REPUBLIQUE DU SENEGAL



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

UNIVERSITE GASTON BERGER DE SAINT-LOUIS



U.F.R DE SCIENCES APPLIQUEES ET DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master d'Ingénierie en Electronique et Télécommunications (MIETEL)

Conception et Implémentation d'un outil de dimensionnement et de planification pour la 5G

Présenté par :

Elhadji Mamadou DIEME

Sous la Direction :

Pr. Chérif DIALLO

Année universitaire : 2022/2023

Dédicaces

Louanges à Allah, le Très Miséricordieux, le Très Clément, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance et Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

À mes parents bien-aimés,
Qui ont toujours été le socle de mon éducation et de mon épanouissement. Leur amour incommensurable, leurs prières constantes et leurs innombrables sacrifices ont pavé le chemin de ma réussite. Ce travail est le fruit de leur bienveillance et de leur foi en moi.

À ma famille,
Dont le soutien indéfectible et les encouragements m'ont permis d'avancer malgré les épreuves.

À mes frères et sœurs en la foi,
Particulièrement à Mouhamed Hamid Dia, Serigne Fallou Ndiaye, Oumou Kalsoume Ba, Ndeye Sokhna Ndao, Hadja Bocoum, Mbombé Kane, Oumou Gadiaga, dont la fraternité, les conseils et les invocations ont été une source de réconfort et de motivation.

À l'AEEMS,
Cette noble association qui a été pour moi une véritable école de vie, m'offrant un cadre d'apprentissage, d'engagement et de fraternité. Une mention spéciale à la SECUS, section universitaire de l'AEEMS, dont l'engagement et l'esprit de solidarité ont marqué mon évolution personnelle et académique.

À mon maître coranique, Oustaz BARRY,
Qui, avec patience et sagesse, m'a enseigné la Parole d'Allah au sein de la Daara Zeyd Ibn Thaabit, et m'a inculqué des valeurs fondamentales qui ont guidé mon cheminement. Que Dieu lui accorde Ses bienfaits ici-bas et dans l'Au-delà.

À mes enseignants et encadrants,
Pour la rigueur intellectuelle qu'ils m'ont inculquée, leurs précieux conseils et leur engagement à transmettre le savoir avec passion et dévouement.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail,
Par leurs conseils avisés, leur bienveillance ou simplement leur présence réconfortante.

Que Le Très-Haut les récompense tous de la meilleure des manières.

Remerciements

Au terme de ce parcours académique intense et enrichissant, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Mes premiers remerciements s'adressent à mon encadrant, Pr. Chérif DIALLO, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce travail. Son expertise et ses orientations ont été déterminants pour mener à bien ce projet.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble du corps enseignant de l'UFR de Sciences et de Technologie pour les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon cursus, ainsi qu'aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements chaleureux vont également aux professionnels du secteur des télécommunications qui ont accepté de partager leur expérience et leurs perspectives, enrichissant ainsi ma compréhension des enjeux actuels de la 5G.

Je remercie sincèrement mes collègues et camarades de promotion pour leur esprit de partage et leur soutien moral durant ces années d'études. Leur présence a enrichi mon parcours académique et personnel.

Enfin, mes pensées les plus affectueuses vont à ma famille, particulièrement à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants, et leur soutien indéfectible, sans lesquels ce travail n'aurait pu voir le jour.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre des recherches sur le déploiement des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) et vise à concevoir et implémenter un outil de dimensionnement et de planification adapté à cette technologie. La 5G, avec ses caractéristiques avancées telles que des débits élevés, une latence faible et une connectivité massive, représente une avancée significative dans l'évolution des réseaux mobiles.

Dans un premier temps, nous avons exploré les généralités sur la 5G, en retraçant l'évolution des générations précédentes de réseaux mobiles et en mettant en évidence les fondements théoriques et technologiques qui sous-tendent la 5G. Ce chapitre pose les bases nécessaires à la compréhension des exigences et des spécificités de cette technologie émergente.

Le second chapitre se concentre sur le dimensionnement des réseaux 5G. Il détaille les scénarios de déploiement, les modèles de propagation, ainsi que les processus et paramètres essentiels pour optimiser la couverture et les performances du réseau. Une attention particulière est accordée aux défis liés au choix des bandes de fréquences, au bilan de liaison, et à la répartition des stations de relais dans les zones à couvrir.

Enfin, le troisième chapitre est dédié à la conception et à l'implémentation d'un outil pratique pour le dimensionnement et la planification de la 5G. Après avoir défini les besoins fonctionnels et non fonctionnels, une analyse technique a été menée pour choisir les équipements et technologies adaptés. L'outil développé intègre des fonctionnalités telles que le calcul de pertes de chemin, l'estimation du nombre de stations relais nécessaires, et la simulation du déploiement sur des zones spécifiques.

Mot clés : Réseaux 5G, Dimensionnement, Planification, Couverture Radio, Réseaux Mobiles

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a planning and dimensioning tool for fifth-generation (5G) networks. With its advanced features such as high data rates, reduced latency, and massive connectivity, 5G represents a significant evolution in mobile networks.

The first chapter explores the fundamentals of 5G technology, tracing the evolution of previous mobile network generations and highlighting the theoretical and technological foundations that underpin 5G. This chapter provides a comprehensive understanding of the requirements and specificities of this cutting-edge technology.

The second chapter delves into the dimensioning of 5G networks. It outlines various deployment scenarios, propagation models, and the essential processes and parameters required for optimizing network coverage and performance. Key aspects include frequency band selection, link budget calculations, and the optimal distribution of relay stations in coverage areas.

The final chapter is dedicated to the design and implementation of a practical tool for 5G network planning and dimensioning. Following a thorough analysis of functional and non-functional requirements, appropriate technologies and tools were selected. The developed tool includes features such as path loss calculation, estimation of required relay stations, and simulation of network dimensioning for specific areas.

