

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE 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 de Télécommunications

Par : MESSAOUDI Ayoub et AICHI Mohammed

Sujet

Optimisation de la Planification de Réseaux Mobiles 5G Utilisant Atoll : Une Étude de Cas sur la Couverture et la Capacité dans une Zone Urbaine

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

Mme BENOSMANE Hayat	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme SEDJELMACI Amina	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme GOURARI Fatima Zohra	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicace

C'est avec une profonde admiration et une joie sincère que je dédie ce modeste ouvrage à mon cher père, "MESSAOUDI YUCEF". Tel un phare dans la tempête, tu as été mon ancrage, mon guide éclairé à travers les vicissitudes de la vie. Ta patience sans borne, ta foi inébranlable en moi et ton amour sans limites ont sculpté mon âme et mon être. Ta sagesse a été mon héritage le plus précieux. Que Dieu te bénisse et veille sur toi.

À l'égard de la plus merveilleuse des mères, "M. LATIFA", les mots me manquent pour exprimer ma gratitude pour ton accompagnement inlassable, tes sacrifices, ton affection débordante et ta douceur qui m'ont guidé vers la lumière. En ce jour exceptionnel et inoubliable, je te dédie cette réalisation, témoignage de ma reconnaissance éternelle. Que le Tout-Puissant t'accorde une longue vie emplie de santé et te préserve de tout malheur.

À mon frère bien-aimé, à ma chère petite sœur et à mes chères tantes, pour leur soutien indéfectible ;

À mes amis de cœur, ainsi qu'à toutes les âmes bienveillantes qui m'ont épaulé et assisté durant ce projet d'envergure ;

Et enfin, à tous mes enseignants, qui ont semé les graines de la connaissance et de la sagesse depuis mon enfance jusqu'à mes études supérieures.

Ayoub Messaoudi

أيوب مسعودي

Dédicace

À mon cher père "AICHI SIDI MOHAMMED",

C'est avec une immense gratitude que je vous dédie cette réalisation. Votre force, votre sagesse et votre soutien inébranlable ont été mon guide tout au long de ce voyage. Vous avez toujours cru en moi, même quand j'en doutais. Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien constant.

À ma chère mère "A. NOUR ELHOUDA",

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

À ma famille bien-aimée,

Votre amour et votre soutien ont été une source constante d'inspiration tout au long de mon parcours académique. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.

À mes précieux amis,

Merci pour votre amitié, votre soutien et vos encouragements constants. Vous avez rendu ce voyage beaucoup plus agréable.

En terminant mes études, je regarde en arrière avec gratitude et en avant avec espoir. Merci à vous tous d'avoir fait partie de mon voyage.

Mohammed Aichi

محمد عايشي

Remerciement

Avant tout, notre gratitude va à Allah pour la force et la persévérance qu'Il nous a accordées pour réaliser cette œuvre.

Nous exprimons notre sincère gratitude à notre directrice de thèse, **Mme. GOURARI Fatima Zohra**, maître de conférences classe B à l'Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, pour son environnement de travail stimulant et son accompagnement précieux.

Nous adressons également notre reconnaissance à **Mme BENOSMANE Hayat**, professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, pour avoir gracieusement accepté de diriger ce jury distingué. Nos remerciements s'étendent à **Mme SEDJELMACI Amina**, maître de conférences classe A à l'Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, pour avoir évalué et apporté sa contribution à notre humble travail.

Pour conclure, nous tenons à remercier l'ensemble du corps professoral du département de Télécommunication de l'Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, ainsi que tous les enseignants qui ont joué un rôle dans mon parcours éducatif, depuis l'école primaire jusqu'à l'enseignement supérieur.

Table des matières

DEDICACE	I
REMERCIEMENT.....	III
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : RESEAUX MOBILES.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Concept de base des réseaux mobile	4
I.3 Taille des cellules et bandes de fréquences.....	5
I.4 Architecture de réseaux mobile.....	6
I.5 Évolution des réseaux cellulaires	9
I.5.1 Première génération (1G)	10
I.5.2 Deuxième génération 2G (GSM).....	10
I.5.3 Troisième génération 3G (UMTS) :	11
I.5.4 Quatrième génération 4G :	12
I.6 Limitations de la 4G	12
I.7 Introduction de la 5G	13
I.7.1 Pourquoi la 5G.....	13

I.7.2	Difficultés rencontrées avec la 5G	13
I.7.3	Présentation des services 5G	14
I.7.4	Indicateurs clés de performance (KPI)	15
I.7.5	Analyse comparative de la 4G et de la 5G	15
I.7.6	Effets de la 5G sur les fournisseurs de services mobiles	17
I.7.7	Les avantages de la 5G	18
I.8	Futur des réseaux mobiles	18
I.8.1	6G et au-delà.....	18
I.8.2	A quoi ressemblera le monde avec la 6G ?	19
I.8.3	Nouvelles technologies pour les réseaux mobiles	20
I.8.3.1	VOIP : TÉLÉPHONER VIA INTERNET	20
I.8.3.2	UWB : PLUS PERFORMANTE QUE LE BLUETOOTH	21
I.8.3.3	LES COMMUNICATIONS UNIFIÉES : UN MUST POUR LES ENTREPRISES	21
I.9	Impact des réseaux mobiles sur la société.....	22
I.9.1	Évolution de la Communication :.....	22
I.9.2	Conséquences Économiques :	22
I.9.3	Répercussions Environnementales :	22
I.9.4	Effets sur la Santé :.....	23
I.10	Conclusion.....	23
	CHAPITRE II : 5^{EME} GENERATION NEW RADIO	24
II.1	Introduction	25
II.2	Principes de base de la technologie radio 5G	25
II.3	Nouvelle radio 5G (NR).....	25
II.3.1	Promesses attendues de la 5G.....	26
II.3.2	Exigences techniques et bandes de fréquences	28
II.3.3	Numérologie	32
II.3.4	Structure de trame.....	34
II.3.5	Modèles de duplex.....	35

II.3.6	La couche physique NR.....	36
II.4	Transmission multi-antenne	39
II.5	Communications par ondes millimétriques	43
II.6	Conclusion :.....	44
CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PLANIFICATION DE RESEAUX		
	MOBILES 5G	45
III.1	Introduction	46
III.2	Logiciel de planification pour les réseaux 5G NR :.....	46
III.3	Etapas de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll	47
III.3.1	Pré-Planification :	48
III.3.2	Planification.....	48
III.3.3	Vérification.....	49
III.3.4	Optimisation	49
III.4	Démarrage d'un projet ATOLL :.....	49
III.4.1	Les étapes de configuration à suivre :	49
III.4.1.1	Création d'un nouveau projet :	50
III.4.1.2	Choisir le système de coordonnées :	53
III.4.1.3	Importation de la carte :.....	54
III.4.1.4	Données d'entrée :.....	60
III.4.1.5	Importation des sites et des émetteurs (gNB)	60
A)	Couverture par niveau de signal :.....	69
B)	Prédiction de couverture par émetteur (transmitter) :.....	71
C)	Prédiction de couverture liaison descendante :	71
D)	Prédiction de qualité de la liaison descendante :	73
E)	Prédiction effective de zone de service :	74
F)	Prédiction de capacité de la liaison descendante :.....	76
G)	Simulation.....	77

III.5 Conclusion :	77
CONCLUSION GENERALES	79
BIBLIOGRAPHIE	81
RESUME	85
ABSTRACT	86
ملخص	87

Liste des figures

Figure I.1.: différent type des cellules	6
Figure I.2 Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles	7
Figure I.3 Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles	8
Figure I.4 : Architecture des réseaux UMTS	9
Figure I.5: Évolution des réseaux cellulaires.....	10
Figure I.6: Applications du réseau 5G	14
Figure I.7: Comparaisons entre 4G et de la 5G au niveau des huit indicateurs de performance	16
Figure II.1 IMT-2020 utiliser des cas et cartographier des scénarios d'utilisation.	28
Figure II.2 Structure de trame en NR [18].....	32
Figure II.3 structure générale de trame pour différentes numérolgies	35
Figure II.4 Schémas duplex 5G NR.....	36
Figure II.5 Pile de protocoles du plan utilisateur NR [20]	37
Figure II.6 Antenne réseau à commande de phase [23].....	40
Figure II.7 Panneau d'antenne à double polarisation. [24]	41
Figure II.8 Schéma MIMO massif [26]	42
Figure III.1 Interface de démarrage du logiciel ATOLL.....	47
Figure III.2 Etapes de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll	48
Figure III.3 Lieu de travail au cœur de l'Atoll.....	51
Figure III.4 Création d'un fichier atoll	51
Figure III.5 Création d'un nouveau projet.....	52
Figure III.6 Choisir la technologie	52
Figure III.7 Choisir le système de coordonnées.....	53
Figure III.8 Projection et affichage	54
Figure III.9 Clutter classes	55

Figure III.10 après l'importation de clutter classes	55
Figure III.11 Clutter hight	57
Figure III.12 après l'importation de clutter hight.....	57
Figure III.13 Digital Terrain Model (DTM).....	58
Figure III.14 Importation de vector.....	59
Figure III.15 après l'importation de vector.	59
Figure III.16 Anciennes génération 68 sites.....	67
Figure III.17 Nouvelle génération 71 sites.....	67
Figure III.18 Template de la station 5G NR.....	68
Figure III.19 5G 71 sites.....	68
Figure III.20 Différents types de prédictions	69
Figure III.21 Prédiction de la couverture par niveau du signal	70
Figure III.22 Histogramme de la couverture par niveau de signal.....	70
Figure III.23 Prédiction de couverture par émetteur.	71
Figure III.24 Prédiction de couverture liaison descendante.	72
Figure III.25 Histogramme de la de couverture liaison descendante.	73
Figure III.26 Prédiction de qualité de la liaison descendante.....	73
Figure III.27 Histogramme de qualité de la liaison descendante	74
Figure III.28 Prédiction effective de service area	75
Figure III.29 Effective service area analyse	75
Figure III.30 Prédiction de capacité de la liaison descendante.	76
Figure III.31 Histogramme de capacité de la liaison descendante	76
Figure III.32 Simulation.	77

Liste des tableaux

Tableau I.1 Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G	17
Tableau II.1 Exigences minimales de performances techniques pour les IMT-2020	30
Tableau II.2 Bandes de fonctionnement NR [17].....	31
Tableau II.3 Numéro logies multiples dans NR [18]	33
Tableau II.4 Durée du symbole OFDM [18].....	34
Tableau III.1 Caractéristiques du service haut débit	61
Tableau III.2 Caractéristiques du profil utilisateur professionnel.....	62
Tableau III.3 Caractéristiques du profil utilisateur professionnel.....	62
Tableau III.4 Prédiction de la couverture dans Atoll	63
Tableau III.5 Caractéristiques de la bande de fréquence de 3,5 GHz.	66

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)
3.5G	HSDPA (High Speed DownLink Packet Access)
3.75G	HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)
3G	Third generation.
3GPP	Third Generation Partnership Project.
4G	Fourth generation.
4G+	4G LTE Advanced
5G	Fifth generation.
5G NR	5G New Radio
6G	Sixth generation.
B	
BS	Base station
BSC	Base Station Controller
BSS	business support system
C	
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix

CSI-RS Channel State Information Reference Signal

D

DM-RS Demodulation Reference Signal

E

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EMBB Enhanced mobile bandwidth

F

FDD Frequency Division Duplex

FDMA Frequency division multiple access.

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
Communications Sector

K

Kbps Kilobits per second

KPI: Key Performance Indicators

L

LORA Long Range

LPLT Low Power LowThroughput

LTE Long-Term Evolution

M

MAC Medium Access Control

Mbps Megabits per second

MHZ Mega Hertz

MMS Multimedia Messaging Service

MNO Mobile Network Operator

MSC Mobile Switching Center

MmTC Massive machine-type communication

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

MU-MIMO Multi-User MIMO

MmWAVE Millimeter wave

N

NMT Nordic Mobile Telephone

NSS Network switching subsystem

NTT Nippon Telephone and Telegraph

O

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

P

PDN Public Data Network

PME Previous Message Error

PDCP packet data convergence protocol

PHY Physical Layer

PDSCH Physical Downlink Shared Channel

PBCH Physical Broadcast Channel

PDCCH Physical Downlink Control Channel

PUCCH Physical Uplink Control Channel

PUSCH Physical Uplink Shared Channel

PRACH Physical Random-Access Channel

PT-RS	Phase Tracking Reference Signal
PSS	Primary Synchronization Signal
R	
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RTC	Reseau Téléphonique Commuté
RTPC	Reseau Téléphonique Public Commuté
RLC	Radio link control
S	
SGSN	Serving GPRS Support Node
SC-FDMA	Single Carrier- Frequency Division Multi-Access
SMS	Short Message Service
SCS	Subcarrier Spacing
SDAP	Service data adaption protocol
SSS	Secondary Synchronization Signal
SRS	Sounding Reference Signal
SS-RSRP	SS Reference Signal Received Power
SNR	Signal to Noise Ratio
SU-MIMO	Single-User MIMO

T

TACS Total Access Communication System.

TDD Time Division Duplex

TDMA Time Division Multiple Access

THZ Terahertz

U

UC Unified Communications

UHF Ultra High Frequency

UIT International Telecommunications Union

UM User Mobile

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

UWB Ultra Wide Band

URLLC Ultra-reliable low-latency communication

UE User Equipment

V

VHF Very High Frequency

VLR Visitor location register

VOIP Voice over Internet Protocol

Introduction Générale

La technologie a exercé une influence considérable sur de nombreux aspects de la vie courante au cours des dernières décennies, caractérisées par une évolution technologique rapide. La téléphonie mobile, jadis un luxe pour quelques privilégiés, est désormais une commodité répandue et massivement adoptée à travers le monde. Le réseau téléphonique public, un système de communication électronique, fournit des services de téléphonie au grand public, facilitant l'échange vocal et d'autres types de données (vidéos, musiques, textes, etc.) entre les utilisateurs du réseau.

Nous avons assisté à l'émergence de cinq générations de systèmes de télécommunications mobiles, chacune introduisant des innovations significatives et s'appuyant sur des technologies distinctes pour des applications variées. Ces avancées ont été déployées à l'échelle mondiale. L'objectif de cette étude est de concevoir et de dimensionner un réseau de cinquième génération, en expliquant ses différences par rapport aux générations antérieures et son importance cruciale pour l'avenir des communications.

Le document est organisé comme suit : le premier chapitre se consacre à l'analyse des générations antérieures (**1G, 2G, 3G et 4G LTE**), à leur fonctionnement et à leurs contraintes, qui justifient la transition vers la 5G pour satisfaire les besoins émergents dans divers secteurs. Le second chapitre détaille le dimensionnement et la planification de la **5G**, en décrivant son architecture et en se focalisant sur des éléments tels que le modèle de propagation, la structure cellulaire et la gestion des ressources et des connexions. Il approfondit la construction et le fonctionnement des réseaux **5G**, qui permettent d'atteindre des vitesses de connexion extrêmement élevées.

Le troisième chapitre présente les différentes étapes de notre simulation. Il aborde la planification et l'optimisation des réseaux **5G NR** effectuées dans une région d'Oran, en utilisant le logiciel Atoll, un outil avancé. Ce chapitre traite des phases essentielles de la planification réseau, incluant l'initialisation du projet, l'intégration des cartographies numériques et des coordonnées, ainsi que la configuration des paramètres cellulaires. Il souligne également les capacités d'Atoll, telles que l'évaluation des zones de couverture, l'analyse de la puissance du signal et l'estimation des débits de téléchargement optimaux.

Chapitre I: Réseaux mobiles

I.1 Introduction

Actuellement, les dispositifs de communication sans fil gagnent une place de plus en plus importante dans notre vie quotidienne, progressivement remplaçant l'utilisation intensive de câbles. Les réseaux mobiles ont connu un développement constant, donnant lieu à plusieurs générations, à savoir la **1G**, **2G**, **3G**, **4G**, et la **5G** qui n'est pas encore mise en œuvre. Ces générations ont évolué de manière significative, proposant des débits exceptionnels en constante augmentation et une bande passante de plus en plus large. Un avantage notable de cette augmentation de bande passante réside dans la capacité à prendre en charge un nombre croissant d'utilisateurs.

Dans cette section, nous allons explorer les concepts fondamentaux des réseaux mobiles et leurs évolutions.

I.2 Concept de base des réseaux mobile

Les réseaux de téléphonie mobile s'étendent sur de vastes zones, subdivisées en multiples cellules de dimensions réduites. La configuration et les dimensions de ces cellules sont influencées par plusieurs facteurs, dont la configuration du terrain environnant (zones planes, montagneuses, rurales, zones urbaines, etc.) [1].

L'impact du relief est crucial puisque les obstacles peuvent réduire la portée des signaux radio. Chaque cellule est équipée d'une station de base (**BS**) pourvue d'une antenne, responsable de la transmission des signaux radio et de la communication au sein de la cellule. [1]

L'orientation de l'antenne, ou azimut, est aussi considérée pour maximiser la couverture de la zone ciblée. Dans le cas d'antennes omnidirectionnelles, la cellule prend une forme circulaire en théorie, mais cette géométrie peut être altérée par des obstacles rencontrés par le signal.

Habituellement, il y a un léger chevauchement entre les cellules pour assurer une couverture intégrale de la région désignée. La superficie de la cellule varie également en fonction de la densité de population de la zone, une forte densité d'utilisateurs menant à une réduction de la taille des cellules. Cette réduction est liée à la capacité limitée des antennes, qui exige une gestion rigoureuse du nombre d'utilisateurs par antenne afin d'assurer une bande passante suffisante pour chaque individu [1].

I.3 Taille des cellules et bandes de fréquences

La taille des cellules fluctue d'un réseau mobile à l'autre, principalement en raison des bandes de fréquences employées. La portée des ondes millimétriques s'accroît en fonction de la fréquence [1].

Dans les premiers systèmes cellulaires, les fréquences s'étendaient initialement de **30 à 300 MHz** dans les bandes **UHF** (Ultra High Frequency), puis de **300 MHz à 3 GHz** dans les bandes **VHF** (Very High Frequency) [1].

Le premier système de communications mobiles standardisé pour toute l'Europe, en **1982**, opérait dans la gamme des **890-915 MHz** et **935-960 MHz**. Aujourd'hui, des fréquences beaucoup plus élevées, allant de **20 à 60 GHz**, sont en usage. En fonction de la fréquence et de la puissance disponible, différentes tailles de cellules sont définies, comme illustré dans la figure 1.1 : pico-cellule, microcellule, macrocellule et la cellule parapluie.

La pico-cellule désigne une zone de service de quelques mètres de diamètre, tandis que la microcellule couvre une surface géographique de quelques dizaines de mètres de diamètre. La cellule proprement dite à une superficie avec un diamètre variant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres [1].

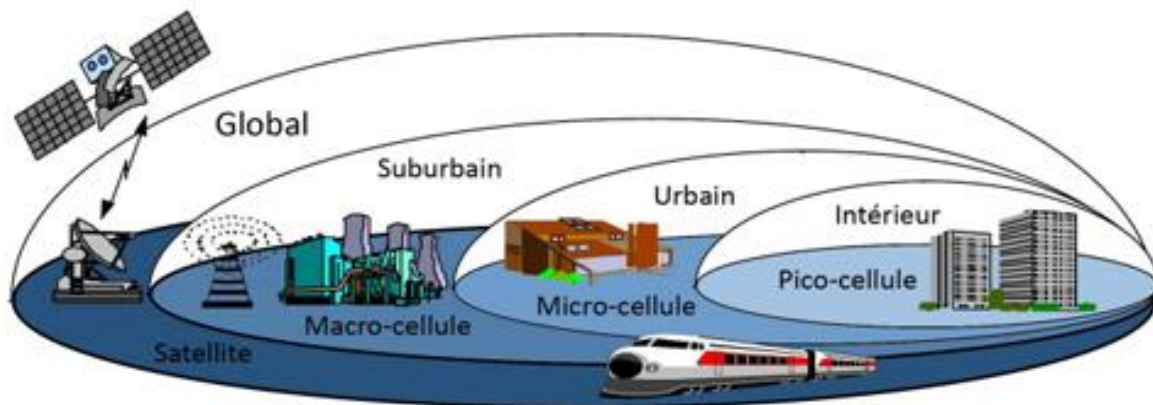


Figure I.1.: différent type des cellules

La macro-cellule correspond à une étendue géographique de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres de diamètre. Enfin, la cellule parapluie englobe une région de quelques centaines de kilomètres de diamètre [1].

I.4 Architecture de réseaux mobile

Habituellement, les réseaux de téléphonie mobile s'étendent sur de vastes régions, subdivisées en multiples secteurs délimités géographiquement, nommés cellules. La configuration et l'ampleur de ces cellules varient selon plusieurs éléments, dont la configuration du terrain de la région desservie (terrains plats, zones vallonnées, campagnes, constructions, etc.) [2].

Les entraves rencontrées par les ondes radio en cours de transmission influencent l'étendue de ces cellules. Une station de base (**BS**), munie d'une antenne, est affectée à chaque cellule pour gérer la communication radio et les signaux au sein de celle-ci. L'altitude et la catégorie d'antenne jouent un rôle crucial, puisqu'une antenne positionnée plus haut étend la portée de la zone de couverture [2].

L'ajustement de l'azimut de l'antenne est crucial pour garantir une couverture optimale de la zone avoisinante. Une antenne omnidirectionnelle crée, en théorie, une cellule de forme circulaire, mais cette géométrie peut être altérée par des obstacles rencontrés par le signal [2].

Il est important de souligner qu'une antenne directionnelle se limite à couvrir un secteur défini, correspondant à l'orientation de l'antenne, et le choix de l'antenne est déterminé en fonction de l'application visée [2].

En règle générale, il existe un léger chevauchement des cellules pour assurer une couverture sans faille de la région désignée. La dimension de chaque cellule est aussi influencée par la concentration d'utilisateurs dans l'aire concernée, avec une forte densité d'utilisateurs menant à la diminution de la taille des cellules dû à la capacité restreinte des antennes. De ce fait, pour préserver une quantité de bande passante adéquate par utilisateur, le nombre d'utilisateurs par antenne est restreint [2].

L'infrastructure fondamentale des réseaux mobiles est divisée en une section fixe et une section mobile. La section mobile est essentiellement formée par les usagers des appareils mobiles (UM), alors que la section fixe est constituée du réseau d'accès, qui inclut les stations de base et leurs contrôleurs, servant de ponts vers le réseau central le réseau central est, quant à lui, constitué de commutateurs et/ou de routeurs [1].

Un réseau de transmission peut servir d'intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau central, surtout quand l'étendue à couvrir est vaste ou que le nombre d'appareils dans le réseau est conséquent. Les liaisons entre les stations de base et les contrôleurs, ainsi que celles reliant les contrôleurs aux commutateurs, sont établies suivant des normes précises, qui font partie de ce qu'on appelle la planification du réseau d'accès et du réseau central. Le réseau central comprend aussi des bases de données de localisation, y compris une base de données principale (HLR) et une base de données de visiteurs (VLR) associées à chaque commutateur [1].

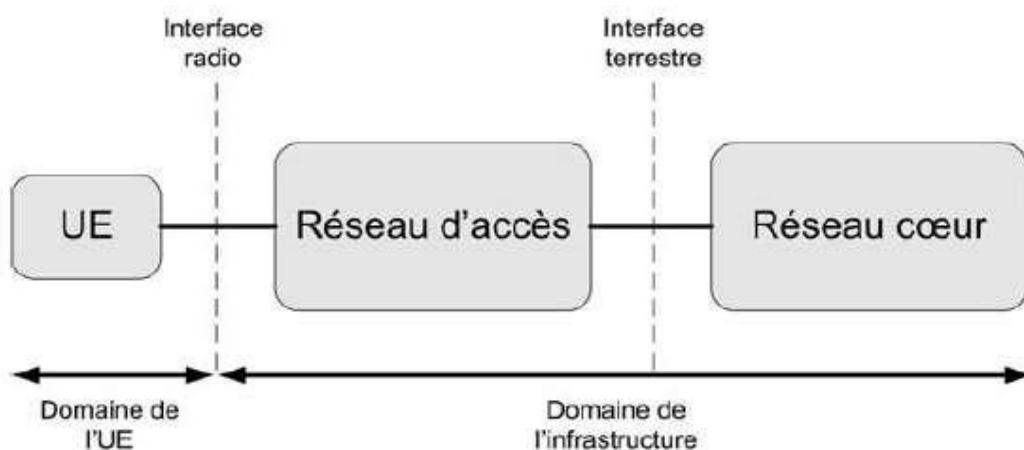


Figure I.2 Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles

La représentation schématique 1.3 illustre de manière épurée la structure des réseaux de téléphonie mobile. Pour les réseaux **GSM** (Système Global pour les Communications Mobiles), les stations de base (**BS**) sont connectées à des contrôleurs de stations de base (**BSC**) qui orchestrent les ressources radio, également désignées comme les fréquences, des **BS**. Ces stations de base, en association avec les **BSC**, forment le réseau d'accès ou le sous-système radio (**BSS**), qui fait office de pont entre les usagers mobiles et le réseau terrestre. Le cœur du réseau, ou sous-système réseau (**NSS**), est constitué de centres de commutation mobiles (**MSC**), qui relient les **BSC** les uns aux autres ainsi qu'à d'autres composants statiques du réseau. La figure 1.3 dépeint la configuration structurelle des réseaux **GSM**.

