MTC) :	24
II.3.5 Exploitation des ondes millimétriques :	24
II.3.6 Réorganisation des liaisons de connectivité :	25
II.3.7 Efficacité énergétique (EE) :	25
II.3.8 Attribution de nouveaux spectres :	25
II.3.9 Partage du spectre :	25
II.3.10 Virtualisation du RAN :	25
II.4 Les fréquences de la 5G :	25
II.4.1 Choix et harmonisation des bandes à l'échelle mondiale :	25

II.5 Spectre 5G :	27
II.6 Les modes de déploiement du réseau 5G :	29
II.6.1 L'architecture NSA :	30
II.6.2 L'architecture SA :	30
II.6.3 Principales différences entre 5G NSA et SA :	31
II.7 Les KPI de la 5G (Key Performance Indicator) :	32
II.7.1 Débit crête par utilisateur :	32
II.7.2 Débit moyen perçu par l'utilisateur :	32
II.7.3 Efficacité spectrale maximale :	32
II.7.4 Mobilité :	32
II.7.5 Latence :	32
II.7.6 Densité de connexions :	32
II.7.7 Efficacité énergétique :	32
II.7.8 Débit par surface (capacité de trafic) :	32
II.8 Les nouvelles antennes Massive MIMO :	33
II.9 Beamforming :	34
II.10 Catégories fondamentales des services 5G :	34
II.10.1 eMBB :	35
II.10.2 mMTC :	35
II.10.3 uRLLC :	36
II.11 Les défis de la cinquième génération :	36
II.12 Conclusion :	37
CHAPITRE III	38
III.1 Introduction :	39
III.2 Logiciel de planification pour les réseaux 5G NR :	39
III.3 Planification d'un réseau avec le logiciel Atoll :	40
III.3.1 Pré-Planification :	40
III.3.2 Planification :	41

III.3.3 Vérification :	41
III.3.4 Optimisation :	41
III.4 Planification sur atoll :	42
III.4.1 Environnement de travail d'Atoll :	42
III.4.2 Création d'un projet 5G Multi Rat :	43
III.4.3 Choisir le système de coordonnées :	43
III.4.4 Réglage des paramètres de la zone :	44
III.4.5 Importation de la carte :	45
III.4.6 Création d'un site :	49
III.4.7 Mise en place d'une cellule :	52
III.4.8 Paramètres de l'antenne :	52
III.4.9 Paramètres de trafic :	53
III.5 Prédiction :	56
III.5.1 Prédiction de couverture par niveau de signal :	56
III.5.2 Prédiction de couverture par émetteur :	59
III.5.3 Prédiction de la couverture de la liaison descendante :	60
III.5.4 Prédiction de la capacité de la liaison descendante :	63
III.5.5 Prédiction de la capacité de la liaison montante :	65
III.5.6 Prédiction de la qualité de la liaison montante :	68
III.6 Simulation :	70
III.7 Comparaison entre les performances sur la planification 3G/4G/5G :	71
III.8 Conclusion :	71
Conclusion générale	72
Bibliographie	74
Webographie	76

Liste des figures :

Figure I.1 : Réseau cellulaire.....	5
Figure I.2 : Les différents types de cellules.....	6
Figure I.3 : L'évolution des réseaux mobiles.....	6
Figure I.4 : La FDMA dans la 1G.....	7
Figure I.5 : L'architecture du GSM.....	9
Figure I.6 : Architecture de l'UMTS.....	11
Figure I.7 : Les différents débits de L'UMTS.....	12
Figure I.8 : Comparaison entre les débits de L'UMTS et GSM	12
Figure I.9 : Développement de la 3GPP.....	13
Figure I.10 : Comparatif architecture entre LTE et GSM/UMTS.....	14
Figure I.11 : Comparaison des caractéristiques entre la LTE et 5G NR.....	15
Figure I.12 : Principaux services de la 5G.....	16
Figure I.13 : Répartition abonnés opérateurs T3-2024.....	17
Figure II.1 : L'architecture générale de la 5G.....	20
Figure II.2 : Architecture globale du NG-RAN.....	21
Figure II.3 : Architecture du cœur 5GC.....	23
Figure II.4 : Les piliers de la 5G	24
Figure II.5: Bandes millimétriques identifiées lors du WRC-15.....	27
Figure II.6: L'architecture du mode NSA.....	30
Figure II.7: L'architecture du mode SA.....	31
Figure II.8: Les huit indicateurs de performance.....	33
Figure II.9: Massive MIMO.....	33
Figure II.10: Beamforming et la massive MIMO.....	34
Figure II.11: Catégories d'usage de la 5G.....	35
Figure III.1: Etapes de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll.....	40
Figure III.2: Zone de la ville d'Oran.....	41

Figure III.3: Interface de démarrage du logiciel ATOLL.....	42
Figure III.4: Environnement de travail d'Atoll.....	42
Figure III.5: Création d'un nouveau projet.....	43
Figure III.6: Choisir la technologie 5G multi-Rat.....	43
Figure III.7: Choisir le système de coordonnées.....	44
Figure III.8: Projection et affichage.....	44
Figure III.9: Importation de Clutter Classes.....	45
Figure III.10: Après l'importation de Clutter classes.....	45
Figure III.11: Code couleurs des diverses categories d'encombrement.....	46
Figure III.12: Importation du Clutter Heights.....	46
Figure III.13: Après l'importation du Clutter heights.....	47
Figure III.14: Digital Terrain Model (DTM) en présence du Clutter classes.....	47
Figure III.15: Digital Terrain Model (DTM) en absence du Clutter classes.....	48
Figure III.16: Importation de vector.....	48
Figure III.17: Après l'importation de vector.....	49
Figure III.18: Propriétés des sites.....	50
Figure III.19: Cartographies des sites.....	50
Figure III.20: Création d'un émetteur et ses caractéristiques.....	51
Figure III.21: 5G NR 182 émetteur.....	51
Figure III.22: Template de la station 5G NR.....	52
Figure III.23: Paramètres d'antenne.....	53
Figure III.24: Polarisation d'antenne pattern horizontal et vertical.....	53
Figure III.25: Caractéristiques du service haut débit.....	54
Figure III.26: Caractéristiques de la terminale.....	55
Figure III.27: Caractéristiques du profil utilisateur.....	55
Figure III.28: Prédiction de la couverture par niveau du signal.....	56
Figure III.29: Histogramme de la couverture par niveau de signal.....	57
Figure III.30: Prédiction de couverture par émetteur.....	59
Figure III.31: Prédiction de couverture de la liaison descendante.....	61
Figure III.32: Histogramme de couverture de la liaison descendante.....	62
Figure III.33: Prédiction de capacité de la liaison descendante.....	64

Figure III.34: Histogramme de capacité de la liaison descendante.....	64
Figure III.35: Prédiction de la capacité de la liaison montante.....	66
Figure III.36: Histogramme de capacité de la liaison montante.....	66
Figure III.37: Prédiction de la qualité de la liaison montante.....	68
Figure III.38: Histogramme de la qualité de la liaison montante.....	69
Figure III.39: Distribution des utilisateurs 5G.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Le nombre des abonnements aux réseaux mobiles.....	17
Tableau II.1 : Les interfaces utilisées.....	21
Tableau II.2 : Bandes de fréquences 5G	27
Tableau II.3 : Gamme de fréquences FR1.....	28
Tableau II.4 : Gamme de fréquences FR2	29
Tableau III.1 : Paramètres de la zone (planification Atoll)	40
Tableau III.2 : Caractéristiques de la bande de fréquence.....	55
Tableau III.3 : Les différents intervalles RSRP.....	57
Tableau III.4 : Les différents intervalles du débit UL.....	67
Tableau III.5 : Les différents intervalles du C(I+N)	69

Liste des abréviations

1G	First generation
2G	Second generation.
2.5G	GPRS (General Packet Radio Service)
2.75G	EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)
3G	Third generation.
3.5G	HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)
3.75G	HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)
3GPP	Third Generation Partnership Project.
4G	Fourth generation.
5G	Fifth generation.
5G NR	5G New Radio
5GC	5G Core
6G	Sixth generation.
A	
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AUSF	Authentication Server Function
B	
BS	Base station
BSC	Base Station Controller
BSS	Business support system
C	
CDMA	Code Division Multiple Access
CUPS	Control and User Plane Separation
CU	Control Unit
D	
DL	Downlink
E	
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access

EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EMB	Enhanced mobile bandwidth
ENB	Evolved Node B
F	
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency division multiple Access
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
G	
GHZ	Gega Hertz
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General packet radio service
GNB	gNodeB
H	
HLR	Home location register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
I	
IP	Internet Protocol
IMT-2020	International Mobile Telecommunications
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
IOT	Internet Over Thing
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunications Union-Radio
K	
Kbps	Kilobits per second
KPI	Key Performance Indicator
L	
LTE	Long-Term Evolution
LTE-Advanced	Long-Term Evolution-Advanced

M

Mbps	Megabits per second
MHz	Mega Hertz
MMS	Multimedia Messaging Service
MSC	Mobile Switching Center
MmTC	Massive machine-type communication
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MmWave	Millimeter wave

N

NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function
NMT	Nordic Mobile Telephone
NSS	Network Switching subsystem
NTT	Nippon Telephone and Telegraph
NRF	Network Repository Function
NSA	Non-Standalone Access
NSSF	Network Slice Selection Function

O

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

P

PCF	Policy Control Function
------------	-------------------------

R

RAN	Radio Access Network
RNC	Radio Network Controller
RTC	Réseau Téléphonique Commuté

S

SA	Standalone Access
SC-FDMA	Single Carrier- Frequency Division Multi-Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service

T**TACS** Total Access Communication System.**TDD** Time Division Duplex**TDMA** Time Division Multiple Access**U****UE** User Equipment**UIT** International Telecommunications Union**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System**UWB** Ultra-Wide Band**URLLC** Ultra-reliable low-latency communication**V****VLR** Visitor location register**W****W-CDMA** Wide Coding Division Multiple Acces

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, marquées par une évolution technologique accélérée, la technologie a eu un impact significatif sur de nombreux aspects de la vie quotidienne. Autrefois considérée comme un privilège réservé à quelques-uns, la téléphonie mobile est aujourd'hui une commodité largement répandue et adoptée à grande échelle dans le monde entier. Le réseau téléphonique public, système de communication numérique, offre des services d'appel au grand public, permettant l'échange de voix ainsi que d'autres types de données entre les usagers.

Le document est structuré de la manière suivante :
Le **premier chapitre** est consacré à l'étude des générations précédentes (1G, 2G, 3G et 4G LTE), à leur mode de fonctionnement et à leurs limites. Ces dernières mettent en évidence la nécessité de migrer vers la 5G afin de répondre aux exigences croissantes dans divers domaines.

Le **deuxième chapitre** se concentre sur la conception et la planification de la 5G, en raison de son architecture, en mettant l'accent sur des aspects tels que le modèle de propagation, la configuration cellulaire, ainsi que la gestion des ressources et des connexions. Il traite de l'élaboration et du fonctionnement des réseaux 5G, qui permettent des vitesses de connexion très élevées.

Le **troisième chapitre** décrit les différentes phases de notre simulation. Il porte sur la planification et l'optimisation des réseaux 5G NR dans une zone d'Oran, en utilisant le logiciel **Atoll**, un outil sophistiqué. Ce chapitre aborde les étapes clés de la planification du réseau, notamment le lancement du projet, l'intégration des cartes numériques et des coordonnées, ainsi que la configuration des paramètres cellulaires. Il met également en lumière les fonctionnalités d'Atoll, telles que l'évaluation des zones de couverture. Nous étudierons également certaines prédictions, analyserons les résultats de la simulation, ainsi que le débit calculé et proposé par Atoll.

CHAPITRE I

L'évolution des réseaux mobiles

I.1 Introduction :

Les systèmes de communication mobile sont implantés depuis plusieurs années, depuis le début des années 1980, dans diverses régions du monde pour offrir aux utilisateurs mobiles, l'accès aux services téléphoniques. Avec la première génération (**1G**), des systèmes analogiques sont concernés à supériorité que la téléphonie vocale. Le succès des communications mobiles repose pour beaucoup sur le développement du réseau cellulaire introduit au cours des années 1970. Le concept a permis d'obtenir une forte communication et d'un faible débit d'énergie. Le modèle cellulaire a été l'une des étapes clés du développement des communications mobiles.

Le meilleur exemple des systèmes mobiles **1G** est le **AMPS** des États-Unis, la première constellation géolocalisée au monde, lancée en 1983. En Europe, de nombreux systèmes analogiques **1G** ont été développés mais ces derniers n'étaient pas compatibles entre eux car il y avait des différences de fréquence et de protocole de communication. Cela rendait l'errance internationale impossible. Ces systèmes analogiques ont été remplacés et progressivement par des systèmes numériques de deuxième génération (**2G**) puisque du service **GSM**, introduit en 1991 dans l'Europe. L'introduction de la technologie numérique (TDMA) a été un pas important pour offrir des services similaires à ceux du réseau 1G, mais plus efficiente. Le GSM a été couronné de succès sur la planète entière.

Pour offrir des services de données sans fil à haut débit, les systèmes **3G (UMTS)** étaient développés. Les systèmes **2G** et **3G** coexisteront pendant un certain temps, avec des optimisations des services entre les deux générations. Puis ensuite vient la nouvelle technologie nommée **4G (LTE)** qui a fait un gros succès dans le monde entier. La nouvelle génération **5G NR** prend de l'avance sur toute la technologie précédente. Dans un futur proche, cette technologie sera mise en service en Algérie.[1]

I.2 Concept de base des réseaux mobiles :

Un réseau mobile, également appelé réseau cellulaire, est un réseau de télécommunications qui permet aux appareils mobiles, tels que les smartphones et les tablettes, de communiquer entre eux et de se connecter à une infrastructure de télécommunications plus large. Les réseaux mobiles sont essentiels pour offrir des services de voix et de données aux utilisateurs en déplacement. Il est composé d'un réseau d'antennes-relais (ou station de base), couvrant chacune une portion de territoire délimitée

(cellule) comme le montre la **Figure I.1** et acheminant les communications sous forme d'ondes radio vers et depuis les terminaux des utilisateurs. Ces réseaux sont conçus pour offrir une connectivité continue et fiable.[2]

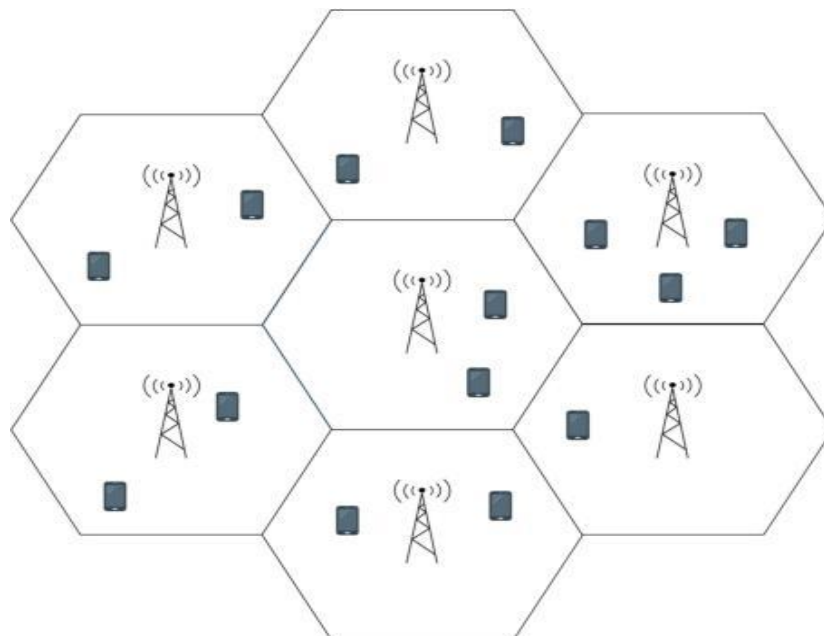


Figure I.1 : Réseau cellulaire [3]

L'organisation du réseau vise à réduire les interférences en segmentant le territoire en petites zones appelées cellules et en répartissant les fréquences radio entre elles. Chaque cellule dispose d'une station de base connectée au réseau de télécommunications commuté (RTC), où plusieurs canaux de fréquences courtes sont attribués. Chaque fréquence est utilisée à des moments uniques en grappes [4].

I.3 Les différents types de cellules :

Tout comme le réseau GSM, l'UMTS est divisé en plusieurs cellules de tailles variables. Chacune d'entre elles est présentée en fonction de la densité de population à servir et de la vitesse de mobilité.

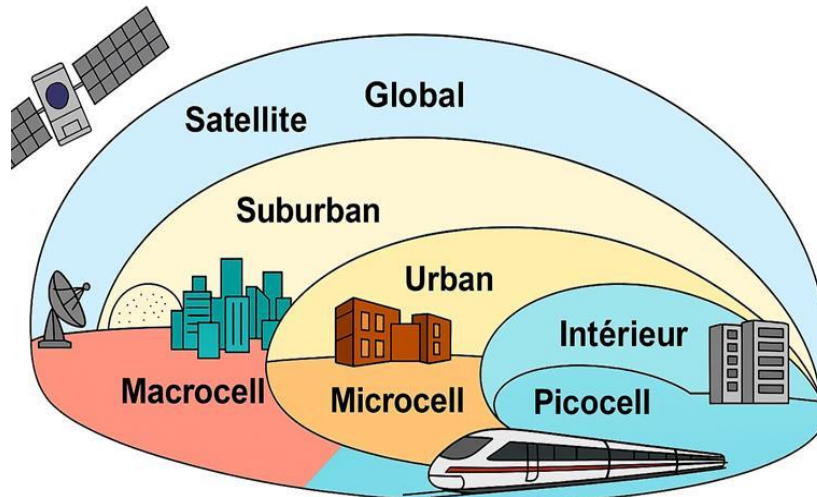


Figure I.2 : Les différents types de cellules [5]

I.3.1 Une pico-cellule : permet des débits de l'ordre de 2 Mbits/s lors d'un déplacement de l'ordre de 10 km/h (marche à pied, déplacement en intérieur, etc.).

I.3.2 Une micro-cellule : permet des débits de l'ordre de 384 Kbits/s lors d'un déplacement de l'ordre de 120 km/h (véhicule, transports en commun, etc.).

I.3.3 Une macro-cellule : permet des débits de l'ordre de 144 Kbits/s lors d'un déplacement de l'ordre de 500 km/h (Train à Grande Vitesse, etc.).[5]

I.4 Évolution des systèmes cellulaires :

Depuis l'apparition du téléphone mobile, les réseaux cellulaires ont connu une évolution importante, à travers diverses générations.

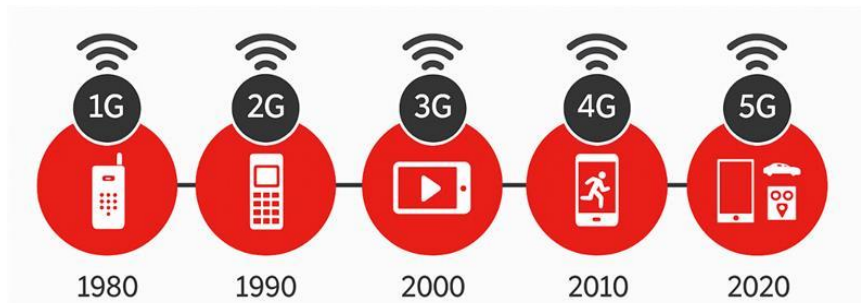


Figure I.3 : L'évolution des réseaux mobiles [6]

I.4.1 La première génération (1G) :

La 1G a été inventée par AT&T Bell Labs au début des années 1970. Ces systèmes à faible largeur de bande étaient basés sur la modulation de fréquence (FM) avec la technologie FDMA et le duplexage par division de fréquence (FDD) fonctionnant à 800 MHz et déployée plus tard en 1980, et depuis cela début des réseaux cellulaires, et il avait différents types 1G :[7]

- **AMPS** : Ce système analogique a été développé et utilisé pour la première fois aux États-Unis.
- **NAMPS** : Utilisée aux États-Unis, cette version est basée sur un espacement des canaux de 10 kHz.
- **TACS** : Un système analogique utilisé à l'origine au Royaume-Uni, basé autour de la fréquence de 900 MHz, ce système s'est ensuite répandu dans le monde entier.
- **NMT** : Ce système était principalement utilisé en Scandinavie, mais il a été adopté par une trentaine d'autres pays.
- **NTT** : Utilisé au Japon, ce système fonctionnait à des fréquences situées autour de 900 MHz.



Figure I.4 : La FDMA dans la 1G [7]

I.4.1.1 Inconvénients de la première génération :

- Très faible sécurité. Il peut y avoir fréquemment des interceptions, donc pas de sécurité.
- Frais très élevés. Le téléphone et les frais du service étaient tellement chers en ce moment. C'est pour ça que seulement 1% de la population utilisait la première génération. [7]
- Très mauvaise qualité de voix car on utilisait le système analogique.[7]

I.4.2 La deuxième génération : GSM (2G)

Les années 1990 ont vu l'émergence des réseaux mobiles 2G appelé **GSM**, elle a adopté des méthodes de transmission numériques, apportant une série d'améliorations qui ont révolutionné l'industrie des télécommunications mobiles.

L'objectif initial était de développer un système de téléphonie mobile numérique qui permettrait l'itinérance à travers les frontières nationales et offrirait également une capacité améliorée par rapport aux systèmes analogiques en usage à l'époque.

Les systèmes utilisant les bandes de haute fréquence portaient les noms **DCS 1800** et **PCS 1900**. Désormais, ils sont simplement appelés **GSM 1800** et **GSM 1900** respectivement. [8]

➤ **Les différentes technologies utilisées en GSM :**

- ❖ **TDMA** aux États-Unis (IS-54).
- ❖ **CDMA** aux États-Unis (IS-95).
- ❖ **PDC** au Japon (Personal Digital Cellular).

➤ **Le débit du GSM :**

Bien que les systèmes 2G évolués puissent offrir des services de données, les débits restent relativement faibles jusqu'à environ **100 kbps**.

➤ **Architecture du GSM :**

L'architecture du système GSM s'est avérée très performante et a été largement adoptée par d'autres systèmes de télécommunications.

Les principaux éléments du système GSM sont les suivants : **BTS**, **BSC**, **MSC** ainsi que les zones d'enregistrement et d'authentification telles que le **HLR**, **VLR**, **EIR** et **AuC**.