Keywords : 5G Networks, Dimensioning, Planning, Radio Coverage, Mobile Networks

Table des matières

Dédicaces i

Remerciements ii

Résumé iii

Abstract iv

Table des matières v

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

Liste des abréviations xi

Introduction Générale 1

Chapitre 1 : Généralités sur la 5G 3

1.1 Introduction 3

1. 2 Evolution des réseaux mobiles 3

1.2.1 La première génération 3

1.2.2 La deuxième génération 4

1.2.2.1 Architecture du réseau GSM 4

1.2.2.3 Le réseau GPRS (2.5G) 5

1.2.2.4 Le réseau EDGE (2.75G) 6

1.2.3 La troisième génération 6

1.2.3.1 Le réseaux UMTS 7

1.2.3.2 Réseau d'accès UTRAN 8

1.2.3.3 Les normes HSDPA et HSUPA (3G+) 8

1.2.4 La quatrième génération 9

1.2.4.1 Architecture du réseau EPS 9

1.2.4.2 Le réseau d'accès E-UTRAN 10

1.2.4.3 Le réseau cœur EPC 10

1.3 Fondements théoriques et avancées technologiques de la 5G 11

1.3.1 La 5G : Définition, Objectifs, Caractéristiques et Avantages 11
1.3.2 Exigences du réseau 5G 14
1.3.2.1 Débit de données élevé 15
1.3.2.2 Latence ultra-faible 15
1.3.2.3 Capacité réseau accrue 15
1.3.2.4. Fiabilité 15
1.3.2.5. Efficacité énergétique 16
1.3.2.6 Flexibilité du spectre 16
1.3.3 Architecture de la 5G 16
1.3.3.1 Réseau cœur (Core Network) 16
1.3.3.2 Réseaux d'accès (Access Networks) 18
1.3.3.3 Options d'architecture 5G 19
1.3.4 Les technologies et normes sous-jacentes à la 5G 20
1.3.4.1 5G New Radio (NR) 20
1.3.4.2 Catégories de services de la 5G 21
1.3.4.3 Transmission multi-antennes 22
1.3.4.4 Beamforming 23
1.3.4.5 Carrier aggregation 24
1.3.5 Network Slicing 24
1.3.6 Edge Computing 25
1.3.7 Virtualisation des fonctions réseau (NFV) et SDN 26
1.3.8 Modulation et accès multiple 26
1.3.9 Fréquences et bandes de spectre 27
1.3.10 IoT et M2M 28
1.4 Conclusion 29
Chapitre 2 : Dimensionnement du réseau 5G 30
2.1 Introduction 30

2.2 Les divers scénarios de déploiement dans la 5G 30
2.2.1 Scénarios pour les Macro cellules 30
2.2.1.1 eMBB (enhanced Mobile Broad Band) 30
2.2.1.2 BLUF (Basse Latence Ultra Fiable) 31
2.2.1.3 AIRE (Accès à l'Internet pour les régions éloignées) 32
2.2.2 Scénarios pour les Micro cellules 32
2.2.2.1 UMi dans la gorge de la rue et dans une place ouverte 32
2.2.2.2 InH (Indoor Hotspot) 33
2.2.2.3 Communication entre objets /ou communication entre les machines (M2M) . 33
2.3 Dimensionnement d'un réseau 5G 34
2.3.1 Processus de dimensionnement du réseau 5G 34
2.3.2 Choix de la bande de fréquence 34
2.3.3 Choix du type de dimensionnement 35
2.3.4 Modèles de propagation 36
2.3.4.1 Le modèle de propagation en espace libre 36
2.3.4.2 Modèle de propagation Alpha Beta Gama (UMi, UMa) 36
2.3.4.3 Modèle Close-In (CI) 37
2.3.4.4 Modèle Close-In with Frequency weight (CIF) 38
2.3.4.5 Modèle Alpha Beta Gama et close-in F à double-pente 38
2.4 Bilan de Liaison 39
2.4.1 Puissance isotrope rayonnée équivalente 40
2.4.2 Sensibilité de réception 41
2.4.3 Affaiblissement maximum tolérable 42
2.5 Dimensionnement selon la couverture 43
2.5.1 Système de réseau d'accès 5G 43
2.5.2 Portée d'une station de base et d'une station de relais 44
2.5.3 Détermination du nombre de stations de relais à utiliser 45

2.5.4 Répartition des stations de relais dans une zone à couvrir 45
2.5.5 Contrôle d'admission d'utilisateur 46
2.5.6 Contrôle de puissance 47
2.5.7 Arrangement d'association d'utilisateurs basé sur le diagramme de Voronoi 49
2.6 Conclusion 50
Chapitre 3 : Conception et implémentation de l'outil 51
3.1 Introduction 51
3.2 Définitions des besoins 51
3.2.1 Exigences fonctionnels 52
3.2.2 Exigences non fonctionnels 52
3.3 Analyse technique 53
3.3.1 Equipements de base 53
3.3.2 Outils de conception 53
3.3.2.1 Outil d'envoi de requêtes API 54
3.3.2.2 Outil de développement 54
3.3.3 Choix du langage de modélisation 56
3.4 Présentation de l'outil 56
3.4.1 Interface de connexion 57
3.4.2 Interface d'accueil 58
3.5 Simulation de dimensionnement 59
3.5.1 Calcul de pertes du chemin 59
3.5.2 Calcul de la portée des stations de base/relai (Bilan de liaison) 62
3.5.3 Estimation du nombre de stations relais nécessaires 65
3.5.4 Simulation du dimensionnement d'une zone spécifique 66
3.6 Conclusion 70
Conclusion Générale 71
Bibliographie xvi

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Avantages et Inconvénients du réseau mobile 1G [5] 4
Tableau 1.2 : Avantages et Inconvénients de la 3G 7
Tableau 1.3 : Exigences minimales de performance technique pour l'IMT-2020 [24] 12
Tableau 1.4 : Bandes d'exploitation NR [25] 13
Tableau 3.5 : Pertes en chemin pour différents environnements 60
Tableau 3.6 : PIRE, la sensibilité et l'affaiblissement selon la zone 64
Tableau 3.7 : Paramètres de simulation 67