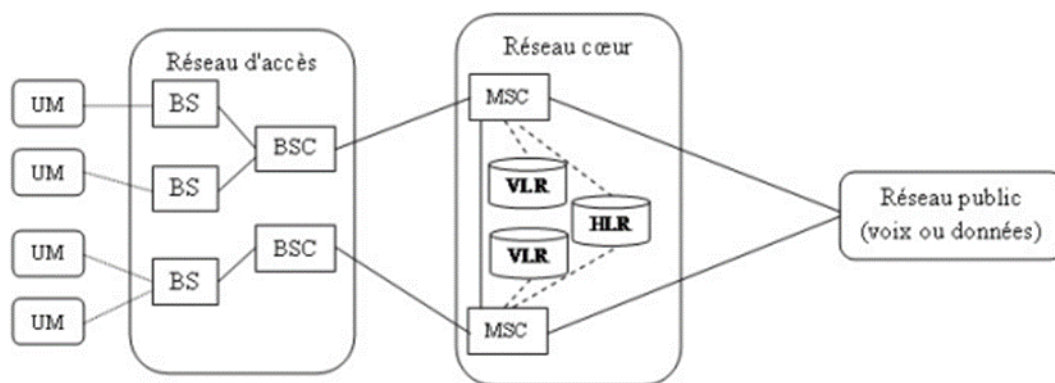


Figure I.3 Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles

Au sein des réseaux **UMTS** (Système Universel de Télécommunications Mobiles), les stations de base, aussi appelées nœuds B (nœud pour l'accès large bande), sont reliées à des contrôleurs de réseau radio (**RNC**) qui supervisent les ressources radio pour les nœuds B correspondants. Les **RNC** ont aussi la charge de réguler le flux de données du réseau d'accès vers le cœur du réseau. La combinaison des nœuds B et des **RNC** associés forme le sous-système radio, ou **RNS** (Sous-système de Réseau Radio).

Le cœur du réseau se compose de deux sortes de commutateurs : le **MSC**, dédié à la transmission de la voix via des circuits, et le **SGSN** (Nœud de Support **GPRS** de Service), destiné à la transmission de données par paquets. Le **MSC** est connecté à des passerelles **GMSC** (Centre de Commutation Mobile de Passerelle), qui facilitent la liaison avec le **RTPC** (Réseau Téléphonique Public Commuté), tandis que le **SGSN** est relié au **GGSN** (Nœud de Support

GPRS de Passerelle), qui fournit une connexion au **PDN** (Réseau Public de Données). La Figure 1.4 illustre cette configuration [2].

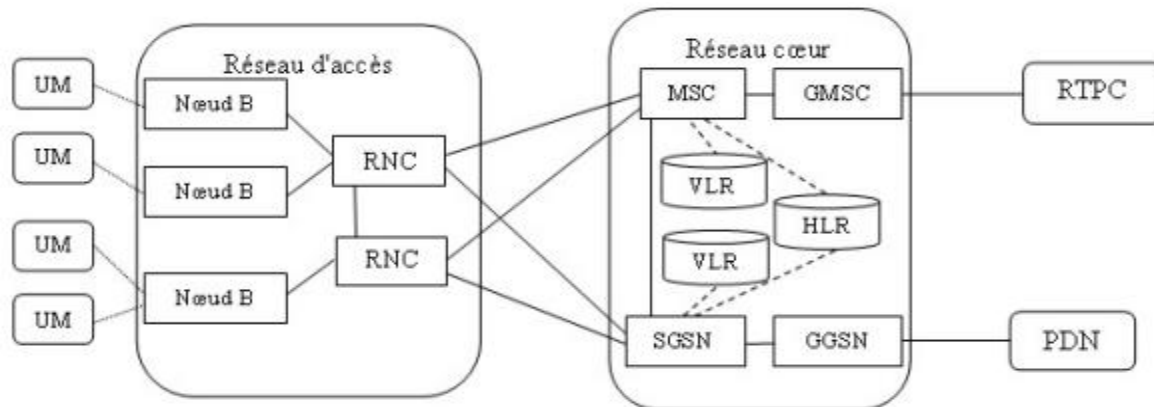


Figure I.4 : Architecture des réseaux UMTS

I.5 Évolution des réseaux cellulaires

L'industrie de la téléphonie mobile est en constante évolution, avec un développement notable tant sur le plan technologique que du nombre d'utilisateurs. Les avancées continues dans les technologies de communication exigent des normes de plus en plus élevées en termes de qualité de service pour les clients. Technologiquement, les réseaux de transmission ont considérablement augmenté leur capacité, que ce soit en termes de débit supporté ou du nombre d'utilisateurs.

En outre, l'intégration des services et la diversité des données transmises (voix, vidéo haute définition, consultation interactive de bases de données, Internet à haut débit, etc.) nécessitent des systèmes de traitement de l'information de plus en plus performants pour faire face à l'augmentation constante du volume d'informations.



Figure I.5: Évolution des réseaux cellulaires

I.5.1 Première génération (1G)

La genèse des systèmes cellulaires est marquée par l'arrivée de la **1G**, qui a inauguré l'ère de la téléphonie mobile. Les premiers téléphones portables, lancés en **1980**, étaient de nature analogique. En **1979**, le premier système cellulaire mondial a été établi par la « Nippon Telephone and Telegraph (**NTT**) » à **Tokyo, Japon** [3].

En Europe, le « Nordic Mobile Telephone (**NMT**) » et le « **TACS** » étaient les deux systèmes analogiques les plus courants. D'autres systèmes analogiques ont vu le jour à travers l'Europe dans les années **1980**. Malgré des fonctionnalités comme le handover et l'itinérance, ces systèmes cellulaires ne pouvaient pas interagir entre les pays, ce qui était un inconvénient majeur de la **1G** [3].

La **1G** avait plusieurs lacunes, dont l'incompatibilité des normes entre différentes régions, une transmission analogique non sécurisée (vulnérable aux écoutes), et l'absence de roaming international (la capacité de garder son numéro sur un réseau d'un autre opérateur) [3].

I.5.2 Deuxième génération 2G (GSM)

Le réseau mobile de deuxième génération, ou **2G**, a vu le jour dans les années **1990**. Il a introduit la modulation numérique et a été réalisé grâce à la technologie **GSM**. La **2G** a également élargi la prise en charge des bandes de fréquences. Avant l'arrivée de la **3G**, deux générations intermédiaires ont été développées : la **2,5G** et la **2,75G**, représentées par les

technologies **GPRS** et **EDGE** respectivement. Voici les principales caractéristiques du système 2G [3]:

- Bande de fréquence : Le **GSM**, qui est le standard utilisé, opère sur les bandes de fréquence de **900 MHz** et de **1800 MHz** en Europe [4].
- Technique d'accès : Les réseaux **2G** utilisent la technique d'accès **TDMA**, qui augmente le volume de données transmises simultanément en divisant temporellement les canaux de communication [5].
- Débit : Les réseaux **2G** supportent la transmission vocale ainsi que de petits volumes de données numériques, y compris les messages textes (**SMS**) et les messages multimédias (**MMS**). Le débit maximal autorisé par la norme **GSM** est de **9,6 Kbps** [6].

I.5.3 Troisième génération 3G (UMTS) :

La **3G**, ou troisième génération de réseaux mobiles, a été développée pour établir des normes internationales assurant une compatibilité mondiale, une mobilité globale et une compatibilité avec les réseaux **2G**. Elle offre des débits allant jusqu'à **2 Mbps** pour une mobilité réduite et jusqu'à **144 kbps** pour une mobilité élevée [7].

Les normes **3G** principales incluent le **CDMA2000** et l'**UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System). À la différence du **GSM**, la norme **CDMA2000**, qui est une évolution de la norme **IS-95**, n'est pas compatible avec le **GSM** [7].

Des améliorations ultérieures ont été apportées au débit de l'**UMTS** avec l'introduction des normes **HSDPA** (High Speed DownLink Packet Access : **3.5G**), offrant un débit théorique maximum de **14,4 Mbps** en téléchargement, et **HSUPA** (High Speed Uplink Packet Access : **3.75G**), offrant un débit théorique maximum de **5,76 Mbps** en téléversement [7] , Ces deux normes sont regroupées sous l'appellation **HSPA** (High Speed Packet Access).

I.5.4 Quatrième génération 4G :

Introduite en **2010**, la technologie **4G** marque une avancée majeure dans le domaine des réseaux sans fil. Elle vise à dépasser les capacités des générations antérieures en fournissant des services vocaux et de données rapides, de haute capacité, sécurisés et rentables. Voici les progrès notables de la **4G** :

- **Bande de fréquence** : Les réseaux **4G LTE** utilisent des bandes de fréquences de **800 MHz**, **1800 MHz** et **2600 MHz**, ce qui se traduit par des vitesses améliorées et une couverture réseau étendue [7].
- **Technique d'accès** : Grâce à l'adoption de l'**OFDMA** pour le canal descendant et du **SC-FDMA** pour le canal montant, la **4G** permet une transmission de données efficace et simultanée à de multiples utilisateurs, optimisant l'usage du spectre de fréquences [7].
- **Débit** : La **4G** a été élaborée pour fournir des vitesses de connexion supérieures, visant des débits de **100 Mbps** en réception et jusqu'à **75 Mbps** en émission.
- **Mobilité** : Conçue pour supporter une mobilité élevée, la **4G** permet une connexion stable jusqu'à des vitesses de **350 km/h**.
- **Latence** : Avec une latence réduite à moins de **5 ms** pour le transfert de petits paquets IP dans des conditions idéales, la **4G** offre une expérience utilisateur plus réactive et sans délai perceptible [7].

I.6 Limitations de la 4G

À l'orée d'une ère numérique en pleine expansion, nous assistons à l'avènement de technologies disruptives telles que la réalité augmentée, la visualisation en haute résolution, les véhicules intelligents, l'Internet des Objets, entre autres. Ces avancées entraînent une augmentation exponentielle du volume de données, ce qui appelle à l'élaboration de systèmes de communication novateurs dans des secteurs variés comme la santé, le transport ou l'écologie. Pour faire face à cette croissance de données, il est impératif de procéder à des améliorations conséquentes dans les réseaux de télécommunications mobiles.

La technologie **4G** a déjà optimisé des éléments clés tels que la rapidité de transmission et l'élargissement de la bande passante, surpassant ainsi les générations antérieures de réseaux mobiles.

Elle assure une connexion internet vélocité et stable pour les smartphones, tablettes et laptops. Toutefois, face à des situations exigeant une forte densité de trafic, un nombre important de connexions simultanées et une mobilité soutenue, la **4G** atteint ses limites.

Pour pallier ces défis, le secteur de la téléphonie mobile s'est orienté vers le développement de la **5G**, la cinquième génération de réseau, visant à résoudre les limitations de la **4G**. Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, l'objectif est de mettre en place et de simuler les fonctionnalités de la **5G** via la plateforme Atoll, afin de satisfaire les besoins évolutifs des utilisateurs [7].

I.7 Introduction de la 5G

La **5G** est la technologie d'accès radio récente, mise au point par le **3GPP** en **2020**, destinée à devenir la nouvelle référence pour l'interface radio. Son objectif est de diminuer la latence, d'accroître le débit de données, de gérer une quantité croissante de trafic de données et d'offrir une connectivité constante et variée.

I.7.1 Pourquoi la 5G

Les générations antérieures de réseaux mobiles se sont toujours fixé comme objectif d'augmenter la vitesse des données pour répondre à une demande croissante de ressources et à des services nécessitant des débits de plus en plus élevés. Chaque génération a réussi à mettre en place de nouvelles technologies pour prévoir les besoins des utilisateurs.

I.7.2 Difficultés rencontrées avec la 5G

La **5G** vise à réaliser les améliorations suivantes [8]:

- Une augmentation significative du nombre d'utilisateurs de la **5G** [8].
- Réduction de **10** fois le temps de latence [8].

- La gestion d'un volume de trafic considérable généré par les utilisateurs de la **5G**.
- L'élargissement de la bande passante d'application pour répondre à une variété de demandes et de caractéristiques [8].

I.7.3 Présentation des services 5G

À la différence des réseaux mobiles existants, la **5G** ne se concentrera pas essentiellement sur la téléphonie. C'est cette spécificité qui fait son unicité.

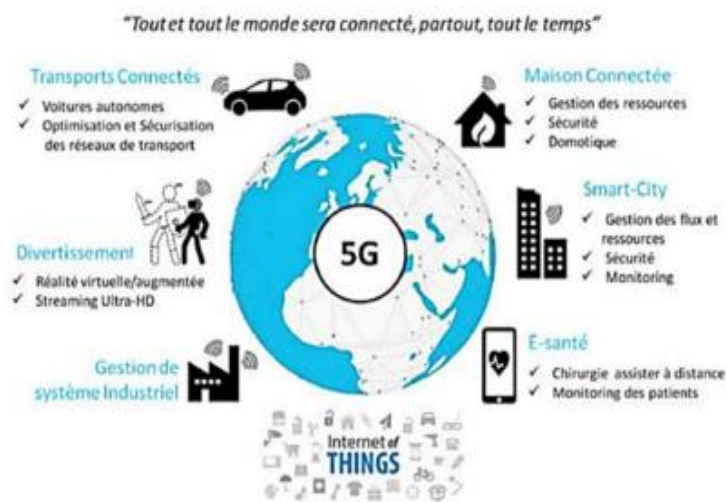


Figure I.6: Applications du réseau 5G

Effectivement, nous pouvons distinguer plusieurs applications clés que le réseau **5G** servira (Fig. 1.6) :

- Les métropoles futuristes, ou "villes intelligentes", seront dotées d'infrastructures gérables de façon plus efficace et économe en ressources, grâce à l'intégration de réseaux de détection avancés.
- Les habitations modernes, pilotables aisément et de manière économique en énergie, seront protégées à l'aide de dispositifs de surveillance et de gestion domotique à distance.
- Le secteur des transports évoluera avec l'avènement des véhicules autonomes, contribuant à la sécurisation et à l'amélioration de l'efficacité des réseaux de circulation.

- Le domaine médical bénéficiera de progrès notables, tels que la réalisation d'opérations chirurgicales à distance pour les individus vulnérables ou en situation de risque.

Pour ce qui est des secteurs industriel, logistique et sécuritaire, il est possible de prévoir des avancées technologiques moins disruptives que celles mentionnées ci-dessus, mais tout aussi importantes [9].

I.7.4 Indicateurs clés de performance (KPI)

L'UIT définit huit indicateurs clés de performance (KPI) pour caractériser, quantifier et évaluer les propriétés des systèmes **IMT-2020 (5G)** [9] :

- Débit maximal par utilisateur (**Gbit/s**).
- Débit moyen ressenti par l'utilisateur (**Mbit/s**).
- Efficacité spectrale (**bit/Hz**).
- Vitesse maximale des dispositifs (**km/h**).
- Latence (**ms**).
- Nombre d'appareils connectés dans une zone (**nombre d'appareils/km²**).
- Efficacité énergétique du réseau.
- Débit dans une zone (**Mbit/s/m²**).

I.7.5 Analyse comparative de la 4G et de la 5G

L'UIT caractérise la 4^{ème} génération, connue sous le nom de **IMT-Advanced**, en fonction des **8 KPI** mentionnés précédemment avec les valeurs illustrées dans le schéma ci-dessous. La **5G**, nommée **IMT-2020**, y est aussi représentée. Il est important de souligner que la définition officielle de la **4G** par l'UIT correspond en fait à ce que les réseaux commerciaux n'ont déployé que plus tard, sous le nom de **4G+** ou **LTE-Advanced** [10]

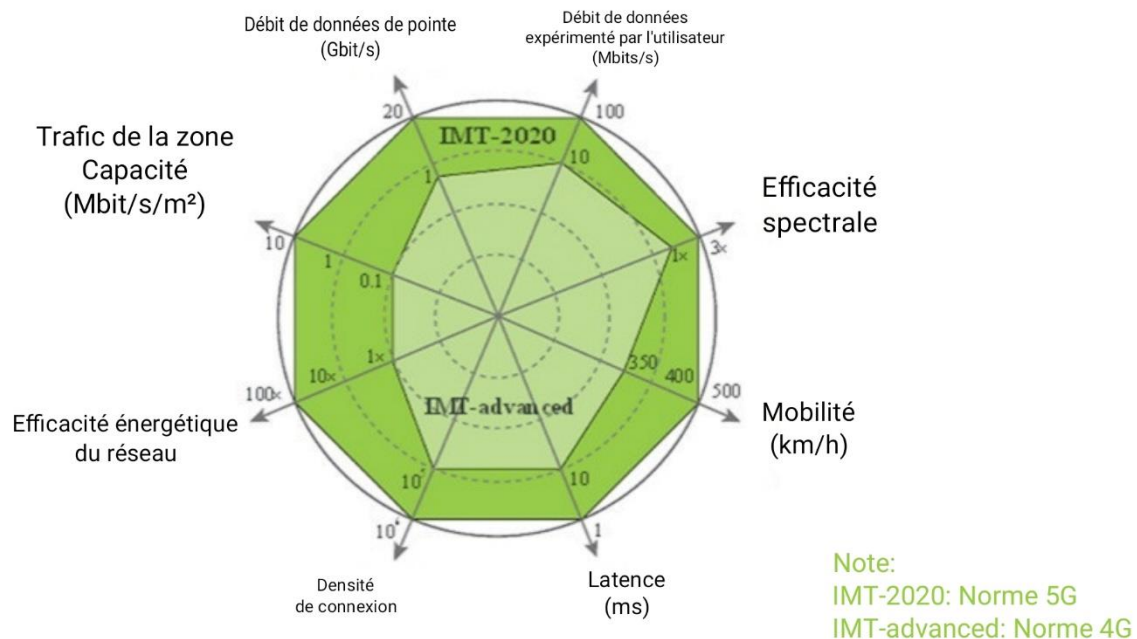


Figure I.7: Comparisons entre 4G et de la 5G au niveau des huit indicateurs de performance

Selon les ambitions fixées, la technologie **5G** devrait offrir des vitesses de téléchargement individuelles et des vitesses maximales qui surpassent de **10** à **20** fois celles offertes par les réseaux actuels. On prévoit également une multiplication par dix de la densité de connexions et une diminution significative de la latence, visant une latence de bout en bout de **1 ms**, comparée aux **30** à **40 ms** actuelles.

En tant qu'évolution de la **4G**, la **5G** vise à assurer :

- Un réseau d'une fiabilité exceptionnelle, garantissant des performances constantes, indépendamment de la localisation de l'utilisateur par rapport à l'antenne relais.
- Une connectivité fiable même à grande vitesse (jusqu'à **500 km/h**).
- Une nette amélioration de l'efficacité énergétique, avec des batteries potentiellement jusqu'à **100** fois plus durantes.

Le tableau suivant illustre les améliorations de performance anticipées avec la **5G** par rapport aux capacités actuelles de la **4G** :

Performance /Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit /s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1 ×	3 ×
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1 ×	100 ×
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

Tableau I.1 Comparaisons entre les performances de la **4G** et de la **5G**

I.7.6 Effets de la 5G sur les fournisseurs de services mobiles

La **5G** est une technologie de communication mobile à haut débit qui sert de réseau de réseaux. La compétence et l'expérience des opérateurs de réseau mobile dans la construction et l'exploitation des réseaux seront cruciales pour le succès de la **5G**.

En plus de fournir des services réseau, les opérateurs mobiles seront en mesure de créer et de gérer de nouveaux services **IOT**. L'établissement de réseaux **5G** tout en maintenant les réseaux **3G** et **4G** opérationnels représentera sûrement un nouveau défi pour les opérateurs en termes de capacité des fréquences sur le spectre, surtout si le volume énorme prévu sur l'**IOT** se réalise.

Les opérateurs de réseau mobile (**MNO**) devront demander puis exploiter un nouveau spectre sur la gamme de fréquences de **6 à 300 GHz**, ce qui nécessitera d'importants investissements dans l'infrastructure des réseaux. Pour atteindre l'objectif d'une latence de **1ms**, les réseaux **5G** nécessitent une connectivité pour la station de base via des fibres optiques [10].

Sur le plan économique, les réseaux **5G** devraient être capables de supporter des réseaux virtuels tels que les réseaux **LPLT** (Low Power Low Throughput) pour l'**IOT** à faible puissance. Contrairement à aujourd'hui, où les réseaux **LORA** répondent à ce besoin séparément de la **4G** [10].

I.7.7 Les avantages de la 5G

La **5G**, avec un débit dix fois plus élevé que la **4G**, ouvrira de nouvelles possibilités d'évolution et touchera une grande variété de secteurs elle permettra [10] :

- La modernisation des processus de production des entreprises, ce qui augmentera considérablement les profits.
- Les réseaux **5G** devraient également offrir une bande passante beaucoup plus large et supporter un plus grand nombre d'appareils.
- La réduction de la latence, qui passerait de **10** à **1ms**. Enfin, la **5G** devrait également permettre des connexions plus fiables, en particulier pour les objets connectés tels que les voitures autonomes ou les robots qui opèrent à distance dans les hôpitaux [10].

I.8 Futur des réseaux mobiles

I.8.1 6G et au-delà

La **6G**, qui succède à la **5G**, est la technologie de réseau mobile de sixième génération actuellement en phase de développement pour les communications sans fil sur les réseaux de données cellulaires. D'après le rapport « **6G The Next Hyper-Connected Experience for All** », l'UIT a commencé à travailler sur le développement de la **6G** en **2021** et devrait probablement terminer en **2028**, date à laquelle les premiers dispositifs **6G** seront disponibles. D'ici **2030**, la mise en œuvre de la **6G** sera presque omniprésente [11].

La vision de la **6G** est basée sur l'ambition de créer une réalité transparente où les mondes numérique et physique tels que nous les connaissons aujourd'hui sont fusionnés. Cette réalité future offrira de nouvelles manières de rencontrer et d'interagir avec d'autres personnes, de nouvelles opportunités de travailler de n'importe où et de nouvelles manières de découvrir des endroits et des cultures inconnues. En fournissant une communication intelligente omniprésente, la **6G** aidera à construire une société plus agréable, plus durable et plus efficace. [11]

I.8.2 A quoi ressemblera le monde avec la 6G ?

Nous envisageons un monde physique interconnecté et durable, à la fois digitalisé et programmable, où les humains sont soutenus par des machines intelligentes. Des exemples significatifs d'utilisation de la **6G** comprennent la santé en ligne accessible à tous, l'agriculture intelligente, la surveillance de la terre, le jumeau numérique, et la navigation des robots. Ces utilisations peuvent être regroupées sous trois grands scénarios : l'Internet des sens, les machines intelligentes connectées et un monde durable connecté [11].

De plus, avec la **6G**, il sera nécessaire de :

Exploiter le spectre libre : une part importante de la recherche sur la **6G** se focalise sur la transmission de données à des fréquences ultra-hautes. En effet, la **5G** peut supporter des fréquences allant jusqu'à **100GHz**, même si aucune fréquence supérieure à **39GHz** n'est actuellement utilisée. Pour la **6G**, les ingénieurs cherchent à transférer des données sur des ondes de l'ordre de centaines de gigahertz (**GHz**) ou de terahertz (**THZ**). Ces ondes sont minuscules et fragiles, mais il reste une quantité massive de spectre inutilisé qui pourrait permettre des vitesses de transfert de données impressionnantes [11].

Améliorer l'efficacité du spectre libre : les technologies sans fil existantes permettent la transmission ou la réception sur une fréquence spécifique en même temps. Pour une communication bilatérale, les utilisateurs peuvent diviser leurs flux en fonction de la fréquence (Frequency Division Duplex ou **FDD**) ou en définissant des périodes de temps (Time Division Duplex ou **TDD**). La **6G** pourrait améliorer l'efficacité de la distribution actuelle du spectre en

utilisant des mathématiques sophistiquées pour émettre et recevoir simultanément sur la même fréquence [11].

Tirer parti des réseaux maillés : l'installation de réseau maillé est une tendance depuis des décennies, mais les réseaux **5G** sont encore principalement basés sur une architecture en étoile « hub-and-spoke architecture ». Par la suite, les appareils des utilisateurs téléphones sont reliés à des nœuds d'ancrage (tours de téléphonie mobile), qui se connectent à un réseau fédérateur. La **6G** pourrait utiliser les machines comme amplificateurs des données des autres utilisateurs, permettant à chaque appareil d'étendre la couverture en plus de l'utiliser [11].