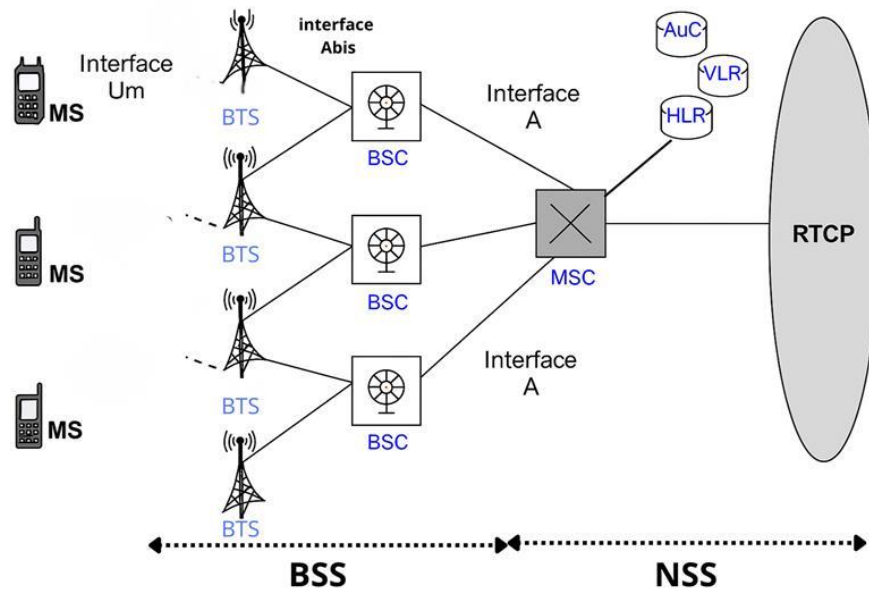


Figure I.5 : L'architecture du GSM

En résumé, l'architecture du GSM repose sur un ensemble de composants qui assurent non seulement la gestion des appels et leur acheminement, mais aussi la sécurité et la localisation des abonnés, facilitant ainsi une gestion optimale des communications mobiles.

I.4.2.1 GPRS :

Le GPRS (*General Packet Radio Service*) est une technologie intermédiaire entre le GSM et l'UMTS. Contrairement au GSM classique, qui utilise un mode de transmission par commutation de circuits, le GPRS introduit la transmission de données en mode paquet. Cette évolution améliore considérablement l'efficacité de l'utilisation du réseau radio et permet un accès à Internet mobile, avec des vitesses supérieures à celles offertes par le GSM traditionnel. [9]

I.4.2.2 L'EDGE :

L'EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) constitue une amélioration du GPRS, visant à offrir des débits de données plus élevés tout en réutilisant en grande partie les infrastructures réseau existantes. Contrairement au GPRS, qui utilise la modulation **GMSK**, l'EDGE adopte une modulation plus avancée, le **8PSK**, ce qui permet d'atteindre des vitesses de transmission jusqu'à trois fois supérieures. Cependant, cette amélioration s'accompagne d'un compromis : la modulation 8PSK est

plus sensible au bruit et nécessite des conditions de signal optimales pour fonctionner efficacement [9].

I.4.2.3 CDMA en 2G:

❖ IS-95 (CDMAone):

- La première version de la CDMA a été introduite sous le nom de **IS-95**, aussi appelée **CDMAone**, en tant que technologie **2G**.
- **CDMAone** permettait une meilleure utilisation du spectre en attribuant le même canal à plusieurs utilisateurs via des codes uniques.

❖ CDMA 2000 :

Est une évolution directe du CDMAone, aussi connue sous le nom de **IS-2000**. Il a été introduit en **2000** et comprend plusieurs versions, dont **CDMA2000 1X** et **CDMA2000 1xEV-DO**. **CDMA2000** permet des débits de données bien plus élevés.

I.4.3 La troisième génération UMTS (3G) :

Est une technologie mobile de troisième génération (3G) appelés **IMT-2000** qui constitue l'évolution des réseaux GSM et de ses améliorations comme le GPRS et l'EDGE. L'UMTS repose sur une interface radio différente. Le **W-CDMA** est une technologie émergente qui devient la norme pour les systèmes 3G, offrant une flexibilité importante pour supporter des services de données rapides et diversifiés. Toutefois, afin de faciliter la transition depuis les technologies 2G, l'infrastructure du cœur de réseau a progressivement évolué vers les exigences de l'UMTS grâce à l'introduction du GPRS et de l'EDGE. Cela a permis aux opérateurs mobiles de passer à la 3G sans devoir investir immédiatement dans une refonte complète du réseau.

➤ Principaux développements :

- ❖ En **1992**, la Conférence Administrative Mondiale des Radiocommunications a réservé des bandes de fréquences pour les futurs services mobiles.
- ❖ En **1998**, le **3GPP** a été créé pour développer les spécifications de l'UMTS, avec la participation d'organismes de normalisation de plusieurs régions du monde (Europe, États-Unis, Japon, Chine et Corée).[9]

I.4.3.1 Architecture de l'UMTS :

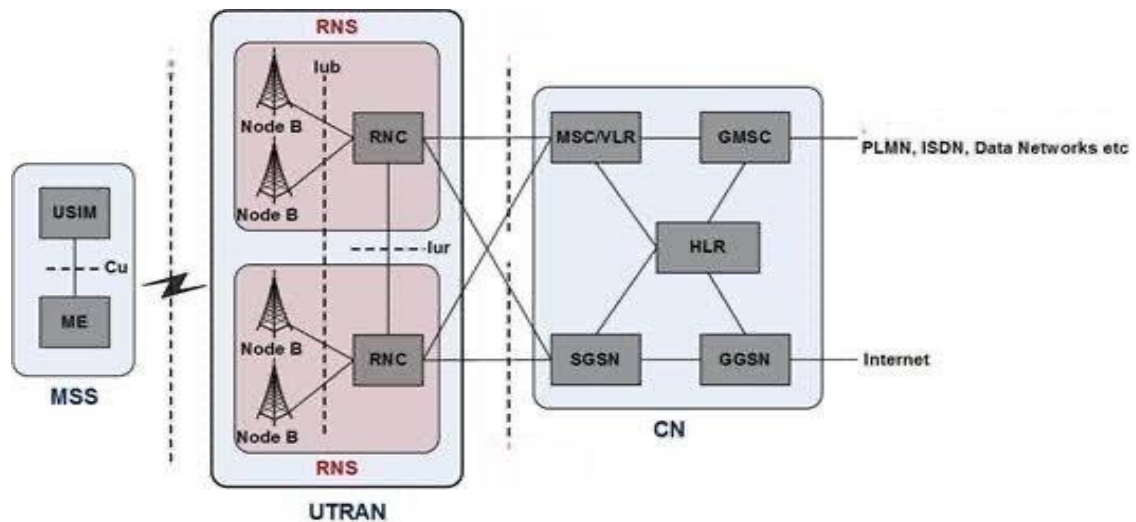


Figure I.6 : L'architecture de l'UMTS [13]

Le réseau **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*) se structure autour de trois principales composantes :

1. **Le cœur de réseau (CN – Core Network) :**

Responsable de la gestion des appels, des connexions et du routage des données. Il assure l'interconnexion avec les autres réseaux (téléphonie fixe, Internet, etc.).

2. **Le réseau d'accès radio (UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network) :**

Constitué de **Node B** (stations de base) et de **contrôleurs RNC (Radio Network Controller)**, il gère la transmission radio entre les terminaux mobiles et le cœur de réseau.

3. **Les équipements utilisateurs (UE – User Equipment) :**

Il s'agit des téléphones mobiles ou des modems 3G compatibles avec la technologie UMTS.

I.4.3.2 Le débit de l'UMTS :

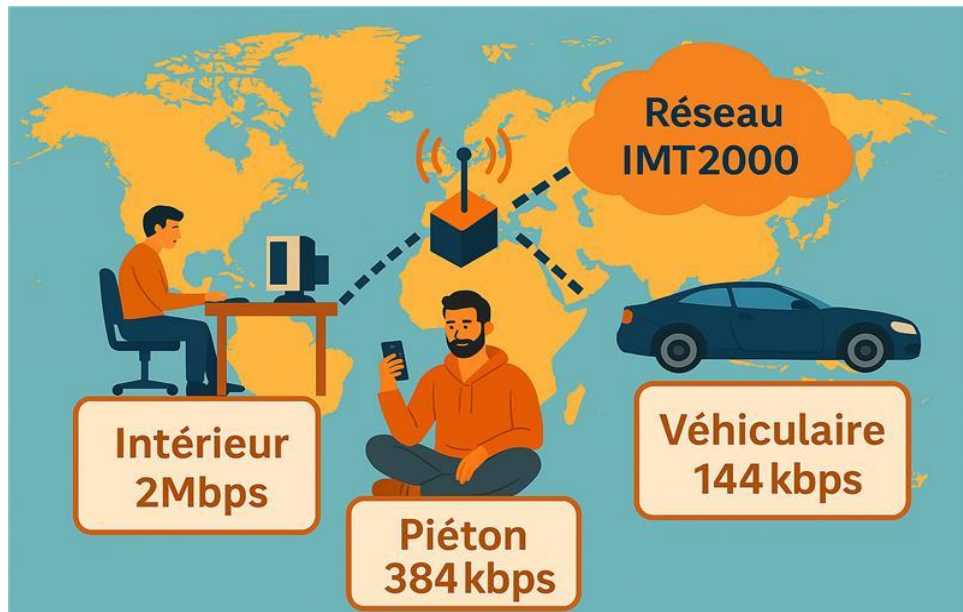


Figure I.7 : Les différents débits de l'UMTS [13]

Il permet des vitesses de téléchargement allant jusqu'à **384 kbps** pour accéder à Internet sans fil et jusqu'à **2 Mbps** pour les transmissions vidéo.

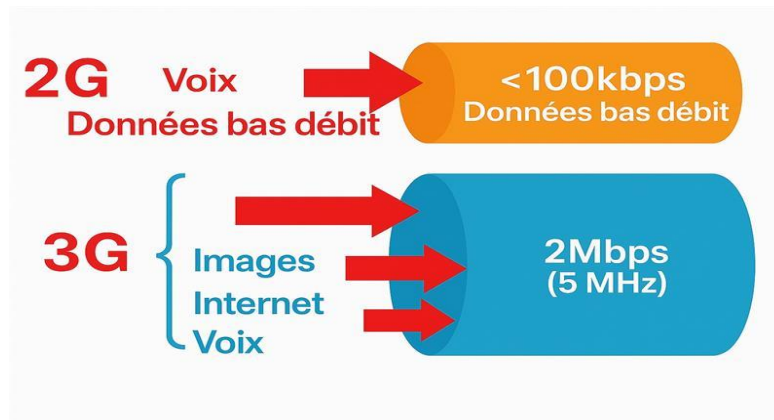


Figure I.8 : Comparaison entre les débits de l'UMTS et GSM [14]

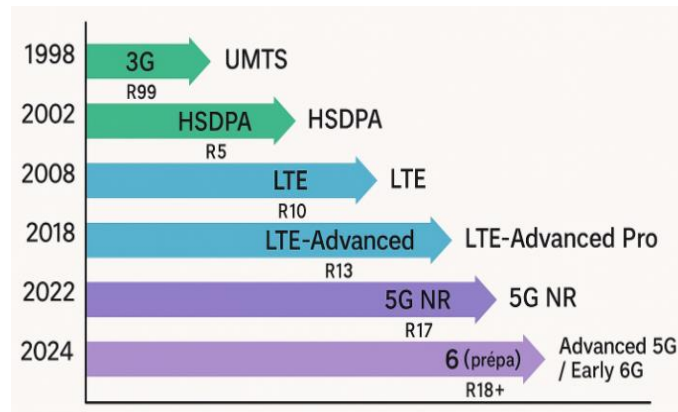


Figure I.9 : Développement de la 3GPP à travers le temps [16]

La figure ci-dessus illustre l'évolution des générations de réseaux mobiles depuis l'introduction de la 3G jusqu'aux premières étapes de la 6G. En 1998, le réseau UMTS (3G), basé sur la Release 99 du 3GPP, a marqué le début de la transmission de données à large échelle. Il a ensuite été amélioré en 2002 par le HSDPA (Release 5), souvent qualifié de 3.5G, permettant un débit descendant plus élevé. En 2008, la 4G LTE (Release 10) a apporté une transformation majeure avec une architecture tout IP, des performances accrues et une latence réduite. Cette technologie a évolué vers le LTE-Advanced (Release 13) en 2018, offrant davantage de capacité grâce à l'agrégation de porteuses et à l'introduction du MIMO massif.

La 5G NR (Release 17), lancée autour de 2022, représente une avancée majeure avec des débits ultra-rapides, une latence minimale et une connectivité massive adaptée aux objets intelligents. Enfin, dès 2024, les travaux de normalisation de la Release 18 introduisent la phase préparatoire de la 6G, visant à repousser les limites actuelles en matière de communication mobile, notamment grâce à l'intelligence artificielle et aux systèmes autonomes. [16]

I.4.4 La quatrième génération LTE (4G) :

La quatrième génération, connue sous le nom de **LTE (*Long Term Evolution*)**, a été introduite autour de 2008 pour répondre aux besoins croissants en haut débit mobile. Contrairement aux générations précédentes, la 4G repose sur une architecture tout IP, ce qui permet une transmission de la voix, des données et des services multimédias de manière unifiée et optimisée. Le LTE offre des débits nettement supérieurs à ceux de la 3G, avec une latence réduite et une meilleure gestion de la mobilité. Il permet également l'utilisation d'applications temps réel comme la visiophonie, la télévision mobile ou encore les jeux en

ligne. Grâce à des technologies telles que l'**OFDMA**, le **MIMO** et l'**agrégation de porteuses**, le LTE constitue une avancée majeure en termes de capacité, de couverture et de qualité de service. Cette génération marque également une étape essentielle vers la 5G, notamment avec ses évolutions comme le **LTE-Advanced** et le **LTE-Advanced Pro** [17].

I.4.4.1 Architecture de la LTE :

Avec la 4G, l'architecture évolue vers le Long-Term Evolution (LTE), caractérisé par :

- **E-UTRAN** : Utilise des eNodeB qui intègrent les fonctions des anciens Node B et RNC, simplifiant ainsi l'architecture.
- **EPC** : Comprend le Mobility Management Entity (MME), le Serving Gateway (SGW) et le Packet Data Network Gateway (PGW).

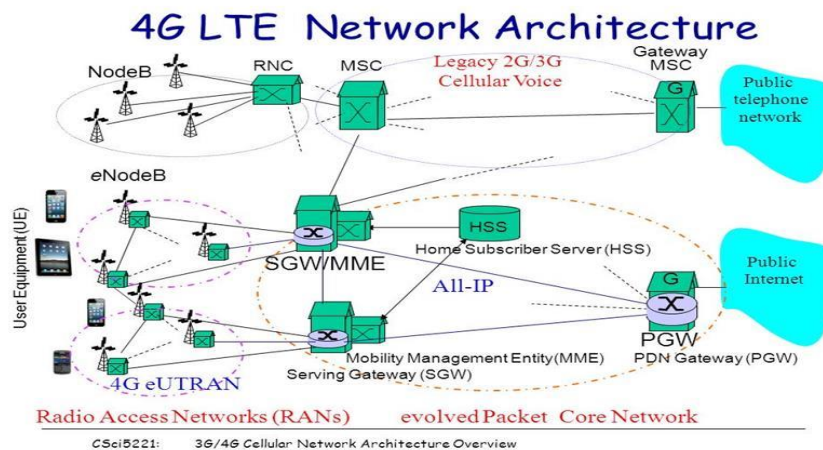


Figure I.10 : Comparatif entre l'architecture de la LTE et GSM/UMTS [18]

En 4G, tout est basé sur l'**IP (All-IP)**. Les **eNodeB** remplacent les **NodeB** et **RNC**, ce qui simplifie l'accès radio. Le cœur du réseau évolue avec des éléments comme le **MME** pour la gestion de la mobilité et les gateways (**SGW/PGW**) pour le trafic data. La voix est aussi gérée via IP (**VoLTE**).

I.4.5 La cinquième génération 5G NR :

La **5G**, également désignée sous le nom de **IMT-2020**, représente la nouvelle étape majeure dans l'évolution des communications mobiles, développée par le **3GPP** à partir de la Release 15 et officiellement lancée en 2020. La **5G** introduit des améliorations significatives par rapport aux générations précédentes. Elle a été conçue pour offrir des taux de transfert de données très

élevés, une latence ultra-faible et une fiabilité renforcée, répondant ainsi aux exigences croissantes des applications modernes. Grâce à son architecture flexible et à l'utilisation de nouvelles bandes de fréquences, y compris les ondes millimétriques, la **5G** ouvre la voie à des usages innovants tels que les véhicules autonomes, l'Internet des objets à grande échelle (massive **IoT**), la réalité augmentée et virtuelle, ainsi que les réseaux industriels intelligents. Elle constitue une rupture technologique majeure, capable de transformer en profondeur un large éventail de secteurs économiques. [19]

I.4.5.1 Comparaison des caractéristiques entre LTE et 5G NR :

D'après nos recherches sur les comparatifs d'un congrès scientifique (**cicom 2020**) :

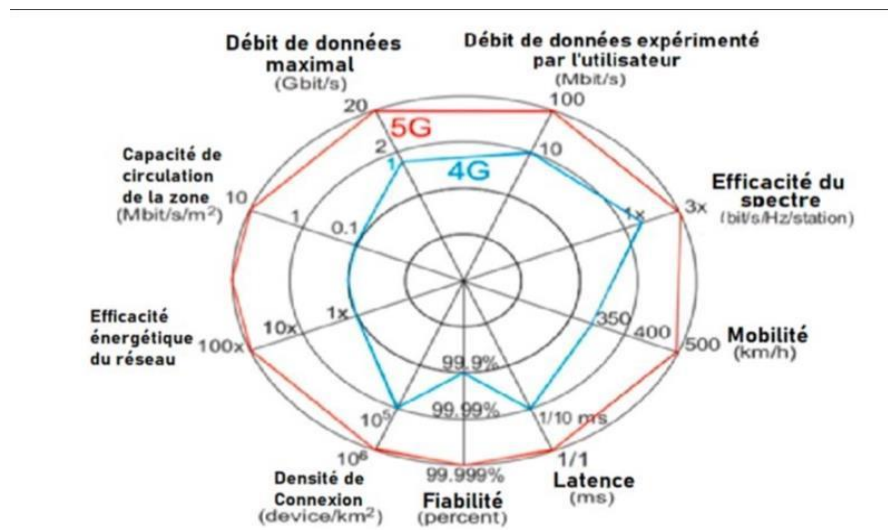


Figure I.11 : Comparaison des caractéristiques entre LTE et 5G NR [20]

I.4.5.2 Les Applications de la 5G :

Les réseaux 5G, également appelés 5G NR, permettent de gérer davantage d'appareils et des applications axées sur les données comme la réalité augmentée, les véhicules autonomes et l'IoT. Ils offrent de nouvelles innovations et opportunités dans des secteurs comme la santé, l'industrie manufacturière, les transports et le divertissement, et continuent de se développer à mesure que les fournisseurs de services managés (MSP) du monde entier déploient leurs réseaux [21]. Plusieurs applications et fonctionnalités uniques à la 5G sont décrites dans la **figure I.12** :

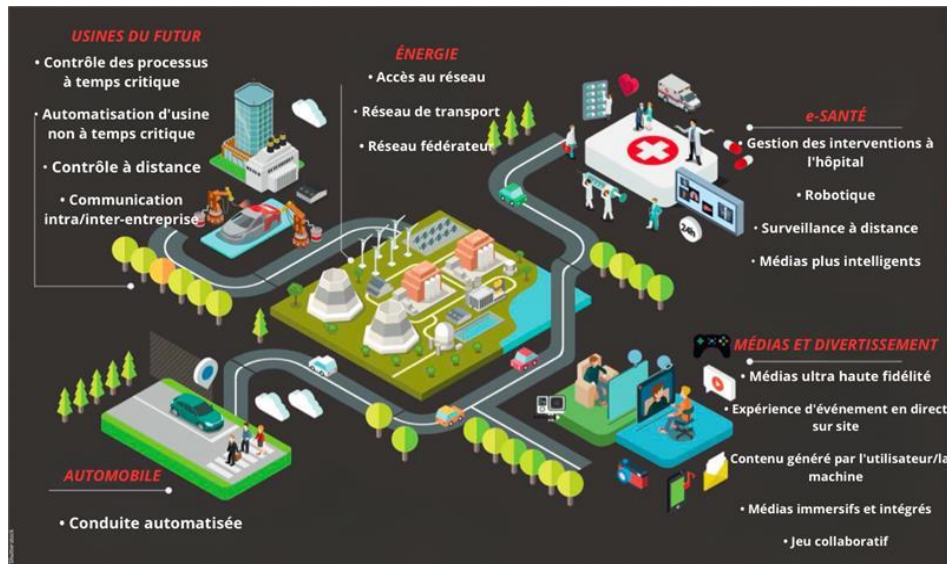


Figure I.12 : Principaux services de la 5G [23]

- ❖ **Médias et divertissement** : La 5G renforce l'immersion en réalité virtuelle avec des contenus vidéo à 360° et en ultra haute définition, offrant une expérience plus créative et captivante. [22]
- ❖ **Industrie et agriculture du futur** : La 5G permet l'utilisation de robots connectés dans l'industrie, et favorise l'installation massive de capteurs IoT en agriculture pour optimiser les traitements et améliorer les rendements. [22]
- ❖ **Le transport** : Les véhicules pourront communiquer entre eux et prendre des décisions autonomes, grâce à la fiabilité et à la faible latence du réseau 5G. [22]
- ❖ **L'énergie** : La 5G assure une communication stable et rapide entre les nœuds du réseau électrique, permettant un meilleur équilibre entre production, consommation et distribution. [22]
- ❖ **La santé** : Elle rend possibles les diagnostics et interventions médicales à distance en temps réel, avec des vidéos 3D en haute qualité et une sécurité optimale grâce à sa très faible latence. [22]

I.5 Développement des communications mobiles en Algérie : [24]

Aujourd'hui, les réseaux mobiles représentent le domaine technologique le plus dynamique en termes d'investissements et d'innovations. Leur capacité à toucher une population massive a accéléré leur évolution de façon exponentielle. Cette accélération permanente fait des télécoms un secteur unique où les avancées technologiques s'auto-alimentent, et aussi la technologie mobile est un outil qui aide à la progression

technologique pour cela il suffit de reporter au tableau suivant, qui montre le nombre en millions des abonnements aux réseaux mobiles par opérateur en 2024.

Algérie Télécom Mobile (Mobilis)	22 996 731
Optimum Télécom Algérie (Djezzy)	16 235 287
Wataniya Télécom Algérie (Ooredoo)	14 222 887
Total des abonnés	53 454 905

Tableau I.1 : Le nombre des abonnements aux réseaux mobiles [24]

Répartition des parts de marché en nombre d'abonnés (T3-2024)

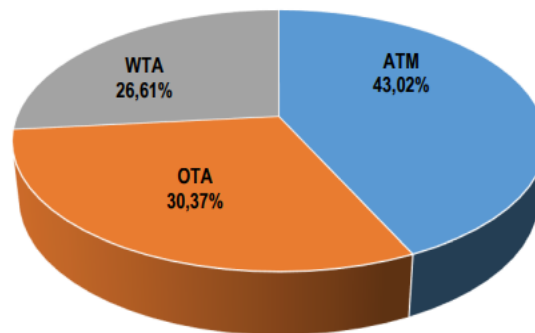


Figure I.13 : Répartition abonnés opérateurs T3-2024 [24]

I.6 Conclusion :

Le passage de la 1G à la 5G a été une évolution passionnante, transformant la communication mobile, des simples appels vocaux à un puissant écosystème de connectivité et d'innovation. Chaque génération a apporté des caractéristiques et des capacités uniques qui ont façonné notre interaction avec la technologie mobile. Si la 5G offre des vitesses Internet plus rapides, elle représente bien plus que cela.