Liste des figures

Figure 1.1 : Architecture du réseau GSM [7] 5
Figure 1. 2 : Architecture du réseau GPRS [8] 6
Figure 1. 3 : Architecture du réseau UMTS [11] 7
Figure 1.4 : Architecture du réseau d'accès [13] 8
Figure 1.5 : Architecture du réseau LTE [17] 9
Figure 1.6 : Architecture E-UTRAN [19] 10
Figure 1.7 : Architecture EPC [20] 11
Figure 1.8 : Architecture 5G [21] 17
Figure 1.9 : Architecture du NG-RAN [28] 19
Figure 1.10 : Modes de déploiement autonome et non-autonome du réseau 5G [30] 20
Figure 1.11 : Types de services de la 5G NR [31] 21
Figure 1.12 : Massive MIMO [34] 23
Figure 1.13 : Beamforming [30] 23
Figure 1.14 : Architecture du Network Slicing [27] 25
Figure 1.15 : Architecture du Edge Computing [34] 26
Figure 1.16 : 5G Network Spectrum [37] 28
Figure 3.17 : Outil de test endpoint API 54
Figure 3.18 : Outil de développement InteliJ 55
Figure 3.19 : Diagramme des cas d'utilisation de l'outil 55
Figure 3.20 : Interface de connexion 57
Figure 3.21 : Interface de réinitialisation 58
Figure 3.22 : Interface d'accueil 59
Figure 3.23 : Interface de calcul du Path Loss 60
Figure 3.24 : Comparaison du Path Loss en fonction de la portée pour différents modèles 61
Figure 3.25 : Path Loss en fonction de la portée pour différents types de terrain 61
Figure 3.26 : Interface de calcul du bilan de liaison 63
Figure 3.27 : Variation de maximum Path loss (dB) en fonction des portées 64
Figure 3.28 : Calcule de nombre de stations de relais 66
Figure 3.29 : Interface de dimensionnement 67
Figure 3.30 : Ajout des sites dans la zone de couverture 68
Figure 3.31 : Diagramme de Voronoi pour le réseau sans fil hétérogènes 69

Liste des abréviations

ABG : Alpha-Beta-Gamma (path loss model)

A-bis : Interface between BTS and BSC

AF : Application Function

AM : Amplitude Modulation

AMF : Access and Mobility Management Function

AMPS : Advanced Mobile Phone System

API : Application Programming Interface

ARQ : Automatic Repeat Request

AUSF : Authentication Server Function

BER : Bit Error Rate

BLUF : Bottom Line Up Front

BPSK : Binary Phase Shift Keying

BS : Base station

BSC : Base Station Controller

BTS : Base Transceiver Station

CA : Carrier Aggregation

CAU : User Admission Control

CDMA : Code Division Multiple Access

CI : Close-In

CIF : Close-In with Frequency weight

CoMP : Coordinated Multipoint

CP-OFDM : Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing

DL : Downlink

DOM : Document Object Model

EDGE : Enhanced Data rates for GSM Evolution

eMBB : Enhanced Mobile Broadband

eNodeB : Evolved Node B (base station in LTE networks)

EPC : Evolved Packet Core

EPS : Evolved Packet System

ETACS : Extended Total Access Communication System

ETSI : European Telecommunications Standards Institute

E-UTRAN : Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

FEC : Forward Error Correction

FR : Frequency Range

FSPL : Free Space Path Loss

Gbps : Gigabits per Second

gNodeB : Next-Generation Node B (base station in 5G networks)

GPRS : General Packet Radio Service

GSM : Global System for Mobile Communications

HetNet : Heterogeneous Network

HSDPA : High-Speed Downlink Packet Access

HSPA : High-Speed Packet Access

HSPA+ : Evolved High-Speed Packet Access

HSS : Home Subscriber Server

HSUPA : High-Speed Uplink Packet Access

FDMA : Frequency Division Multiple Access

HLR : Home Location Register

InH : Indoor Hotspot

IoC : Inversion of Control

IoT : Internet of Things

ITU-R : International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector

LOS : Line of Sight

LDPC : Low-Density Parity-Check

LTE : Long-Term Evolution

MIMO : Multiple Input Multiple Output

Mbps : Megabits per Second

MEC : Multi-access Edge Computing

MME : Mobility Management Entity

MMS : Multimedia Messaging Service

MSC : Mobile Switching Center

mMTC : Massive Machine-Type Communications

M2M : Machine-to-Machine

NFV : Network Functions Virtualization

ng-eNodeB : Next-Generation Evolved Node B (LTE base station adapted for 5G core)

NG-C : Next-Generation Control Plane

NG-U : Next-Generation User Plane

NG-RAN : Next-Generation Radio Access Network

NLOS : Non-Line of Sight

NodeB : Base station in 3G (UMTS) networks

NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access

NS : Network Slice

NSA : Non-Standalone (5G deployment mode with LTE as anchor)

NSS : Network Switching Subsystem

NSSF : Network Slice Selection Function

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (Equivalent Isotropically Radiated Power)

PCF : Policy Control Function

PCRF : Policy and Charging Rules Function

PL : Path Loss

PLE : Path Loss Exponent

P-GW : Packet Gateway

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QoS : Quality of Service

RAN : Radio Access Network

RNC : Radio Network Controller

RLB : Radio Link Budget

RS : Relay Station

RSS : Received Signal Strength

SA : Standalone (5G deployment mode independent of LTE)