I.8.3 Nouvelles technologies pour les réseaux mobiles

I.8.3.1 VOIP : TÉLÉPHONER VIA INTERNET

La **VOIP**, acronyme de Voice Over Internet Protocol, représente une avancée majeure dans le secteur de la télécommunication moderne. Depuis l'avènement du téléphone mobile au milieu du 20^{ème} siècle, qui a inauguré une ère de généralisation de la communication vocale, cette technologie a progressivement supplanté les systèmes de télécommunication traditionnels, tels que les réseaux **RTC** basés sur des câbles en cuivre. La transition vers le numérique, avec la conversion des signaux vocaux en données numériques transmissibles via Internet, a marqué un tournant décisif [11].

La **VOIP** révolutionne actuellement la téléphonie d'entreprise en proposant une alternative plus abordable et flexible. Elle offre la possibilité de passer des appels internationaux à coût réduit, d'organiser des conférences audio ou vidéo multi-participants, et de gérer les communications de n'importe quel endroit via diverses interfaces, sans dépendre d'un numéro de téléphone fixe ou d'un appareil spécifique [12].

Grâce à sa capacité à faciliter une communication quasi-instantanée même dans les régions les plus reculées, dépourvues d'infrastructures téléphoniques traditionnelles, la **VOIP** s'impose comme une solution incontournable pour les entreprises, surtout dans un contexte où la production de lignes téléphoniques est abandonnée en raison de coûts de maintenance prohibitifs [12].

I.8.3.2 UWB : PLUS PERFORMANTE QUE LE BLUETOOTH

La prochaine génération de smartphones premium, y compris les modèles tels que l'**iPhone 14** et **15** ou le **Samsung Galaxy S24**, est prévue pour intégrer une technologie de pointe à ultra-large bande. Malgré sa relative obscurité auprès du grand public, on s'attend à ce que l'**UWB** devienne rapidement célèbre pour ses capacités supérieures. Le système se distingue par deux caractéristiques techniques principales : une vitesse élevée et une consommation énergétique minimale. Grâce à cette innovation, le partage de fichiers et de contenus multimédias entre appareils sera grandement simplifié [11].

Au-delà de ces avantages, l'**UWB** propose également une gamme de fonctionnalités pratiques qui pourraient se révéler cruciales. Alors que nos téléphones sont devenus des extensions de notre personne, cela ne s'applique pas aux autres objets essentiels de notre quotidien. À quelle fréquence avez-vous été en retard à un rendez-vous car vous ne trouviez pas vos clés ? Dotée d'un détecteur, la technologie **UWB** permet désormais de repérer avec précision les objets, à condition qu'ils soient munis d'une puce **UWB** et associés à une application dédiée à la localisation. Il sera même envisageable de munir sa voiture d'une antenne **UWB** pour la déverrouiller via son smartphone [11].

I.8.3.3 LES COMMUNICATIONS UNIFIÉES : UN MUST POUR LES ENTREPRISES

Pour les grandes structures, les petites et moyennes entreprises ainsi que les entités de grande envergure, l'adoption des systèmes de communication unifiée (UC) présente de nombreux avantages. Ces systèmes ambitionnent de centraliser divers moyens de communication (téléphonie fixe et mobile, **VOIP**, conférences audio et vidéo, courriels, messagerie instantanée, réseaux sociaux, etc.) au sein d'une interface unique, en prenant en compte les interactions et la collaboration des utilisateurs. L'objectif est de rationaliser les processus internes, d'économiser du temps, de renforcer la collaboration à distance, d'accroître la productivité et de soutenir la mobilité professionnelle [12].

L'interface de communication unifiée offre un accès centralisé à tous ces canaux depuis n'importe quel dispositif connecté à Internet (téléphone mobile, ordinateur, tablette, etc.),

éliminant le besoin de télécharger et configurer de multiples applications ou de retenir des identifiants pour chaque dispositif. Cette centralisation facilite l'accès aux informations, la gestion de multiples tâches, la conduite d'appels ou le travail à distance, indépendamment de la localisation géographique [12].

Actuellement, les entreprises peuvent choisir parmi une variété d'offres de communication unifiée, chacune proposant une gamme de prix différente. Les fonctionnalités accessibles varient selon le plan sélectionné. Les solutions UC modernes sont conçues pour être évolutives, permettant aux entreprises d'ajouter de nouvelles fonctionnalités au fur et à mesure de leur développement [12].

I.9 Impact des réseaux mobiles sur la société

L'influence des technologies de communication mobile (**1G, 2G, 3G, 4G et 5G**) sur notre société est indéniable. Voici quelques aspects importants :

I.9.1 Évolution de la Communication :

Le passage de la **1G** à la **5G** a considérablement augmenté la rapidité des transferts de données, la qualité des appels et la capacité à gérer une multitude d'applications et de services gourmands en données, modifiant ainsi notre manière de communiquer et d'utiliser les dispositifs mobiles [12].

I.9.2 Conséquences Économiques :

D'un point de vue économique, la **5G** devrait contribuer à la production industrielle dans six pays jusqu'en **2030**, pour un montant estimé à **416 milliards** d'euros. En termes d'emploi, les nouvelles infrastructures réseau devraient générer plus d'un million de postes [13].

I.9.3 Répercussions Environnementales :

L'arrêt des réseaux mobiles **2G/3G** et le transfert de leurs services vocaux vers la **4G/5G** ont un impact carbone tout au long du cycle de vie des réseaux et des appareils concernés [14] [15].

I.9.4 Effets sur la Santé :

En ce qui concerne la **5G**, il est peu probable que son déploiement dans la bande de fréquences autour de **3,5 GHz** présente actuellement de nouveaux risques pour la santé.

Il est crucial de souligner que l'impact des réseaux mobiles peut varier en fonction de l'utilisation personnelle et des pratiques de gestion de la confidentialité. Il est donc primordial d'utiliser ces outils de manière responsable [15].

I.10 Conclusion

La **5G**, également connue sous le nom de cinquième génération, représente la prochaine étape dans l'évolution des technologies mobiles dont le déploiement est sur le point de commencer. Elle se compose d'un ensemble de techniques de transmission d'information conçues pour offrir une vitesse et un temps de latence extrêmement faibles, ce qui permettra l'émergence de nouveaux services et l'amélioration des systèmes actuels.

La **5G** est également censée favoriser de nombreuses innovations, comme la prise en charge de la connectivité de tous les véhicules autonomes et connectés, ainsi que la facilitation du développement de la santé numérique.

Dans le chapitre suivant, qui est une progression naturelle de notre travail, nous présenterons l'architecture du réseau **5G NR** et ses principaux composants, tout en donnant un aperçu général de leur couche physique.

Chapitre II: 5^{ème} Génération New Radio.

II.1 Introduction

La **5G NR** (Nouvelle Radio) est une norme de réseau sans fil qui fait partie intégrante de la technologie **5G**. Son objectif principal est d'augmenter considérablement les vitesses de transmission de données, de réduire de manière importante la latence et d'améliorer l'efficacité énergétique par rapport aux générations précédentes de technologie. Cette innovation a le potentiel de révolutionner le secteur des télécommunications mobiles en offrant une amélioration substantielle de l'expérience utilisateur.

II.2 Principes de base de la technologie radio 5G

Ce passage met en lumière les principes et les éléments essentiels de la **5G NR**. Il commence par une introduction concise de la **5G NR**, en anticipant ses applications à venir et en abordant les éléments clés de sa structure. Il poursuit avec une explication des canaux physiques spécifiques à la **NR**. Il examine ensuite la diffusion de signaux à travers plusieurs antennes, en se concentrant sur des techniques comme le beamforming et le **MIMO** à grande échelle. Pour finir, il aborde la communication de données utilisant les bandes de fréquence millimétrique propres à la **5G** [16].

II.3 Nouvelle radio 5G (NR)

La **5G New Radio (5G NR)**, dernière avancée en matière de technologie d'accès sans fil, est issue des récentes initiatives du **Third-Generation Partnership Project (3GPP)**. Elle est conçue pour répondre à une variété de scénarios d'utilisation qui émergent avec le progrès continu des technologies mobiles [16].

En comparaison avec la **LTE**, la précédente génération de technologie d'accès radio, la **5G NR** offre plusieurs améliorations significatives :

- Elle utilise des spectres de fréquence plus élevés, ce qui permet d'augmenter la largeur de bande et d'accélérer le débit des données.
- Son architecture sophistiquée améliore l'efficacité énergétique du réseau et diminue les interférences en limitant les transmissions ininterrompues.

- Elle supporte une variété d'intervalles de sous-porteuses pour une plus grande flexibilité.
- Elle est conçue pour être évolutivement compatible, facilitant l'intégration future de services innovants encore inconnus.
- Elle réduit la latence pour une performance réseau améliorée.
- Son architecture est centrée sur le **beamforming**, ce qui encourage l'utilisation intensive de la formation de faisceaux et le déploiement à grande échelle d'antennes, aussi bien pour la transmission de données que pour la gestion du réseau.

Cette section traite des concepts clés et de la terminologie spécifique à la technologie **5G NR**.

II.3.1 Promesses attendues de la 5G

Avec son éventail d'applications innovantes, il est un moteur clé de l'innovation. L'**UIT-R** a défini trois scénarios d'utilisation inclus dans la recommandation Vision **IMT [9]**. Les apports du secteur de la téléphonie mobile, ainsi que ceux de diverses entités régionales et opérateurs, ont été intégrés dans le cadre du processus **IMT-2020** au sein **l'UIT-R**, et se résument en trois scénarios :

- **eMBB (Enhanced Mobile Broadband)** : Le haut débit mobile, pilier actuel des réseaux **3G** et **4G**, est envisagé dans ce scénario comme ayant une importance croissante. Avec une demande en hausse et l'émergence de nouvelles applications, de nouveaux standards sont établis pour ce que l'**UIT-R** appelle le haut débit mobile amélioré. En raison de son usage généralisé, il couvre divers besoins avec des défis spécifiques, incluant des points d'accès pour des débits de données et une densité d'utilisateurs élevés, ainsi qu'une capacité accrue, tandis que la couverture étendue se concentre sur la mobilité et une expérience utilisateur optimale, avec des besoins moindres en termes de débit de données et de densité d'utilisateurs. Le scénario **eMBB** est principalement orienté vers la communication humaine [9].
- **URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications)** : Ce scénario vise à répondre aux besoins de communication tant humains que machiniques, ces derniers étant souvent qualifiés de communication machine critique (**C-MTC**). Il se caractérise par des applications nécessitant une faible latence, une haute fiabilité et une disponibilité constante.

Par exemple, la communication entre véhicules pour la sécurité, le contrôle à distance d'équipements industriels, la chirurgie médicale à distance et l'automatisation de la distribution dans les réseaux intelligents. Un exemple d'application centrée sur l'humain serait le jeu en 3D et l'Internet tactile, où la faible latence est également associée à des débits de données très importants [9].

- **mMTC (Massive Machine Type Communications)** : Ce scénario, orienté machine, se distingue par le nombre élevé de dispositifs connectés, tels que capteurs, gadgets portables et appareils **IoT**. Ces dispositifs, peu gourmands en énergie et économiques, génèrent et consomment peu de données, rendant le support de hauts débits de données secondaire. C'est un composant crucial de la technologie **5G**, permettant une connectivité étendue pour les appareils **IoT**. La Figure II.1 représente ces scénarios d'utilisation. Bien qu'ils ne couvrent pas toutes les applications potentielles, ils regroupent une majorité des usages envisagés actuellement. Ainsi, ils contribuent à définir les compétences fondamentales nécessaires pour la technologie de l'interface radio de nouvelle génération pour **IMT-2020**. Il est probable que de nouvelles applications apparaissent, que nous ne pouvons ni prévoir ni décrire avec précision à ce jour. Cela signifie également que la nouvelle interface radio doit être suffisamment adaptable pour accueillir de nouvelles applications et répondre à l'éventail de compétences clés envisagées, si les exigences évoluent avec les applications [16].

Large bande mobile améliorée

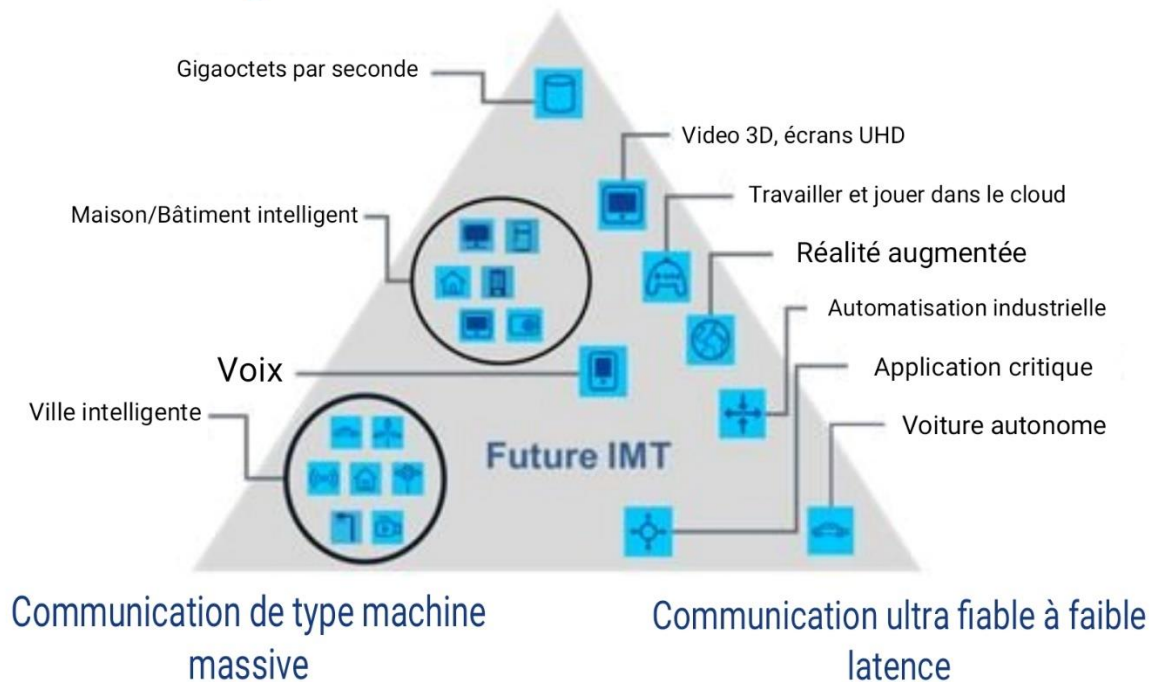


Figure II.1 IMT-2020 utiliser des cas et cartographier des scénarios d'utilisation.

II.3.2 Exigences techniques et bandes de fréquences

Dans le cadre du processus de normalisation de la **5G**, l'**UIT-R**, le secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (**UIT**), responsable de garantir une utilisation efficace du spectre **RF**, a publié l'International Mobile Télécommunications-2020 (**IMT-2020**), une série de conditions pour les réseaux **5G**. Le tableau suivant présente les conditions minimales relatives aux performances techniques des interfaces radioélectriques **IMT-2020**, qui sont fondées sur un ensemble de capacités requises pour supporter les cas d'utilisation et les scénarios d'utilisation de la **5G**.

Paramètre	Exigence de performance technique minimale
Débit de données maximal	Liaison descendante : 20 Gbit/s Liaison montante : 10 Gbit/s
Efficacité spectrale maximale	Liaison descendante : 30 bit/s/Hz Liaison montante : 15 bit/s/Hz
Débit de données utilisateur	Liaison descendante : 100 Mbit/s Liaison montante : 50 Mbit/s
Capacité de trafic régional	10 Mbps/m² (hot spot intérieur pour eMBB)
Latence du plan utilisateur	4 ms pour eMBB 1 ms pour URLLC
Contrôle de la latence du plan	20 ms
Densité de connexion	1 000 000 d'appareils par km²
Efficacité énergétique	Transmission de données efficace dans un boîtier chargé Faible consommation d'énergie en l'absence de données Taux de sommeil élevé Longue durée de sommeil
Fiabilité	Probabilité de réussite de 1-10 ⁻⁵ pour la transmission d'une PDU de couche 2 de 32 octets en 1 ms , au bord de la couverture dans Urban Macro pour URLLC

Mobilité	1,5 bit/s/Hz à 10 km/h pour hotspot intérieur eMBB 1,12 bit/s/Hz à 30 km/h pour les eMBB urbains denses 0,8 bit/s/Hz à 120 km/h pour les eMBB ruraux 0,45 bit/s/Hz à 500 km/h pour les eMBB ruraux
Temps d'interruption de la mobilité	0 ms
Bande passante	Au moins 100 MHz et jusqu'à 1 GHz en fréquence plus élevée bandes. La bande passante évolutive doit être prise en charge

Tableau II.1 Exigences minimales de performances techniques pour les **IMT-2020**

L'implémentation du **NR** s'effectue sur une variété de bandes de fréquences, définies par le **3GPP** dans le cadre de la Release en fonction des restrictions **RF** (par exemple, la puissance d'émission maximale), ces bandes sont divisées en deux groupes de fréquences :

Voici la reformulation demandée :

- **Catégorie de fréquences 1 (CF1)** : inclut l'ensemble des gammes de fréquences actuelles et futures situées en dessous de **6 GHz**.
- **Catégorie de fréquences 2 (CF2)** : englobe les gammes de fréquences récemment établies entre **24,25 et 52,6 GHz** [17].

En outre, le **3GPP** a défini les bandes de fréquences utilisées, qui correspondent à divers intervalles de fréquences pour les transmissions montantes et descendantes.

Bande de fonctionnement NR	Portée de liaison montante (MHz)	Gamme de liaison descendante (MHz)	Duplex
Gamme de fréquences 1 (FR1)			
n1	1920–1980	2110–2170	FDD
n2	1850–1910	1930–1990	FDD
n3	1710–1785	1805–1880	FDD
n5	824–849	869–894	FDD
n7	2500–2570	2620–2690	FDD
n8	880–915	925–960	FDD
n12	699–716	729–746	FDD
n20	832–862	791–821	FDD
n25	1850–1915	1930–1995	FDD
n28	703–748	758–803	FDD
n34	2010–2025	2010–2025	TDD
n38	2570–2620	2570–2620	TDD
n39	1880–1920	1880–1920	TDD
n40	2300–2400	2300–2400	TDD
n41	2496–2690	2496–2690	TDD
n50	1432–1517	1432–1517	TDD
n51	1427–1432	1427–1432	TDD
n66	1710–1780	2110–2200	FDD
n70	1695–1710	1995–2020	FDD
n71	663–698	617–652	FDD
n74	1427–1470	1475–1518	FDD
n75	N/A	1432–1517	SDL
n76	N/A	1427–1432	SDL
n77	3300–4200	3300–4200	TDD
n78	3300–3800	3300–3800	TDD
n79	4400–5000	4400–5000	TDD
n80	1710–1785	N/A	SUL
n81	880–915	N/A	SUL
n82	832–862	N/A	SUL
n83	703–748	N/A	SUL
n84	1920–1980	N/A	SUL
n86	1710–1780	N/A	SUL
Gamme de fréquences 2 (FR2)			
n257	26500–29500	26500–29500	TDD
n258	24250–27500	24250–27500	TDD
n260	37000–40000	37000–40000	TDD
n261	27500–28350	27500–28350	TDD

Tableau II.2 Bandes de fonctionnement NR [17]

II.3.3 Numérologie

La technologie NR utilise un cadre de trame flexible, offrant divers écarts de sous-porteuses (SCS). Le SCS représente l'intervalle entre les centres de deux sous-porteuses adjacentes et peut prendre les valeurs suivantes en (kHz) : **15, 30, 60, 120**, et **240**, ce qui est désigné par l'expression « chiffres multiples ». Un ensemble ininterrompu de 12 sous-porteuses forme ce que l'on appelle un bloc de ressources (RB). La largeur de bande d'un canal NR se compose d'une quantité déterminée de RB. Par ailleurs, un élément de ressource (RE) est caractérisé comme l'association d'une sous-porteuse (dans le domaine fréquentiel) et d'un symbole OFDM (dans le domaine temporel). [18]

En ce qui concerne le domaine temporel, il est divisé en trames radio de **10 ms**, chacune composée de **10** sous-trames de **1 ms**, comme illustré dans l'image ci-dessous.

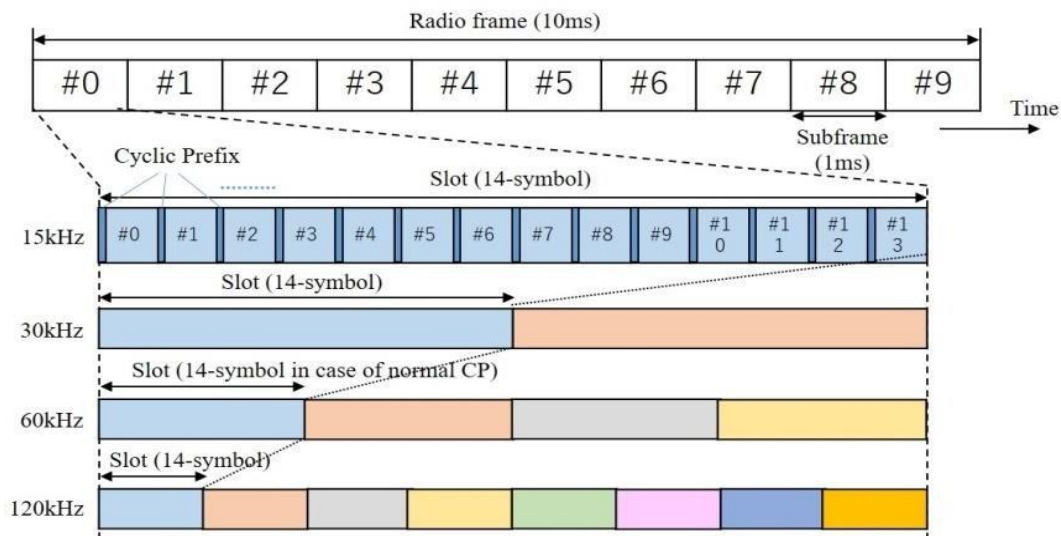


Figure II.2 Structure de trame en NR [18]

Chaque sous-trame, à son tour, se compose de **1, 2, 4, 8** ou **16** intervalles (illustrés par différentes teintes) selon la SCS ou la numérologie sélectionnée. L'image illustre les scénarios pour les SCS de **15, 30, 60** et **120 kHz**, alors que le tableau associé détaille la gamme complète des valeurs utilisables dans NR. Pour l'exemple de **15 kHz** montré dans l'illustration, on

observe que chaque intervalle inclut **14 symboles OFDM** (ceci est constant quel que soit le SCS) et est introduit par un préfixe cyclique (CP) [18].

préfixe cyclique	espacement des sous-porteuses(SCS) [kHz]	Nombre des sous-trames par trame radio	Nombre emplacements par sous-trame	Nombre de symbole OFDM par emplacement	Plage de fréquence applicable
Normal	15	10	1	14	FR1
Normal	30	10	2	14	FR1
Normal	60	10	4	14	FR1 and FR2
Élargie	60	10	4	12	FR1 and FR2
Normal	120	10	8	14	FR2
Normal	240	10	16	14	FR2

Tableau II.3 Numéro logies multiples dans NR [18]

Pour un SCS de **60 kHz**, l'adoption d'un CP allongé est possible. Ce CP allongé est presque quadruple en longueur par rapport au CP normal et s'applique aux cellules avec des retards de propagation significatifs. Dans cette configuration, une fente contient uniquement **12** symboles OFDM.

La durée d'un symbole OFDM et la dimension du CP varient inversement avec le SCS. À titre d'exemple, avec un SCS de **15 kHz**, un symbole OFDM dure approximativement **66,6 µs** et le CP mesure environ **4,7 µs**. Si le SCS augmente à **30 kHz**, la durée des symboles OFDM et la longueur du CP sont réduites de moitié par rapport à celles du SCS de **15 kHz**.

La NR prend en charge les modes FDD et TDD en utilisant la même configuration de trame. Pour le TDD, afin de s'adapter de manière flexible au trafic, chaque symbole OFDM d'une fente peut être désigné comme « downlink », « uplink », ou « flexible » (pouvant être downlink ou uplink). Cette configuration peut être ajustée de façon semi-statique ou varier dynamiquement selon les décisions de planification.

Les transmissions se font habituellement sur une fente entière. Cependant, dans certains cas particuliers, elles peuvent se limiter à une partie d'une fente, avec un minimum de deux

symboles. Ces transmissions éphémères sont conçues pour des applications exigeant une faible latence, comme certains services **URLLC** (Ultra Reliable Low Latency). [18]

Paramètre / Numérologie (u)	0	1	2	3	4
Escapement des sous-porteuses (KHz)	15	30	60	120	240
Durée du symbole OFDM (us)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
Durée du préfixe cyclique (us)	4.69	2.34	1.17	0.57	0.29
Symbole OFDM incluant CP (us)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46

Tableau II.4 Durée du symbole OFDM [18]

II.3.4 Structure de trame

Les cadres de synchronisation **5G** constituent la base de l'alignement des signaux physiques. Le timing est adapté pour divers éléments de la couche physique, notamment :

- L'émission de séquences de données.
- La diffusion de symboles.
- La synchronisation elle-même.