Chapitre II
LA TECHNOLOGIE 5G

II.1 Introduction :

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les générations antérieures de réseaux mobiles ont atteint leurs limites et ne peuvent plus répondre aux exigences actuelles. La **5G NR**, ou cinquième génération, a été développée dès 2020 pour répondre aux besoins complexes des applications modernes et futures.

Elle constitue un écosystème connecté hautement efficace, sécurisé et fiable, favorisant une connectivité fluide, une densité de connexions accrue, l'automatisation des processus, une productivité industrielle renforcée, ainsi que le développement durable. Les sociétés interconnectées de demain seront marquées par une augmentation massive de la connectivité, un flux de données intensifié, et une diversité d'usages inédits.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de l'architecture du réseau 5G, englobant non seulement le cœur du réseau et le réseau d'accès, mais également l'ensemble des composants et éléments fonctionnels qui définissent cette technologie de nouvelle génération.

II.2 Architecture générale du réseau 5G NR :

Un réseau 5G se compose d'un réseau d'accès radio (NG-RAN), d'un réseau cœur (5GC) et l'équipement utilisateur (UE). Un réseau de transport TCP/IP sous-jacent relie diverses entités de réseau, offrant un soutien aux services différenciés en matière de qualité de service. [25]

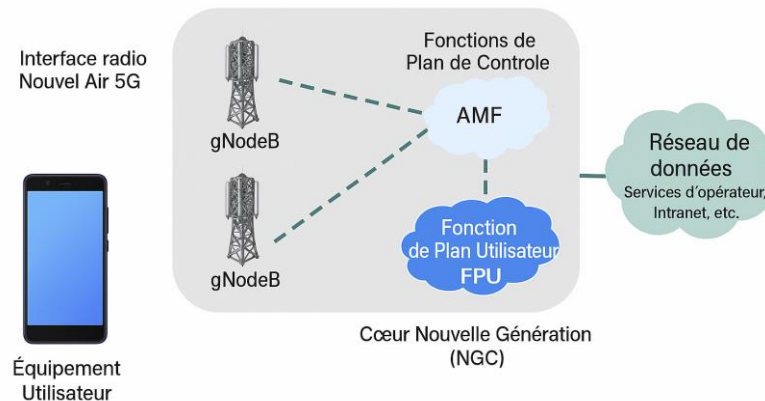


Figure II.1 : L'architecture générale de la 5G

II.2.1 Équipement utilisateur :

Dans les réseaux de communication sans fil 5G (Cinquième Génération), l'Équipement Utilisateur (UE) est un élément essentiel qui représente le dispositif utilisé par l'utilisateur, facilitant la connexion avec le réseau 5G. Il regroupe une vaste sélection d'appareils que les utilisateurs peuvent utiliser pour se connecter et interagir avec le réseau 5G, y compris les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables.

II.2.2 RAN de nouvelle génération (NG-RAN) :

La figure ci-dessous illustre l'architecture modulaire du gNB (Next Generation Node B), la station de base dans le réseau 5G NR, décomposée en plusieurs entités fonctionnelles selon les spécifications 3GPP. Cette architecture est conçue pour favoriser la flexibilité, la virtualisation et la performance.[26]

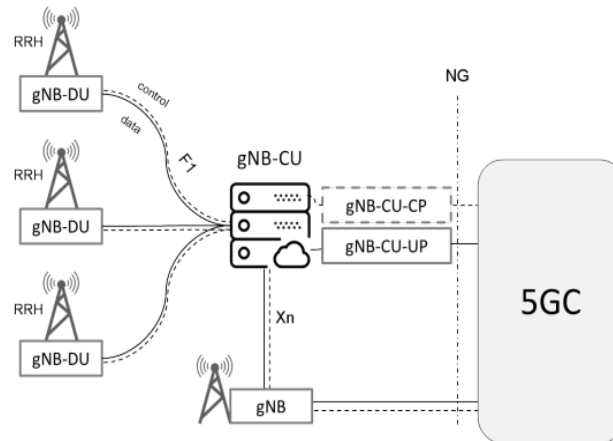


Figure II.2 : Architecture globale du réseau NG-RAN [26]

❖ Composants principaux :

gNB-DU (Distributed Unit)

Située généralement près des antennes (RRH – Remote Radio Head).

Gère les fonctions temps réel comme :

- L'accès radio (RLC, MAC, PHY).
- La gestion des ressources radio par cellule.

Communique avec le CU via l'interface F1.

gNB-CU (Centralized Unit)

Gère les fonctions non-temps réel :

- La signalisation, la mobilité intercellulaire.
- Le routage IP, l'interface avec le cœur de réseau (5GC).

Elle est souvent hébergée dans le cloud ou un datacenter (NFVI).

Le gNB-CU est scindé en deux entités logiques :

- **gNB-CU-CP (Control Plane)** : traite la signalisation RRC et NAS.
- **gNB-CU-UP (User Plane)** : s'occupe de la transmission des données utilisateurs.

❖ Interfaces utilisées :

Interface	Rôle	Connecte
F1-C / F1-U	Sépare les fonctions de contrôle et de données entre DU et CU	gNB-DU ↔ gNB-CU
NG (NG-C / NG-U)	Connecte le gNB-CU au 5G Core (5GC)	gNB-CU ↔ 5GC
Xn	Interface d'interconnexion entre gNBs (pour le handover, coordination intercellulaire, etc.)	gNB ↔ gNB

Tableau II.1 : Les Interfaces utilisées

❖ Avantages de l'architecture 5G :

- **Flexibilité de déploiement** : La séparation des unités de contrôle (CU) et des unités de distribution (DU) permet une implantation géographique plus souple selon les besoins du réseau.
- **Prise en charge du Cloud-RAN** : Grâce à la virtualisation des fonctions réseau (vCU, vDU), cette architecture permet une gestion centralisée et évolutive des ressources.
- **Optimisation des performances** : Elle offre une gestion plus efficace des ressources radio, ce qui améliore la qualité de service et la capacité du réseau.
- **Réduction de la latence** : L'architecture permet de minimiser les délais dans le plan utilisateur, favorisant les applications critiques en temps réel.

II.2.2.1 Le rôle du gNB :

Le gNB réalise les opérations suivantes : [27]

- Les capacités de gestion des ressources radio : surveillance de la porteuse radio, contrôle d'accès sans fil, gestion de la mobilité des connexions.
- La transmission des données du plan utilisateur vers les UPF.
- L'envoi des informations du système de contrôle vers l'AMF.
- Mise en place et activation de la connexion, ainsi que de la double connectivité.
- Mise en place de la mesure et des rapports concernant la mobilité et l'organisation, ainsi que l'élaboration et la distribution de messages de pagination.
- Administration des sessions et assistance pour la segmentation du réseau.
- Gestion de la qualité du service et illustration cartographique des flux sur les supports radio de données.

II.2.3 Réseau cœur 5G :

L'architecture 5GC repose sur un modèle connu sous le nom de “ Architecture basée sur le service ” (SBA), dans lequel les composants de l'architecture sont caractérisés par des « Fonctions réseau » (NFs) au lieu par des éléments d'une architecture classiques.

[27]

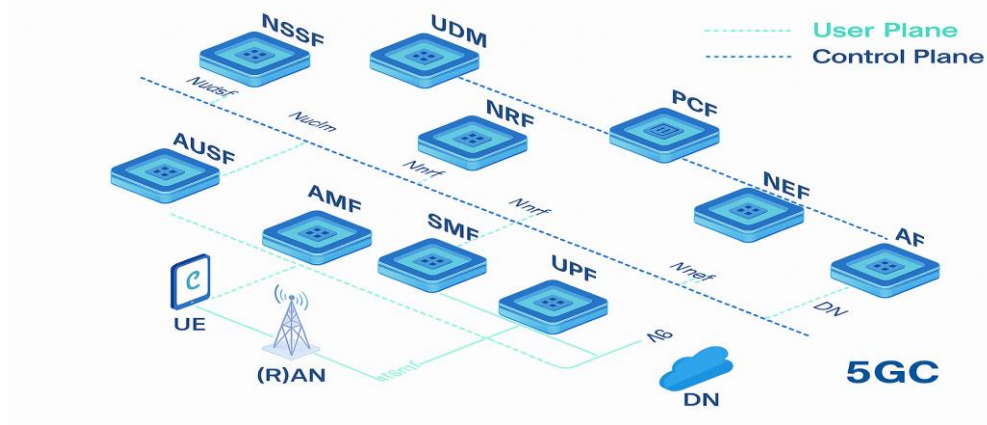


Figure II.3 : Architecture du cœur 5GC [28]

AF : Cet élément représente une entité semblable à un serveur d'application, facilitant l'interaction avec d'autres NF du plan de contrôle.[31]

AMF : Elle s'occupe des activités suivantes : la gestion des enregistrements, des connexions et de la mobilité.[30]

AUSF : Il est chargé de la mise en œuvre du processus d'authentification avec les UE. Son rôle est aussi de séparer la base de données des abonnés. [30]

NRF : Dans les réseaux 5G, la fonction NRF a une importance majeure car elle sert de dépôt centralisé pour toutes les fonctions réseau au sein du réseau d'un opérateur. [29]

NSSF : Est un élément essentiel du réseau central 5G qui permet une gestion efficace et flexible des tranches de réseau ainsi qu'une attribution optimale des ressources aux UE.[29]

UPF : Est un élément fondamental du réseau central 5G qui gère le chemin du plan utilisateur des sessions (PDU). Le UPF notifie l'UE des données accessibles.[29]

NEF : A un rôle primordial dans la garantie de la sécurité et de la confidentialité en validant, en autorisant et en réduisant les fonctions d'application qui accèdent aux fonctions du réseau.[29]

SMF : Il joue un rôle vital dans la gestion et le contrôle des sessions au sein du réseau 5G. Elle est chargée de l'établissement et de la gestion des sessions conformément à la politique réseau.[29]

PCF : Il exerce la part d'une entité centralisée qui fournit des procédures de stratégie aux autres fonctions du plan de contrôle.

II.3 Les piliers de la 5G :

Nous avons identifié 10 éléments clés pour la 5G, comme le montre la **figure II.4**. À partir de là, nous allons développer chacun de ces éléments et souligner leur rôle et leur importance dans la réalisation de la nouvelle génération. [32]

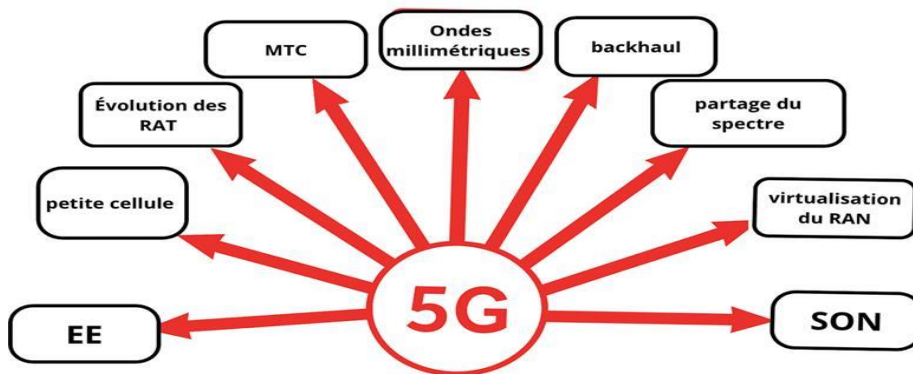


Figure II.4 : Les piliers de la 5G

II.3.1 Évolution des RAT existants :

La 5G n'introduit pas un nouveau RAT isolé, mais améliore les RAT existants (SE, EE, latence) dans une architecture innovante permettant une répartition flexible du RAN entre opérateurs.

II.3.2 Déploiement hyperdense de petites cellules :

L'HetNet repose sur l'implantation massive de petites cellules homogènes ou hétérogènes, renforçant l'efficacité spectrale et énergétique.

II.3.3 Réseau auto-organisé (SON) :

Les cellules intérieures doivent s'auto-configurer sans intervention opérateur, grâce au SON, pour répondre à la croissance du trafic intérieur et minimiser les interférences.

II.3.4 Communication de type machine (MTC) :

Le MTC implique la connexion massive de dispositifs (jusqu'à 50 milliards), nécessitant une latence ultra-faible pour des applications comme l'Internet tactile.

II.3.5 Exploitation des ondes millimétriques :

Face à la saturation des bandes sous 3 GHz, les cmWave et mmWave représentent une solution prometteuse pour augmenter la capacité.

II.3.6 Réorganisation des liaisons de connectivité :

Il devient crucial de moderniser les liaisons de retour (backhaul) avec des supports comme la fibre optique ou les micro-ondes, pour éviter des goulets d'étranglement.

II.3.7 Efficacité énergétique (EE) :

La réduction de la consommation énergétique est un objectif majeur : elle contribue au développement durable, diminue les coûts, et prolonge l'autonomie des terminaux.

II.3.8 Attribution de nouveaux spectres :

Pour gérer un trafic multiplié par 1000, il est nécessaire d'attribuer de nouvelles bandes de fréquences dédiées à la 5G, au-delà des optimisations actuelles.

II.3.9 Partage du spectre :

Des modèles innovants de partage (alternatifs à la licence exclusive) permettent d'utiliser plus efficacement le spectre et de contourner les contraintes réglementaires.

II.3.10 Virtualisation du RAN :

La virtualisation permet le partage d'infrastructure entre opérateurs, centralise l'intelligence réseau et optimise la gestion globale via des unités d'orchestration logicielles.

II.4 Les fréquences de la 5G :

La 5G est une technologie qui exploitera simultanément des fréquences basses ($f < 1$ GHz), des fréquences élevées ($1 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$) et, pour la première fois dans des réseaux destinés au grand public, des fréquences extrêmement hautes, communément appelées « millimétriques » ($f > 6 \text{ GHz}$). Cette variété spectrale est destinée à satisfaire divers besoins : large couverture (fréquences basses), capacité réseau importante (fréquences élevées), et ultra haut débit (canalisations extrêmement larges en bandes très hautes). La sélection variée de fréquences pour la 5G facilite l'adaptation à des cas d'utilisation ayant des exigences spécifiques en termes de vitesse, de consommation d'énergie, de latence et de fiabilité. [33]

II.4.1 Choix et harmonisation des bandes à l'échelle mondiale :

❖ Les bandes ($f < 1 \text{ GHz}$) :

Certaines entreprises ayant déjà recours à ces technologies pour la 4G, elles garantissent une excellente pénétration à l'intérieur des bâtiments, ainsi qu'une couverture de qualité avec un débit similaire à celui de la 4G. Ce spectre est prisé pour les communications à large bande en général et pour les applications de sécurité publique en

particulier, grâce à ses propriétés captivantes pour la radiodiffusion (comme sa capacité à traverser les murs).

- Les bandes 600 MHz et 700 MHz sont traditionnellement réservées au broadcast média.
- La bande 600 MHz (470-694/698 MHz), identifiée dans certains pays en Amérique du Nord, Amérique latine et Asie-Pacifique, sera étudiée dans le cadre d'IMT au WRC-23 par les pays de la région 1 (Europe, Afrique, Moyen-Orient). [33]

❖ **Les bandes (1 GHz < f < 6 GHz) :**

Elles permettent une augmentation notable du débit, malgré une pénétration réduite dans les bâtiments et une portée inférieure à celle des bandes de moins de 1 GHz. Elles sont reconnues comme les principales avec la 5G et offrent une largeur de bande suffisante pour permettre aux opérateurs de proposer des services innovants ayant des performances supérieures à celles fournies par la 4G. Dans cette catégorie, les nouvelles bandes examinées dans le contexte de la 5G sont les suivantes :

- 3427-1518 MHz (L-band) : nouvelle bande reconnue dans tous les pays.
- 3300-3400 MHz : bande mondiale identifiée dans plusieurs pays, sauf en Europe et en Amérique du nord.
- 3400-3600 MHz (C-band) : bande reconnue au niveau mondial et déjà allouée en Europe comme bande de la 5G.
- 3 600-3 700 MHz (C-band) : bande mondiale identifiée dans plusieurs pays, mais pas en Afrique ni dans certains pays de l'Asie-Pacifique.
- 4 800-4 990 MHz : nouvelle bande identifiée dans quelques pays de la zone Asie-Pacifique. [33]

❖ **Les bandes (f > 6 GHz) :**

Il est essentiel que la 5G, qui se différencie de la 4G, utilise des bandes dites « millimétriques », soit des fréquences dépassant les 6 GHz. Face à l'augmentation constante des débits et des volumes de données échangées, il devient indispensable d'exploiter de nouvelles bandes de fréquences offrant des largeurs de bande très étendues (plus de 100 MHz par utilisateur). Ce sont les fréquences les plus hautes employées dans la technologie de téléphonie mobile ; elles peuvent offrir un taux de transfert de données très élevé, similaire à celui de la fibre optique. En revanche, leur capacité à s'immerger dans les bâtiments est très limitée puisqu'elles ne traversent pas les obstacles et leur portée ne s'étend que sur quelques centaines de mètres. L'utilisation de cette bande nécessite la mise en place

des techniques de Beamforming. [3].

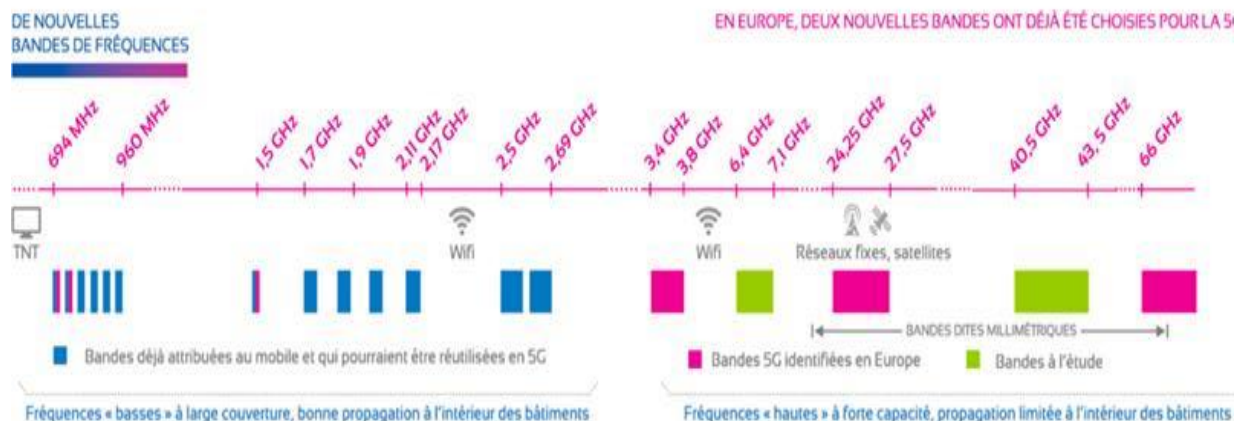


Figure II.5 : Bandes millimétriques identifiées lors du WRC-15 [34]

Catégories de fréquences	Fréquences	Cas d'usage 5G	Capacité	Couverture
Basses fréquences (sous 1 GHz)	694–700 MHz en Europe, environ 600 MHz aux États-Unis	mMTC, URLLC	Faible	Large (zones rurales et urbaines)
Fréquences moyennes (1 GHz < f < 6 GHz)	3,4–3,8 GHz en Europe, 3,1–3,55 & 3,7–4,2 GHz aux États-Unis	URLLC, eMBB, mMTC	Moyenne	Moyenne (zones urbaines)
Hautes fréquences (f > 6 GHz)	24–27 GHz en Europe, 27,5–28,35 / 37–40 / 64–71 GHz aux États-Unis	eMBB	Élevée	Faible (points chauds)

Tableau II.2 : Bandes de fréquences 5G

II.5 Spectre 5G :

NR couvre une gamme de fréquences assez vaste pour répondre aux besoins du réseau. Pour cette raison, les bandes dans le cadre de la Release-15 de spécification sont divisées en deux plages de fréquences :

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
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
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
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

Tableau II.3 : Gamme de fréquences FR1 [35]

Bande NR	Liaison montante (UL) et descendante (DL)	Mode Duplex
n257	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	TDD

Tableau II.4 : Gamme de fréquences FR2 [36]

- La gamme de fréquences 1 (FR1) inclut toutes les bandes existantes et nouvelles en dessous de 6 GHz.
- La gamme de fréquences 2 (FR2) inclut les nouvelles bandes entre 24,25 et 52,6 GHz.
- La plage n65 à n256 est réservée aux nouvelles bandes NR de FR1.
- La plage n257 à n512 est réservée aux nouvelles bandes NR de FR2.

II.6 Les modes de déploiement du réseau 5G :

Les modèles non autonomes (NSA) et autonomes (SA) représentent deux des méthodes de déploiement les plus fréquemment utilisées pour la 5G.

II.6.1 L'architecture NSA :

La plupart des premières mises en place de réseaux 5G sont réalisées en mode non autonome ou NSA. Ils mettent l'accent sur l'amélioration du haut débit mobile. Le but est d'offrir un débit de données supérieur et une connexion plus stable. De manière plus précise, cela implique que les réseaux 5G utilisent l'infrastructure 4G existante pour profiter de la couverture des bandes basses 4G et de la liaison vers un réseau central 4G amélioré. On y intègre ensuite les fonctionnalités requises pour adapter le nouveau standard 5G. C'est l'option qui a permis la mise en œuvre et la mise sur le marché de la 5G dès l'année 2019. [25]



Figure II.6 : L'architecture du mode NSA

II.6.2 L'architecture SA :

Le mode de déploiement 5G SA permet au réseau 5G de fonctionner de manière autonome, sans dépendre de l'infrastructure 4G existante précédemment. Cela veut dire que 5G SA ne dépend d'aucune fonctionnalité du réseau 4G, ce qui en fait un réseau véritablement autonome. Ainsi, la 5G SA présente une latence réduite et une performance réseau supérieure comparée à la 5G NSA. Donc, cette version 5G SA ne sera accessible partout qu'après sa mise en œuvre. [25]



Figure II.7 : L'architecture du mode SA

II.6.3 Principales différences entre 5G NSA et SA :

Maintenant que nous avons une compréhension de base de la 5G NSA et SA, approfondissons les principales différences entre les deux options de déploiement.[38]

- **Latence** : une différence notable entre la 5G NSA et la SA concerne les performances liées à la latence. Du fait de son appui sur l'infrastructure 4G déjà en place, la 5G NSA a tendance à présenter une latence plus importante que la 5G SA.
- **Performance du réseau** : la 5G SA est réputée pour sa performance réseau supérieure comparée à la 5G NSA. Comme la 5G SA opère indépendamment du réseau 4G, elle peut proposer une meilleure gestion des ressources et une optimisation réseau plus efficace.
- **Complexité de la mise en place** : L'implémentation de la 5G SA peut s'avérer plus complexe que celle de la 5G NSA, étant donné qu'elle requiert l'établissement d'un réseau autonome entièrement neuf.
- **Durabilité** : En matière de durabilité, la 5G SA est jugée plus durable que la 5G NSA. Comme 5G SA opère indépendamment du réseau 4G, elle propose une structure plus adaptable et évolutive capable de mieux gérer les progrès futurs de la technologie 5G.