SBA : Service-Based Architecture

SDN : Software-Defined Networking

SMF : Session Management Function

SMSC : Short Message Service Center

SMSF : Short Message Service Function

SMS : Short Message Service

SNR : Signal-to-Noise Ratio

SSS : Secondary Synchronization Signal

S-GW : Serving Gateway

TACS : Total Access Communication System

UE : User Equipment

UDM : Unified Data Management

UMa : Urban Macrocell

UMi : Urban Microcell

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

UL : Uplink

UPF : User Plane Function

UTRAN : Universal Terrestrial Radio Access Network

URLLC : Ultra-Reliable Low Latency Communications

VMSC : Visited Mobile Switching Center

VLR : Visitor Location Register

VoIP : Voice over Internet Protoco

WCDMA : Wideband Code Division Multiple Access

WAP : Wireless Application Protocol

3GPP : 3rd Generation Partnership Project

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, les réseaux de télécommunications ont connu une évolution rapide pour répondre à la demande croissante de connectivité, de vitesse et de fiabilité. Avec l'émergence de nouvelles applications exigeantes en bande passante, telles que la vidéo en streaming, les services en temps réel et l'Internet des objets (IoT), il est devenu impératif de développer des réseaux plus performants et adaptés à ces besoins. Dans ce contexte, la cinquième génération de réseaux mobiles est en train de révolutionner le paysage des télécommunications en offrant des performances sans précédent.

Cependant, le déploiement réussi de la 5G nécessite une planification et un dimensionnement méticuleux. Il s'agit d'optimiser la couverture radio, de garantir une capacité suffisante, et d'assurer une qualité de service adaptée aux besoins des utilisateurs. Cela implique de prendre en compte des technologies avancées, telles que les bandes de fréquences millimétriques, le Massive MIMO, et les architectures ultra-denses, ainsi que des facteurs environnementaux variés, qu'ils soient urbains, ruraux ou spécifiques à certaines conditions géographiques.

La complexité du dimensionnement de la 5G réside également dans la nécessité de modéliser les ressources, comme la portée des stations de base et le choix des modèles de propagation adaptés. Ce processus doit permettre d'estimer le nombre d'infrastructures nécessaires pour offrir une couverture idéale tout en minimisant les coûts d'installation. En parallèle, les scénarios de déploiement doivent répondre à des besoins variés, allant des zones densement peuplées aux régions éloignées, en s'adaptant aux exigences de faible latence et de haut débit pour les applications critiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective, visant à concevoir et implémenter un outil systématique pour le dimensionnement et la planification des réseaux 5G. Basé sur des modèles mathématiques et des simulations avancées, cet outil permettra de générer des recommandations adaptées pour le déploiement de réseaux 5G, en prenant en compte les contraintes techniques et environnementales.

La suite de ce mémoire est organisée de la manière suivante :

- Le chapitre 1 examinera l'évolution des réseaux mobiles, depuis la première génération (1G) jusqu'à la quatrième (4G), et présente les fondements théoriques et technologiques de la 5G. Les innovations majeures de la 5G et leur impact sur le paysage des télécommunications seront également abordés.

- Le chapitre 2 explorera les divers scénarios de déploiement et les processus de dimensionnement d'un réseau 5G. Il détaille les modèles de propagation, les bilans de liaison, et les approches utilisées pour estimer les besoins en infrastructure en fonction de la couverture et de la densité d'utilisateurs.
- Et enfin le chapitre 3 se concentre sur la conception et la mise en œuvre de l'outil de dimensionnement pour les réseaux 5G. Les besoins fonctionnels et techniques, les étapes de développement, ainsi que les simulations réalisées pour valider les performances de l'outil y seront décrits.

Chapitre 1 : Généralités sur la 5G

1.1 Introduction

Les réseaux mobiles ont connu une évolution progressive depuis leur création. L'objectif principal de cette évolution a été d'augmenter la capacité et la vitesse du réseau tout en réduisant les coûts de mise en œuvre et d'exploitation. Les réseaux mobiles ont évolué au fil des années pour offrir une couverture plus large, une connectivité plus rapide et plus stable, ainsi qu'une meilleure qualité de service pour les utilisateurs.

Dans ce chapitre, nous retracerons l'évolution des réseaux mobiles, depuis les premiers réseaux analogiques de la 1G jusqu'à la 5G, en mettant en évidence les changements majeurs et les innovations technologiques introduits à chaque étape. Enfin, nous explorerons les principes fondamentaux et les avancées de la 5G, qui marquent une rupture significative avec les générations précédentes et redéfinissent les standards de la connectivité mobile.

1. 2 Evolution des réseaux mobiles

1.2.1 La première génération

Les réseaux mobiles de première génération ont été développés dans les années 1980. Ces réseaux étaient analogiques et utilisés pour les appels vocaux uniquement [1]. Les réseaux 1G étaient limités en termes de vitesse et de couverture, avec une capacité limitée et une qualité de service médiocre [2], le système de contrôle qui gère toutes les informations relatives aux appareils mobiles est situé dans le MSC des réseaux 1G. En outre, le MSC est responsable de toutes les fonctions de gestion de réseau, telles que le traitement des appels, la facturation et la détection de la fraude.

La 1G a marqué le début de la téléphonie mobile avec des systèmes analogiques [3]. Le système AMPS, lancé en 1976 aux États-Unis, était le premier standard cellulaire, mais vulnérable aux piratages. En Europe, le TACS, fonctionnant à 900 MHz, fut adopté notamment en Angleterre et en Asie. L'ETACS, introduit en 1983 au Royaume-Uni, offrait plus de canaux, augmentant ainsi la capacité et la performance du réseau [4].

Le système 1G souffrait de plusieurs limitations, telles qu'une capacité restreinte due à l'utilisation de la technique d'accès FDMA, et l'incompatibilité des normes entre différentes régions. De plus, l'absence de mécanismes de sécurité efficaces rendait le système vulnérable à

la fraude, et la mobilité des utilisateurs était limitée, notamment en raison de l'absence de roaming international [2]. Ces défauts ont été corrigés avec l'introduction des réseaux 2G, qui apportaient des technologies numériques, une meilleure qualité de service et des coûts réduits.

Le tableau 1.1 ci-dessous présente un résumé des avantages et inconvénients de la première génération de téléphonie mobile.