Les cadres de synchronisation **5G** fournissent un cadre fixe et universel pour la synchronisation de l'émission des séquences de données. Les trames et les sous-trames radio ont des longueurs déterminées, comme illustré dans la figure II.3.

Ces longueurs sont choisies pour correspondre à celles utilisées dans **LTE**, favorisant ainsi une intégration harmonieuse entre **LTE** et **NR**. Lorsque les systèmes sont co-localisés, il est possible d'aligner les structures de déploiement, de secteur et de trame pour faciliter la détection des cellules et les mesures entre différentes fréquences. Cette méthode permet aussi de coordonner les signaux de contrôle et les canaux temporels pour prévenir les interférences croisées entre **LTE** et **NR**. [16]

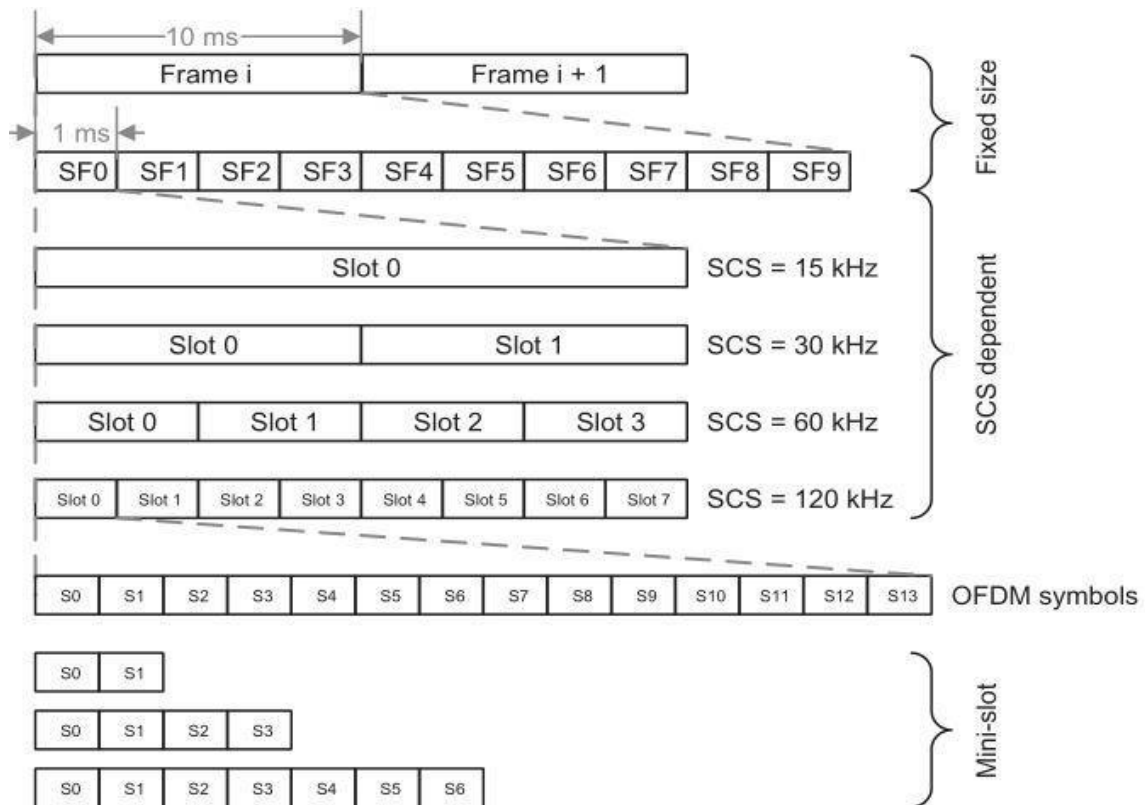


Figure II.3 structure générale de trame pour différentes numéologies

Pour administrer diverses configurations numériques sans dépendre de la synchronisation de l'échange de blocs de données, les architectures de trame de la **5G** incluent des sous-structures flexibles qui permettent de réguler la cadence de transmission des symboles. La durée des intervalles et des symboles peut varier et est fonction de l'intervalle entre les sous-porteuses (voir figure II.3). La cadence de synchronisation est établie selon des structures de trame prédéfinies ainsi que des séquences de signaux de synchronisation et leurs groupements.

II.3.5 Modèles de duplex

La **5G NR** est conçue pour être compatible avec le **duplexage par répartition en fréquence (FDD)** pour les gammes de fréquences inférieures et le **duplexage par répartition temporelle (TDD)** pour les gammes supérieures, selon qu'elle opère en mode semi-duplex ou en duplex intégral.

Dans un contexte **TDD**, une fréquence unique est utilisée pour les transmissions en liaison montante et descendante. La **NR** tire parti du **TDD** dynamique, où une période peut être allouée de façon dynamique à la liaison montante ou descendante selon les directives de l'ordonnanceur. Les systèmes **TDD** disposent d'une période de garde étendue durant laquelle aucune transmission n'est effectuée, ni en montée ni en descente, ce qui permet de changer la direction de la transmission et de réduire les interférences au niveau de la station de base [19].

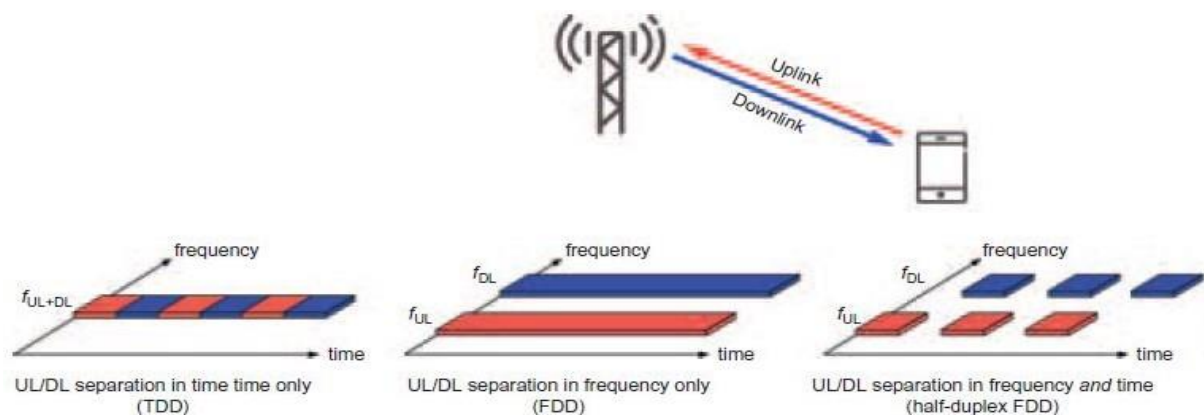


Figure II.4 Schémas duplex 5G NR

II.3.6 La couche physique NR

L'infrastructure protocolaire de la **5G NR** se scinde en deux volets : le plan de contrôle et le plan de données. Le plan de données s'occupe de la gestion des informations utilisateur, tandis que le plan de contrôle est dédié à l'établissement des connexions, à la gestion de la mobilité et à la sécurisation des échanges.

La structure protocolaire du plan de données est constituée de plusieurs couches distinctes, à savoir : la couche physique (**PHY**), la couche de contrôle d'accès au support (**MAC**), la couche de contrôle de liaison radio (**RLC**), la couche de protocole de convergence de données de paquets (**PDCP**) et la couche de protocole d'adaptation de données de service (**SDAP**). Chacune de ces couches remplit des fonctions précises. La couche **PHY**, en particulier, prend en charge les opérations de codage et de décodage, de modulation et de démodulation, le traitement des signaux pour les systèmes multi-antennes, ainsi que l'assignation des signaux aux ressources physiques dans l'espace-temps-fréquence.

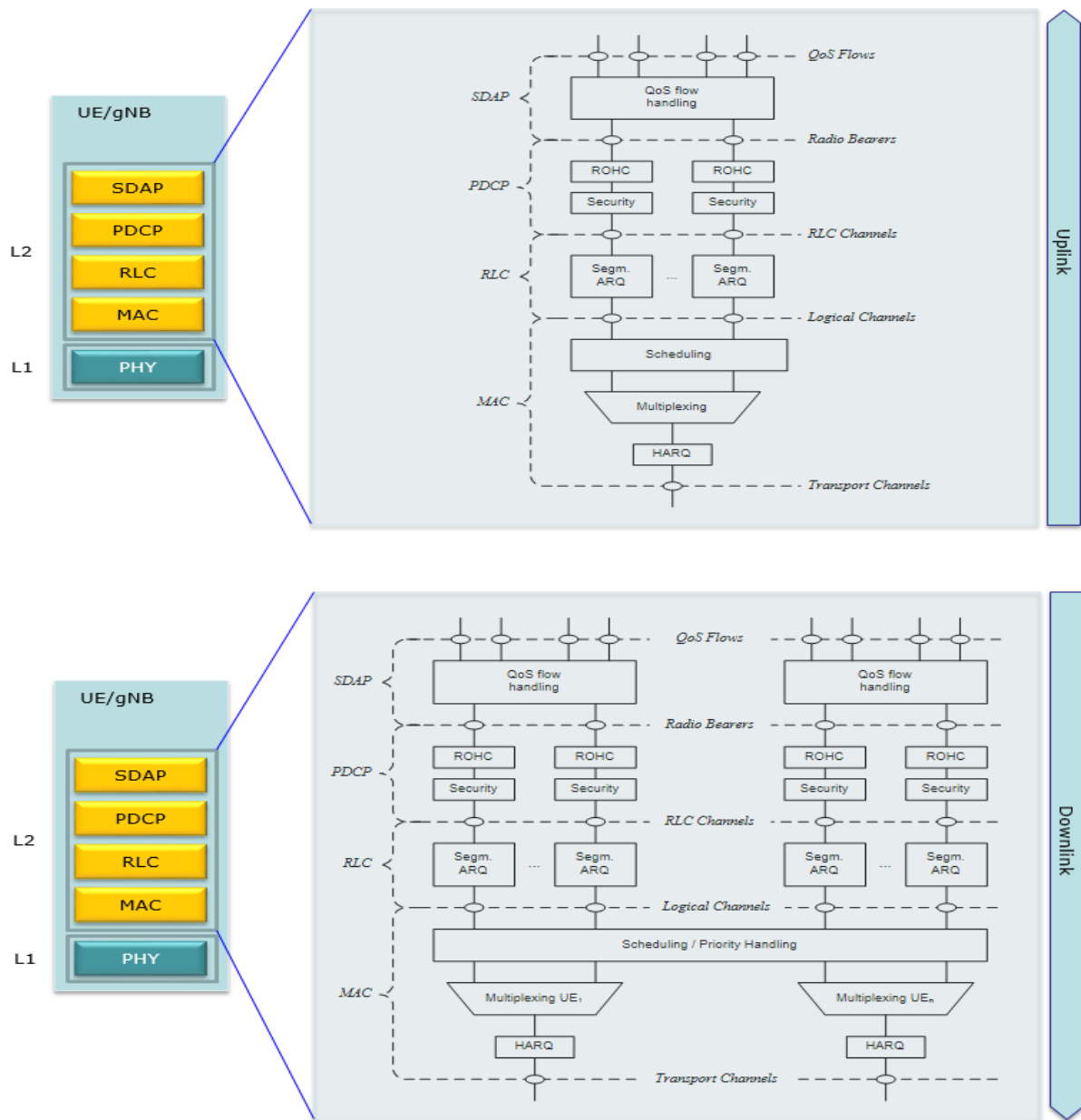


Figure II.5 Pile de protocoles du plan utilisateur NR [20]

Les ressources de temps-fréquence qui véhiculent des informations des couches supérieures (au-dessus de PHY) sont nommées canaux physiques [21].

Les canaux physiques spécifiés pour la Nouvelle Radio (NR) sont les suivants [22] :

- **PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)** : Ce canal principal transmet les données en mode unicast, gère les informations de pagination et diffuse certaines informations systémiques [22].
- **PBCH (Physical Broadcast Channel)** : Ce canal transmet des informations systémiques essentielles à l'accès réseau par les appareils [22].
- **PDCCH (Physical Downlink Control Channel)** : Ce canal véhicule les informations de contrôle pour la liaison descendante, incluant les décisions de planification pour la réception du **PDSCH** et les autorisations pour la transmission sur le **PUSCH** [22].
- **PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)** : C'est l'équivalent en liaison montante du **PDSCH** [22].
- **PUCCH (Physical Uplink Control Channel)** : Les appareils utilisent ce canal pour transmettre des accusés de réception **ARQ** hybrides, des rapports d'état de canal et des demandes de ressources pour la transmission de données en liaison montante [22].
- **PRACH (Physical Random Access Channel)** : Utilisé par les équipements utilisateurs (UE) pour initier une demande de connexion, connue sous le nom d'accès aléatoire [22] .

La communication en liaison descendante et montante entre le **gNB** (nœud du réseau d'accès radio) et l'**UE** se déroule comme suit : En liaison descendante, l'**UE** surveille le **PDCCH** à intervalles réguliers. Après avoir détecté un **PDCCH** valide, l'**UE** reçoit un bloc de transport sur le **PDSCH**, basé sur la planification décidée par le **gNB**. L'**UE** envoie ensuite un accusé de réception **ARQ** hybride pour confirmer la réception correcte des données. En liaison montante, l'**UE** demande au **gNB** des ressources de temps-fréquence pour la transmission de données via le **PUCCH**. Le **gNB** répond en accordant l'autorisation sur le **PDCCH**, permettant à l'**UE** d'utiliser des ressources spécifiques pour la transmission. L'**UE** procède alors à la transmission de données sur le **PUSCH**, qui sont reçues par le **gNB** et suivies d'un accusé de réception **ARQ** hybride.

Les signaux physiques, quant à eux, représentent un ensemble de ressources de temps-fréquence allouées par la couche **PHY**, sans porter d'informations des couches supérieures. Ils servent de signaux de référence pour la démodulation, l'estimation de canal, la synchronisation et la mesure de l'état du canal. Les signaux physiques en liaison descendante comprennent :

- **DM-RS (Demodulation Reference Signal)**
- **PT-RS (Phase Tracking Reference Signal)**
- **CSI-RS (Channel State Information Reference Signal)**
- **PSS (Primary Synchronization Signal)**
- **SSS (Secondary Synchronization Signal)**

Pour la liaison montante, les signaux physiques incluent :

- **DM-RS (Demodulation Reference Signal)**
- **PT-RS (Phase Tracking Reference Signal)**
- **SRS (Sounding Reference Signal)**

Le **PSS** et le **SSS** sont spécifiquement utilisés dans le processus de recherche de cellule par l'UE pour identifier une nouvelle cellule, avec le **PSS** comme premier signal recherché et le **SSS** permettant la détection de l'identifiant unique de la cellule au niveau physique [22].

Enfin, le **3GPP** définit des mesures spécifiques de la couche physique, telles que la **SS-RSRP (Secondary Synchronization Signal Received Power)**, qui est la moyenne linéaire des contributions de puissance des éléments de ressource portant le **SSS** [22].

II.4 Transmission multi-antenne

L'exploitation de la technologie **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) massive et de la technique de beamforming est cruciale pour la **5G NR**, car elle contribue significativement à l'optimisation des systèmes de communication mobiles. L'usage de multiples antennes sur l'émetteur permet de contrer l'affaiblissement du signal en tirant parti de la faible corrélation entre les antennes, due soit à leur espacement, soit à leur polarisation distincte. En modulant la

phase de chaque antenne, il est possible de diriger la transmission énergétique vers une zone ciblée, ce qui est le principe de la formation de faisceaux, une application particulière du **MIMO**. Cette focalisation de l'énergie peut non seulement accroître le débit de données et la portée du signal, mais aussi diminuer les interférences, améliorant ainsi l'efficacité spectrale. La diversité de réception est assurée par l'installation de multiples antennes sur le récepteur, qui se concentrent sur le signal souhaité tout en supprimant les interférences venant d'autres directions. L'utilisation conjointe de plusieurs antennes sur l'émetteur et le récepteur permet le multiplexage spatial, autorisant la transmission simultanée de divers flux d'informations sur les mêmes fréquences et intervalles de temps [23].

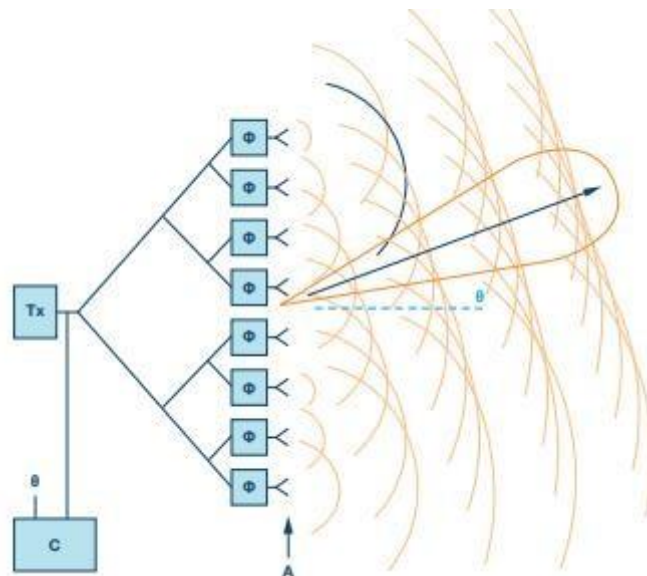


Figure II.6 Antenne réseau à commande de phase [23]

Les réseaux d'antennes, tels que ceux illustrés dans les schémas, comportent une multitude de petites antennes qui peuvent être utilisées pour orienter le faisceau en modifiant la phase des signaux de chaque élément d'antenne individuellement. Cette technique peut être appliquée tant au niveau de l'émetteur qu'au niveau du récepteur. L'utilisation de faisceaux concentrés améliore le rapport signal-sur-bruit (SNR) pour l'équipement utilisateur (UE), ce qui renforce la qualité de la connexion et permet l'emploi de techniques de modulation et de codage plus avancées.

La distance entre les éléments d'antenne est relative à la longueur d'onde, permettant ainsi aux réseaux d'antennes d'être particulièrement compacts à des fréquences plus élevées. Le

réseau d'antennes montré, qui cible la bande des **28 GHz**, est composé de **64** éléments à double polarisation. Pour donner une idée de la dimension du réseau, une pile de type **AAA** est placée à côté à titre de comparaison [24].



Figure II.7 Panneau d'antenne à double polarisation. [24]

D'une perspective différente, selon le volume d'utilisateurs, on peut envisager divers arrangements d'antennes multiples : soit le **MIMO** dédié à un seul utilisateur (**SU-MIMO**) pour le multiplexage spatial, soit le **MIMO** pour plusieurs utilisateurs (**MU-MIMO**). Avec le **SU-MIMO**, un utilisateur unique est assigné à une tranche de temps/fréquence déterminée, permettant la transmission simultanée de nombreuses strates de données (jusqu'à 8). En d'autres termes, un équipement utilisateur (**UE**) peut recevoir jusqu'à 8 signaux distincts de la station de base en downlink. Cette méthode est optimale pour les utilisateurs situés au centre de la cellule qui bénéficient de conditions de rapport signal sur interférence plus bruit (**C(I+N)**) adéquates pour booster le débit de données. Dans le cas du **MU-MIMO**, plusieurs utilisateurs sont affectés en même temps à une ressource temps/fréquence identique, mais avec un nombre restreint de strates spatiales par **UE** programmé, limité ici à **4** au maximum. À l'inverse du **SU-MIMO**, qui limite l'avantage du multiplexage spatial à un seul utilisateur, le **MU-MIMO** permet à plusieurs **UEs** co-programmés de tirer parti de cet avantage. Un atout majeur du

MU-MIMO réside dans la simplification potentielle des circuits des **UEs**, car un seul **UE** aurait besoin d'une unique antenne pour jouir des bénéfices. C'est l'opposé du **SU-MIMO**, qui ne procure des avantages significatifs qu'avec l'utilisation de plusieurs antennes sur le dispositif de l'utilisateur. Dans le cadre de la **5G NR**, l'ensemble de ces avantages liés aux configurations **MIMO** peut être mis à profit à plus grande échelle grâce à l'emploi de centaines, voire de milliers d'antennes sur la station de base. Cela correspond au concept de **MIMO** massif, tel qu'illustré dans la Figure II.8. Un nombre accru d'antennes se traduit par des bénéfices accrus tels qu'un gain amplifié, un meilleur rapport signal sur bruit, une couverture étendue, une capacité accrue, des débits de données supérieurs et une latence diminuée, comparative ment aux systèmes **MIMO** classiques qui comportent moins d'antennes. [25]

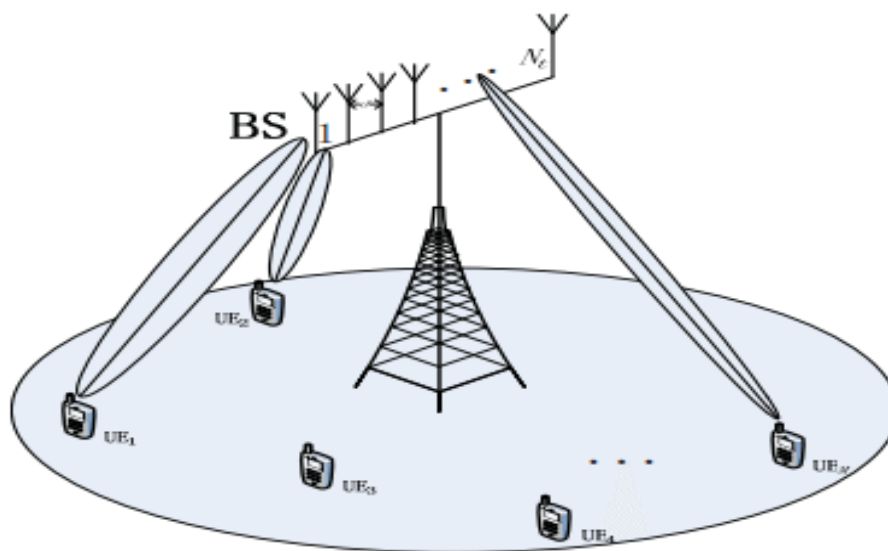


Figure II.8 Schéma MIMO massif [26]

II.5 Communications par ondes millimétriques

NR est capable d'opérer à des fréquences qui dépassent **24,25 GHz**, ce qui correspond à la bande de fréquence **2 (FR2)**. On appelle aussi cette bande de fréquence les ondes millimétriques (**mmWave**).

L'attrait principal de l'utilisation des **mmWave** réside dans l'abondance de spectre disponible dans ces bandes de fréquences élevées. Alors que les bandes de fréquences inférieures à **6 GHz** offrent des largeurs de bande de canal jusqu'à **100 MHz**, la bande **mmWave** propose des largeurs de bande bien plus importantes, de **500 MHz** voire **1GHz** [27]

Ces fréquences sont supposées supporter des débits de données de l'ordre du **Gbps**, cependant, à cause de leur haute fréquence, les **mmWave** rencontrent des défis importants, tels qu'une perte de trajet importante, un effet d'obstruction accru dû à des trajets non en ligne de vue plus faibles et une atténuation due à la pluie et à l'absorption atmosphérique.

On sait que la perte de trajet en espace libre dépend du carré de la fréquence porteuse fc^2 . Ainsi, par exemple, augmenter la fréquence de **3 GHz** à **30 GHz**, ajoutera une perte de puissance de **20 dB**, quelle que soit la distance entre l'émetteur et le récepteur [28]

Avec les petites longueurs d'onde, la bande **mmWave** est sensible au blocage par des obstacles d'une taille nettement plus grande que la longueur d'onde (par exemple le corps humain). Des études ont montré que le corps humain peut atténuer les signaux **mmWave** jusqu'à **35 dB** [29]

En outre, les signaux **mmWaves** sont influencés par plusieurs facteurs atmosphériques. Par exemple, les précipitations de pluie, car les gouttes de pluie ont une taille approximativement équivalente aux longueurs d'onde ; l'interaction avec les molécules de gaz comme l'oxygène, le dioxyde d'azote et la vapeur d'eau présents dans l'atmosphère ; et la perte de puissance due à l'obstruction par le feuillage causée par la végétation et les effets de la dispersion multi path, de la diffraction et de la réflexion [30]

Cependant, des technologies comme le **MIMO** massif et la formation de faisceaux, qui utilisent des centaines d'éléments d'antenne, offrant ainsi des gains élevés, aident à surmonter les pertes de trajet élevées et les blocages. [31]

II.6 Conclusion :

Effectivement, la **5G NR** représente un jalon crucial dans le progrès des technologies de communication sans fil. Elle surpasse largement les performances des réseaux mobiles des générations précédentes, en particulier en ce qui concerne le débit de données, la latence, la fiabilité et la capacité.