II.7 Les KPI de la 5G (Key Performance Indicator) :

II.7.1 Débit crête par utilisateur :

Représente le débit maximal théorique atteignable dans des conditions idéales.

Objectifs 5G : jusqu'à **20 Gbit/s** en téléchargement (DL) et **10 Gbit/s** en envoi (UL).

II.7.2 Débit moyen perçu par l'utilisateur :

Moyenne des débits effectivement mesurés sur une durée donnée, reflétant l'expérience réelle.

Objectifs 5G : **100 Mbit/s** (DL) et **50 Mbit/s** (UL).

II.7.3 Efficacité spectrale maximale :

Rapport entre le débit utile et la largeur de bande (bit/s/Hz).

Objectifs 5G : **30 bit/s/Hz** (DL) et **15 bit/s/Hz** (UL).

II.7.4 Mobilité :

Capacité du réseau à maintenir la qualité de service à différentes vitesses de déplacement.

Cibles 5G : jusqu'à **500 km/h**, couvrant des scénarios de mobilité de l'immobile jusqu'au TGV.

II.7.5 Latence :

Temps total nécessaire pour l'envoi, le traitement, et l'accusé de réception d'une donnée.

Objectif 5G : latence ultra-faible, souvent inférieure à **1 ms** dans les cas critiques.

II.7.6 Densité de connexions :

Nombre d'appareils pouvant être connectés par kilomètre carré.

Cible UIT : 1 million de connexions/km², adapté au massive **IoT**.

II.7.7 Efficacité énergétique :

Quantité de données transmises par unité d'énergie consommée (bits/Joule).

Objectif : réduire la consommation énergétique tout en maintenant des performances élevées.

II.7.8 Débit par surface (capacité de trafic) :

Volume de données transféré par mètre carré (Mbit/s/m²), indiquant la capacité d'une zone à supporter du trafic dense.

Mesure la capacité réseau en milieu urbain dense ou lors d'événements à forte affluence.

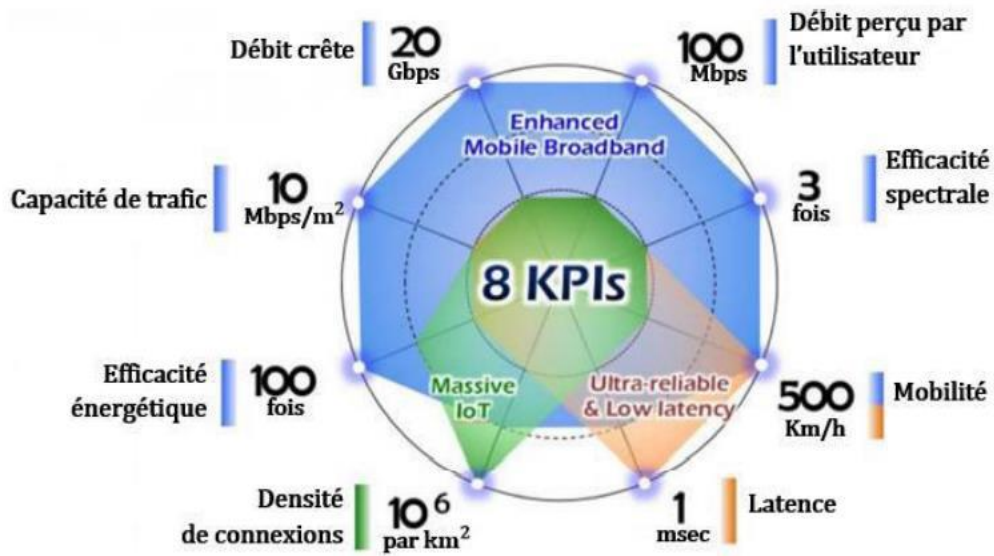


Figure II.8 : Les huit indicateurs de performance [34]

II.8 Les nouvelles antennes Massive MIMO :

Le développement de la 5G nécessite des 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. Les antennes Massive MIMO sont particulièrement utiles dans des zones à forte densité de population comme les stades, les centres commerciaux ou les aéroports. Elles peuvent accueillir jusqu'à 4 fois plus d'utilisateurs pour une quantité de fréquence donnée [43]. Massive MIMO est une technologie qui rend cela possible pour 5G car elle peut apporter une amélioration de dix fois dans l'efficacité spectrale. Ce gain impressionnant est obtenu en utilisant une centaine d'éléments d'antenne bon marché dans les stations de bases. [44]



Figure II.9 : Massive MIMO [45]

II.9 Beamforming :

La formation de faisceaux (Beamforming) présente une option attrayant pour améliorer les performances des réseaux mobiles. Elle offre une plus grande efficacité spectrale, augmentant considérablement la capacité des sites de stations de base déjà en place. Cela est accompli en assurant une séparation convenable entre divers chemins géographiques pour le même UE ou pour différents UE. Elle a aussi la capacité d'améliorer les performances des liaisons et de couvrir une zone plus vaste. Dans la pratique, les antennes MIMO massives permettent d'exploiter les bénéfices du Beamforming. [46]

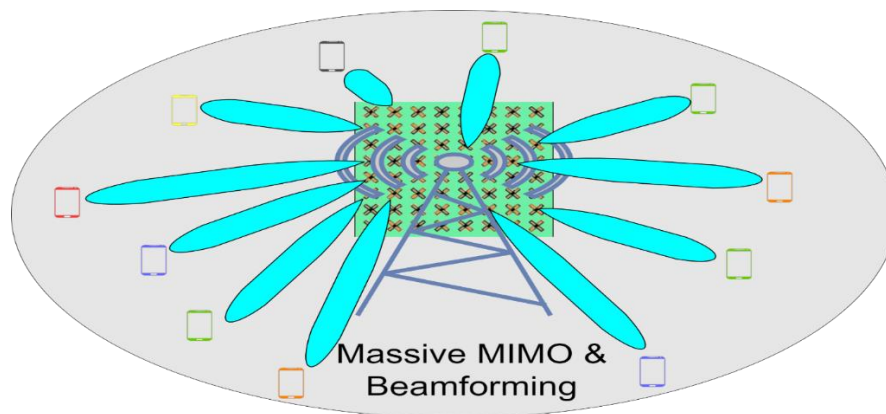


Figure II.10 : Beamforming et la massive MIMO

II.10 Catégories fondamentales des services 5G :

Dans le cadre de la norme IMT-2020 (Telecommunications Mobiles Internationales), l'Union internationale des télécommunications (UIT) a établi trois principales catégories d'applications 5G, accompagnées de leurs besoins spécifiques. Il est possible que ces catégories soient incompatibles les unes avec les autres, et elles répondent à plusieurs besoins professionnels. La **figure (II.11)** présente le résumé des trois cas d'utilisation de la 5G dans les différents domaines d'applications.

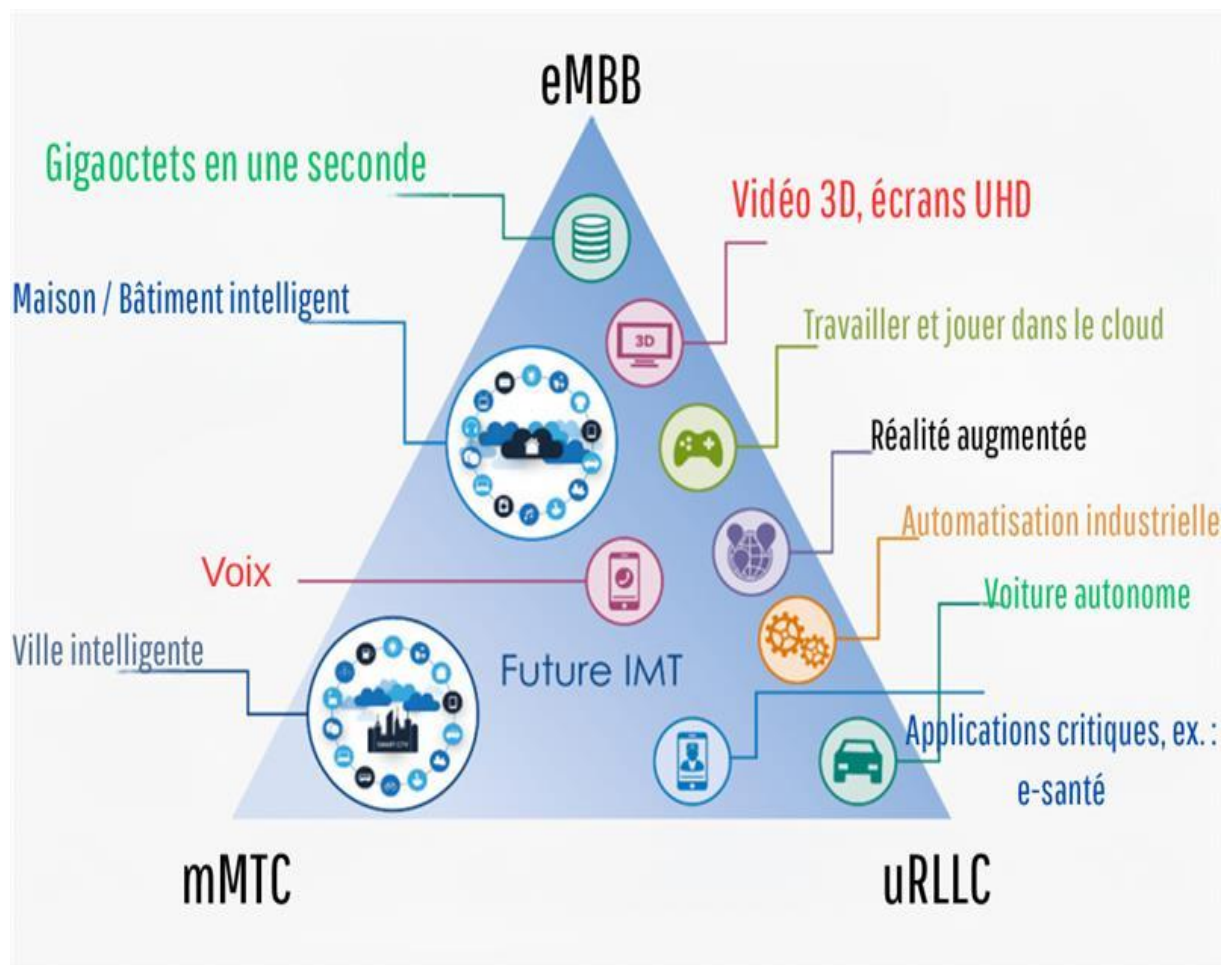


Figure II.11 : Catégories d'usages de la 5G [47]

La segmentation des services 5G en trois grandes catégories de cas d'usage :

II.10.1 eMBB :

Objectif : Fournir des débits très élevés pour des applications à forte consommation de données. Quelques exemples d'applications :

- Vidéos 3D, écrans UHD.
- Réalité augmentée.
- Cloud gaming / travail dans le cloud.
- Téléchargement de giga-octets en quelques secondes.

II.10.2 mMTC :

Objectif : Permettre la connexion massive d'objets avec une faible consommation d'énergie. Quelques exemples d'applications :

- Ville intelligente.
- Bâtiments intelligents.
- Capteurs IoT répartis à large échelle.
- Communication M2M (machine to machine).

II.10.3 uRLLC :

Objectif : Offrir une latence ultra-faible et une fiabilité extrême, pour des services critiques.

Quelques exemples d'applications :

- Voiture autonome.
- Robotique industrielle.
- Applications médicales critiques (e-santé).
- Systèmes de contrôle en temps réel.

II.11 Les défis de la cinquième génération :

➤ **Réduction de la latence :**

La 5G doit atteindre une latence ultra-faible, de l'ordre de 1 milliseconde, pour répondre aux exigences des applications critiques en temps réel. [52]

➤ **Densité de connexion accrue :**

Le réseau doit supporter un grand nombre d'appareils connectés simultanément, notamment pour l'Internet des objets (IoT), sans surcharge de signalisation. [52]

➤ **Amélioration de l'efficacité spectrale :**

La 5G vise une meilleure utilisation du spectre radio, avec un débit plus élevé par Hertz disponible. [52]

➤ **Augmentation de la capacité de trafic :**

Des réseaux densifiés, avec un grand nombre de points d'accès, sont nécessaires pour faire face à la croissance exponentielle du trafic mobile. [52]

➤ **Efficacité énergétique du réseau :**

La 5G doit intégrer des technologies de traitement et de matériel économes en énergie, réduisant ainsi la consommation globale du réseau. [52]

➤ **Coûts d'infrastructure élevés :**

Le déploiement de la 5G implique souvent l'achat de nouveaux équipements

(antennes, stations de base, etc.) et la mise à niveau des infrastructures existantes, ce qui représente un investissement important en temps et en argent.

➤ **Sécurité accrue :**

Avec une surface d'attaque plus large due à l'augmentation du nombre d'appareils et de points d'accès, la 5G nécessite des mesures de cybersécurité renforcées pour protéger les données et les communications sensibles. [53]

II.12 Conclusion :

La 5G devrait offrir une multitude d'applications, dont un bon nombre ne sont pas encore envisagées à l'heure actuelle. Il est effectivement conçu pour répondre aux exigences et aux contextes commerciaux de 2020 et au futur. Il est essentiel d'offrir un débit nettement élevé, une latence considérablement réduite, une fiabilité élevée, une densité de connexion grandement augmentée et une plus grande portée de mobilité. Cela offrirait la possibilité de proposer une vaste gamme de services que la simple voix et les données.

Ce chapitre contient des informations plus significatives concernant la technologie 5G. Nous exposons ainsi le développement typique des télécommunications mobiles, l'architecture, le spectre et les scénarios d'applications de la cinquième génération.

CHAPITRE III

PLANIFICATION DU RÉSEAU MOBILE 5G

III.1 Introduction :

L'introduction de la technologie 5G a créé des enjeux et des opportunités sans précédent pour les fournisseurs de services mobiles. Face à une demande intense de connexions mobiles à la fois rapides et fiables, il est essentiel d'améliorer et de perfectionner l'architecture du réseau pour répondre à ces exigences, C'est dans ce cadre que des programmes de simulation comme la dernière version d'Atoll 3.4.0 qu'on vas utiliser, qui prend en charge la conception de réseaux de nouvelle génération comme la 5G, deviennent indispensables pour leur élaboration et leur perfectionnement. Dans ce chapitre, nous passons en revue les phases essentielles de la conception du réseau mobile 5G à l'aide de l'outil radio Atoll, ainsi que les majeurs, outils et techniques employés pour assurer un déploiement performant du réseau.

III.2 Logiciel de planification pour les réseaux 5G NR :

La société française Forsk [54] est à l'origine du développement d'Atoll. C'est le logiciel dominant en matière de planification et d'optimisation radio. Atoll est une plateforme de conception et d'optimisation de réseaux sans fil multi-technologies qui accompagne les opérateurs sans fil tout au long du cycle de vie du réseau. Il prend en charge une variété de technologies radio, y compris la **5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM, CDMA, WIFI, 3GPP.**



Il offre la possibilité aux ingénieurs de représenter et simuler la couverture radio d'un réseau mobile, d'anticiper la qualité du signal, le débit du réseau, les perturbations, et de contribuer à l'installation des antennes.

III.3 Planification d'un réseau avec le logiciel Atoll :



Figure III.1: Etapes de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll

III.3.1 Pré-Planification :

La pré-planification implique la détermination des éléments suivants : les cartes géographiques, la région géographique à planifier, les données de l'abonné, le nombre d'utilisateurs et des informations détaillées sur le gNB.

Paramètre	Valeur
Zone	La ville d'Oran
Superficie	145 km ²
Morphologie de la zone	Urbaine
Type de multiplexage	TDD
Probabilité de couverture	85 – 90%
Bande de fréquence	3,5 GHz
Largeur de bande	50 MHz

Tableau III.1 : Paramètres de la zone



Figure III.2: Zone de la ville d'Oran

III.3.2 Planification :

Cette étape implique la conception de la fréquence, de l'adjacence et des paramètres spécifiques au déploiement du réseau (puissance d'émission, utilisation des antennes, ajustements des opérateurs...), pour garantir une couverture et une capacité optimale du réseau.

III.3.3 Vérification :

Une vérification est réalisée afin de repérer toute anomalie possible. L'optimisation pré-lancement se focalise sur les éléments clés du réseau, sans se soucier des détails. Par ailleurs, cela inclut la mise en œuvre de tests Drive, une méthode d'évaluation employée pour vérifier le fonctionnement du réseau, que ce soit en matière de couverture, de capacité ou de critères de qualité.

III.3.4 Optimisation :

L'optimisation est un processus sans fin. C'est l'étape définitive qui a pour devoir d'apprécier le contentement des clients et de gérer leurs préoccupations. Suite à avoir eu approfondissement exploré la théorie dans les chapitres 1 et 2 et assimilé les étapes, de planification, nous nous orientons à présent vers l'analyse pratique qui constitue le but de notre projet.

III.4 Planification sur atoll :

Tout d'abord, nous allons sur le logiciel d'atoll, son interface de démarrage est illustrée dans l'image mentionnée :



Figure III.3: Interface de démarrage du logiciel Atoll

III.4.1 Environnement de travail d'Atoll :

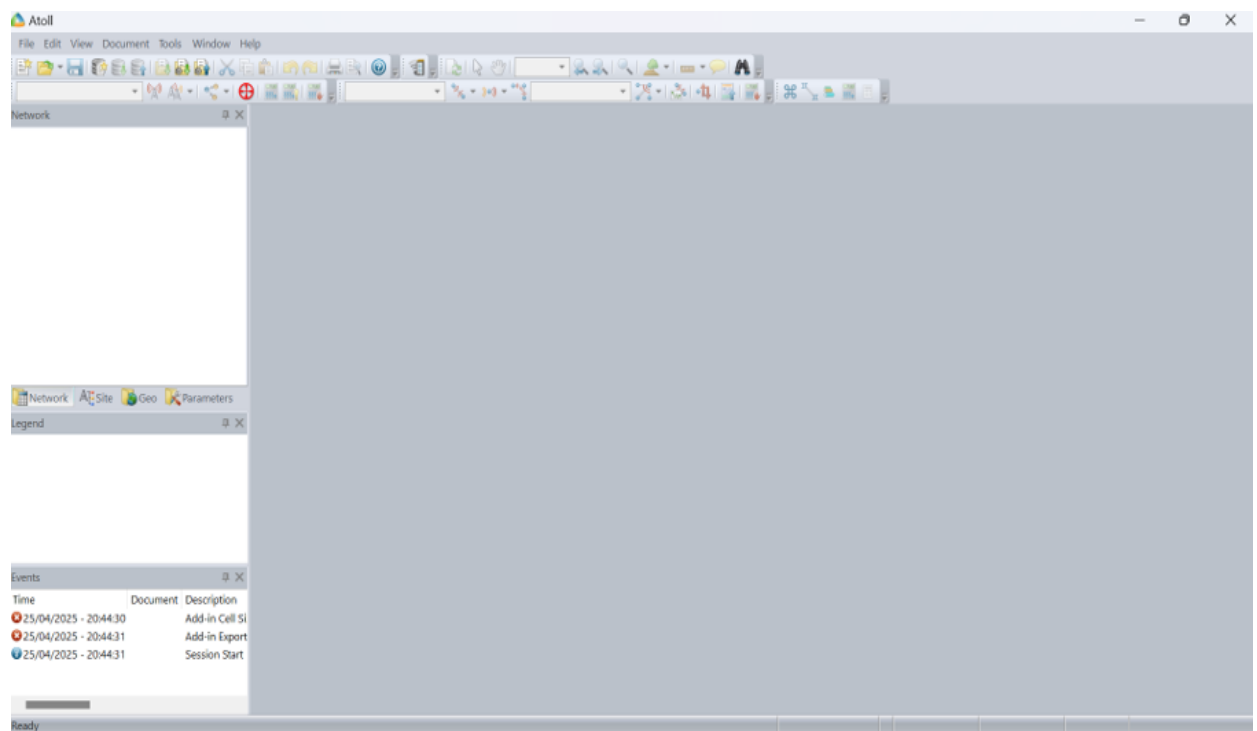


Figure III.4 : Environnement de travail d'Atoll

III.4.2 Création d'un projet 5G Multi Rat :

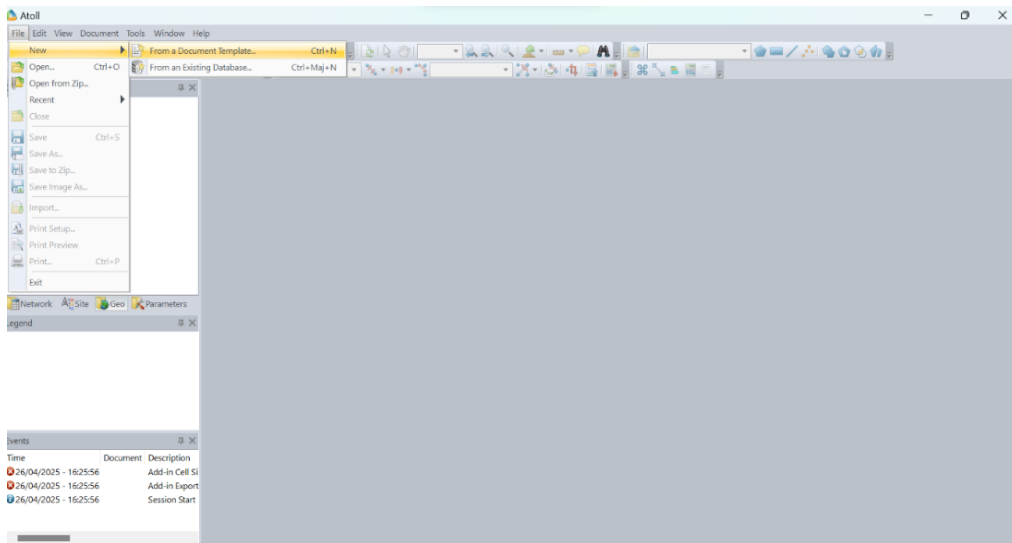


Figure III.5 : Création d'un nouveau projet

Atoll permet la gestion de diverses technologies d'accès radio **3GPP**, y compris la **5G, LTE, UMTS, GSM et CDMA**, entre autres. Ainsi, cette application est compatible avec plusieurs interfaces (**Figure III.6**). Il est nécessaire de sélectionner le modèle approprié pour les données à intégrer dans le logiciel **5G Multi Rat**, dans notre situation :