Tableau 1.1 : Avantages et Inconvénients du réseau mobile 1G [5]

Avantages	Inconvénients
Transmission vocale sans fil	Capacité limitée (Utilisation de la technique d'accès FDMA)
Service nationale de roaming	Nombre de canaux de voix limitée
Large couverture géographique	Pas de roaming vers l'international
	Transmission analogique non sécurisée
	Mobilité limitée des utilisateurs
	Taille des équipements importants

1.2.2 La deuxième génération

Les réseaux mobiles de deuxième génération, introduits dans les années 1990, ont remplacé les réseaux 1G. ls offrent une qualité vocale avec une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz, une capacité réseau multipliée par environ 10 grâce à la commutation numérique, et permettent l'envoi de messages texte via le protocole SMS (160 caractères par message) [5]. Les principales normes 2G sont le GSM, développé par l'ETSI et largement utilisé dans le monde, et le CDMA, développé par Qualcomm et principalement utilisé en Amérique du Nord [6].

1.2.2.1 Architecture du réseau GSM

L'architecture du GSM se compose de trois principaux sous-systèmes :

- Le sous-système radio (RSS) : Il est responsable de la transmission sans fil de signaux entre les téléphones portables et les BTS. Il comprend la BTS, reliée au réseau via l'interface A-bis, et un BSC qui coordonne plusieurs BTS et les appels entre elles [6].

- Le sous-système de réseau de base (NSS) : Il est responsable de la gestion des appels et messages entre téléphones mobiles. Il comprend le MSC pour acheminer les appels, le registre de localisation des utilisateurs (VLR) qui suit les utilisateurs actifs, et le registre de données d'abonné (HLR) qui stocke les informations des abonnés, comme les numéros de téléphone et les données de facturation [5].
- Le sous-système de support de service (SSS) : Il est responsable de la fourniture de des services supplémentaires aux abonnés, comme les SMS, la messagerie vocale et les services de données. Il inclut des centres spécialisés, tels que le centre de messagerie courte (SMSC) pour les SMS et le centre de messagerie vocale (VMSC) pour la messagerie vocale.

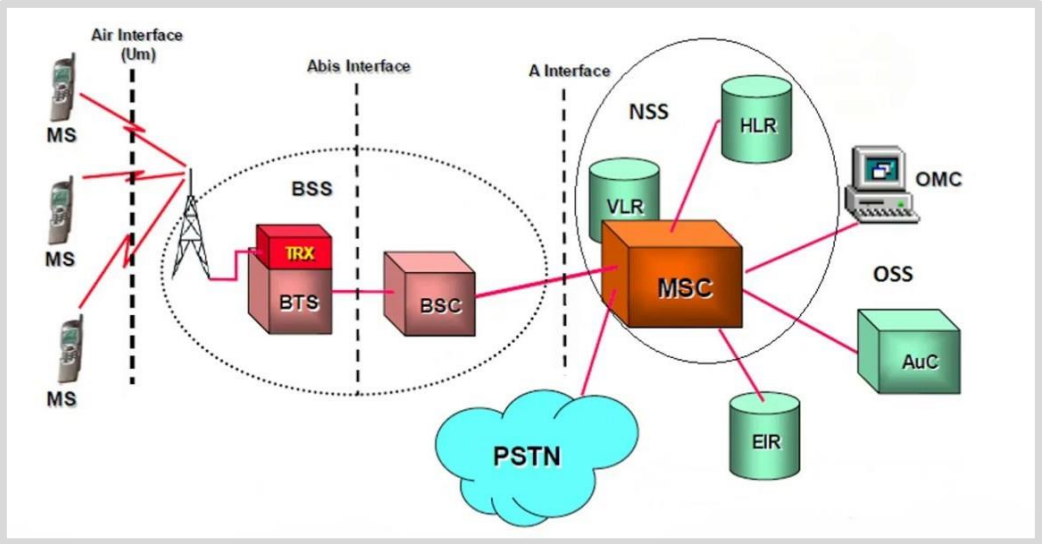


Figure 1.1 : Architecture du réseau GSM [7]

1.2.2.3 Le réseau GPRS (2.5G)

Le GPRS (General Packet Radio Service) est une technologie 2.5G qui améliore la transmission de données sur les réseaux GSM en utilisant des paquets de données plutôt que des connexions vocales [3]. Il optimise l'utilisation de la bande passante en allouant des ressources uniquement lors de la transmission de données et en employant une compression pour augmenter la vitesse de transmission, pouvant atteindre 114 kbps [4]. Cela a permis des services comme la navigation mobile et le streaming. Toutefois, le GPRS a été remplacé par des technologies plus avancées, comme l'EDGE, offrant de meilleures performances.

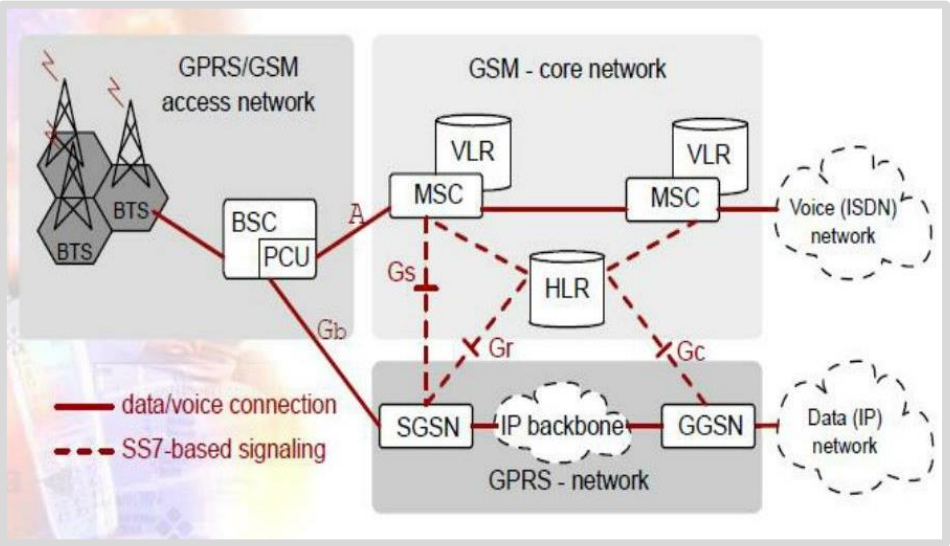


Figure 1. 2 : Architecture du réseau GPRS [8]