La **5G NR** emploie des techniques sophistiquées telles que le beamforming et le **MIMO** massif pour accroître la capacité du réseau et améliorer la qualité du signal. Elle est également compatible avec un éventail plus large de fréquences, y compris les bandes de fréquences millimétriques, ce qui permet d'accroître davantage le débit de données.

Par ailleurs, la **5G NR** est conçue pour prendre en charge une diversité d'applications et de services. Par exemple, elle peut favoriser des applications de réalité augmentée et de réalité virtuelle plus immersives, faciliter l'évolution de la voiture autonome, et permettre l'Internet des objets à grande échelle.

En résumé, la **5G NR** est une technologie prometteuse qui a le potentiel de modifier radicalement notre manière de communiquer et d'interagir avec le monde numérique. Elle ouvre la porte à de nouvelles possibilités technologiques et pourrait avoir un impact significatif sur divers secteurs, de l'industrie à la santé, en passant par l'éducation et les loisirs. C'est une technologie à suivre attentivement dans les années à venir.

Chapitre III: Optimisation de la Planification de Réseaux Mobiles 5G.

III.1 Introduction

Le déploiement de la technologie **5G** a ouvert la porte à des défis et des opportunités inédites pour les opérateurs de téléphonie mobile. Avec une demande croissante pour des connexions mobiles à la fois rapides et stables, il devient crucial de développer et d'affiner l'architecture réseau pour répondre à ces exigences. C'est dans ce contexte que des logiciels de simulation, tels que la version récente d'Atoll 3.4.0, qui supporte la conception de réseaux de nouvelle génération, se révèlent essentiels pour leur conception et leur amélioration [32].

Le présent chapitre expose la procédure de simulation et les conclusions d'une étude menée avec Atoll sur la conception de réseaux **5G NR**. L'objectif de cette recherche était d'analyser la capacité du réseau dans différents scénarios et d'identifier les potentialités d'optimisation. Pour cela, les simulations ont utilisé une variété de modèles de propagation, des configurations de trafic diversifiées et des tactiques de gestion de capacité [32].

On y décrit également les principales caractéristiques d'Atoll et les réglages appliqués concernant les calculs radioélectriques, les modèles de propagation, ainsi que la gestion du trafic et de la capacité pour les réseaux **5G NR**. Ces réglages ont été employés pour les analyses réalisées dans les sections antérieures et doivent être considérés de manière continue, sauf mention contraire. Il convient de souligner que la majorité des données exposées dans ce chapitre sont issues du guide d'utilisation d'Atoll [32].

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

Atoll est une solution développée par Forsk pour la conception et l'amélioration des réseaux sans fil. Elle est compatible avec un éventail de technologies radio telles que la **5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM, CDMA**, et intègre des innovations comme le **MIMO**, le Beamforming 3D et la diffusion **mmWave**. La plateforme sert de base aux opérateurs et fournisseurs pour élaborer, peaufiner et planifier leurs infrastructures réseau en réponse à l'évolution technologique et aux attentes croissantes des consommateurs en matière de services.

Atoll, en tant que logiciel de simulation, traite diverses données pour configurer le modèle de propagation, sélectionner les antennes, déterminer les spécificités des sites, et plus encore.

Après déploiement du réseau, Atoll est capable de prédire plusieurs aspects tels que la capacité cellulaire, la couverture selon le niveau de signal, la couverture par émetteur, l'analyse de trafic, la zone de superposition, la couverture selon le rapport C/I et le débit moyen. Ces prédictions aident à mesurer la performance du réseau et à affiner sa structure pour optimiser l'expérience des utilisateurs.

Les fonctionnalités d'Atoll incluent :

- Des outils avancés pour la conception de réseaux : capacités de calcul avancées, planification automatique des codes et fréquences, prise en charge de diverses technologies d'accès et de réseaux hétérogènes.
- Une architecture souple et ouverte : compatibilité avec les formats standards de fichiers et bases de données d'autres applications.
- Atoll se compose d'un cœur central et de modules complémentaires, tels que le module **5G, LTE** et le module de calibration des modèles de propagation.

L'interface de démarrage d'Atoll est illustrée dans l'image mentionnée.

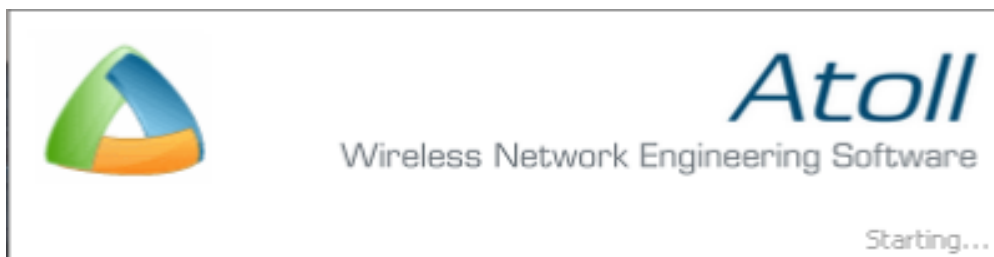


Figure III.1 Interface de démarrage du logiciel ATOLL.

III.3 Étapes de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll

L'outil ATOLL est au cœur du processus de planification **5G**, permettant d'effectuer une variété de prédictions. Les étapes à suivre lors de la phase de planification sont illustrées dans le graphique ci-dessous :

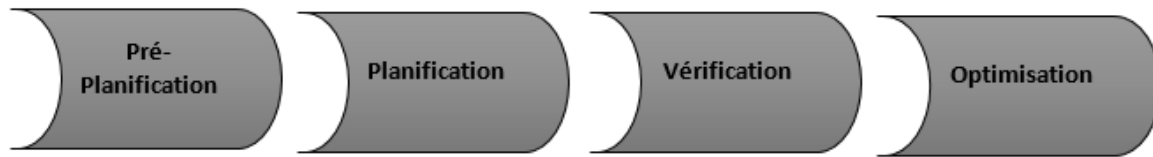


Figure III.2 Etapes de planification d'un réseau avec le logiciel Atoll

III.3.1 Pré-Planification :

L'étape initiale de la planification est une phase préparatoire avant de lancer la planification effective du réseau. Il est nécessaire de rassembler des données sur la région, comme le mode de vie et les horaires de travail [34].

Les critères de planification du réseau sont intégrés dans l'outil comme suit :

- Cartes morphologiques et topographiques
- La région géographique à planifier
- Informations sur l'abonné, y compris le nombre d'utilisateurs
- Trafic des utilisateurs, y compris les heures de pointe
- Les services prévus

III.3.2 Planification

Le but de la phase de planification est d'identifier les emplacements les plus appropriés pour les **gNodeB** afin d'établir une couverture sans interruption en fonction des besoins spécifiques [34].

Les résultats de cette étape de planification incluent :

- Une couverture exhaustive et précise
- Des plans de capacité bien définis

III.3.3 Vérification

Cette phase suit l'installation du site et vise à garantir une performance optimale du réseau. Elle implique l'ajustement des paramètres pour rectifier les erreurs potentielles survenues lors de l'installation.

De plus, elle comprend la réalisation de tests Drive, une technique d'évaluation utilisée pour contrôler la fonctionnalité du réseau, que ce soit en termes de couverture, de capacité ou de critères de qualité

III.3.4 Optimisation

Il s'agit de l'étape finale qui vise à évaluer la satisfaction des clients et à traiter leurs réclamations

III.4 Démarrage d'un projet ATOLL :

Pour notre recherche, l'application ATOLL 3.4.0 a été sélectionnée pour orchestrer la phase concrète de conception du réseau 5G NR dans la région d'ORAN.

Cette partie du document présente les divers composants de l'application utilisés durant notre conception.

Le choix de l'application ATOLL s'est imposé pour sa capacité à faciliter une exécution efficace de la stratégie d'accès réseau.

Les caractéristiques géographiques et les spécifications radioélectriques du réseau envisagé seront établies. Enfin, nous procéderons à la simulation du volume de données que le futur réseau devra gérer.

III.4.1 Les étapes de configuration à suivre :

Les étapes pour configurer ATOLL sont :

- Création d'un projet **5G NR**
- Choisir le système de coordonnées
- Importer la carte de la wilaya d'Oran.
- Entrée les données (le modèle de propagation, les antennes...)
- Importer les sites
- Tracer la zone où nous travaillons.
- Résultat de la planification.

III.4.1.1 Création d'un nouveau projet :

Il est essentiel de préparer un canevas détaillant les données essentielles et l'organisation des fichiers en rapport avec la technologie en question avant de se lancer dans un projet avec Atoll. Après le démarrage du projet, il est possible de personnaliser les configurations du réseau pour répondre aux exigences uniques du projet. Atoll met à disposition divers gabarits prédéfinis qui simplifient cette phase préliminaire, incluant des modèles pour diverses technologies telles que : **3GPP Multi-Rat, 3GPP2 Multi-Rat, 5G Multi-Rat, Backhaul, CDMA2000 1xRTT 1xEV-DO, GSM GPRS EDGE, LPWA, LTE, Liens Radio Micro-ondes, TD-SCDMA, UMTS HSPA, Wi-Fi, et WiMax 802.16e.**

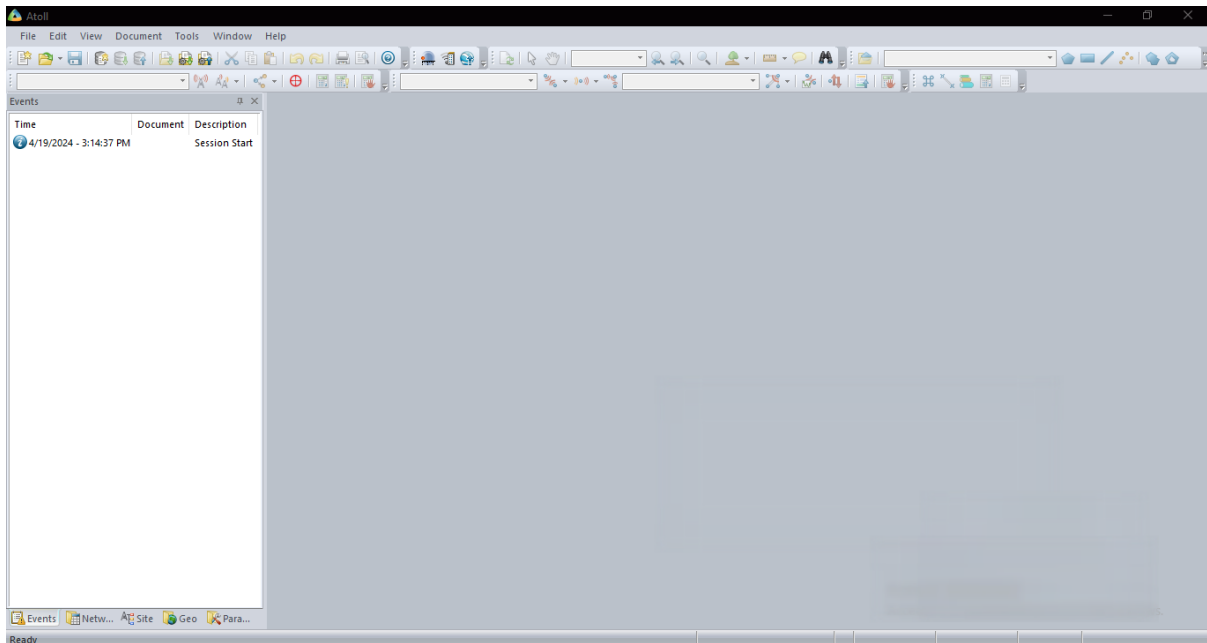


Figure III.3 Lieu de travail au cœur de l'Atoll

Les données sont enregistrées dans un document Atoll, qui est un fichier avec une extension ATL. Les fichiers ATL peuvent contenir une ou plusieurs technologies. Ils peuvent être dupliqués, ouverts sous n'importe quelle station de travail et ne peuvent être lus que par Atoll.

Document créé à partir d'un modèle => Document autonome

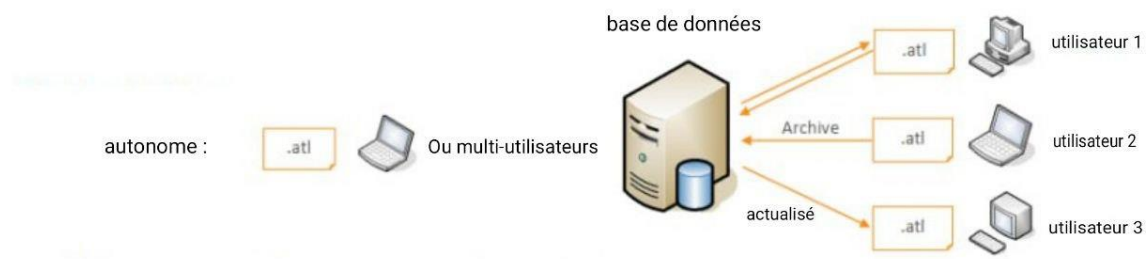


Figure III.4 Création d'un fichier atoll

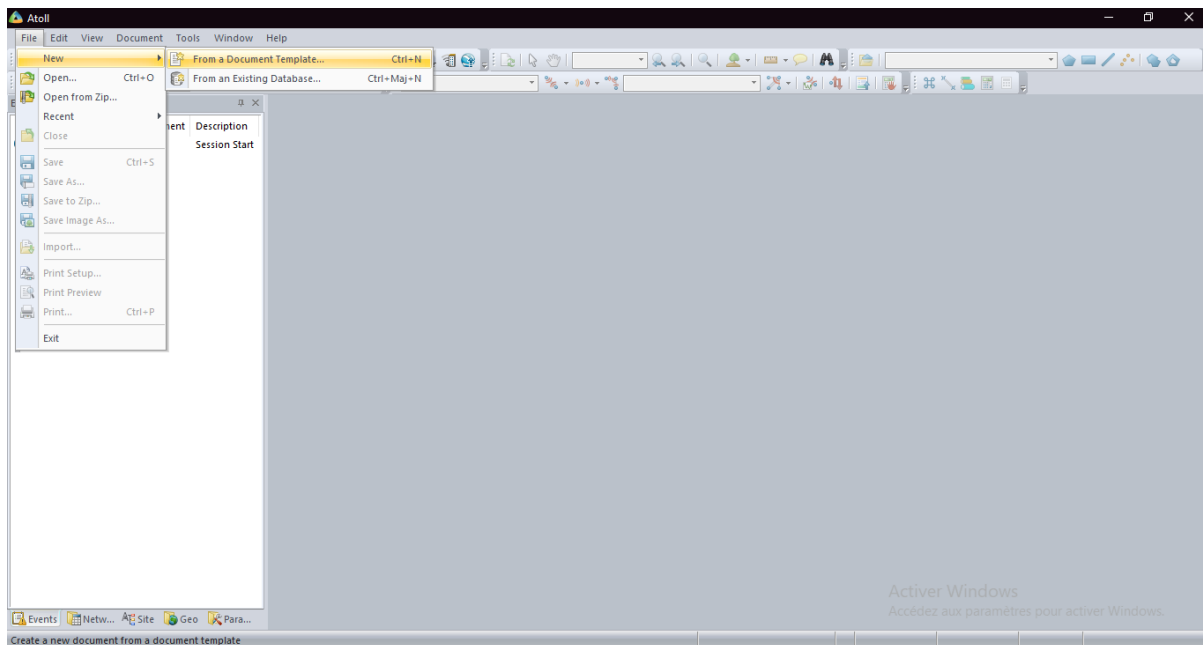


Figure III.5 Création d'un nouveau projet

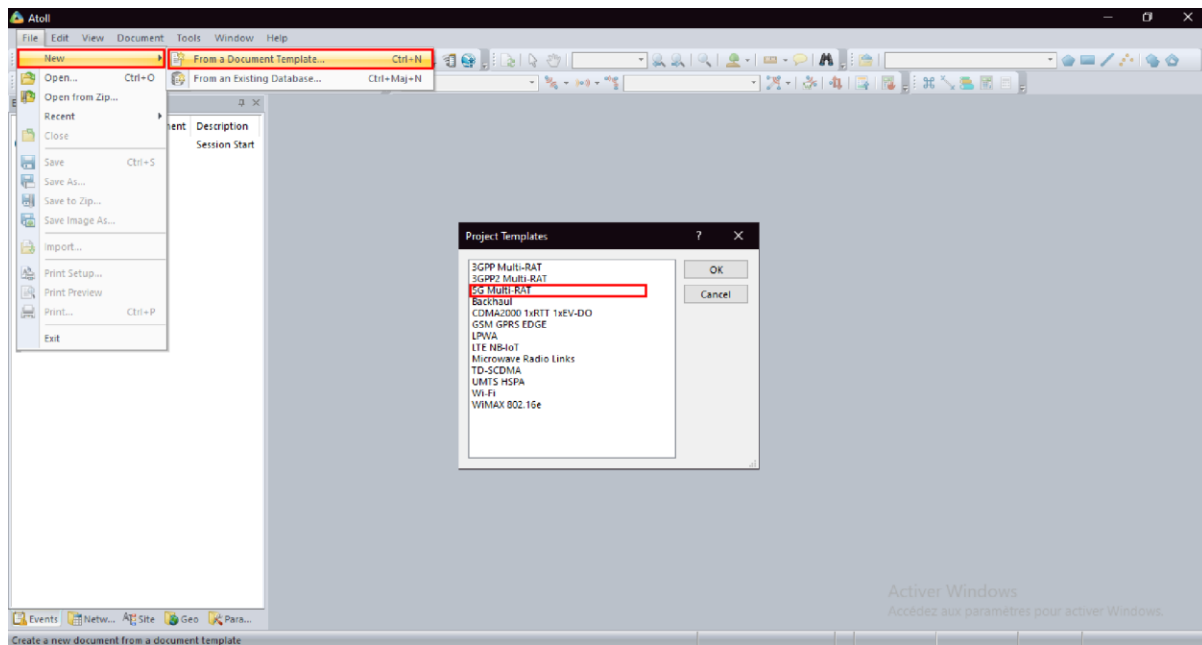


Figure III.6 Choisir la technologie

Il suffit de choisir le modèle adapté aux données à faire introduire au logiciel **5G Multi-Rat** dans notre cas.

III.4.1.2 Choisir le système de coordonnées :

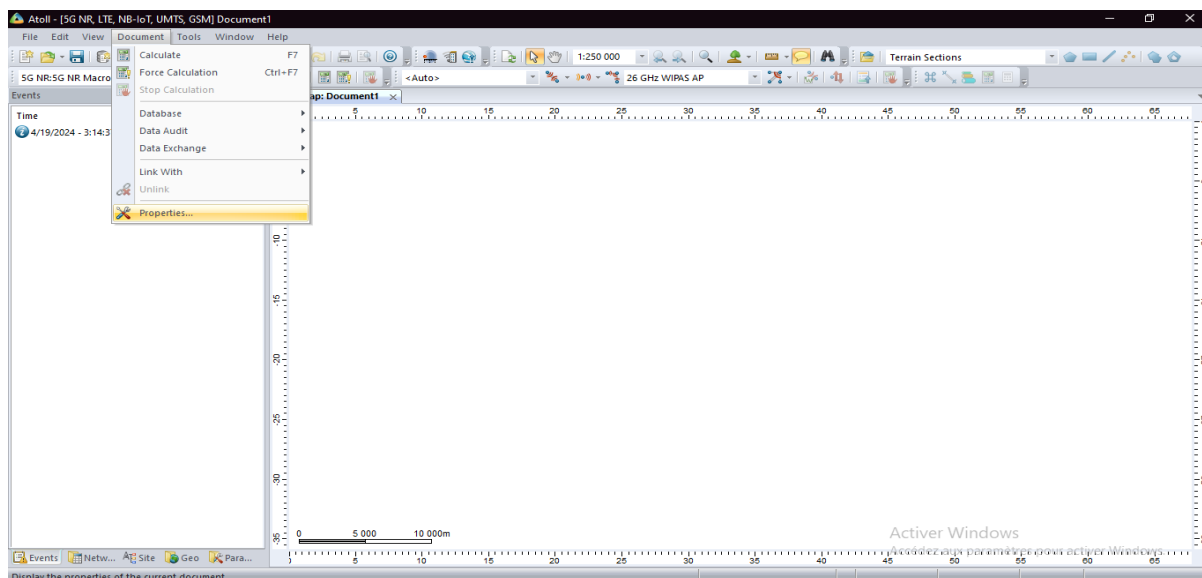


Figure III.7 Choisir le système de coordonnées

Pour sélectionner le système de coordonnées, nous naviguons dans le menu Atoll et sélectionnons propriété. Ensuite, nous sélectionnons la projection et optons pour **WGS 84/UTM zone 31N**. Dans l'affichage, nous optons pour **WGS 84**. Le système de coordonnées **WGS84** est le standard géodésique mondial, largement utilisé par le système **GPS**. Il est rapidement devenu une référence en matière de cartographie. [35]

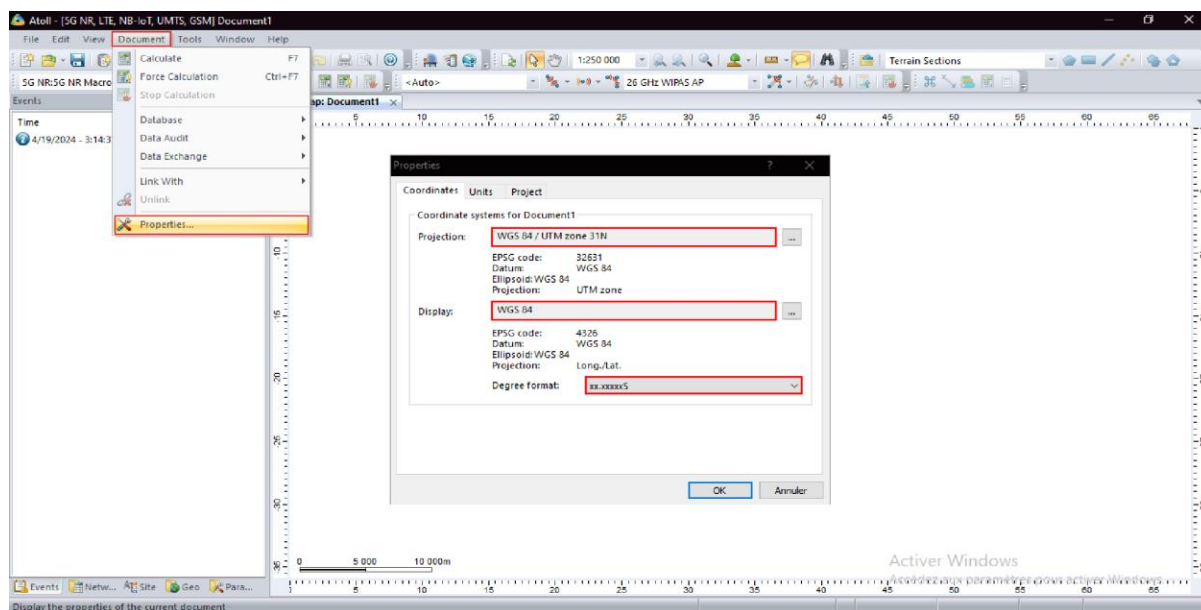


Figure III.8 Projection et affichage

III.4.1.3 Importation de la carte :

Lors de la mise en place d'un réseau **5G**, l'importation d'une carte numérique détaillée de la région ciblée constitue la première étape cruciale. Cette carte numérique se compose habituellement de trois composants principaux : les classes d'encombrement, les altitudes et les vecteurs. Pour notre cas spécifique, nous importerons la carte numérique de la ville d'Oran, qui est indispensable pour initier la planification de la couverture et des performances du réseau **5G**.

- **Clutter Classe** : Il s'agit de grilles numériques qui cartographient l'utilisation du sol ou sa classification, avec un index nommant chaque classe (telles que la mer, les zones urbaines, les forêts, etc.). Ces grilles peuvent être créées à partir de données satellitaires, de photographies aériennes ou de cartes numérisées. Chaque pixel de la grille contient un code, qui peut appartenir à l'une des **256** classes possibles, représentant un type d'obstacle ou une catégorie d'utilisation du sol.