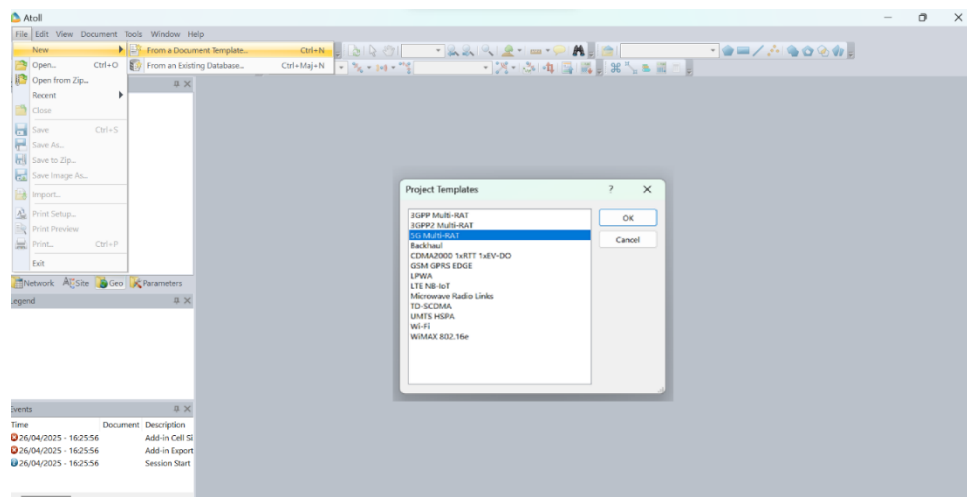


Figure III.6 : Choisir la technologie 5G Multi-Rat

III.4.3 Choisir le système de coordonnées :

Après avoir créé un nouveau projet, le système de coordonnées doit être configuré. Dans ce cas, nous avons choisi le système géographique standard international WGS 84. Il

s’agit de localiser un point sur la terre par la longitude et la latitude. Pour le réglage des paramètres on procède comme suite :

- Sélectionnez — Document — Propriétés

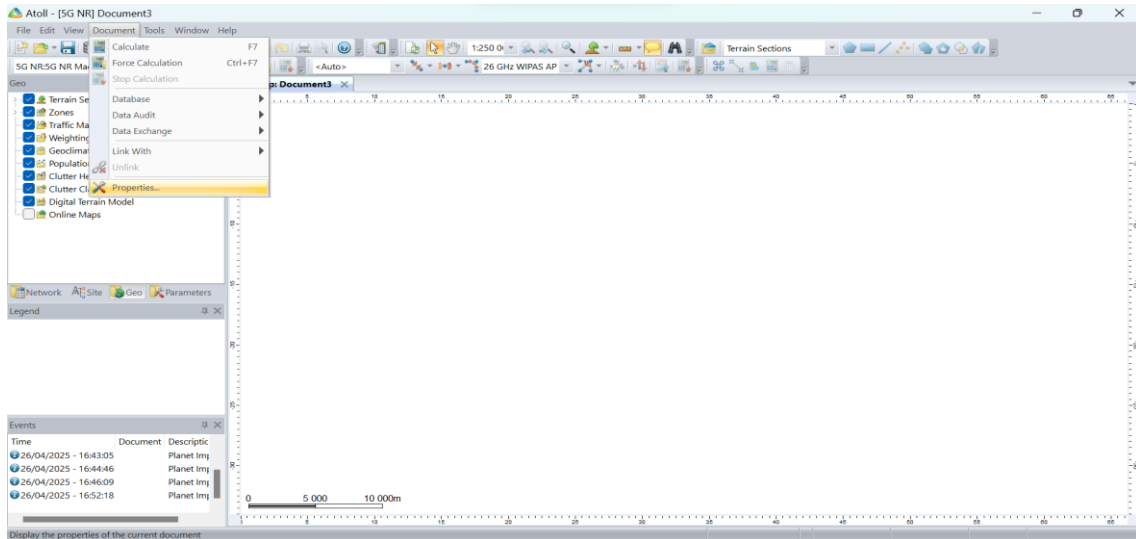


Figure III.7 : Choisir le système de coordonnées

III.4.4 Réglage des paramètres de la zone :

Les paramètres saisis sont :

- Projection : WGS 84 / UTM zone 31N.
- Display : WGS 84 (projection UTM sur le système géodésique WGS84).
- Degré format : xx xxxxxS (indique le format de latitude et de longitude des sites)

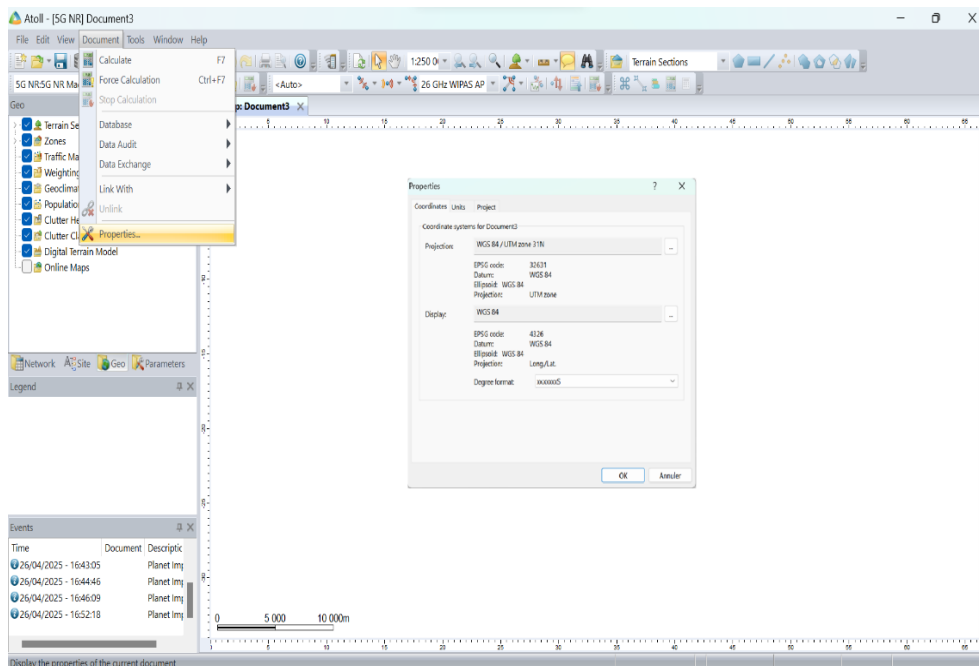


Figure III.8 : Projection et affichage

III.4.5 Importation de la carte :

La première étape primordiale lors de la mise en œuvre d'un réseau 5G consiste à obtenir une carte numérique précise de la zone visée. Dans notre situation nous allons importer la carte numérique de la ville d'Oran, qui est essentielle pour commencer la planification de la couverture et des performances du réseau 5G.

Clutter Classes : Ce sont des graphiques numériques qui illustrent l'usage du sol ou sa catégorisation, avec un indice désignant chaque classe (comme l'Océan, les régions métropolitaines, les forêts, etc.). Ces images peuvent être conçues en s'appuyant sur des données provenant des satellites, des images aériennes ou des cartes numérisées.

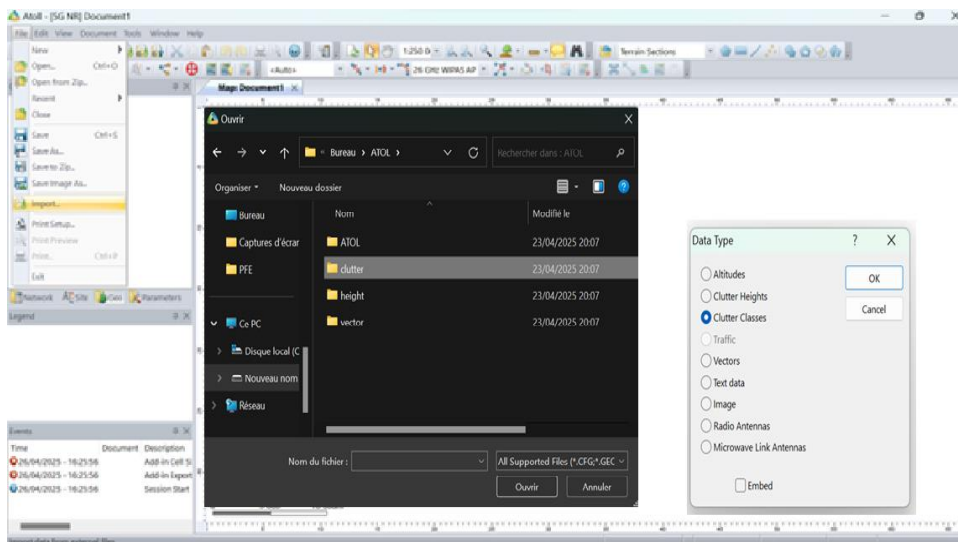


Figure III.9 : Importation de Clutter Classes

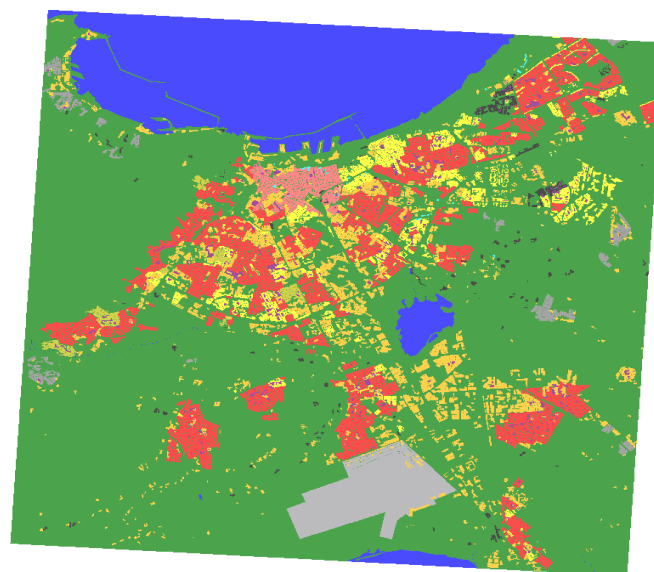


Figure III.10 : Après l'importation de Clutter Classes

Une figure est présentée ci-dessous, montrant les relations entre les codes et les appellations des diverses catégories d'encombrement :

	1 - OPEN
	10 - OPEN IN URBAN
	20 - AIRPORT
	2 - SEA
	3 - INLAND WATER
	11 - FOREST
	12 - PARK
	4 - MEAN INDIVIDUAL
	13 - DENSE INDIVIDUAL
	5 - MEAN COLLECTIVE
	6 - DENSE COLLECTIVE
	9 - INDUSTRIAL
	8 - VILLAGE
	7 - SKYCRAPERS
	14 - GROUP OF SKYCRAPERS
	16 - SCATTERED URBAN

Figure III.11 : Code couleurs des diverses catégories d'encombrement

Heights : Le fichier d'altitudes constitue un ensemble de données fournissant des informations sur l'altitude des terrains en comparaison au niveau de la mer. Ces données sont utilisées pour évaluer le niveau de signal dans une zone spécifique, en prenant également en compte la hauteur des bâtiments dans cette zone.

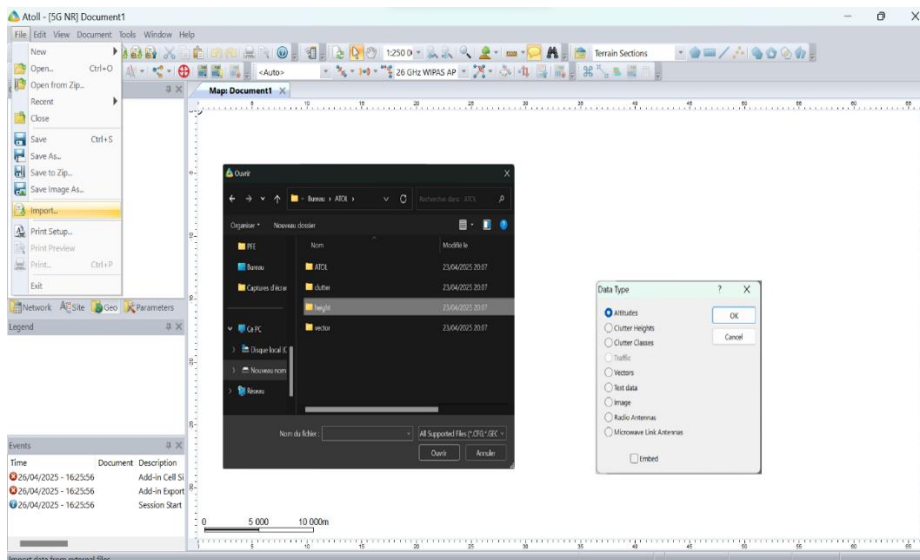


Figure III.12 : Importation du Clutter Heights

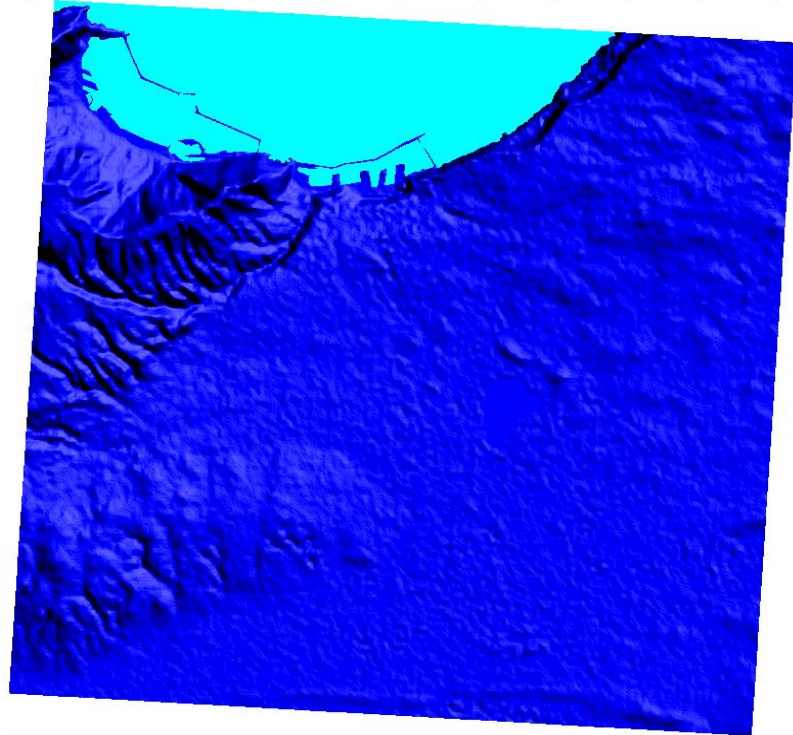


Figure III.13 : Après l'importation du Clutter Heights

Digital Terrain Model (DTM) : Cette illustration se réfère à la hauteur du terrain par rapport au niveau de la mer, une information intégrée automatiquement dans le modèle de diffusion pour les calculs. Dans le fichier concerné, chaque pixel contient des données sur l'altitude du terrain, réalisées sur une échelle allant de 0 à 1000 mètres.

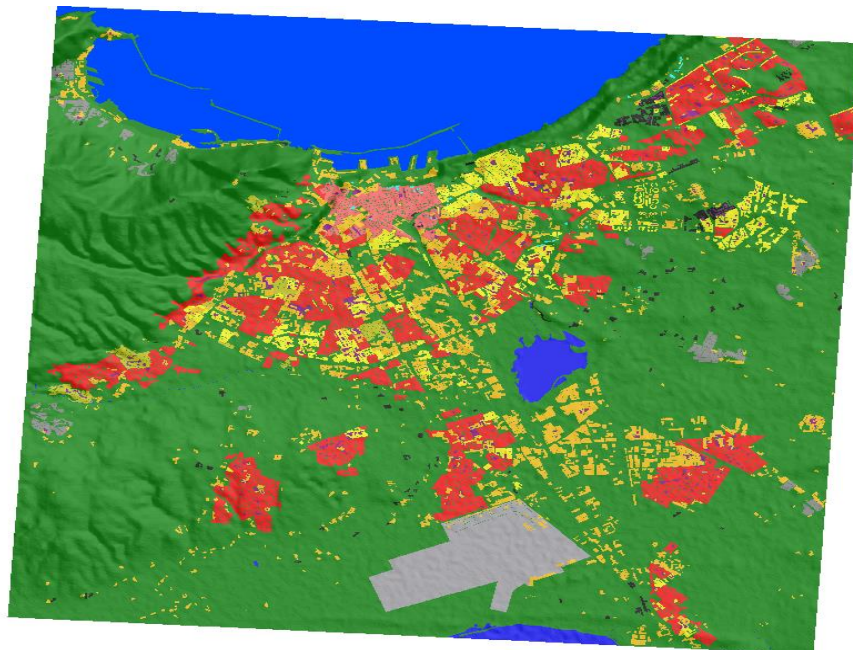


Figure III.14 : Digital Terrain Model (DTM) en présence du Clutter Classes

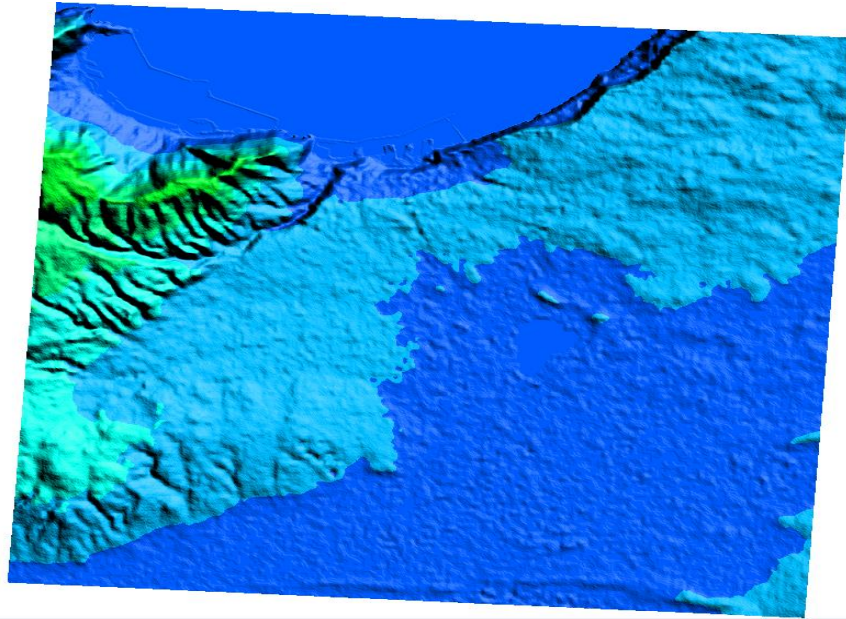


Figure III.15 : Digital Terrain Model (DTM) en absence du Clutter Classes

Vecteur : Le fichier contient des renseignements élaborés pour établir une cartographie des divers types des axes dans une région précise, y incluant les autoroutes et moindres routes, les infrastructures aéroports, les voies rapides et les lignes de chemin de fer.

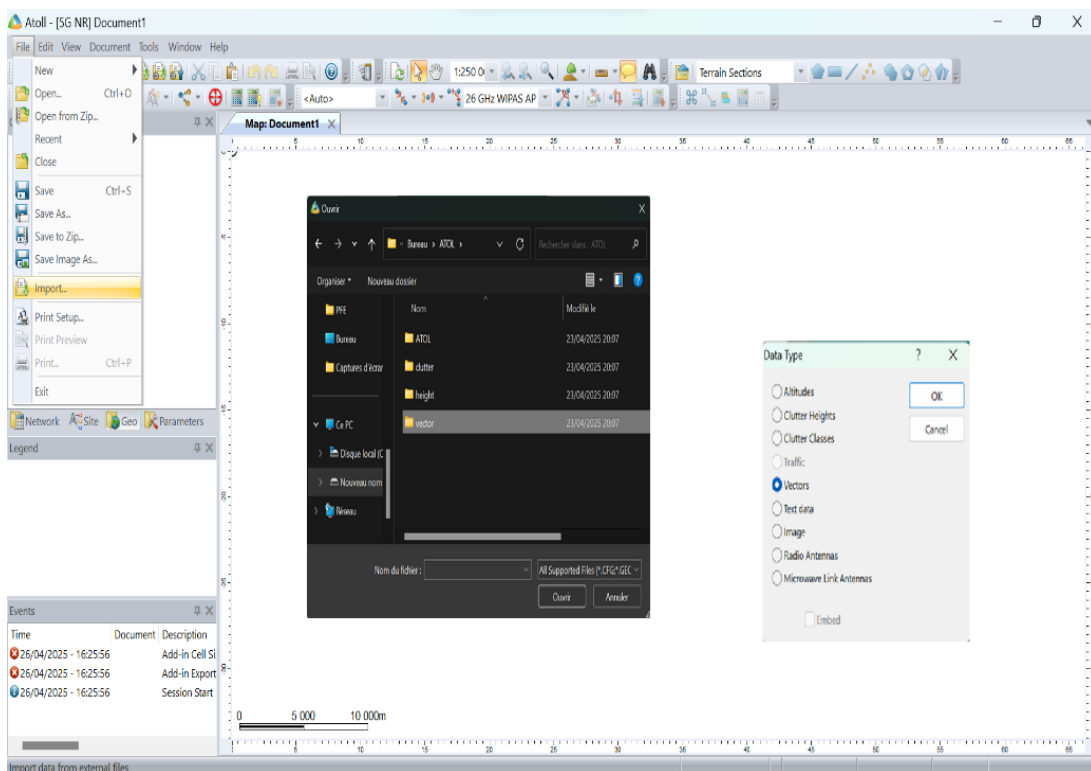


Figure III.16 : Importation de Vectors



Figure III.17 : Après l'importation de Vectors

III.4.6 Création d'un site :

Dans Atoll, le site est caractérisé comme un emplacement géographique. Lors de l'intégration d'un nouveau site, plusieurs critères doivent être précisés : sa localisation géographique (longitude et latitude), son altitude ainsi que la catégorie d'équipement employé. La définition des émetteurs intègre les caractéristiques radio, étant donné que les configurations des secteurs d'un site peuvent varier.