1.2.2.4 Le réseau EDGE (2.75G)

EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) est une technologie 2.5G qui améliore les vitesses de transmission de données sur les réseaux GSM, atteignant jusqu'à 384 kbps [9] grâce à une modulation 8PSK [4]. Elle permet des transferts plus rapides pour des applications comme la navigation mobile et les téléchargements. Bien qu'EDGE ait été largement adopté comme technologie de transition entre la 2G et la 3G, elle est désormais obsolète, remplacée par des réseaux plus avancés comme la 3G et la 4G. Les réseaux 2G ont aussi introduit des services de données tels que SMS, WAP et MMS [10].

1.2.3 La troisième génération

Les réseaux mobiles 3G, lancés au début des années 2000, ont offert une connectivité Internet mobile de base avec des vitesses de données supérieures à celles des réseaux 2G. Conçus pour des services comme la vidéo en continu, la navigation Web mobile et la vidéoconférence, les réseaux 3G utilisent des technologies de transmission de paquets comme le CDMA2000 et l'UMTS, permettant des débits plus élevés et une meilleure expérience utilisateur.

1.2.3.1 Le réseaux UMTS

L'UMTS, norme de télécommunications mobiles 3G développée en 2004 par le consortium 3GPP, permet des services de données à haut débit, atteignant 384 kbit/s, comme l'accès à Internet et la vidéophonie [4]. Il a évolué avec des technologies comme HSPA et HSPA+ pour des vitesses encore plus rapides. Toutefois, l'UMTS est progressivement remplacé par les réseaux 4G et 5G avec l'introduction de la norme LTE [3].

Le tableau 1.2 ci-dessous présente un résumé des avantages et inconvénients de la 3G [5].

Tableau 1.2 : Avantages et Inconvénients de la 3G

Avantages	Inconvénients
Transmission vocale sans fil	Capacité limitée (Utilisation de la technique d'accès FDMA)
Service nationale de roaming	Nombre de canaux de voix limitée
Large couverture géographique	Pas de roaming vers l'international
	Transmission analogique non sécurisée
	Mobilité limitée des utilisateurs
	Taille des équipements importants

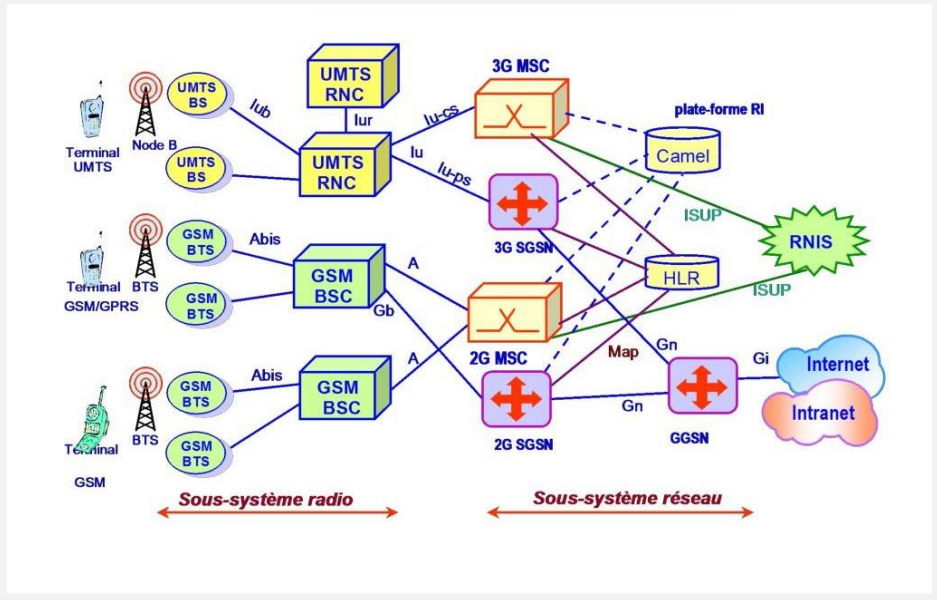


Figure 1. 3 : Architecture du réseau UMTS [11]

1.2.3.2 Réseau d'accès UTRAN

UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) désigne le réseau d'accès radio de la norme UMTS. Il gère les communications sans fil entre les appareils mobiles et les stations de base du réseau. L'UTRAN comprend des NodeB utilisant la technologie WCDMA pour transmettre et recevoir des signaux radio, ainsi que des contrôleurs radio (RNC) qui gèrent les ressources radio, chiffrent les données et localisent les terminaux mobiles [12]. Il inclut également des interfaces pour la communication entre les différents éléments du réseau UMTS.

Le principal objectif d'UTRAN est de fournir des services de communication sans fil à haut débit, de permettre la mobilité des utilisateurs et de gérer efficacement les ressources radio. Il utilise des technologies de pointe telles que la modulation adaptative, le multiplexage temporel et le multiplexage spatial pour améliorer la capacité et l'efficacité du réseau.