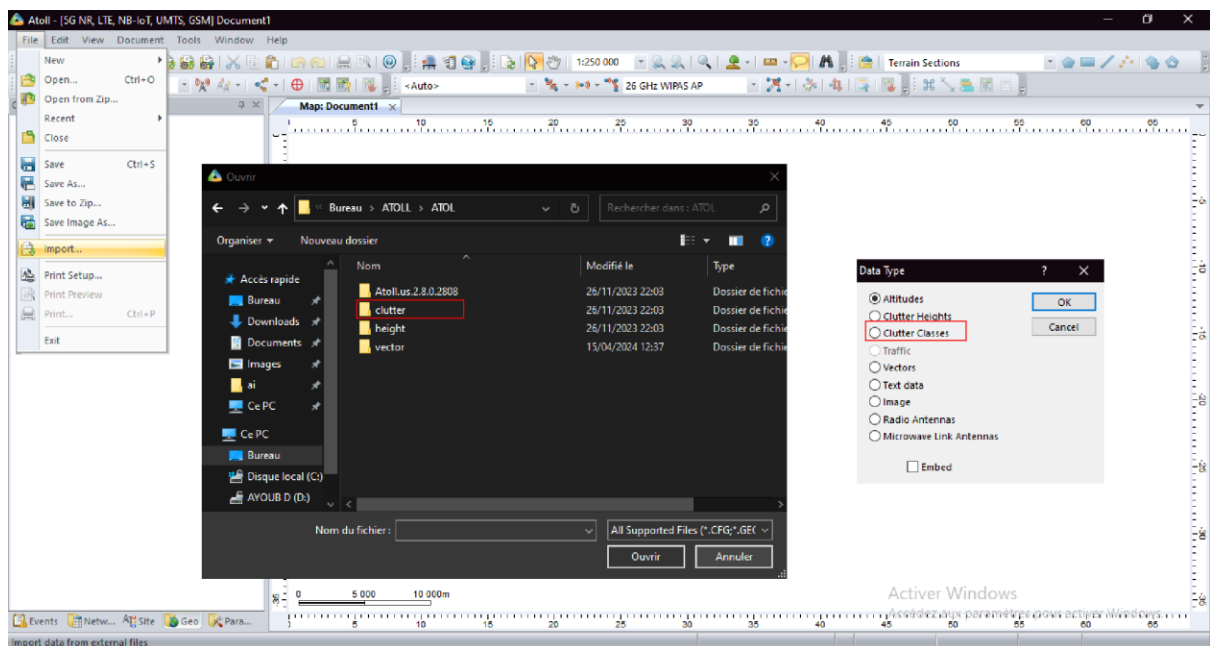


Figure III.9 Clutter classes



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



- **Hight (altitudes) :** Le fichier d'altitudes représente une collection de données offrant des renseignements sur la hauteur des terrains par rapport au niveau de la mer. Ces informations sont employées pour estimer le niveau de signal dans une région spécifique, en considérant aussi la hauteur des constructions dans cette région.

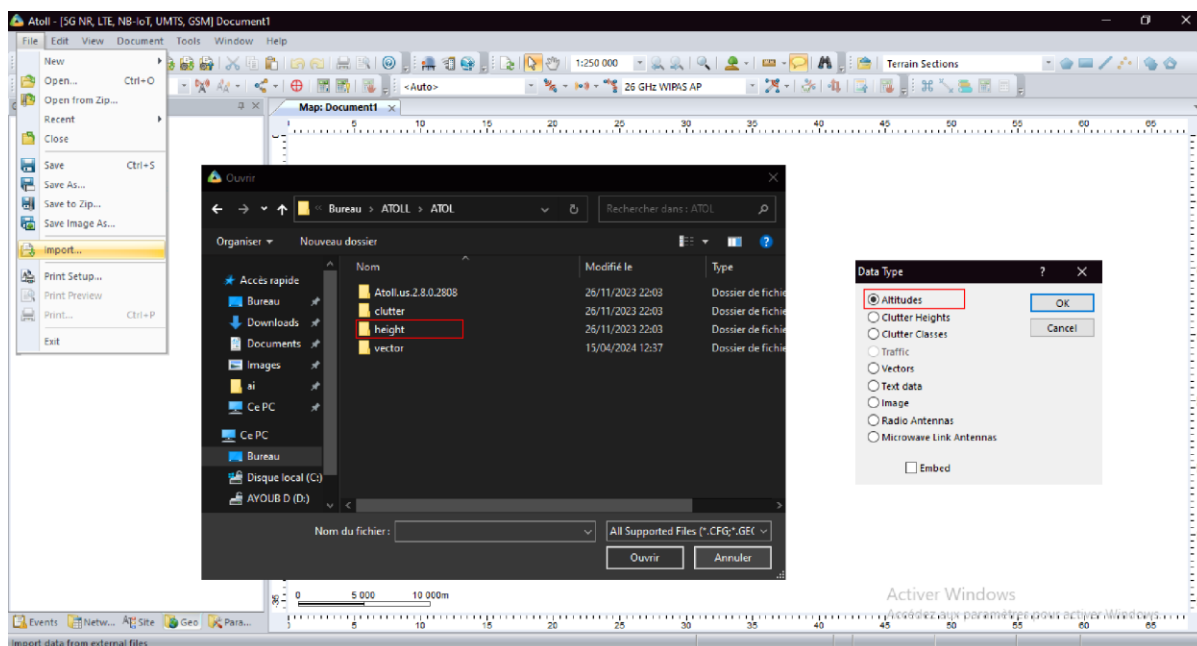


Figure III.11 Clutter hight

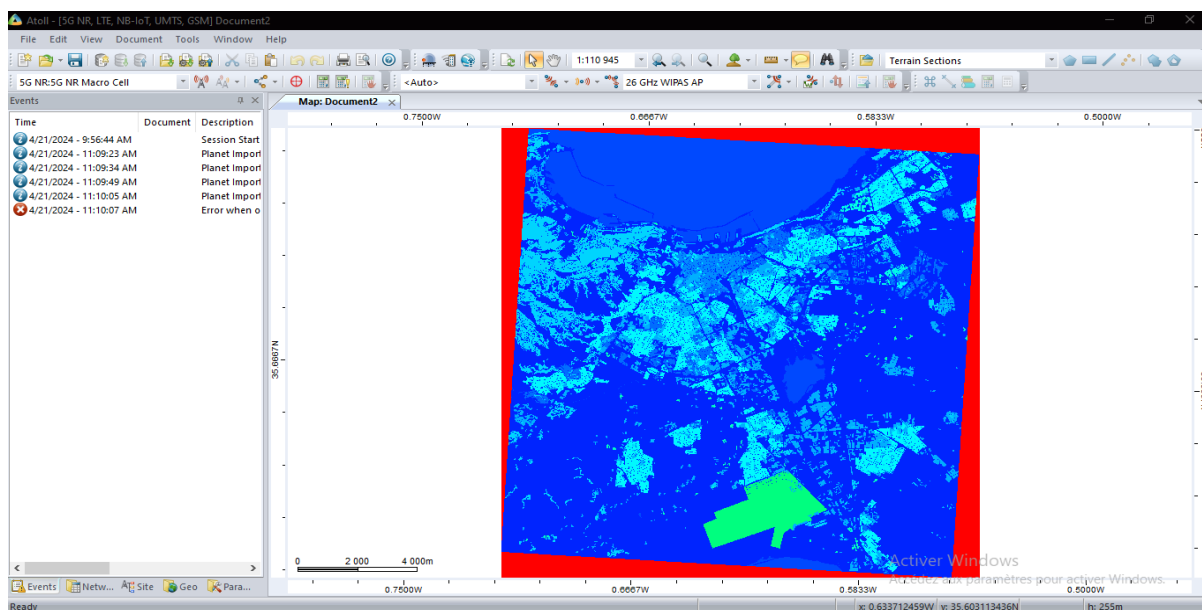


Figure III.12 après l'importation de clutter hight

Digital Terrain Model (DTM) : Cette description concerne l'élevation du terrain au-dessus du niveau de la mer, une donnée qui est automatiquement incorporée dans le modèle de propagation pour les calculs. Dans le fichier en question, chaque pixel retient l'information de l'altitude du terrain, mesurée sur une échelle de 0 à 1000 mètres.

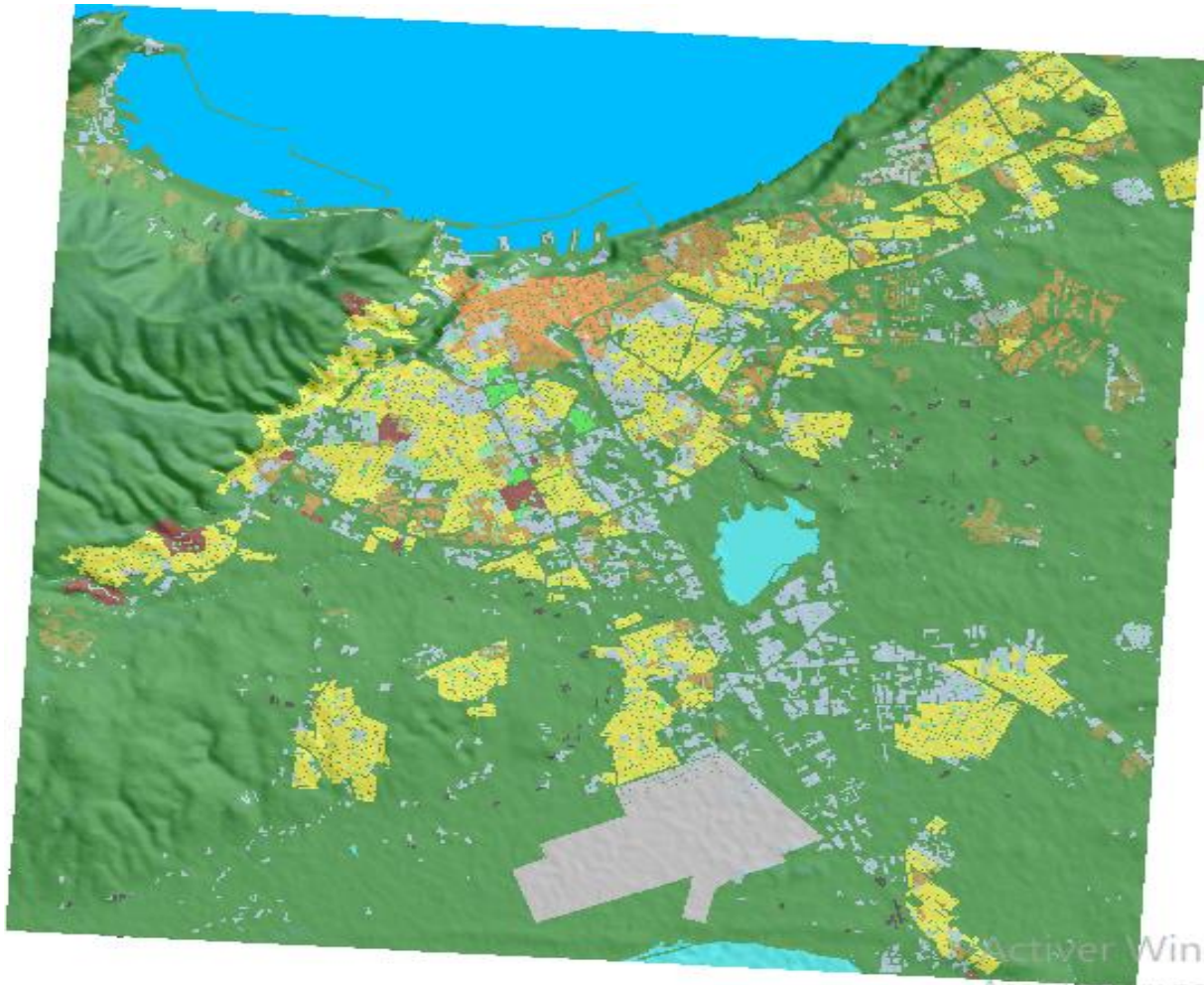


Figure III.13 Digital Terrain Model (DTM)

Vecteur : Le document contient des informations conçues pour établir une cartographie des différents types de voies d'une zone donnée, y compris les grandes et petites routes, les voies urbaines, les installations aéroportuaires, les voies express et les lignes ferroviaires.

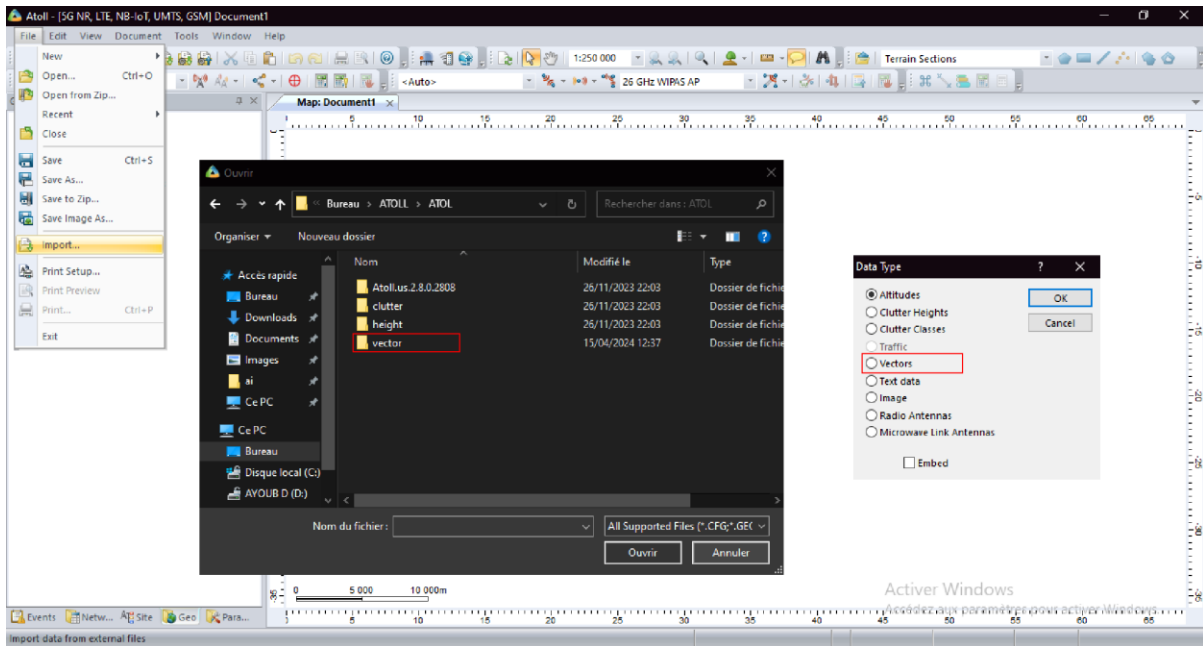


Figure III.14 Importation de vector



Figure III.15 après l'importation de vector.

III.4.1.4 Données d'entrée :

Chargement des informations d'entrée :

- **Modèle de propagation** : utilisé pour estimer la perte moyenne.
- **Antennes** : se réfère aux variétés d'antennes employées.
- **Azimuth** : correspond à l'orientation des différents secteurs.
- **Environnement** : désigne le type d'environnement (urbain, suburbain, urbain dense).
- **Tilt** : représente l'angle d'inclinaison de chaque secteur.
- **Feeders** : pour identifier le type de câbles utilisés et leurs pertes associées.
- **Sites** : pour entrer les informations spécifiques à chaque site.
- **Cellules** : pour entrer les détails propres à chaque cellule.
- **Noise figure** : se rapporte aux paramètres associés au bruit.

III.4.1.5 Importation des sites et des émetteurs (gNB)

- **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** géreront une quantité massive de données à large bande.

Ce service présente les caractéristiques suivantes :

Paramètre	Liaison montante	Liaison descendante
Modulation maximale	64QAM	64QAM
Modulation minimale	BPSK	BPSK
Taux de codage maximal	0,95	0,95
Taux de codage minimal	0,3	0,3
Demande de débit maximal	5 000 kbps	20 000 kbps
Demande de débit minimal	500 kbps	1 000 kbps

Tableau III.1 Caractéristiques du service haut débit

Le type de mobilité établit la vitesse moyenne de l'utilisateur pour reproduire son comportement. Pour la **5G NR**, les données sur la mobilité du récepteur sont essentielles pour choisir quel seuil de support appliquer.

Le type de mobilité employé pour les abonnés **5G NR** était le type piéton, ce qui équivaut à une vitesse de **3 km/h**.

Le terminal représente l'équipement de l'utilisateur utilisé dans le réseau, en l'occurrence le téléphone portable.

Le terminal utilisé était un smartphone **5G** avec les paramètres suivants définis :

- **Puissance minimale : -40 dBm**
- **Puissance maximale : 23 dBm**
- **Facteur de bruit : 8 dB**
- **Pertes : 0 dB**
- **Bande de fréquence : n78**
- **Équipement radio : Équipement radio 5G NR**
- **Gain d'antenne : 0 dB**
- **Nombre d'antennes de transmission : 4**
- **Nombre d'antennes de réception : 4**
- **Modulation maximale supportée : 256 QAM**

Utilisateur	Profil	Service	Terminal	Appels/heures	Durée (sec)	Volume UL (Ko)	Volume DL (Ko)
Business	Utilisateur	Haut débit	Smartphone 5G	0,05	65	10 000	50 000

Tableau III.2 Caractéristiques du profil utilisateur professionnel

- **Modèles de propagation**

Atoll fournit une variété de modèles de propagation conçus pour des environnements spécifiques, des fréquences et des technologies sans fil, afin de réaliser des estimations précises de l'affaiblissement du signal. En particulier, le modèle de propagation standard (SPM) et le modèle de propagation défini par la norme **3GPP 38.900** seront abordés dans cette section. Le tableau suivant présente un résumé des plages de fréquences couvertes, des informations géographiques nécessaires et des recommandations d'application pour ces modèles de propagation.

Modèle propagation	Plage de fréquences (GHz)	Données géographiques prises en compte	Utilisation recommandée
Modèle propagation standard	0,15 - 3,5	Profil du terrain, encombrement statistique	Pour des distances de 1 < d < 20 km
Modèle Propagation 3GPP 38.900	0,15 - 60	Profil du terrain, encombrement statistique ou déterministe	Pour tous types d'environnements, en particulier les zones urbaines denses. Adapté aux petites, micro et macro cellules.

Tableau III.3 Caractéristiques du profil utilisateur professionnel

- **Prédictions et simulations**

Les estimations de couverture **5G NR** dans Atoll offrent la possibilité d'examiner les niveaux de signal réels, la qualité du signal et le débit. Chaque pixel sur la carte est traité comme un utilisateur non interférant, avec un service spécifié, un type de mobilité et un terminal.

Le tableau suivant résume les différentes prédictions de couverture dans Atoll

Prédiction de la couverture	Description
Couverture du réseau (Network coverage)	Estime les niveaux de signal réels pour différents types de signaux 5G NR pour les liaisons descendantes et montantes. Cette estimation comprend le niveau SS-RSRP , le niveau de signal PDSCH et PUSCH , le meilleur faisceau pour le canal de commande et le meilleur faisceau pour le canal de trafic.
Qualité du réseau (Network quality)	Estime les niveaux d'interférence. Cette estimation comprend le niveau PDSCH et PUSCH C/(I+N) et le niveau SS-SIRN .
Capacité du réseau (Network capacity)	Pour les scénarios 5G NR , il indique le débit maximal de la bande passante allouée RLC pour les liaisons descendantes et montantes.
Zones de service (Service areas)	Affiche les porteuses radio 5G NR basées sur le niveau C/(I+N) pour chaque pixel pour les liaisons descendantes et montantes. Affiche également les modulations utilisées.

Tableau III.4 Prédiction de la couverture dans Atoll

D'un autre côté, Atoll a également la capacité d'examiner la capacité du réseau en utilisant une distribution réaliste des utilisateurs et des demandes de trafic grâce à des simulations.

Une simulation, qui diffère d'une prédiction, correspond à une distribution spécifique d'utilisateurs 5G. C'est une capture instantanée du réseau 5G, dont les principaux résultats sont une distribution géographique des utilisateurs avec une certaine demande de trafic, les ressources allouées à chaque utilisateur de la distribution et les charges des cellules.

Atoll permet de définir une distribution tridimensionnelle des utilisateurs à l'aide de cartes de trafic, où la distribution des utilisateurs peut être définie en termes de densité d'utilisateurs, nombre d'utilisateurs répartis aléatoirement sur une certaine zone, ou en entrant les coordonnées des utilisateurs fixes. La distribution verticale des utilisateurs (altitudes) peut être entrée individuellement pour chaque utilisateur sur les paramètres de la carte de trafic ou comme altitude moyenne définie en tant que paramètre de la simulation.

Le processus de simulation en 5G comprend les étapes suivantes :

- **Génération et distribution mobiles** : Atoll génère une distribution d'utilisateurs pour chaque simulation en utilisant un algorithme basé sur des cartes de trafic et en le pondérant avec une distribution de Poisson.
- **Détermination du meilleur serveur** : Atoll détermine la meilleure cellule de desserte pour chaque mobile, qui est l'émetteur à partir duquel l'utilisateur reçoit le niveau de signal le plus élevé.
- **Calculs en liaison descendante** : cela inclut le calcul de $C/(I+N)$ pour les différents signaux et canaux physiques, la détermination du meilleur support disponible, l'allocation de ressources et le calcul des débits utilisateur.
- **Calculs en liaison montante** : cela inclut le calcul de $C/(I+N)$ pour les différents canaux physiques, la détermination du meilleur support disponible, le contrôle de puissance en liaison montante et l'allocation de bande passante en liaison montante, l'allocation de ressources, la mise à jour des valeurs d'élévation de bruit en liaison montante pour les cellules, et le calcul des débits utilisateur.

À la fin des simulations, les utilisateurs actifs peuvent être connectés s'ils ont un meilleur serveur assigné et un support correspondant à leur statut d'activité. Les utilisateurs peuvent également être rejetés pour absence de couverture s'il n'y a aucun serveur assigné, et pour

absence de service s'il n'y a aucun support assigné en liaison descendante ou en liaison montante.

Les résultats des simulations peuvent montrer le débit du canal et de l'utilisateur, le taux de réussite de la connexion en liaison descendante et en liaison montante, le nombre d'utilisateurs rejetés, la charge de trafic de la cellule, etc.

Certains des débits obtenus après une simulation sont :

- **Débit RLC maximal** : correspond au débit maximal de la couche **RLC** qui peut être atteint à un endroit donné en utilisant le meilleur support **5G NR** disponible. Il s'agit du débit brut et ne prend pas en compte les effets de la retransmission due aux erreurs ou au chiffrement de codage de couche supérieure.
- **Débit RLC effectif** : le débit net de la couche **RLC** qui peut être atteint en utilisant le meilleur support **5G NR** disponible, calculé en tenant compte de la réduction du débit due aux erreurs de retransmission.
- **Débit d'application** : est le débit de la couche application à un endroit donné en utilisant le meilleur support **5G NR** disponible, calculé en tenant compte de la réduction du débit due aux informations d'en-tête **PDU/SDU**, au remplissage, au chiffrement, au codage et à d'autres types de surcharge.
- **Débits cumulés** : se réfère à la somme des débits des utilisateurs connectés à la cellule, à la fois en liaison descendante et en liaison montante, respectivement.
- **Zone de déploiement et modélisation de la propagation radio :**

Dans la première section de ce chapitre, la région géographique où l'étude est menée et les données géographiques nécessaires pour divers calculs dans Atoll sont présentées. La deuxième section du chapitre implique une étude sur le modèle de propagation pour observer leur réponse en termes de perte de trajet en fonction du type de données utilisées (statistiques ou déterministes), du type de cellule (macrocellules ou microcellules), de la hauteur du récepteur et de la hauteur du transmetteur. Le tableau suivant illustre la bande de fréquences utilisée pour cette étude.

Bande	Mode duplex	Fréquence (GHz)	Liaison montante (GHz)	Liaison descendante (GHz)	Espacement duplex (MHz)	Largeur de canal (MHz)
N78	TDD	3,5	3,3-3,8	3,3-3,8	N/A	10, 20, 40, 50, 60, 80, 100

Tableau III.5 Caractéristiques de la bande de fréquence de 3,5 GHz.

Tours cellulaires 5G(émetteurs)

L'avènement des infrastructures de télécommunication **5G** représente une évolution majeure par rapport aux systèmes précédents. Leur conception avancée leur permet d'utiliser des fréquences beaucoup plus hautes et puissantes. Ces fréquences, dites millimétriques, ont la capacité de transmettre de vastes quantités de données, mais rencontrent des difficultés à traverser des barrières physiques comme les murs, la végétation ou la pluie.

Pour notre initiative, nous avons maintenu les emplacements des installations existantes tout en y apportant des ajustements nécessaires. De nouveaux sites ont été établis et certains anciens ont été repositionnés, car les infrastructures **5G** diffèrent considérablement des réseaux cellulaires des générations antérieures. En effet, les tours **3G** ou **4G** existantes ne sont pas compatibles avec la transmission des signaux **5G**. Il est donc impératif d'installer des transmetteurs **5G** sur ces structures préexistantes.

De plus, en raison des fréquences significativement plus hautes utilisées par la **5G**, les longueurs d'onde sont beaucoup plus courtes. Bien que ces ondes millimétriques puissent véhiculer plus d'informations, leur capacité à pénétrer les obstacles est réduite. Cela implique la nécessité d'un nombre plus important de ces mini-tours par rapport aux générations précédentes pour assurer une couverture adéquate.