Dans le cadre de notre projet, nous avons conservé les sites des installations présentes tout en effectuant les modifications nécessaires. Des sites récents ont été créés et quelques anciens ont fait l'objet d'un repositionnement, étant donné que les infrastructures 5G se distinguent nettement des réseaux mobiles des générations précédentes. Effectivement, les stations 3G ou 4G en place ne peuvent pas transmettre les signaux 5G. Il est donc essentiel de mettre en place des émetteurs 5G sur ces infrastructures déjà existantes. Dans la fenêtre d'Atoll nommé network on clique sur fichier site après on clique sur la droite de la souris sur l'endroit où on veut implémenter les sites comme on peut le voir sur la **Figure III.18** :

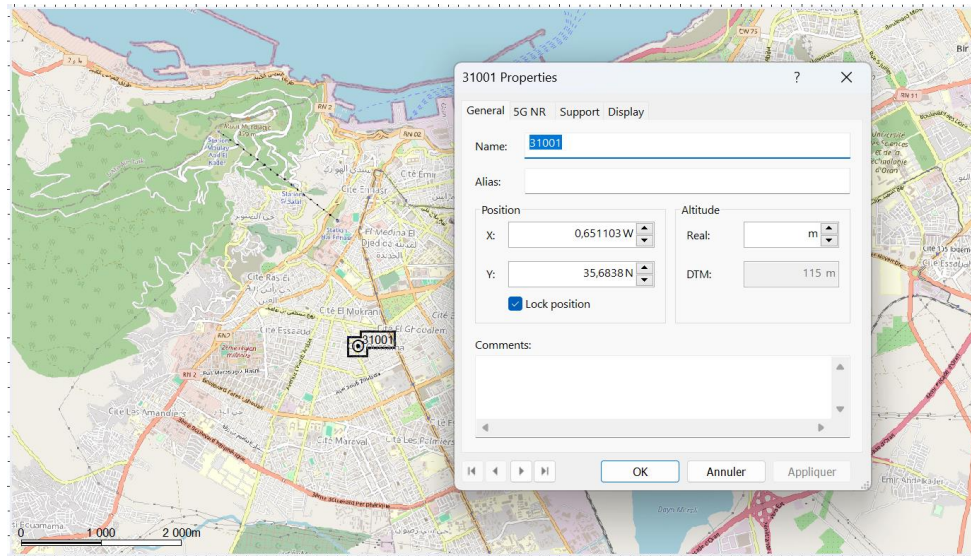


Figure III.18 : Propriétés des sites

Chaque site est caractérisé par ses propriétés (longitude, latitude, altitude...).

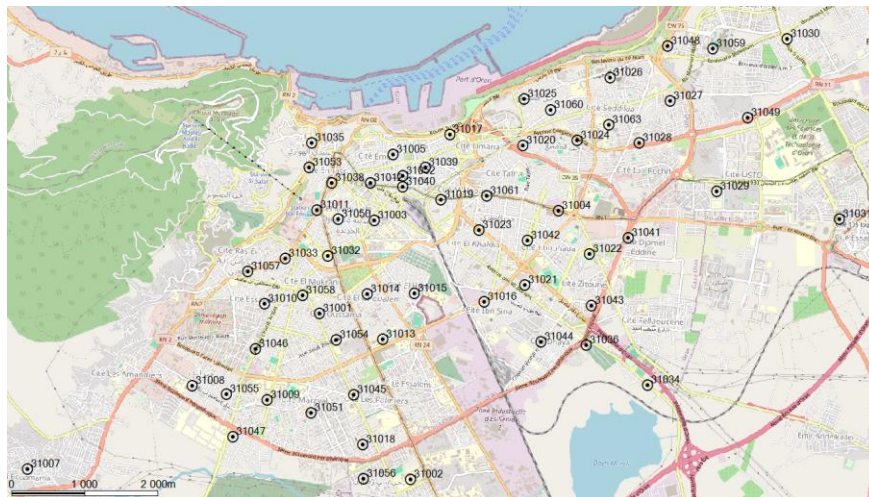


Figure III.19 : Cartographie des sites

Le défi majeur auquel sont confrontés les opérateurs est de garantir une couverture convenable dans les zones fortement peuplées. Pour atteindre nos objectifs comme indiqués, divers facteurs associés aux émetteurs seront pris en compte :

- **L'inclinaison (tilt) :** elle peut être de type électrique ou mécanique. Sa fonction est de régler l'inclinaison du lobe principal de l'émetteur en relation avec la verticale.
- **L'azimut :** il offre l'opportunité d'ajuster l'orientation de l'antenne sur un axe horizontal afin de mieux viser la région à couvrir.
- **L'altitude des émetteurs :** En modifiant cette dernière, on autorise l'onde à se diffuser au-delà des constructions, ce qui favorise d'éviter les réflexions provoquées par l'onde.

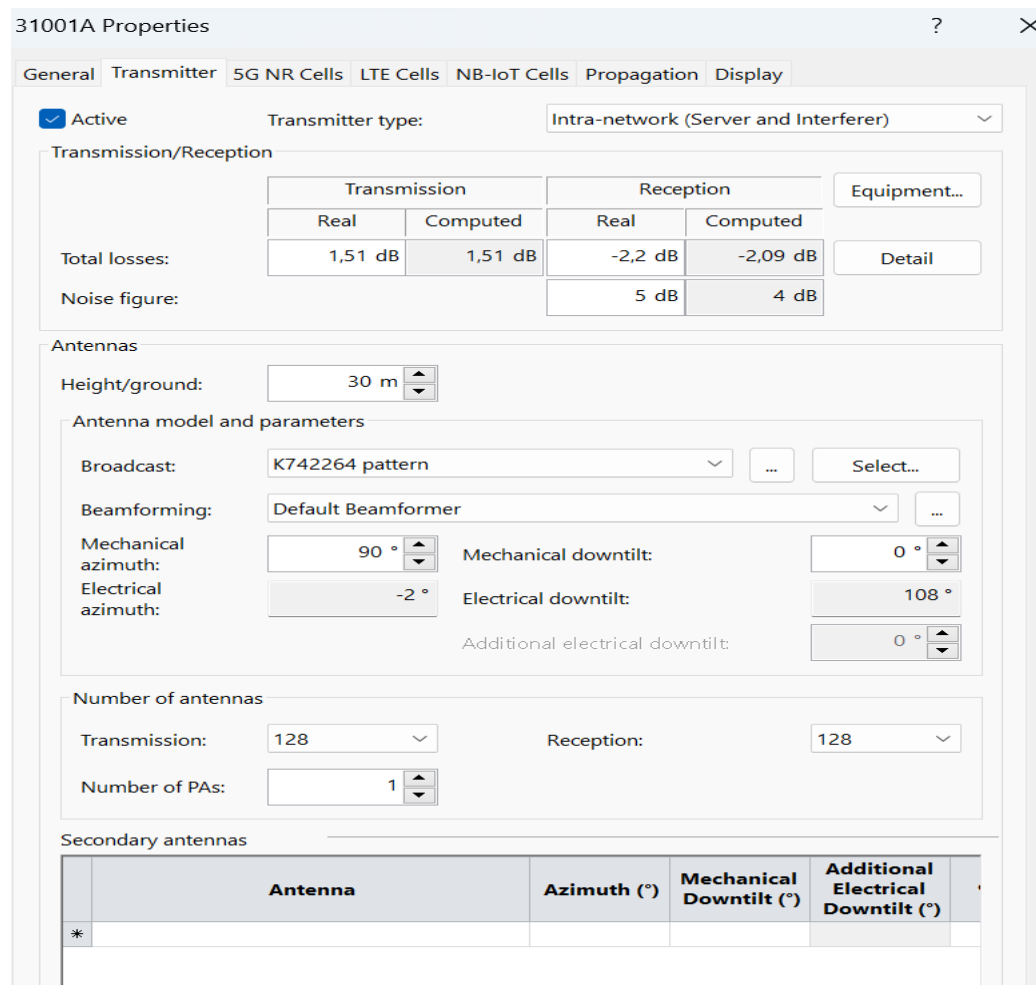


Figure III.20 : Création d'un émetteur et ses caractéristiques

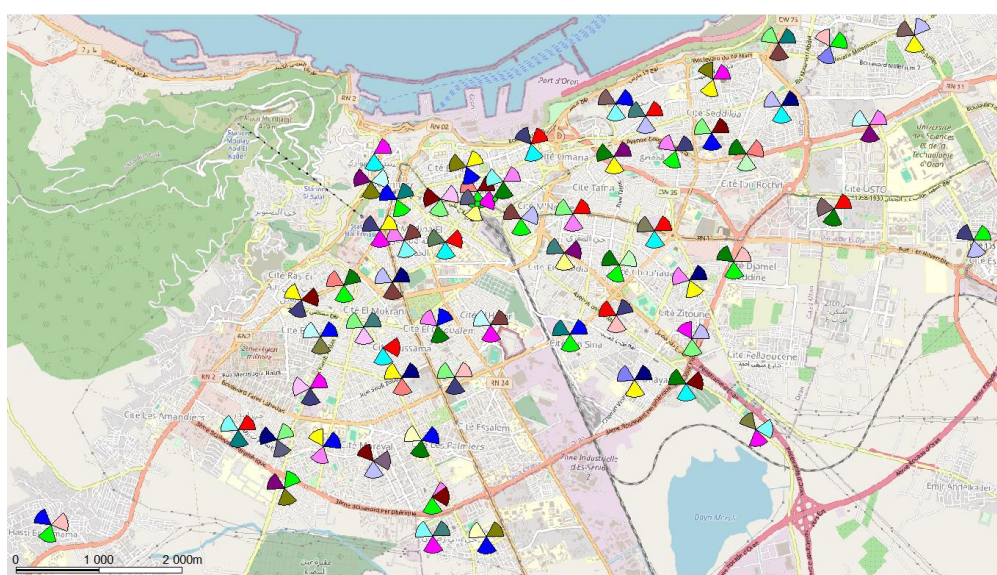


Figure III.21 : 5G NR 182 émetteurs

III.4.7 Mise en place d'une cellule :

Dans Atoll, chaque cellule est traitée comme une fréquence radio (RF) avec toutes ses propriétés sur un émetteur, comme illustré à la Figure III.22 :

	1	2	3
Name	31001B(0)	31001B(1)	31001B(2)
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ID			
Order	1	2	3
Carrier	50 MHz - NR-ARFCN 625000	50 MHz - NR-ARFCN 621667	50 MHz - NR-ARFCN 621667
Channel Allocation Status	Not Allocated	Not Allocated	Not Allocated
Physical Cell ID	0	0	0
Physical Cell ID Domain			
PSS ID	0	0	0
PSS ID Status	Not Allocated	Not Allocated	Not Allocated
SSS ID	0	0	0
SSS ID Status	Not Allocated	Not Allocated	Not Allocated
Reuse Distance (m)			
Max Power (dBm)	50	50	50
SSS EPRE (dBm)	15	15	15
PSS EPRE Offset / SSS (dB)	3	3	3
PBCH EPRE Offset / SSS (dB)	0	0	0
PDCCCH EPRE Offset / SSS (dB)	0	0	0
PDSCH EPRE Offset / SSS (dB)	0	0	0
Layer	Macro Layer	Macro Layer	Macro Layer
Cell Type	PCell	PCell	PCell
Min SS-RSRP (dBm)	-140	-140	-140
Cell Individual Offset (dB)	0	0	0
Cell Selection Threshold (dB)	0	0	0
Handover Margin (dB)	0	0	0
Cell Edge Margin (dB)			
SS/PBCH Numerology	0 (15 kHz)	0 (15 kHz)	0 (15 kHz)
SS/PBCH Periodicity	10 ms	10 ms	10 ms
SS/PBCH OFDM Symbols	{4,8,16,20}+28n [Lmax=4]	{4,8,16,20}+28n [Lmax=4]	{4,8,16,20}+28n [Lmax=4]
PDCCCH Overhead (OFDM Symbols)	1	1	1
Traffic Numerology	2 (60 kHz Normal CP)	2 (60 kHz Normal CP)	2 (60 kHz Normal CP)
TDD DL OFDM Symbols (%)	50	50	50
Radio Equipment	5G NR Radio Equipment	5G NR Radio Equipment	5G NR Radio Equipment
Scheduler	Proportional Fair	Proportional Fair	Proportional Fair
Diversity Support (DL)	Transmit Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO	Transmit Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO	Transmit Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO

Figure III.22 : Template de la station 5G NR

III.4.8 Paramètres de l'antenne :

On peut définir pour une antenne son gain, son diagramme de rayonnement (vertical et horizontal) et sa bande de fréquence de travail.

Les paramètres de l'antenne 65deg 18dBi 108Tilt 3500MHz :

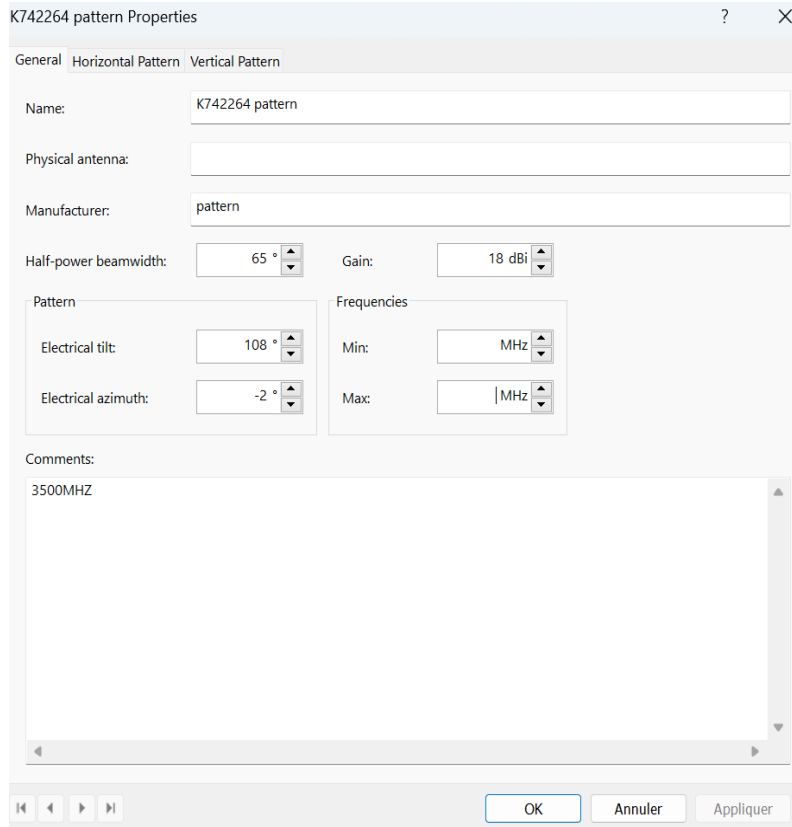


Figure III.23 : Paramètres d’antenne

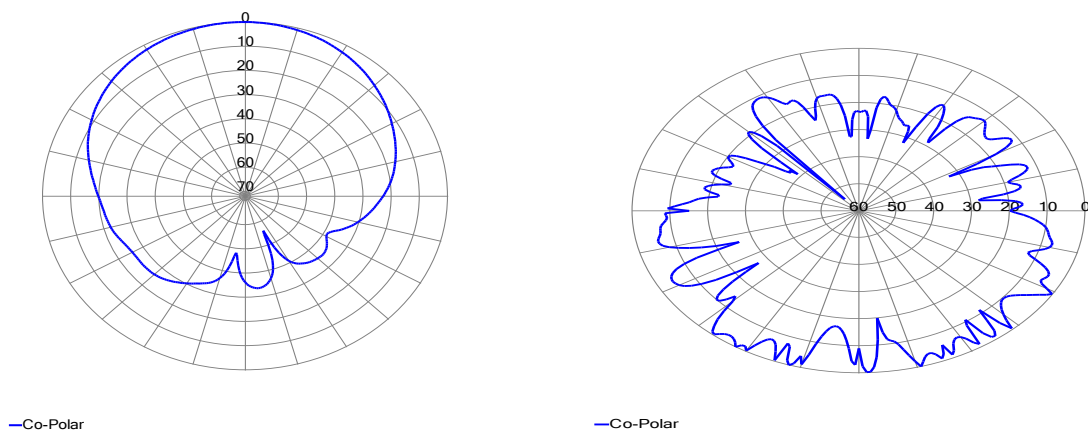


Figure III.24 : Polarisation d’antenne pattern horizontale et verticale

III.4.9 Paramètres de trafic :

Dans Atoll, les paramètres de circulation sont universels pour toutes les technologies d'accès sans fil, déterminant les services requis par les utilisateurs, leur déplacement, les appareils qu'ils emploient, le profil de l'utilisateur et l'environnement où ils se situent en fonction du nombre d'utilisateurs. Des services comme la téléphonie, l'internet, le haut débit, etc., sont accessibles aux abonnés d'Atoll. Néanmoins, le service haut débit était le

service utilisé pour les abonnés 5G NR, car les futurs réseaux 5G gèreront une quantité massive de données à large bande.

Figure III.25 : Caractéristiques du service haut débit

- **Type de mobilité** : détermine la vitesse moyenne de l'utilisateur afin de reproduire son comportement. Concernant la 5G NR, les informations sur la mobilité du récepteur sont cruciales pour déterminer le seuil de support à utiliser. Pour les utilisateurs 5G NR, le type de mobilité utilisé était celle du piéton, ce qui correspond à une vitesse de 3 km/h.
- **Type de terminale** : la terminale représente l'équipement de l'utilisateur utilisé dans le réseau, en l'occurrence le téléphone portable.

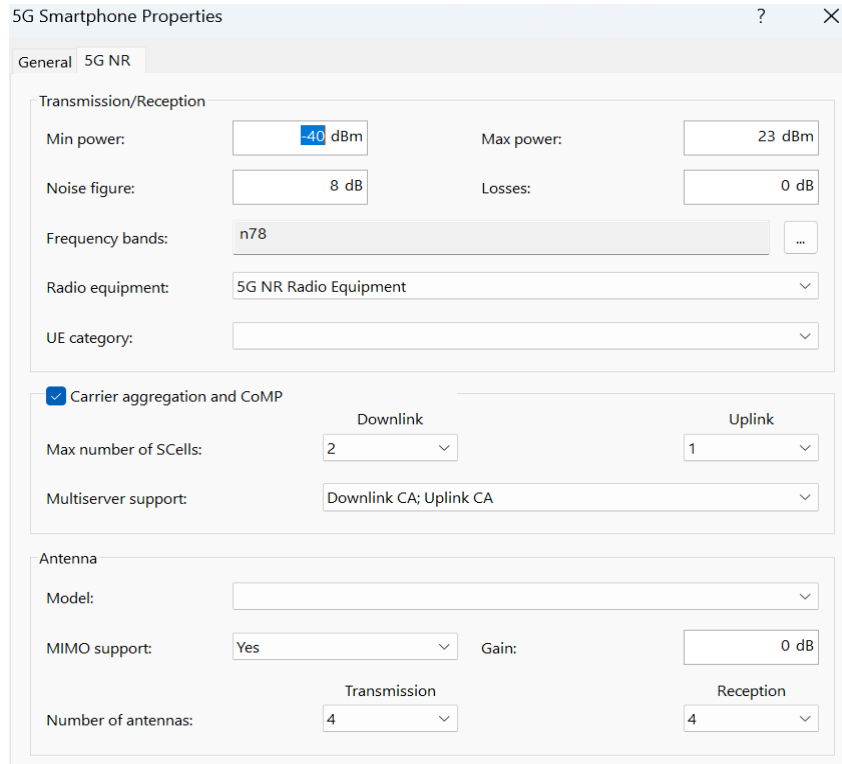


Figure III.26 : Caractéristiques de la terminale

Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
HAUT DEBIT	5G Smartphone	0,05	65	10 000	50 000
*					

Figure III.27 : Caractéristiques du profil utilisateur

➤ **Bande de fréquence 5G NR :**

La bande de fréquence de la 5G se caractérise par :

Bande	Mode duplex	Fréquence (GHz)	Liaison montante (GHz)	Liaison descendante (GHz)	Largeur de canal (MHz)
n 78	TDD	3,5	3,3-3,8	3,3-3,8	10, 20, 40, 50, 60, 80, 100

Tableau III.2 : Caractéristiques de la bande de fréquence

III.5 Prédiction :

Les prédictions offrent la possibilité d'examiner la performance de la couverture du réseau. On trouve différentes sortes de prédictions. Les zones de couverture sont déterminées pour un émetteur spécifique ou pour l'ensemble d'un réseau, en tant que totalité des points qui répondent à un ou plusieurs critères fixés par l'utilisateur. Dans notre cas nous allons étudier plusieurs types de prévisions.

III.5.1 Prédiction de couverture par niveau de signal :

Cette prédiction permet d'apprécier la puissance du signal capté par l'appareil mobile à chaque position dans la zone déterminée. Cette étude vise à repérer les possibles zones d'ombre et à tenter des corrigés en modifiant la disposition des sites et des émetteurs. Après avoir effectué cette prédiction, le résultat est présenté dans les figures ci-après :

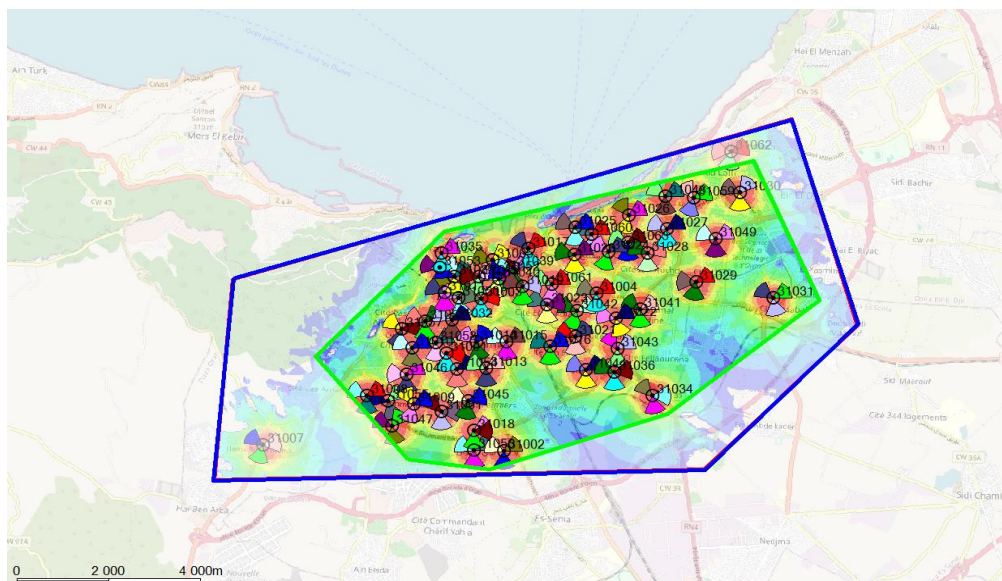


Figure III.28 : Prédiction de la couverture par niveau du signal

Comme le montre le plan précédent, les niveaux de signal sont élevés à proximité des emplacements, et ces valeurs tendent à décroître au fur et à mesure que l'on s'écarte des emplacements en raison de la dégradation. Cela peut être observé à travers les couleurs.

L'axe horizontal (x) représente le niveau du signal reçu (RSRP) en dBm, classé en intervalles de 5 dB.

L'axe vertical (y) représente la surface géographique couverte par chaque niveau de signal, en km².

Les couleurs vont du bleu foncé (très faible signal) au rouge (très bon signal).