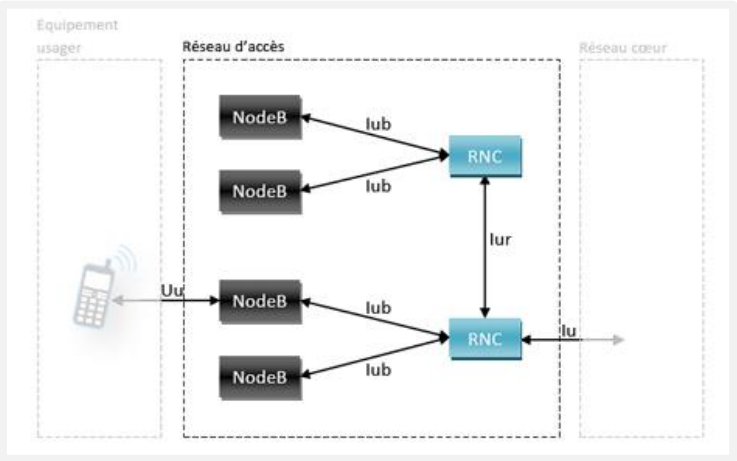


Figure 1.4 : Architecture du réseau d'accès [13]

1.2.3.3 Les normes HSDPA et HSUPA (3G+)

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) et HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) sont des extensions de la norme UMTS visant à améliorer les vitesses de transfert de données. HSDPA, également connu sous le nom de 3.5G ou 3G+ [14], augmente considérablement la vitesse de téléchargement en utilisant des techniques telles que la modulation adaptative et la retransmission sélective, permettant des téléchargements rapides et un streaming fluide [15]. HSUPA, de son côté, améliore la vitesse de téléversement [14] en optimisant les techniques utilisées pour le transfert de données vers le réseau, facilitant ainsi le partage de fichiers et les appels vidéo.

Malgré leur remplacement par des réseaux plus modernes, les réseaux 3G sont toujours utilisés dans certaines régions du monde où les réseaux 4G et 5G ne sont pas encore disponibles ou n'ont pas encore été largement adoptés.

1.2.4 La quatrième génération

Les réseaux mobiles de quatrième génération, lancés en 2009 [16], offrent des vitesses de transfert de données nettement supérieures à celles des réseaux 3G, avec une meilleure capacité et qualité de service [3]. Également connu sous le nom de EPS, le réseau 4G permet des fonctionnalités avancées comme la VoIP et le streaming haute qualité. Il se distingue par des vitesses plus rapides, une latence faible, et une performance globale améliorée. Le 4G utilise des techniques de modulation avancées telles que l'OFDM et supporte la technologie MIMO [3] pour optimiser la qualité du signal, la couverture et la capacité du réseau.

1.2.4.1 Architecture du réseau EPS

L'architecture du réseau EPS comprend deux principaux composants :

- **LTE ou E-UTRAN** : Partie radio du réseau 4G, constituée des eNodeB responsables de la communication radio avec les appareils mobiles.
- **EPC** : Cœur du réseau EPS, gérant le traitement et le routage des paquets de données dans un réseau tout-IP.

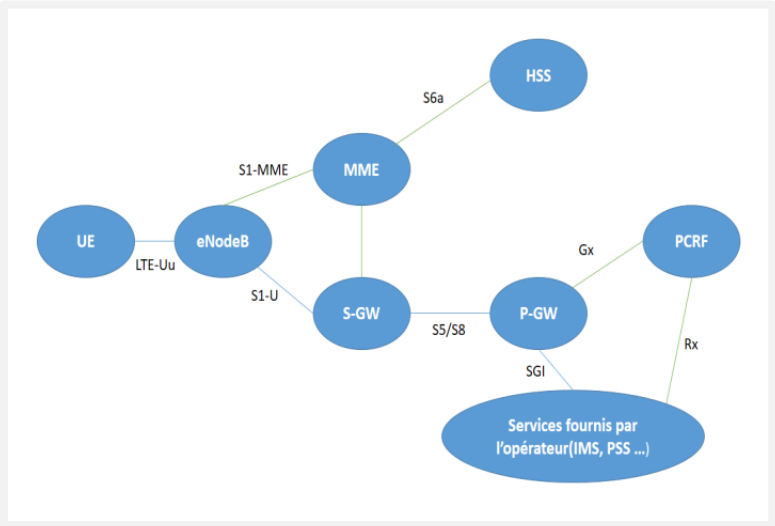


Figure 1.5 : Architecture du réseau LTE [17]

1.2.4.2 Le réseau d'accès E-UTRAN

Le réseau d'accès E-UTRAN reste indispensable dans l'architecture EPS, gérant la communication radio entre les appareils mobiles et le réseau. Le principal élément, l'eNodeB, effectue plusieurs fonctions essentielles :

- Contrôle de la liaison radio : Gestion des paramètres de signal, fréquence et modulation pour une communication stable.
- Gestion de la mobilité : Assure la continuité des sessions en cours lors du déplacement des appareils mobiles entre les eNodeBs.
- Encodage et décodage des données : Utilise des techniques avancées comme l'OFDM pour optimiser la transmission des données.
- Planification des ressources radio : Alloue efficacement les ressources radio pour maintenir des performances optimales du réseau [18].

En outre, plusieurs eNodeB sont connectés à des éléments du cœur de réseau, tels que le BSC ou la MME, pour la coordination et le contrôle des activités du réseau.

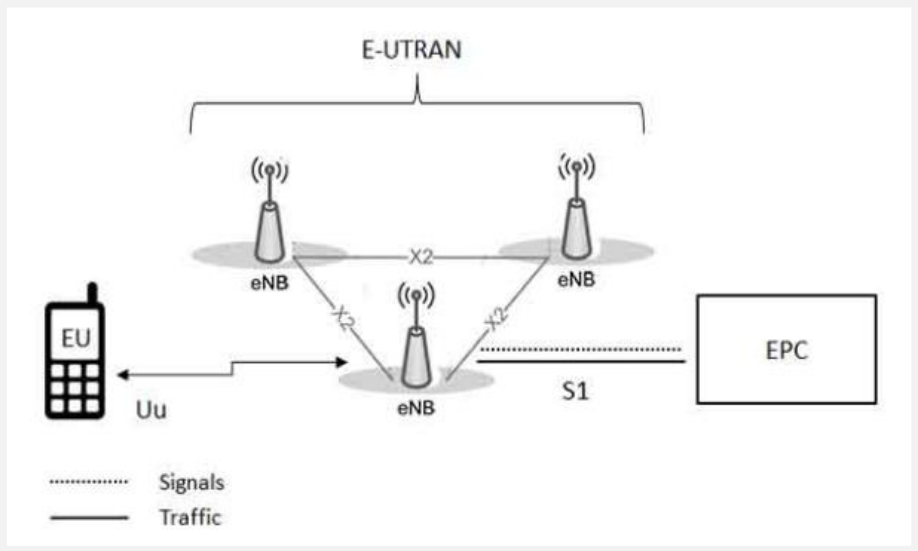


Figure 1.6 : Architecture E-UTRAN [19]

1.2.4.3 Le réseau cœur EPC

Le réseau cœur EPC est une composante clé de l'architecture du réseau 4G. Il est responsable du traitement et du routage des paquets de données dans le réseau.