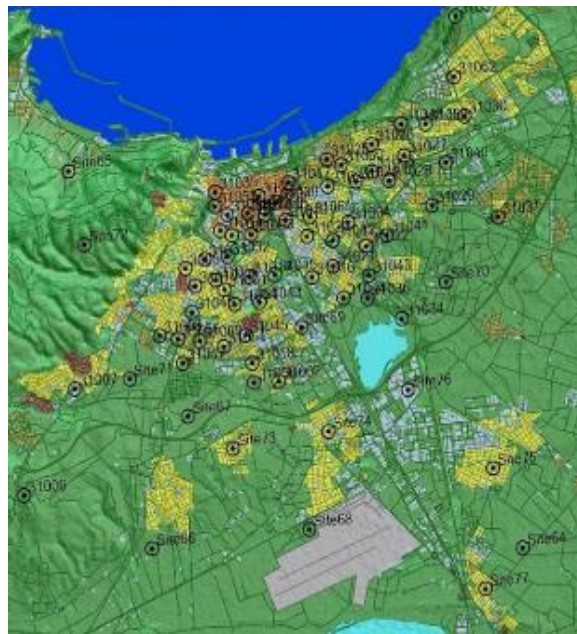
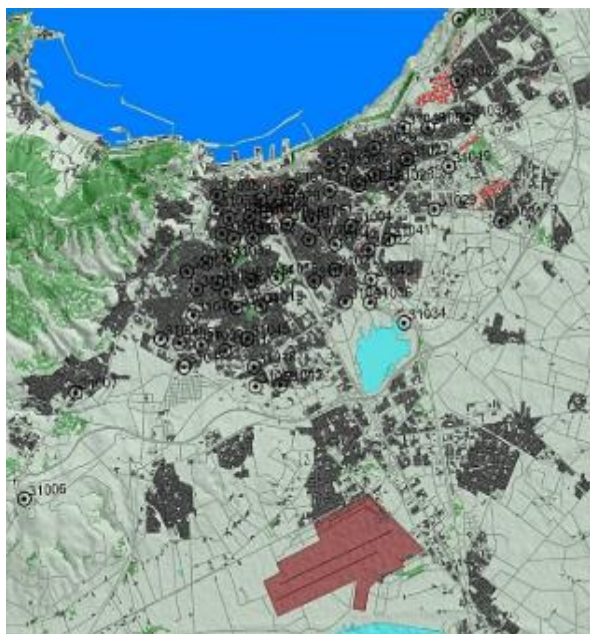


Figure III.16 Anciennes génération 68 sites

Figure III.17 Nouvelle génération 71 sites

- Les paramètres de la cellule :

Paramètre	Valeur
Frequency band	n78
Carrier	400 MHz - NR-ARFCN 2232499
Max power (dBm)	100
SSS EPRE (dBm)	15
PSS EPRE offset / SSS (dB)	0
Layer	Micro layer
Cell type	PCell;SCell (DL);SCell (UL)
Min SS-RSRP (dBm)	-140
SS/PBCH numerology	4(240khz)
SS/PBCH periodicity	10 ms
SS/PBCH OFDM symbols	{4,8,16,20}+28n [Lmax=64]
PDCCH overhead (OFDM symbols)	4
Traffic numerology	3(120khz)
TDD DL OFDM symbols (%)	50
Radio equipment	5G NR Radio Equipment
Scheduler	Proportional Fair

Diversity support (DL)	Transmit Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO
Diversity support (UL)	Receive Diversity;SU-MIMO;MU-MIMO
Number of MU-MIMO users (DL)	1
Number of MU-MIMO users (UL)	1
Number of users (DL)	/
Number of users (UL)	/
Traffic load (DL) (%)	100
Traffic load (UL) (%)	100
Max traffic load (DL) (%)	100
Max Traffic Load (UL) (%)	100
UL noise rise (dB)	0
Fractional power control factor	/
Number of required PRACH RSI	10
Max number of 4G/5G neighbors	16
Max number of inter-technology neighbors	16

Figure III.18 Template de la station 5G NR.

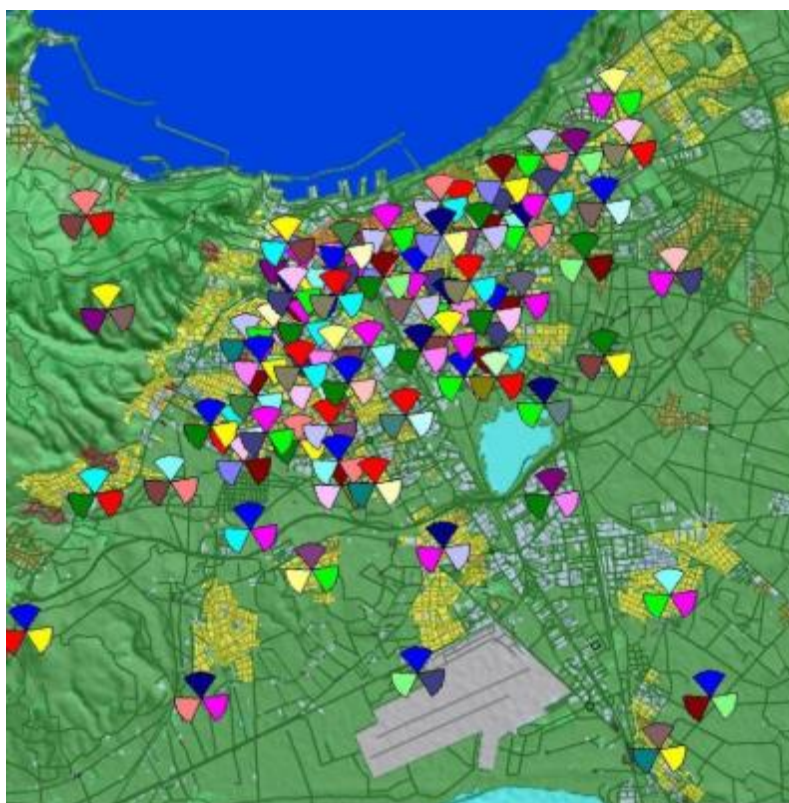


Figure III.19 5G NR 71 sites

- **Prédiction de couverture :**

L'objectif de cette étape est de garantir une performance optimale du réseau. nous utilisons une technique de test pour contrôler la fonctionnalité du réseau de chaque émetteur en fonction des critères de couverture ou de qualité. Après le déploiement du réseau, l'outil Atoll est utilisé pour réaliser plusieurs prédictions. Cela permet de mieux appréhender la diffusion du signal à partir de l'émetteur et d'identifier les zones où le niveau et la qualité du signal sont optimaux.

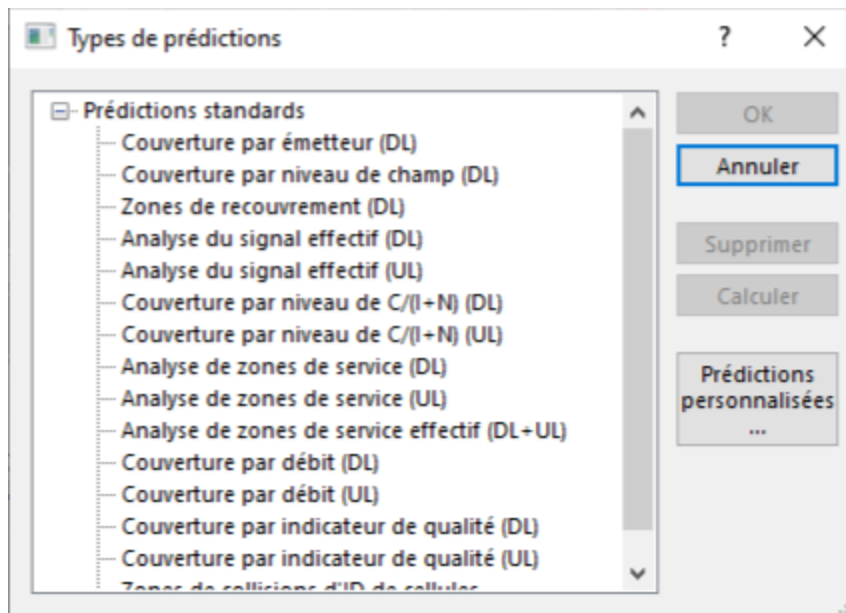


Figure III.20 Différents types de prédictions

Dans notre cas nous allons étudier quelque type de prédictions :

A) Couverture par niveau de signal :

Cette prédiction aide à évaluer la force du signal reçu par le dispositif mobile à chaque emplacement dans la zone calculée. L'objectif de cette analyse est d'identifier les éventuelles zones d'ombre et de tenter de les résoudre en ajustant la configuration des sites et des émetteurs. Une fois cette prédiction réalisée, nous obtenons le résultat illustré dans les figures suivantes :

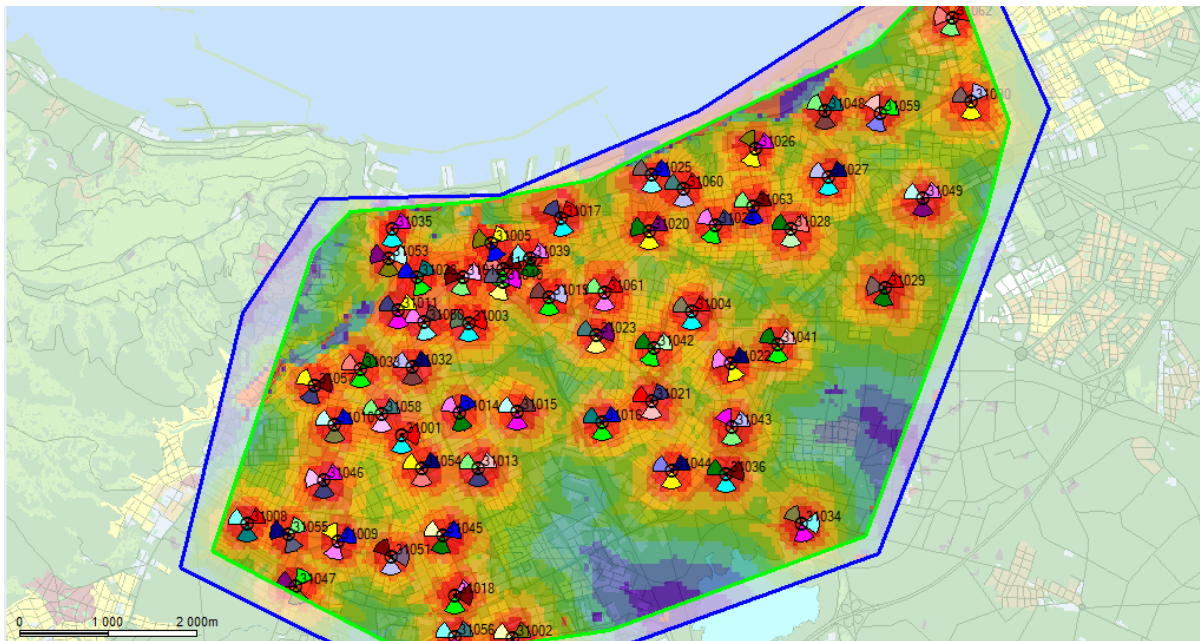


Figure III.21 Prédiction de la couverture par niveau du signal .

Comme nous pouvons le voir dans le graphe ci-dessus, les niveaux de signal sont forts (valeurs élevées) autour des sites et ces valeurs diminuent à mesure que l'on s'éloigne des sites, en raison de l'atténuation. Cela peut être visualisé par les couleurs (rouge, vert, bleu, etc.).

L'histogramme ci-dessous illustre la superficie de la zone couverte en fonction du niveau de signal optimal.

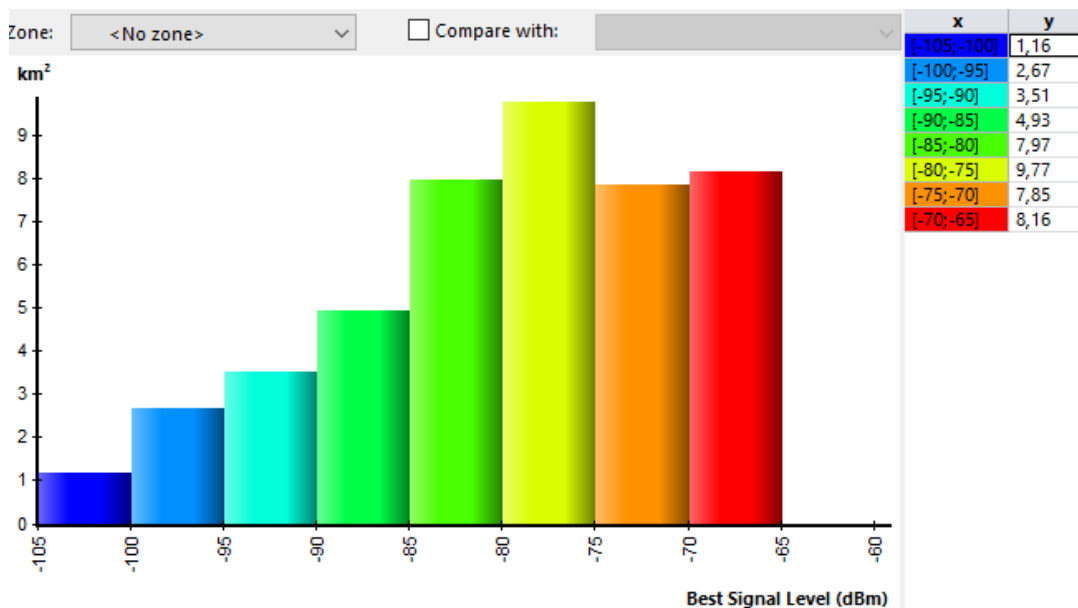


Figure III.22 Histogramme de la couverture par niveau de signal

B) Prédiction de couverture par émetteur (transmitter) :

Cette prédiction aide à identifier les frontières de diverses cellules du réseau **5G NR**, afin de définir précisément la zone de couverture du site où l'on souhaite mettre en œuvre le principe d'optimisation. L'illustration suivante indique que la transmission de chaque site se compose de trois secteurs :

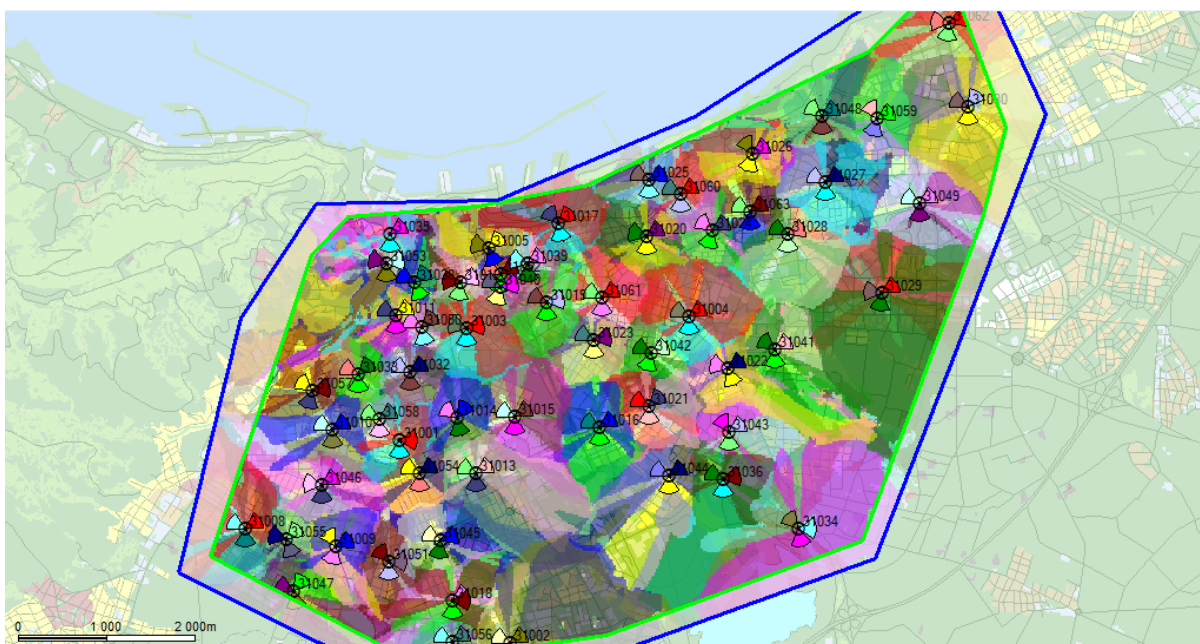


Figure III.23 Prédiction de couverture par émetteur.

C) Prédiction de couverture liaison descendante :

Dans cette section nous avons montré les résultats de niveau **SS-RSRP**, de niveau **PDSCH**, de **C(I/N+R) PDSCH**, de la modulation et du débit obtenu.

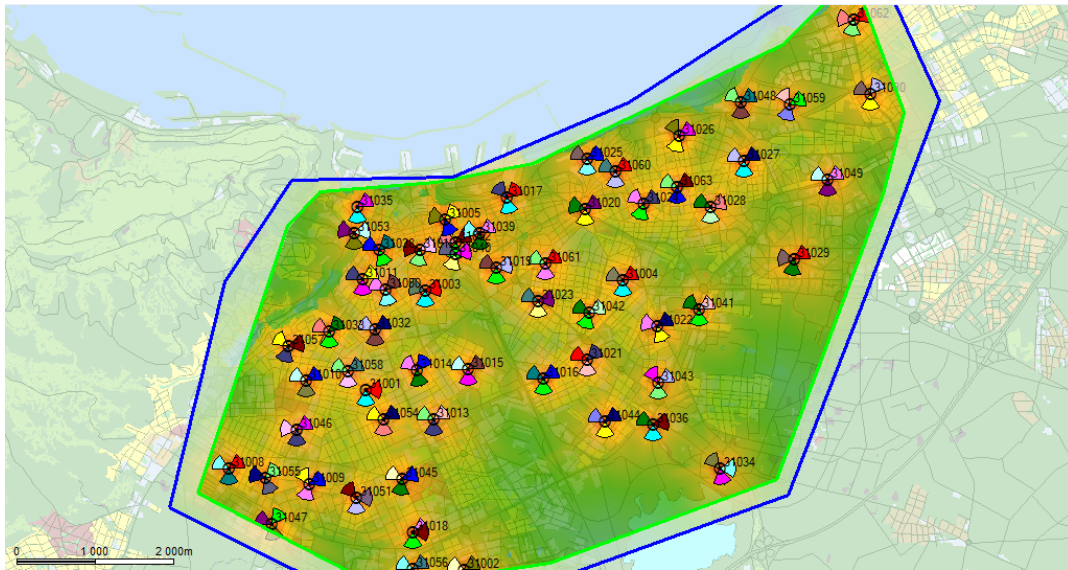


Figure III.24 Prédiction de couverture liaison descendante.

Dans la figure ci-dessus, il est clairement visible que le beamforming a offert une meilleure couverture du signal de référence **SS RSRP**. Toutes les zones ont reçu ce signal avec un niveau supérieur à **-130 dBm** et nous avons une meilleure couverture dans **-70 dbm**. Par conséquent, les utilisateurs dans cette zone couverte pourraient être connectés à la cellule.

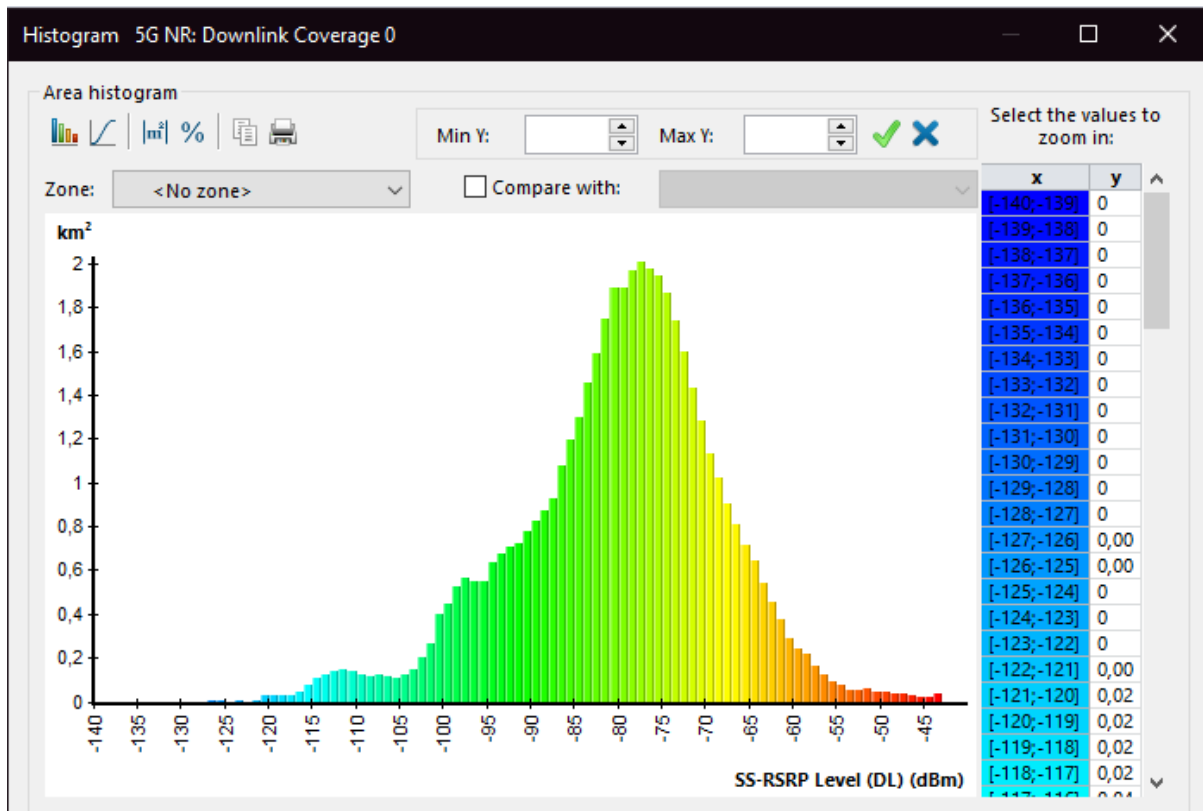


Figure III.25 Histogramme de la de couverture liaison descendante.

D) Prédiction de qualité de la liaison descendante :

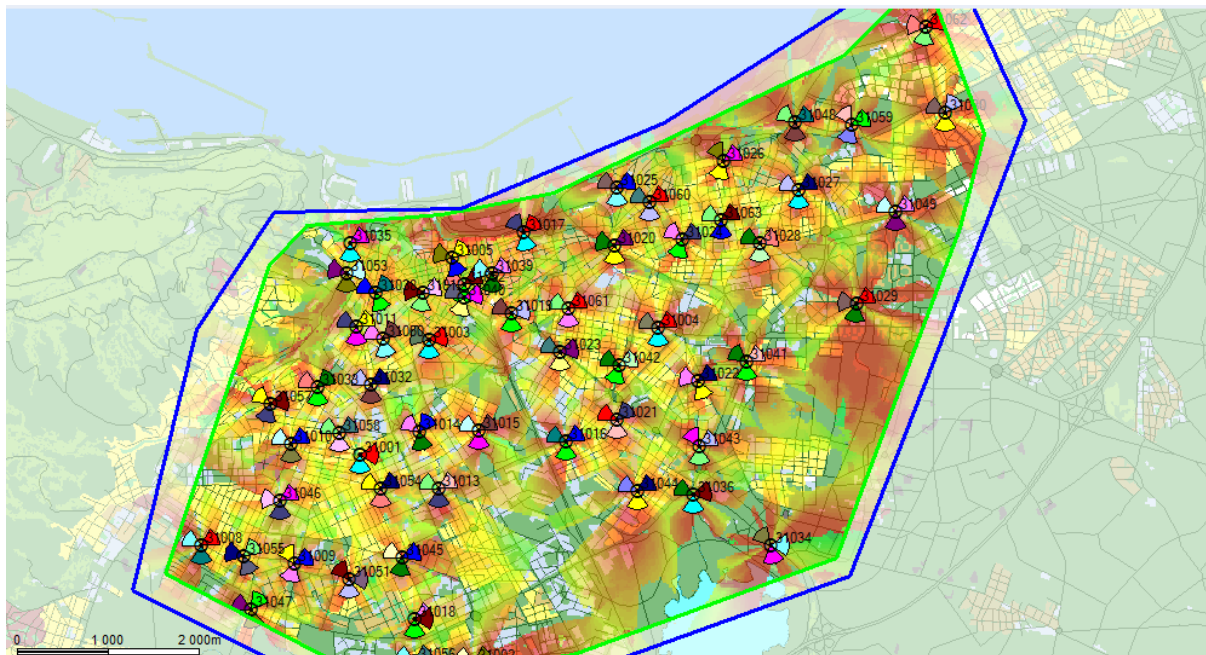


Figure III.26 Prédiction de qualité de la liaison descendante

On s'attendait à une amélioration du $C (I/R+N)$ puisque le niveau du signal PDSCH a également été amélioré.