Intervalle RSRP (dBm)	Couleur	Surface (km ²)	Interprétation
[-105, -100]	Bleu foncé	5.49	Très faible couverture – zones marginales, en limite de couverture.
[-100, -95]	Bleu clair	9.28	Faible signal – couverture très dégradée.
[-95, -90]	Cyan	8.93	Signal encore faible – utilisable difficilement.
[-90, -85]	Vert pâle	8.43	Couverture moyenne – possible en extérieur.
[-85, -80]	Vert clair	8.31	Niveau acceptable – couverture de base.
[-80, -75]	Jaune-vert	8.21	Bonne couverture.
[-75, -70]	Orange	7.75	Bonne à très bonne couverture.
[-70, -65]	Rouge vif	15.94	Très bonne couverture – signal optimal.

Tableau III.3 : Les différents Intervalles RSRP (dBm)

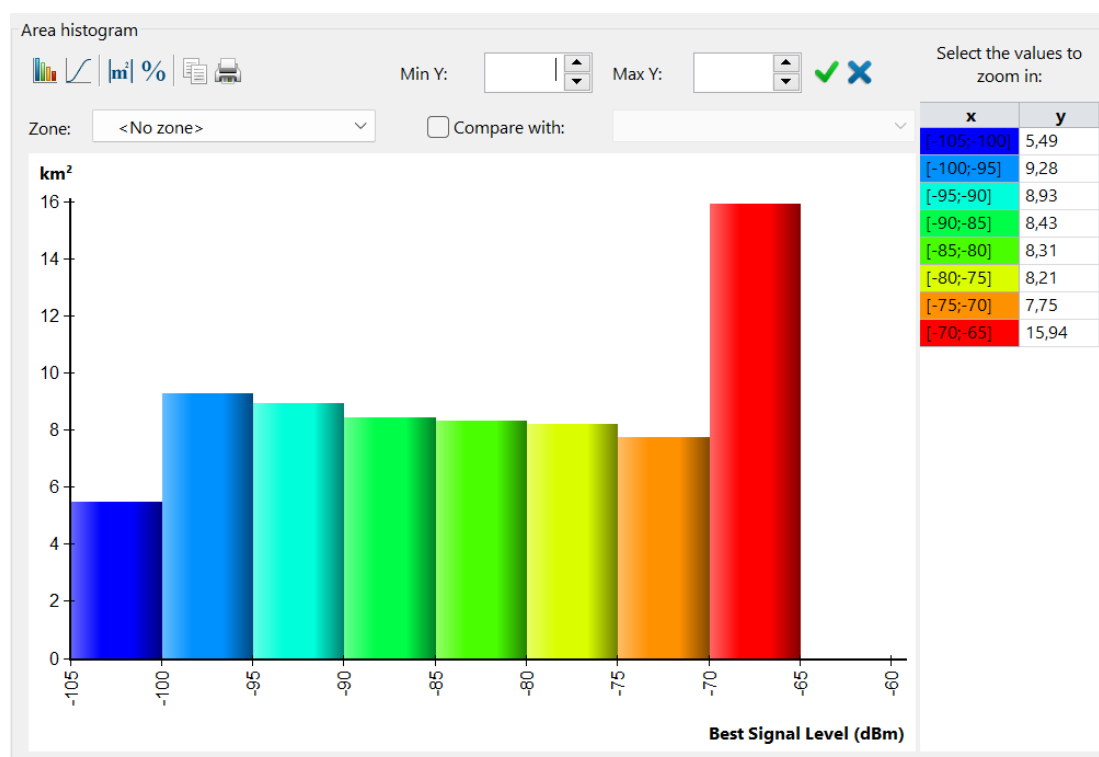


Figure III.29 : Histogramme de la couverture par niveau de signal

Interprétation technique :**1. Excellente couverture (RSRP > -75 dBm) :**

- Environ **23.7 km²** (orange + rouge) bénéficient d'une très bonne réception du signal **5G**.
- Cela représente une zone idéale pour les services eMBB (ex : streaming HD, cloud gaming).

2. Zone acceptable (entre -85 et -75 dBm) :

- Près de **16.5 km²** affichent une couverture moyenne à bonne, convenable pour la plupart des usages classiques.

3. Zones critiques (< -95 dBm) :

- Plus de **14.7 km²** ont un signal faible à très faible (bleu foncé + bleu clair).
- Ces zones peuvent souffrir de coupures, débits faibles ou impossibilité de connexion en intérieur.

Spécificité du milieu urbain :

Les variations sont typiques d'un environnement urbain dense :

- Obstacles comme les bâtiments élevés → affaiblissement ou blocage du signal.
- Multipath et atténuation dus aux matériaux (béton, verre, etc.).
- Besoin de petites cellules ou beamforming pour améliorer la couverture dans les poches d'ombre.

Le réseau planifié offre une bonne performance globale, avec plus de 40 % de la zone couverte en signal fort. Toutefois, la présence notable de zones faiblement couvertes justifie des ajustements :

Renforcement du réseau dans les zones bleu/bleu clair par :

- Ajout de sites secondaires (micro-cellules).
- Utilisation de techniques de beamforming adaptatif.

III.5.2 Prédiction de couverture par émetteur :

L'image suivante représente une carte de la zone urbaine simulée, sur laquelle sont affichées les zones de couverture associées à chaque émetteur (**gNB**) du réseau 5G. Chaque site est représenté par un symbole d'antenne avec trois secteurs colorés, indiquant l'usage d'une antenne tris sectorielle, une configuration classique pour les réseaux cellulaires.

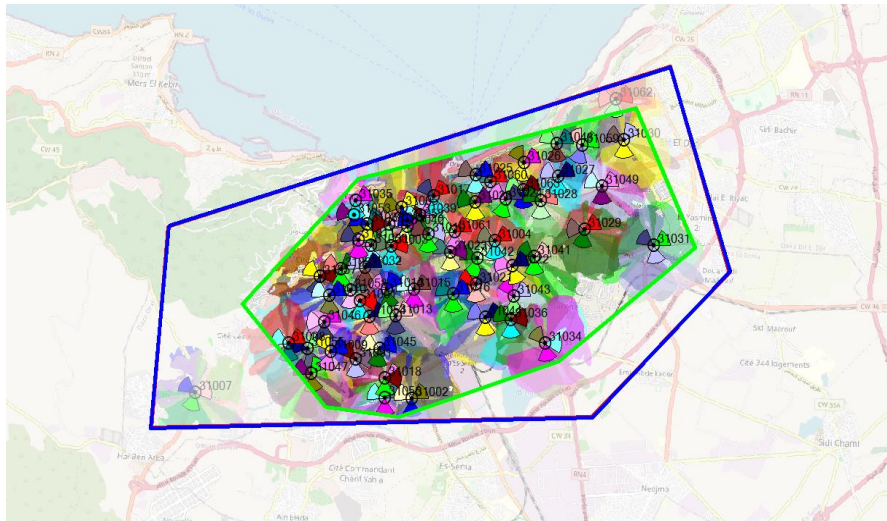


Figure III.30 : Prédiction de couverture par émetteur

Principaux éléments à observer :

1. Densité des sites :

- La carte montre une grande concentration de sites dans le centre de la zone, suggérant une forte densité de population ou de trafic à couvrir.
- La périphérie est moins densément équipée, ce qui est logique si la zone urbaine centrale est prioritaire pour les services à haut débit (eMBB).

2. Couverture par cellule :

- Chaque cellule est représentée par une zone colorée distincte, ce qui permet d'évaluer la répartition spatiale des secteurs.
- On remarque un chevauchement contrôlé entre cellules voisines : cela permet d'assurer la continuité de service et le handover fluide entre cellules.

3. Structure des émetteurs :

- Chaque site est composé de trois secteurs (**120° chacun**), ce qui permet une couverture directionnelle optimisée avec une bonne portée et moins d'interférences intra-site.
- Les secteurs sont orientés de manière à maximiser la couverture et réduire les zones d'ombre.

4. Contours polygonaux :

- Le périmètre vert représente probablement la zone principale d'analyse ou de planification, tandis que le périmètre bleu englobe l'aire totale du projet.
- Cela permet de limiter la simulation aux zones prioritaires et d'identifier rapidement les sites en dehors du noyau central.

Interprétation technique :

Cette carte de prédiction par émetteur est essentielle pour :

- Évaluer la couverture individuelle de chaque cellule.
- Identifier les cellules surchargées ou mal orientées.
- Préparer les actions d'optimisation, comme le réglage d'azimuts, le tilt des antennes, ou l'ajout de petites cellules.

La carte de prédiction de couverture par émetteur montre que chaque site 5G NR est constitué de trois secteurs, couvrant ensemble des zones distinctes avec un chevauchement modéré. Cette configuration assure une couverture homogène sur la zone urbaine ciblée, en tenant compte de la densité d'utilisateurs et des contraintes topographiques. Cette visualisation permet également d'identifier les secteurs mal couverts ou les zones à forte interférence, ce qui facilite la phase d'optimisation radio en ajustant les paramètres des antennes ou en ajoutant des cellules supplémentaires.

III.5.3 Prédiction de la couverture de la liaison descendante :

La prédiction de la couverture en liaison descendante présentée ci-dessous met en évidence la répartition du niveau de signal reçu SS-RSRP, du niveau PDSCH, du rapport $C/(I+N+R)$, ainsi que les performances de modulation et de débit obtenus. La simulation

montre une excellente couverture dans la zone centrale grâce à la densité élevée des sites et au bon alignement des antennes, permettant d'atteindre des niveaux de signal et de débit élevés. En revanche, les zones périphériques montrent une dégradation progressive du signal, nécessitant des ajustements ou le renforcement de la couverture. Cette analyse est essentielle pour identifier les zones à faible performance et planifier des actions d'optimisation adaptées.

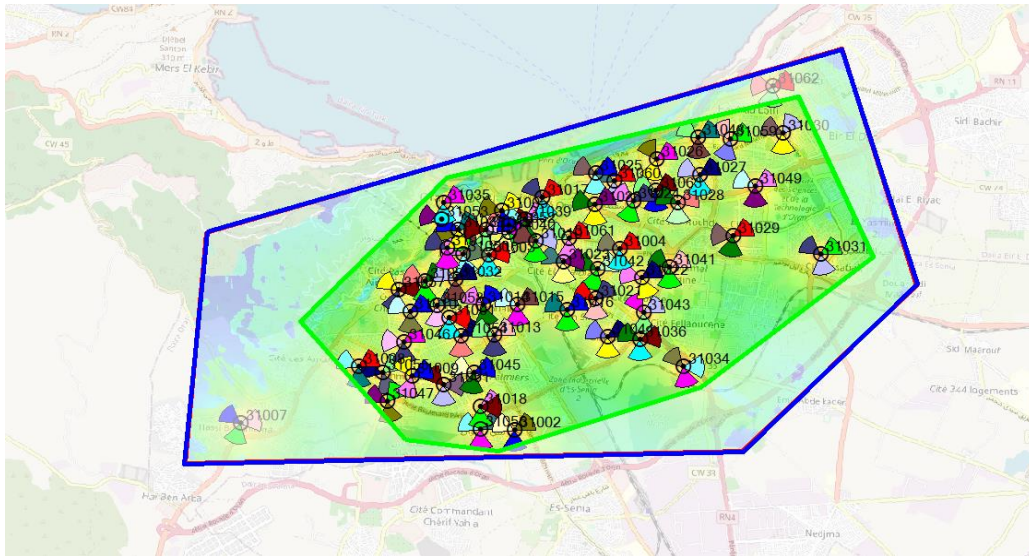


Figure III.31 : Prédiction de couverture de la liaison descendante

L'histogramme SS-RSRP ci-dessous illustre la distribution du signal reçu dans la zone étudiée. La majorité des surfaces couvertes se situent entre -85 dBm et -75 dBm, indiquant une excellente couverture radio adaptée aux usages 5G NR comme l'eMBB. Toutefois, une proportion non négligeable de la zone présente des niveaux inférieurs à -105 dBm, représentant des zones de couverture faible ou dégradée, notamment en bordure de cellule ou dans des zones masquées. Ces résultats soulignent l'intérêt de renforcer localement la couverture par l'ajout des petites cellules ou par des ajustements des paramètres radio pour améliorer la qualité de service globale.

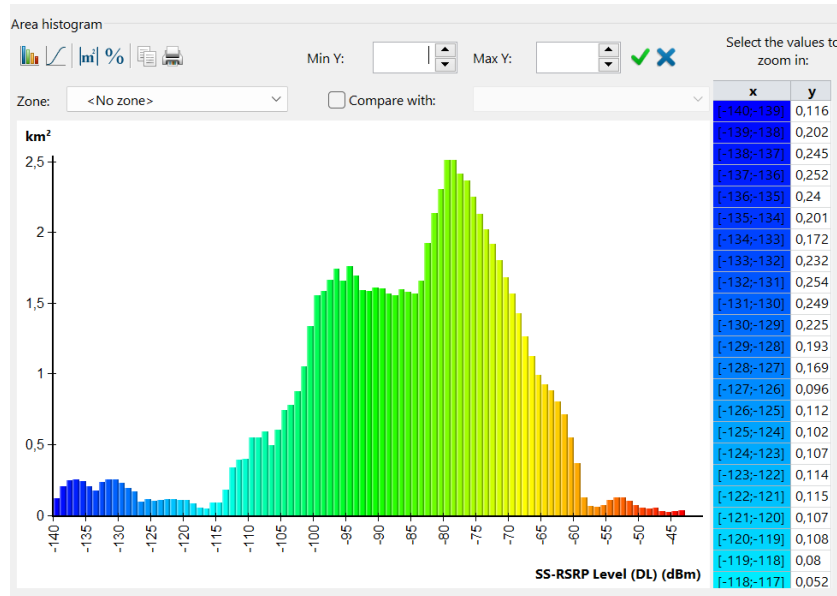


Figure III.32 : Histogramme de couverture de la liaison descendante

Analyse de l'histogramme SS-RSRP (DL) :

- ❖ Axe horizontal (x) : Représente le niveau du signal SS-RSRP (Secondary Synchronisation Signal – Reference Signal Received Power) en dBm, un indicateur clé de la puissance de signal reçue.
- ❖ Axe vertical (y) : Indique la surface (en km²) couverte par chaque intervalle de niveau de signal.

Observations clés :

1. Pointe maximale entre -85 dBm et -75 dBm :

- Ces niveaux correspondent à une couverture excellente pour la 5G NR.
- La zone autour de **-80 dBm** est la plus étendue, atteignant environ **2,5 km²** cela montre que le cœur du réseau est bien desservi.

2. Signal moyen à faible entre -100 dBm et -85 dBm :

- On retrouve encore une grande partie du territoire dans cette plage (signal acceptable à bon).
- Utilisable pour des services classiques, mais potentiellement limité pour les services à très haut débit ou en intérieur.

3. Signal faible à très faible (≤ -105 dBm) :

- Une partie significative de la zone présente des niveaux de signal **inférieurs à -110 dBm**, avec des pics entre **-135 et -130 dBm**.
- Ces zones correspondent à une couverture dégradée (zones d'ombre, bords de cellules, obstacles).

4. Peu de zones à très haut niveau de signal (> -65 dBm) :

- Les valeurs en rouge/orange (autour de -55 dBm à -45 dBm) sont très peu représentées cela indique que peu d'endroits reçoivent un signal extrêmement fort.
- Ces zones sont généralement proches des antennes avec faisceaux bien orientés.

Interprétation technique :

- ❖ Le réseau planifié est globalement bien dimensionné, avec une forte concentration dans la plage optimale (**-85 dBm à -75 dBm**).
- ❖ Les zones en bleu foncé (à gauche du graphe) nécessitent une optimisation :
 - Ajout des sites ou des petites cellules.
 - Optimisation du beamforming.

III.5.4 Prédiction de la capacité de la liaison descendante :

La prédiction de la capacité de la liaison descendante montre une répartition hétérogène du débit sur la zone étudiée. Le centre urbain, dense en cellules, présente une excellente capacité descendante, favorable aux services à haut débit de la 5G NR. En revanche, les zones périphériques, principalement à l'ouest et au sud, souffrent d'une baisse significative de capacité, due à une combinaison de couverture dégradée, d'interférences et de distance aux sites. Ces résultats soulignent la nécessité de renforcer localement le réseau par l'ajout des petites cellules, l'optimisation des faisceaux, ou encore le déploiement des solutions comme la coordination inter-cellulaire (ICIC/CoMP) pour améliorer l'expérience utilisateur.

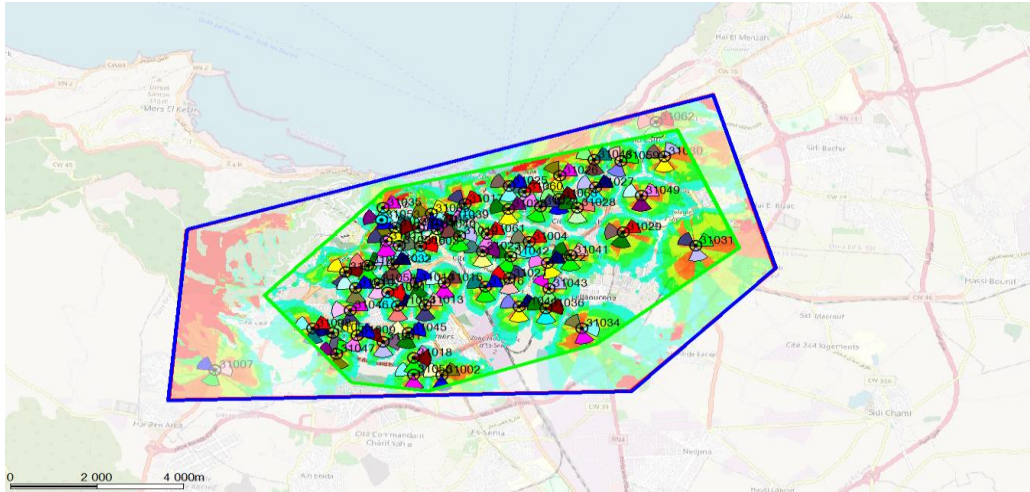


Figure III.33 : Prédiction de capacité de la liaison descendante

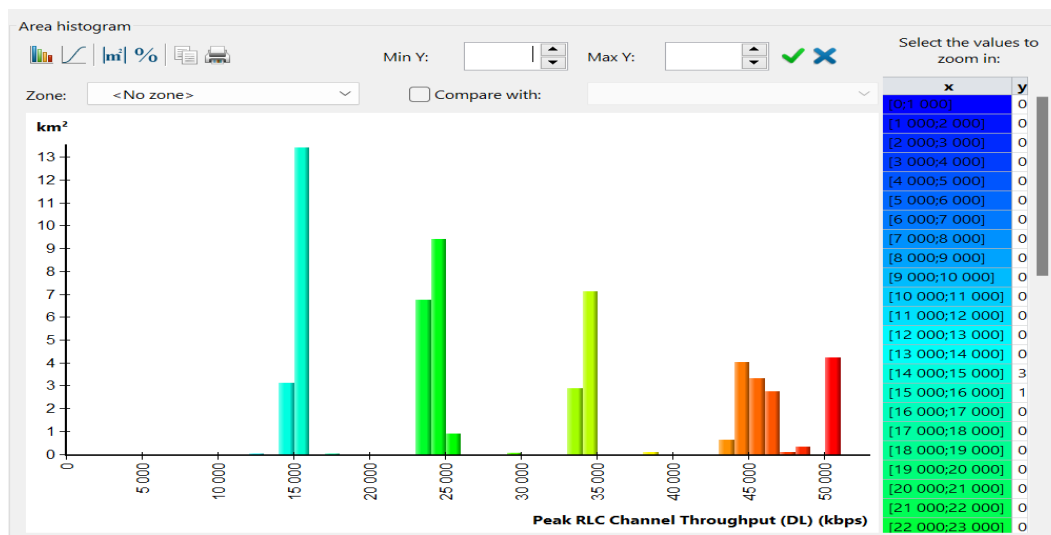


Figure III.34 : Histogramme de capacité de la liaison descendante

Analyse de l’histogramme :

- ❖ **Axe horizontal (x) :** Débit maximal observé (Peak RLC Channel Throughput – DL), en kbps.
- ❖ **Axe vertical (y) :** Surface en km² couverte correspondante à chaque plage de débit.
- ❖ Les couleurs vont du bleu clair (débit faible) au rouge (débit élevé).

Observations clés :

1. Débit dominant autour de 15 000 kbps (15 Mbps) :

- Plus de **13 km²** affichent un débit de l’ordre de **15 Mbps**, ce qui constitue la valeur prédominante dans la zone simulée.

- Ces zones bénéficient de conditions radio modérées : couverture suffisante, mais probablement sans modulation maximale.
2. **Zones avec 25 000 à 35 000 kbps :**
- Représentent ensemble environ **17 km²**, indiquant une bonne qualité de signal et une utilisation efficace des ressources radio.
 - Zones probablement proches des **gNBs** ou bien orientées (bonne géométrie de cellule).
3. **Très haut débit (45 000–50 000 kbps) :**
- Une petite portion (environ **4 à 5 km²**) atteint des débits proches du maximum simulé (**50 Mbps**).
 - Ces zones sont situées au cœur des cellules, avec un RSRP élevé, peu d'interférences et modulation **256-QAM** activée.
4. **Absence de débit très faible (< 10 000 kbps) :**
- Aucun point n'est affiché dans les premières barres (0–10 000 kbps), ce qui indique une qualité globale correcte du réseau planifié.
 - Cela valide un design radio bien optimisé : pas de zones mortes ou en saturation critique.

L'histogramme du débit crête RLC en liaison descendante montre que la majorité de la zone étudiée offre des débits compris entre **15 Mbps et 35 Mbps**, ce qui correspond à une bonne performance réseau. Une part significative de la surface atteint même des valeurs proches de **50 Mbps**, principalement dans les zones centrales, bénéficiant d'un signal fort, d'une faible interférence et de modulations d'ordre élevé. L'absence des surfaces avec un débit inférieur à **10 Mbps** confirme que la planification actuelle du réseau **5G NR** permet de répondre efficacement aux besoins en bande passante des utilisateurs, notamment pour les services eMBB. Toutefois, une optimisation ciblée pourrait encore augmenter la part de la zone à haut débit, notamment en périphérie.

III.5.5 Prédiction de la capacité de la liaison montante :

La figure ci-dessous représente la répartition de la capacité de la liaison montante (uplink) dans le réseau **5G NR** planifié sur la zone urbaine étudiée. Cette capacité,

exprimée en débit maximal théorique, dépend fortement des conditions radio entre l'équipement utilisateur (UE) et la station de base (gNB), ainsi que des ressources attribuées.