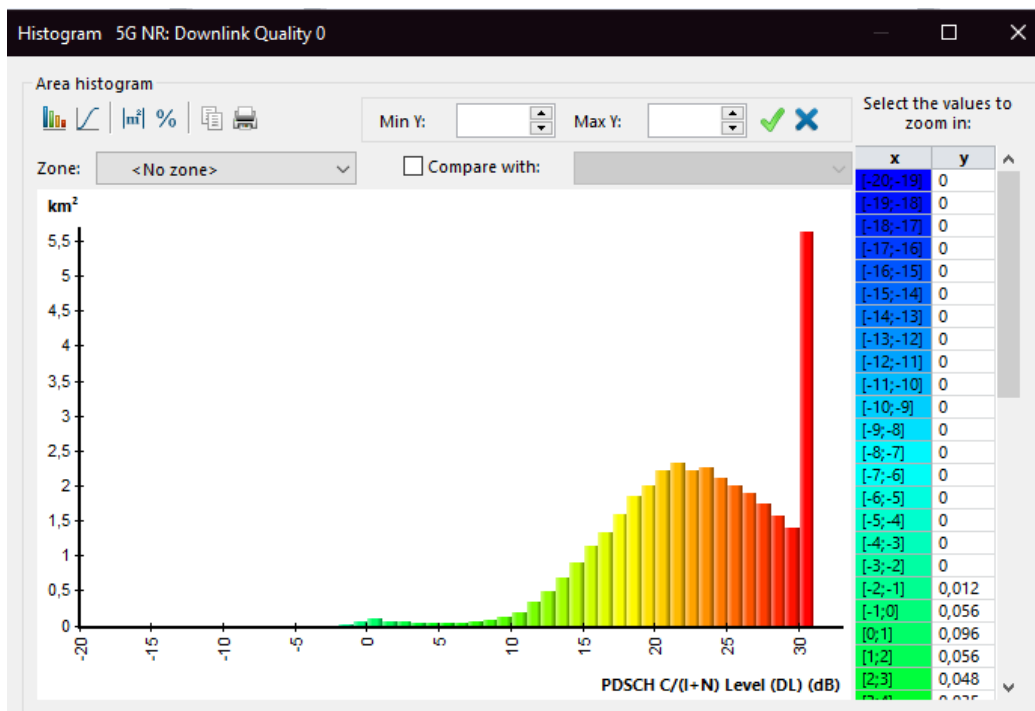


Figure III.27 Histogramme de qualité de la liaison descendante

E) Prédiction effective de zone de service :

L'histogramme affiche les supports radio 5G NR en fonction du niveau $C/(I+N)$ pour chaque pixel pour la liaison descendante.

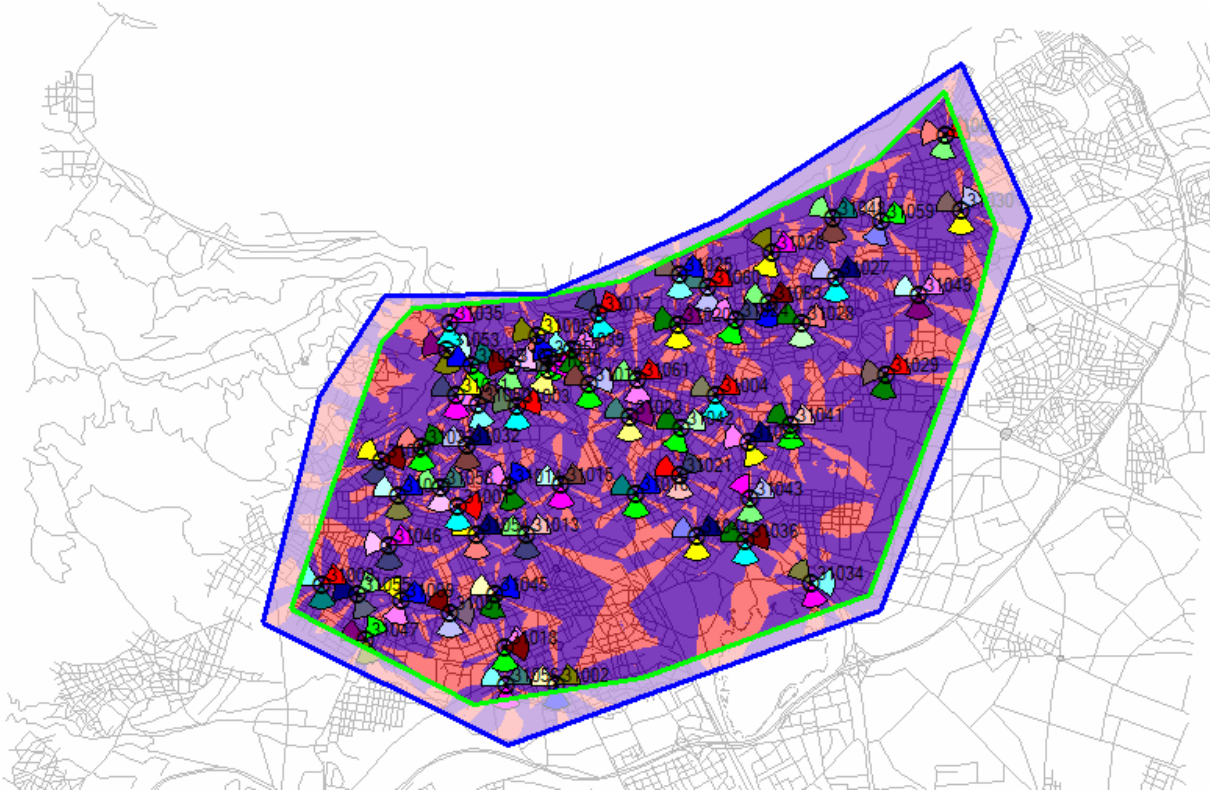


Figure III.28 Prédiction effective de service area

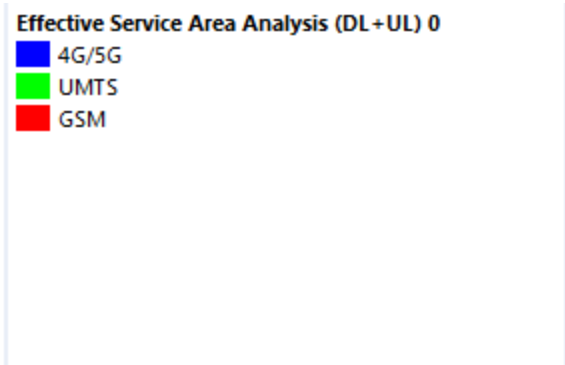


Figure III.29 Effective service area analyse

F) Prédiction de capacité de la liaison descendante :

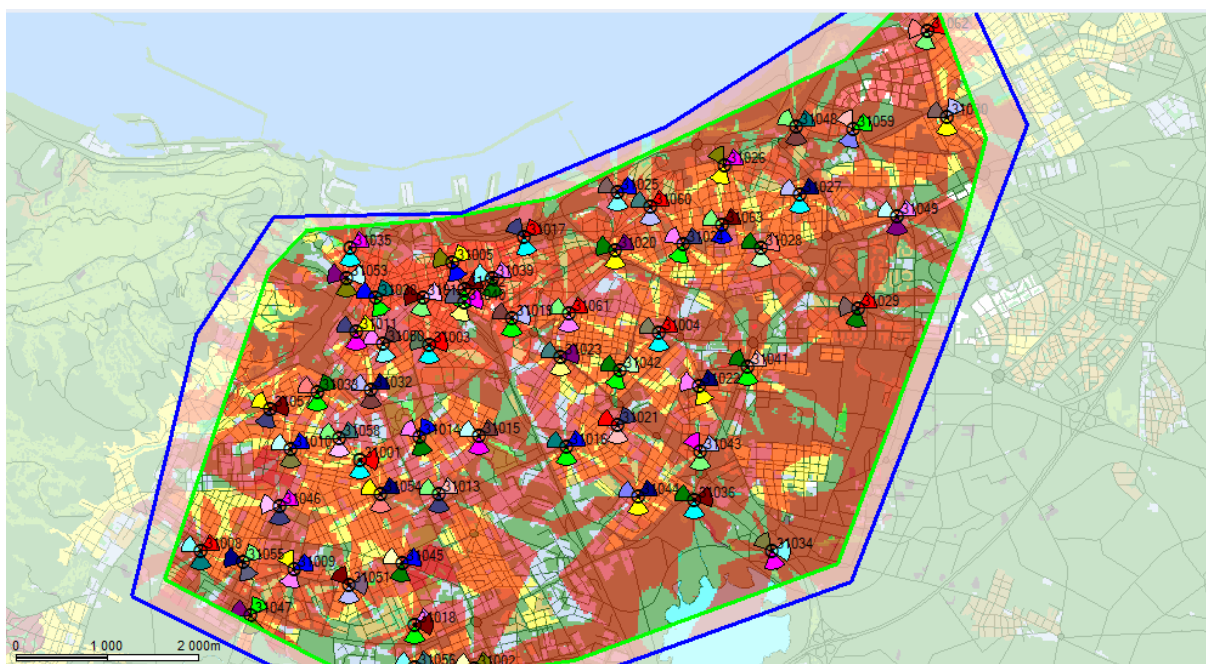


Figure III.30 Prédiction de capacité de la liaison descendante.

L'historgramme (Figure III.31) montre le débit maximal de la bande passante alloué par RLC pour la liaison descendante

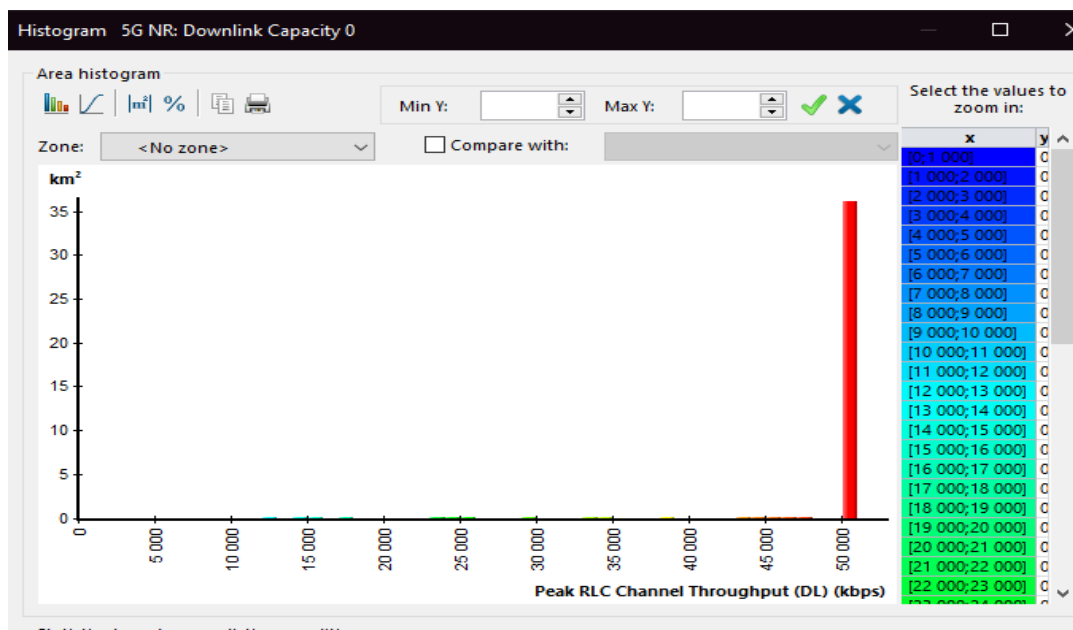


Figure III.31 Histogramme de capacité de la liaison descendante

G) Simulation

La figure III.32 illustre la répartition de la mobilité les équipements utilisateur selon le service.

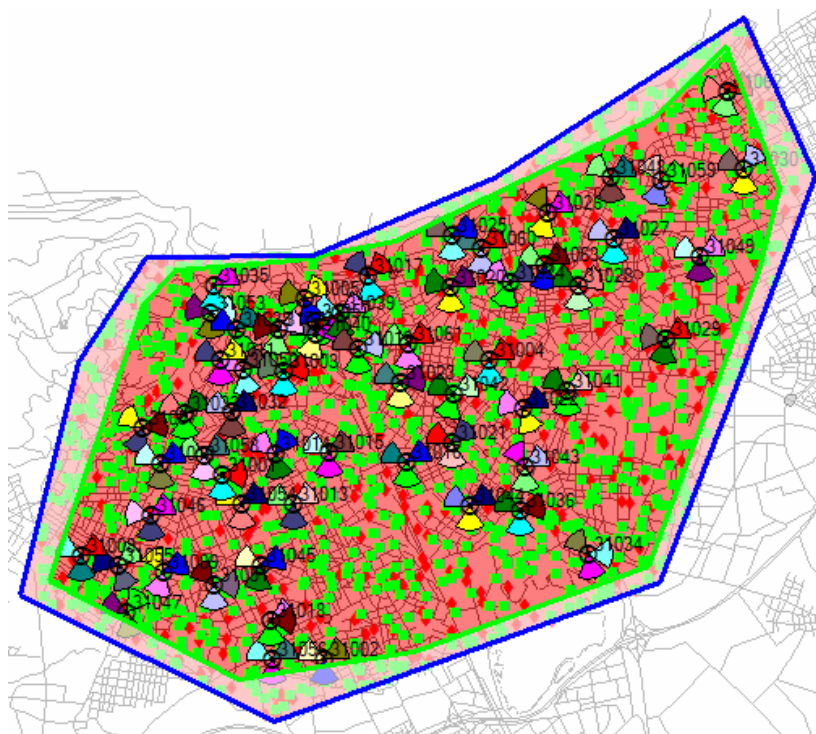


Figure III.32 Simulation.

III.5 Conclusion :

Le chapitre final présente un résumé concis du logiciel Atoll, en mettant l'accent sur ses multiples capacités. Une modélisation de la couverture réseau de la technologie **5G** a été effectuée dans ce cadre l'objectif central de cette démarche était d'évaluer la puissance du signal en tenant compte des fluctuations du gain d'antenne. Initialement, une revue des modèles de propagation dédiés à la **5G** a été menée pour sélectionner les plus pertinents pour notre analyse ces modèles sélectionnés ont servi à la simulation de la diffusion des ondes radio sur le territoire ciblé.

Dans la continuité, une analyse détaillée a été réalisée, examinant différentes configurations de gain d'antenne il a été constaté que le gain d'antenne avait un impact significatif sur l'intensité du signal reçu. Un gain accru a été associé à une amélioration notable de la qualité du signal, alors que sa réduction a eu pour effet de compromettre la qualité de réception.

Ces résultats fournissent une base robuste pour la continuation de nos recherches dans le domaine de la couverture et de la prédiction du signal pour les futurs réseaux de télécommunication.

Conclusion Générales

Conclusion Générales

Notre investigation a minutieusement examiné la conception, l'évaluation et la modélisation associées à la technologie **5G**. Nous avons disséqué les multiples aspects de la **5G**, en sondant les défis et les possibilités qu'elle présente dans le secteur des télécommunications sans fil. Notre analyse a permis de dégager une vision globale de la technologie **5G**.

Le logiciel Atoll a été utilisé pour projeter la couverture réseau, évaluer la capacité et mener des simulations précises pour analyser la transmission du signal en se basant sur divers modèles de propagation. La planification de la **5G** est une tâche ardue qui exige une connaissance approfondie de ses attributs uniques, tels que les fréquences employées, les besoins en capacité et en couverture, ainsi que les enjeux de densification du réseau. Nous avons étudié différentes stratégies et techniques de planification, incluant la planification des fréquences, la gestion de la capacité, l'optimisation des antennes et la stratégie de déploiement.

Le modèle de propagation **3GPP 38.900** s'est révélé supérieur pour les calculs de couverture des microcellules en comparaison avec d'autres modèles. Atoll est un outil qui intègre une multitude de variables liées aux modèles de propagation, au volume de trafic, aux conditions d'usage et à la technologie de réseau d'accès, tout en permettant d'expérimenter des ajustements pour bonifier les performances observées.

Pour les futures études et recherches, il pourrait être envisagé d'étudier :

- Le modèle de propagation Aster
- Utiliser d'autre fréquence inclut dans les bandes FR1 et FR2
- Convergence avec la 6G.

Bibliographie

- [1] C. e. V. D. M. DEMOULIN, Principes de base du fonctionnement du réseau GSM., vol. 4, 2004.
- [2] E. A. LEMAMOU, Planification globale des réseaux mobiles de la quatrième génération (4G) Thèse de doctorat., École Polytechnique de Montréal, 2014.
- [3] K. K. R. M. H. HACINI, Transition 2G/3G/4G en communication mobile: Cas site université d'ATM Mobilis Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2019.
- [4] E. MEURISSE, «L'UMTS et le haut-débit mobile,» Rapport Institut d'électronique et d'informatique, 2007.
- [5] K. MELAL, Analyse des méthodes d'égalisation des techniques CDMA, Université de Batna 2, 2008.
- [6] P. Z. KHALID, Dimensionnement et optimisation du, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah: Thèse de doctorat, 2010.
- [7] E. PAR, LA LIBERALISATION DES TELECOMMUNICATIONS ET MARCHE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION: ETUDE COMPARATIVE ENTRE L'ALGERIE, LA TUNISIE ET LE MAROC.
- [8] S. E. HAJRI, L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs, Université Paris-Saclay (ComUE): Thèse de doctorat, 2018.
- [9] M. SERIES, IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, vol. 2083, Recommendation ITU, 2015.

Bibliographie

- [10] R. R. HADJ MEKHNACHE KHADIDJA, ETUDE ET IMPLEMENTATION DES MODULATIONS MULTIPORTEUSES POUR LA 5G, 2019.
- [11] «telecomreviewafrica,» 2021. [En ligne]. Available: <https://www.telecomreviewafrica.com/articles/divers/3216-6g-la-voie-vers-un-monde-entierement-connecte>. [Accès le 2024 Avril 16].
- [12] visemark, «visemark,» 03 AOUT 2023. [En ligne]. Available: www.visemark.com/fr/post/%C3%A9volution-des-r%C3%A9seaux-mobiles-de-1g-%C3%A0-5g. [Accès le 01 MAI 2024].
- [13] orange, «hellofuture,» orange, 2022 JUIN 15. [En ligne]. Available: hellofuture.orange.com/fr/l'impact-societal-de-la-5g-passe-au-crible/. [Accès le 2024 MAI 01].
- [14] arcep, «arcep,» arcep, 2023 SEPTEMBRE 11. [En ligne]. Available: www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html. [Accès le 2024 05 01].
- [15] Groupe de travail de l'Académie des sciences sur les réseaux du futur, «RAPPORT SUR LA 5G ET LES RÉSEAUX DE COMMUNICATIONS MOBILES,» RÉSEAUX DE COMMUNICATIONS, FRANCE, 2021.
- [16] E. P. S. e. S. J. DAHLMAN, 5G NR: The next generation wireless access technology., Academic Press, , 2020..
- [17] «3GPP, 5G System Overview,» 3GPP, [En ligne]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-systemoverview>. [Accès le 24 02 2024].

Bibliographie

- [18] 3GPP., Technical Specification Group Services and System Aspects, ; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items. Tech. Rep., 2019.
- [19] E. P. S. e. S. J. A. P. DAHLMAN, 5G NR: The next generation wireless access technology., 2020.
- [20] [En ligne]. Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_RadioProtocolStackArchitecture.html. [Accès le 15 02 2024].
- [21] 3. NR et Physical channels and modulation (TS) 38.211, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specific, 2018.
- [22] 3. T. S. (. 38.215, NR; Physical layer measurements, 2020.
- [23] K. BENSON, Phased array beamforming ICs simplify antenna design, Analog Dialogue, 2019.
- [24] [En ligne]. Available: <https://www.es-france.com/12699-antenne-directionnelle-bi-bande-690-960-mhz-1700-2700-mhz-et-double-polarisation-ma-wa82220db-dp14.html>. [Accès le 23 01 2024].
- [25] M. R. C. e. K. M. N. PAPPA, Performance comparison of massive MIMO and conventional MIMO using channel parameters. In : 2017 international conference on wireless communications, signal processing and networking (WiSPNET). IEEE,, 2017.
- [26] 2014. [En ligne]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-Multi-user-MIMO-system-where-the-BS-has-M-transmitter-antennas-and-the-number_fig1_313575604. [Accès le 15 03 2024].

Bibliographie

- [27] G. e. R. H. BROWN, Exploring the potential of mmWave for 5G mobile access. Qualcomm White Paper,, 2016.
- [28] Y. L. Y. J. D. e. a. NIU, A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. Wireless networks,, 2015.
- [29] J. S. S. D. C. P. e. a. LU, Modeling human blockers in millimeter wave radio links. ZTE communications,, 2012.
- [30] Y. M. R. G. e. B. G. R. BANDAY, Effect of atmospheric absorption on millimetre wave frequencies for 5G cellular networks. IET Communications,, 2019,.
- [31] F. e. S. R. M. AL-OGAILI, Millimeter-wave mobile communications for 5G: Challenges and opportunities. In : 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). IEEE,, 2016.
- [32] L. I. e. a. C. PERPIÑÁ, «technology in 5G networks: Modelling and assessment with ATOLL.,» chez *Thèse de maîtrise*, Universitat Politècnica de Catalunya., 2023.
- [33] W. B. e. C. A. (. e. a. d. r. m. 3. e. 4G, Etudes et analyse des réseaux mobiles 3G et 4G, JIJEL: UNIVERSITE DE JIJEL, 2021.
- [34] H. PARSIAN, Comparison of Asset and Atoll Cellular Planning Tools for LTE Network Planning. Dept. Communication and Networking, Aalto: Univ. Finland, Finland, Master Thesis, 2012.
- [35] A. A. F. M. J. e. a. ., ZAIDI, 5G Physical Layer: principles, models and technology components., Academic Press, 2018..

Résumé

L'évolution rapide des technologies mobiles a rendu les réseaux 4G insuffisants pour répondre aux exigences avancées des réseaux sans fil de demain, qui incluent une meilleure mobilité, une latence plus faible, une plus grande fiabilité, une consommation d'énergie optimisée et des vitesses de transmission de données supérieures pour un coût réduit. En conséquence, la technologie 5G a été développée pour pallier ces lacunes.

Toutefois, à mesure que les technologies de communication sans fil avancent et que le rayon d'action des réseaux radio s'élargit, la complexité de la planification de ces réseaux s'intensifie. Il est donc crucial d'étudier minutieusement la couverture et l'optimisation de la planification des réseaux radio 5G avant leur mise en place. Pour ce projet de fin d'études, nous avons analysé et simulé les paramètres définissant la planification des réseaux radio 5G, tels que la couverture, la capacité et la qualité de service. Pour cela, nous avons employé l'outil Atoll (version 3.4.0) pour la simulation concrète du réseau 5G.

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

Abstract

As mobile technology advances rapidly, 4G networks are falling short in fulfilling the ambitious demands of upcoming wireless networks. These demands include high mobility, diminished latency, enhanced reliability, efficient power usage, and elevated data rates at a reduced cost. To address these challenges, the 5G solution has been implemented. However, as wireless communication technology becomes more sophisticated and the scope of the radio network expands, radio network planning becomes increasingly complex. Therefore, before deploying, the coverage and optimization of 5G radio network planning need to be meticulously scrutinized. In this concluding project, we aim to investigate and simulate the parameters that define 5G radio network planning, such as coverage, capacity, and quality of service. The Atoll tool (version 3.4.0) was employed for the practical simulation of the 5G network.

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

ملخص

مع تقدم التكنولوجيا المحمولة بسرعة، لم تعد شبكات الجيل الرابع قادرة على تلبية المتطلبات الطموحة للشبكات اللاسلكية القادمة. تشمل هذه المتطلبات التنقل العالي، وتقليل زمن الاستجابة، وتحسين الموثوقية، واستخدام الطاقة بكفاءة، ومع ذلك، ومع ازدياد (5G) ورفع معدلات البيانات بتكلفة منخفضة. وللتصدي لهذه التحديات، تم تنفيذ حل الجيل الخامس تعقيد تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية وتوسع نطاق الشبكة الراديوية، تصبح عملية تخطيط الشبكة الراديوية أكثر تعقيداً. بعناية. في هذا المشروع (5G) لذلك، قبل النشر، يجب فحص تغطية وتطوير تخطيط الشبكة الراديوية للجيل الخامس ، مثل التغطية والسعة (5G) الختامي، نهدف إلى دراسة ومحاكاة المعايير التي تحدد تخطيط الشبكة الراديوية للجيل الخامس (5G) (الإصدار 3.4.0) لمحاكاة عملية شبكة الجيل الخامس (Atoll) وجود الخدمة. تم استخدام أداة

، وأداة SS-RSRP ، مؤشر gNB ، التغطية، السعة، التخطيط التفصيلي، محطة (5G) الكلمات المفتاحية: الجيل الخامس Atoll.