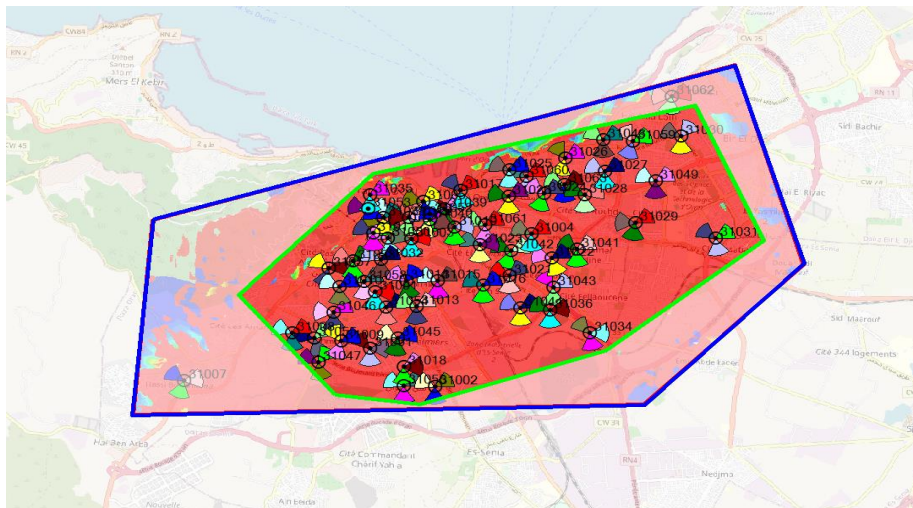


Figure III.35 : Prédiction de la capacité de la liaison montante

L'histogramme ci-dessous représente la répartition du débit alloué en liaison montante (UL) selon la bande passante RLC, en kilobits par seconde (kbps), sur l'ensemble de la zone simulée. L'analyse de la distribution met en évidence un pic massif et unique autour de **50 000 kbps**, qui couvre à lui seul plus de **70 km²**. Cette valeur représente la capacité maximale simulée pour la liaison montante, suggérant que la quasi-totalité des cellules ont été en mesure d'attribuer un débit RLC élevé aux utilisateurs.

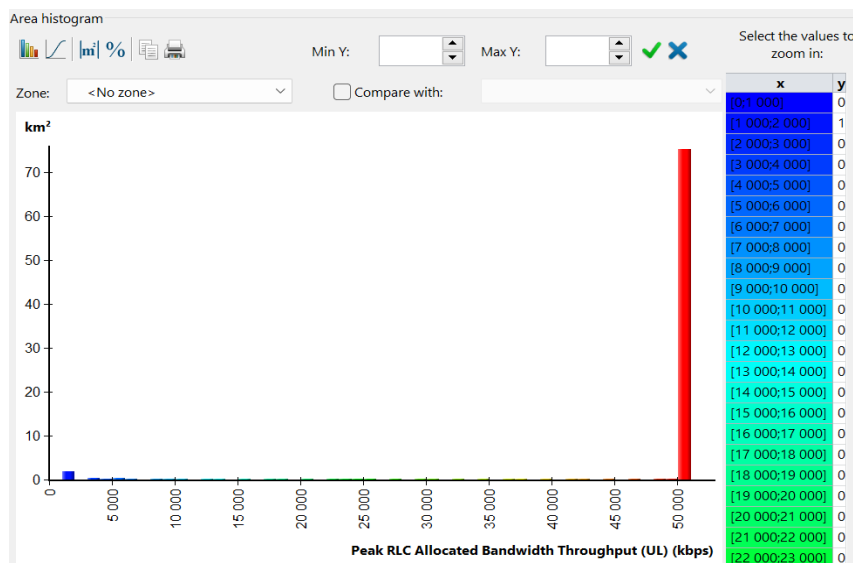


Figure III.36 : Histogramme de capacité de la liaison montante

L'axe des X montre le débit montant maximal attribué en couche RLC (Radio Link Control), mesuré en kbps. Plus la valeur est grande, plus le débit montant possible est élevé.

L'axe des Y montre la surface en km². Cela indique combien de km² sont concernés par un certain niveau de débit up Link.

Intervalle de débit UL (kbps)	Surface (km ²)	Interprétation
[50 000–51 000]	~73 km ²	Valeur dominante (bande rouge) – débit alloué maximal
[2 000–3 000]	~1 km ²	Faible allocation – zones très localisées
Autres intervalles (0–49 999)	~0 km ²	Négligeable, quasi absents

Tableau III.4 : Les différents intervalles du débit UL

Analyse technique :

1. Dominance de l'intervalle [50 000–51 000 kbps]

- ❖ Plus de 95 % de la zone a reçu une allocation maximale théorique de 50 Mbps.
- ❖ Cela reflète une planification très optimiste, souvent observée :
 - En conditions idéales (peu d'utilisateurs actifs simultanément).
 - Ou dans des scénarios de test sans contrainte de congestion.
- ❖ Cela montre que le plan de ressource UL permettrait, théoriquement, un excellent service.

2. Présence marginale de classes basses

- ❖ Seule une très faible surface reçoit une allocation entre 2 000 et 3 000 kbps.
- ❖ Cela peut représenter :
 - Des zones périphériques.
 - Des obstacles (bâtiments élevés).
 - Ou une interférence UL plus élevée, réduisant l'efficacité.

3. Limites de cette simulation

- ❖ Il s'agit d'un débit "attribué" et non observé, donc :
 - Il ne prend pas en compte les pertes, la congestion, ou le bruit.
 - Il suppose que toutes les ressources radio sont disponibles.

III.5.6 Prédiction de la qualité de la liaison montante :

La figure ci-après représente la qualité de la liaison montante, exprimée par le rapport signal sur interférence, bruit et perturbations :

$C / (I + N)$, mesuré au niveau des canaux PUSCH (Physical Up Link Shared Channel) et PUCCH (Physical Up Link Control Channel).

C = puissance du signal utile.

I = interférences.

N = bruit.

Ce paramètre est fondamental pour évaluer l'efficacité du lien de transmission UL et déterminer la capacité du terminal à transmettre des données de manière fiable.

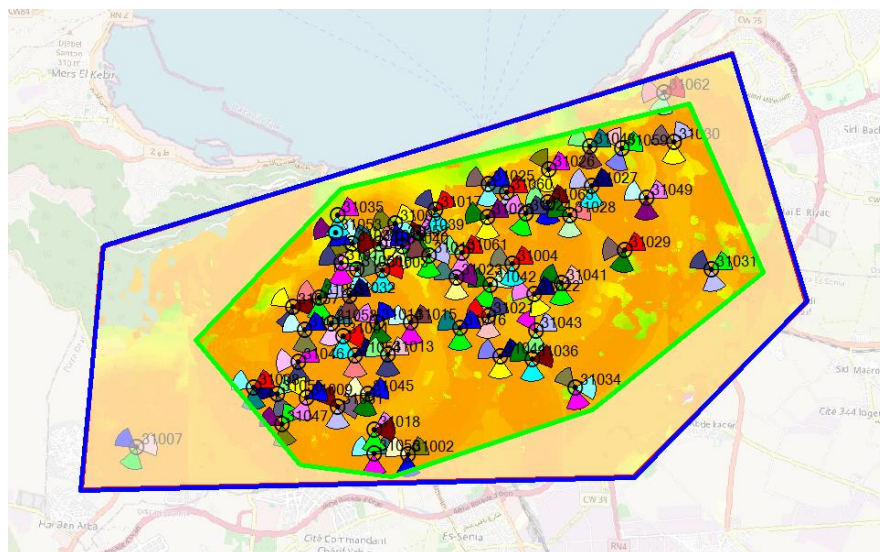


Figure III.37 : Prédiction de la qualité de la liaison montante

Analyse de la carte de couverture :

- ❖ La carte montre une répartition colorée (majoritairement **orange**, avec du **jaune** et quelques zones **vertes**).

- ❖ Cette couleur indique une qualité de signal montante homogène, avec des niveaux de $C/(I+N)$ élevés dans presque toute la zone.
- ❖ Les quelques variations périphériques en jaune clair ou vert pâle correspondent à :
 - Des zones en bordure de cellule.
 - Une distance accrue entre UE et gNB.
 - Des obstacles physiques (zones semi-urbaines ou reliefs).

Analyse de l’histogramme :

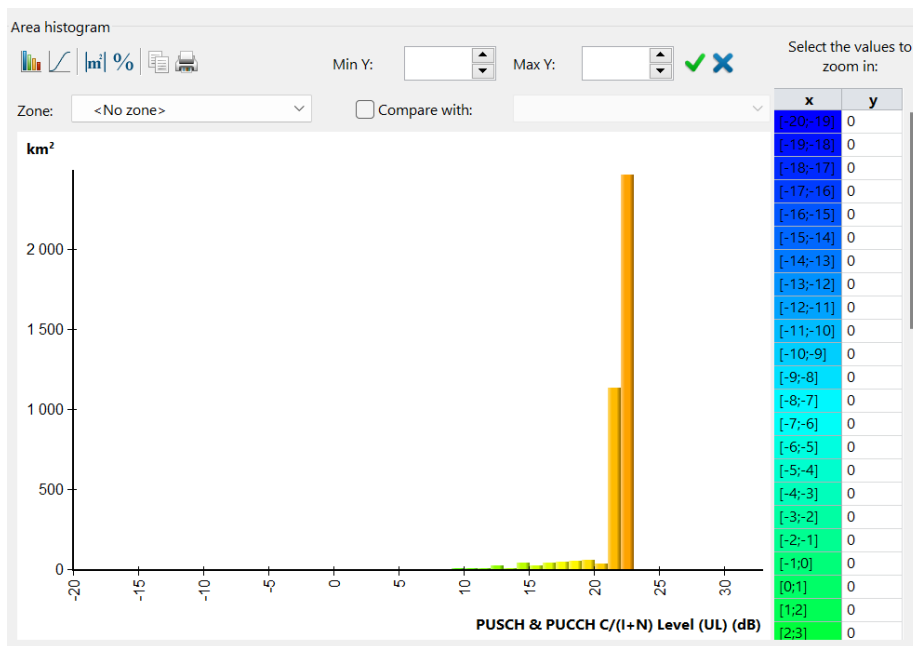


Figure III.38 : Histogramme de la qualité de la liaison montante

Intervale $C/(I+N)$ (dB)	Surface (km ²)	Interprétation
[20 – 21]	~2300 km ²	Valeur dominante – Très bonne qualité UL
[19 – 20]	~1000 km ²	Bonne qualité UL
[15 – 18]	Faible portion	Qualité acceptable
< 10 dB	≈ 0	Aucune zone en mauvaise qualité

Tableau III.5 : Les différents intervalles du $C/(I+N)$

Plus de 90 % de la zone affiche un $C/(I+N) > 19$ dB, ce qui indique une excellente qualité de la liaison montante.

L'absence quasi totale de zones à faible rapport signal/interférence (< 10 dB) suggère un réseau bien dimensionné, avec peu de bruit et interférences UL.

L'analyse de la qualité de la liaison montante, basée sur le rapport $C/(I+N)$, démontre que le réseau 5G NR planifié offre une excellente performance radio UL sur l'ensemble de la zone simulée. Plus de 90 % de la surface présente un $C/(I+N)$ supérieur à 19 dB. Cette qualité s'explique par :

- Une densité suffisante de stations de base (gNB).
- Un niveau de bruit UL maîtrisé.
- Une gestion efficace de la réutilisation de fréquence.

En somme, cette prédiction valide que le réseau est capable de maintenir des communications UL robustes et continues, même dans un environnement urbain complexe, ce qui est essentiel pour les applications interactives, la voix, l'IoT critique, et le contrôle en temps réel.

III.6 Simulation :

La **Figure III.39** montre la répartition de la mobilité des équipements utilisateurs en fonction du service utilisé :

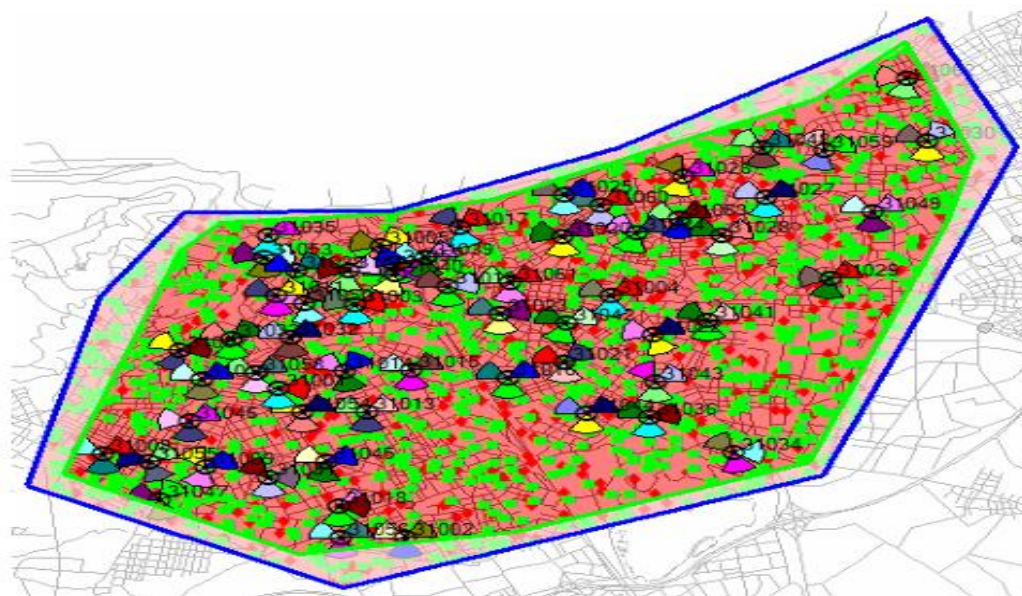


Figure III.39 : Distribution des utilisateurs 5G

Cette figure met en évidence l'importance de considérer la mobilité des équipements utilisateurs selon les types de services utilisés dans la planification d'un réseau 5G NR. En effet, les besoins radio varient selon qu'un utilisateur soit statique ou en déplacement, et selon le service sollicité (débit, latence, fiabilité).

Cette simulation permet d'anticiper les zones critiques en termes de handover, de gestion de ressources, et de priorisation des flux, et constitue une base essentielle pour l'optimisation radio intelligente dans un environnement 5G dynamique.

III.7 Comparaison entre les performances sur la planification 3G/4G/5G :

Concernant la 5G, on prévoit des débits dépassant les centaines de Mbps, et généralement plus d'1 Gbps, contrairement à la 3G et à la 4G. Cependant, cela ne peut être atteint qu'avec une couverture idéale et un SINR de qualité supérieure, ce qui nécessite une densité élevée de sites. Atoll démontrent que chaque cellule 3G possède une capacité restreinte, qui est souvent dépassée en une courte durée. La 4G augmente largement cette capacité. Dans le cadre de la technologie 5G, notamment grâce à l'exploitation de larges bandes passantes, les simulations indiquent une croissance considérable de la capacité. Les prévisions de puissance reçue suggèrent que la 5G représente une avancée notable comparée à la 3G et à la 4G. Plus on avance dans les générations, plus la performance s'améliore, mais la complexité de la planification augmente également.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé la planification et l'optimisation d'un réseau 5G dans la zone d'Oran présentant des caractéristiques différentes. Nous avons fait recours au logiciel de planification 'Atoll' et dans ce cadre, nous sélectionnons le modèle numérique représentatif du terrain de la ville d'Oran. Nous avons positionné les divers sites et paramétré l'ensemble de ces éléments. Ensuite, nous avons effectué des simulations de diverses prédictions de couverture et nous avons analysé les résultats. Pour conclure, cette recherche a offert des résultats précieux pour la conception et l'amélioration des réseaux de communication 5G.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution rapide du secteur des télécommunications a profondément transformé notre manière de communiquer et d'accéder à l'information. Aujourd'hui, un utilisateur peut établir une connexion en tout lieu et à tout moment, tout en profitant d'une diversité de services via un seul et même réseau. Les réseaux de nouvelle génération, et en particulier la **5G**, sont conçus dans cette logique de convergence technologique, en intégrant des exigences de haut débit, de faible latence et de connectivité massive.

Ce mémoire s'est fixé pour objectif le déploiement et la planification d'un réseau **5G** dans la région d'Oran. À travers ce travail, nous avons non seulement approfondi nos connaissances sur la technologie 5G et ses spécificités, mais également acquis une maîtrise précieuse de l'outil de planification radio **Atoll**, largement utilisé dans le domaine des télécommunications.

Les différentes simulations effectuées ont permis de formuler des prévisions concrètes sur les performances du réseau **5G NR**. Les estimations de couverture ont clairement mis en évidence les zones bien desservies, tout en signalant des zones non couvertes nécessitant des ajustements dans la configuration des émetteurs. Les prédictions de liaison descendante et montante ont révélé des vitesses moyennes remarquables (jusqu'à **30275,82 kbps**), associées à une excellente qualité de signal, confirmée par les valeurs élevées de **SS-RSRP** et du rapport **C/(I+N)**. Ces résultats traduisent une couverture solide et stable, assurant un débit performant sur l'ensemble de la zone étudiée.

En somme, ce mémoire constitue une contribution pertinente à l'étude du déploiement des réseaux **5G**. Les résultats obtenus démontrent le potentiel considérable de cette technologie pour répondre aux besoins croissants en connectivité, tout en garantissant des performances techniques élevées et une expérience utilisateur optimisée.

Bibliographie

- [2] HUANG, H., PAPADIAS, C. B., VENKATESAN, S. MIMO Communication for cellular Networks. Springer Science & Business Media, 2011.
- [4] Kukushkin, Alexander. Introduction to Mobile Network Engineering : GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road To 5G, John Wiley & Sons, Incorporated, 2018.
- [9] POOLE, Ian. Cellular communications explained : from basics to 3G. Newnes, 2006
- [11] Sanghera, Paul. CDMA Wireless Networks : Protocols, Performance, and Implementation. McGraw-Hill, 2003
- [12] UMTS Networks : Architecture, Mobility and Services (Heikki Kaaranen)
- [13] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread Spectrum Multiple-Access communication — part I : system analysis," IEEE Trans. Commun., vol. 25, pp. 795-799, Aug. 1977.
- [14] BROADBAND WIRELESS COMMUNICATIONS 3G, 4G and Wireless LAN By Jiangzhou WANG Université of Hong Kong 2020
- [17] Cox, Christopher. An Introduction To 5G: The New Radio, 5G Network and Beyond, John Wiley & Sons, Incorporated, 2020. ProQuest Ebook Central.
- [22] 5GPPP, "5G empowering vertical industries", Supported by European Commission, 2016.
- [25] Nakul H. Navarange, Staff Systems Engineer, 5G Networks Qualcomm Technologies, 2020.
- [26] Andrea Detti CNIT-Electronic Eng. Dept., University of Rome Tor Vergata
- [27] 3GPP, "Release 15, TR 21.915; septembre-2019.
- [30] B. A. DEHEMCHI MARWA Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G," 2019.
- [31] A. Detti, "Functional architecture," CNIT Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata , 2018.
- [32] Rodriguez, Jonathan. Fundamentals of 5G Mobile Networks, John Wiley & Sons, Incorporated, 2015. ProQuest Ebook Central.

Bibliographie

- [33] Arcep, « Les enjeux de la 5G », 2017
- [35] 3GPP TS 38.101-1, “User Equipment (UE) radio transmission and reception ; Range 1”, 3GPP, 2019.
- [36] 3GPP TS 38.101-2, “User Equipment (UE) radio transmission and reception; Range 1”, 3GPP, 2019.
- [40] AKBARZADEH, Sara, SCHWOERER, Jean, BAILLY, Bertrand, et al. Les réseaux 5G : Architecture système, radio et cœur, coexistence 4G, mise en œuvre opérationnelle. Eyrolles, 2020.
- [41] E. P. S. e. S. J. A. P. DAHLMAN, 5G NR : The next generation wireless access technology., 2020.
- [43] 5G : Nouvelles antennes Massive MIMO - Réseaux Orange 2020
- [44] Wei Xiang, Kan Zheng, Xuemin Shen, 5G Mobile Communications, Springer International Publishing Switzerland 2017.
- [52] White Paper: Making 5GNR reality, Qualcomm Technologies Inc. , December 2016.

Webographie

- [1] <https://tridenstechnology.com/fr/generations-de-reseaux-mobiles/> en mars 2025
- [3] <https://www.researchgate.net/profile/Remi-Bonnefoi> en mars 2025
- [5] https://www.frequentieland.nl/umts/umts_tech.htm en avril 2025
- [6] <https://bridgera.com/5g-promises-new-horizons-for-iot-solutions/amp/> en avril 2025
- [7] [Université YONSEI, Séoul, Corée](#) en avril 2025
- [8] <https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2011/08/22/evolutiondelalgversla4g/> en avril 2025
- [10] https://sites.pitt.edu/~dtipper/cdma_2000.pdf en avril 2025
- [15] <https://zh.wikipedia.org/wiki/3GPP2> en avril 2025
- [16] <http://www.3gpp.org/> en avril 2025
- [18] https://images.slideplayer.com/19/5826230/slides/slide_9.jpg en avril 2025
- [19] <https://www.huawei.com/en/news/2020/7/3gpp-itu-imt-2020-5g-standard> en avril 2025
- [20] <http://www.cicom2020.uagro.mx/wp-content/uploads/2020/11/memorias-cicom2020.pdf> en avril 2025
- [21] <https://www.mpirical.com/blog/the-evolution-of-mobile-communication> en avril 2025
- [23] <https://www.sowee.fr/conseils/objets-connectes/qu-est-ce-que-la-5g/> en avril 2025
- [24] <https://www.arpce.dz/fr/file/b6h9s2> en avril 2025
- [28] <https://www.dreamnews.jp/press/0000309154/> en avril 2025
- [29] <https://networkbuildz.com/5g-core-network-architecture/> en avril 2025
- [34] https://lafibre.info/images/5g/202009_arnaque_la_deferlante_5g.pdf en avril 2025
- [37] <https://www.innotip.com/5g-network-slicing/> en avril 2025
- [38] <https://wraycastle.com/fr/blogs/glossaire-des-termes-de-la-technologie-des-telecommunications/> en avril 2025

Webographie

- [39] <https://www.5g-networks.net/5g-nsa-and-5g-sa-networks-compared/> en avril 2025
- [42] <https://ytd2525.wordpress.com/2021/03/29/rf-and-5g-new-radio-top-5-questions-answered/> en mai 2025
- [45] <https://images.frandroid.com/wp-content/uploads/2020/03/nokia-massive-mimo.png> en mai 2025
- [46] <https://info-nrlte.com/2020/07/15/massive-mimo-and-beamforming/> en mai 2025
- [47] https://www.pngitem.com/middle/hixmbRw_5g-usage-scenarios-5g-emb-mmtc-urllc-hd/ en mai 2025
- [48] <https://itnspotlight.com/massive-machine-type-communication-in-5g-and-beyond-network/> en mai 2025
- [49] <https://fr.digi.com/resources/definitions/urllc> en mai 2025
- [50] <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/11/5111> en mai 2025
- [51] <https://www.innotip.com/5g-network-slicing/> en mai 2025
- [53] <https://davenportgroup.com/insights/the-benefits-and-challenges-of-5g-in-business-it-environments/> en mai 2025
- [54] <https://www.forsk.com/atoll-overview> en mai 2025