- MME (Mobility Management Entity) : Gère la mobilité des appareils, l'authentification, l'établissement des sessions et le contexte de mobilité.
- S-GW (Serving Gateway) : Routage des données entre l'eNodeB et le reste du réseau, gestion de la mobilité des utilisateurs.
- P-GW (Packet Gateway) : Connectivité entre LTE et réseaux externes comme l'Internet, gestion du routage des données, facturation et sécurité.
- HSS (Home Subscriber Server) : Base de données centrale stockant les informations des abonnés, profils, clés d'authentification et autorisations.
- PCRF (Policy and Charging Rules Function) : Gère les politiques de réseau, la qualité de service (QoS) et la tarification des services [18].

Ces entités du réseau cœur EPC collaborent pour garantir un traitement efficace des paquets de données, une gestion fluide de la mobilité des utilisateurs et une connectivité fiable avec les réseaux externes. Elles assurent ainsi une expérience utilisateur optimale et des services de communication de haute qualité sur le réseau LTE.



Figure 1.7 : Architecture EPC [20]

1.3 Fondements théoriques et avancées technologiques de la 5G

1.3.1 La 5G : Définition, Objectifs, Caractéristiques et Avantages

La 5G représente l'évolution la plus récente des technologies de communication radio, succédant à la 4G avec des objectifs de connectivité ultra-rapide, une latence plus faible, une capacité élevée et une meilleure fiabilité [3]. Elle va au-delà du réseau mobile sans fil pour répondre aux besoins d'une société hyperconnectée. L'objectif principal de la 5G est de

permettre de nouveaux scénarios de déploiement, capables de répondre à une grande diversité de segments de marché [21]. Le projet IMT-2020, qui sert de référence pour la 5G prévoit des débits descendants allant jusqu'à 20 Gbps et des débits montants atteignant 10 Gbps, ainsi que des bandes passantes pouvant atteindre 1 GHz [22], et une réduction de la consommation d'énergie grâce à l'utilisation de logiciels pour la gestion des fonctions réseau et des services [23].

Tableau 1.3 : Exigences minimales de performance technique pour l'IMT-2020 [24]

Parameter	Minimum Technical Performance Requirement
Peak data rate	Downlink: 20 Gbps Uplink: 10 Gbps
Peak spectral efficiency	Downlink: 30 bit/s/Hz Uplink: 15 bit/s/Hz
User-experienced data rate	Downlink: 100 Mbps Uplink: 50 Mbps
Area traffic capacity	10 Mbps/m² (indoor hotspot for eMBB)
User plane latency	4 ms for eMBB 1 ms for URLLC
Control plane latency	20 ms
Connection density	1,000,000 devices per km²
Energy efficiency	Efficient data transmission in a loaded case Low energy consumption when there is no data High sleep ratio Long sleep duration
Reliability	$1\text{-}10^{-5}$ success probability of transmitting a layer 2 PDU of 32 bytes within 1 ms, at coverage edge in Urban Macro for URLLC
Mobility	1.5 bit/s/Hz at 10 km/h for indoor hotspot eMBB 1.12 bit/s/Hz at 30 km/h for dense urban eMBB 0.8 bit/s/Hz at 120 km/h for rural eMBB 0.45 bit/s/Hz at 500 km/h for rural eMBB
Mobility interruption time	0 ms

Bandwidth	At least 100 MHz and up to 1 GHz in higher frequency bands. Scalable bandwidth shall be supported

La NR (New Radio) peut être déployée dans différentes bandes de fréquences définies par la 3GPP dans le cadre des travaux de la Release 15. En raison des exigences différentes en matière de radiofréquence (par exemple, la puissance maximale de transmission), ces bandes ont été divisées en deux plages de fréquences :

- Plage de fréquences 1 (FR1) : inclut toutes les bandes existantes et nouvelles en dessous de 6 GHz.
- Plage de fréquences 2 (FR2) : inclut les nouvelles bandes dans la plage de 24,25 à 52,6 GHz.

En parallèle, la 3GPP a défini les bandes opérationnelles, correspondant à différentes plages de fréquences pour les liaisons descendantes (downlink) et montantes (uplink).

Tableau 1.4 : Bandes d'exploitation NR [25]

NR Operating Band	Uplink Range (MHz)	Downlink Range (MHz)	Duplex Mode
Frequency Range 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
Frequency Range 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

1.3.2 Exigences du réseau 5G

Pour mesurer l'efficacité et les capacités de la 5G, il est essentiel de se concentrer sur des paramètres critiques comme le débit de données, la latence, la capacité, la couverture et l'efficacité énergétique. Ces critères jouent un rôle fondamental dans la performance du réseau et dans sa capacité à supporter les applications et services modernes.

1.3.2.1 Débit de données élevé

Le débit de données est un paramètre clé qui distingue la 5G des générations précédentes. Alors que la 4G permettait des vitesses allant jusqu'à 1 Gbps, la 5G offre des débits pouvant atteindre 20 Gbps dans des conditions idéales [22]. Cette amélioration est due à des avancées technologiques telles que l'utilisation des ondes millimétriques (24 à 52 GHz), l'agrégation de porteuses qui combine plusieurs bandes de fréquences pour augmenter la capacité, et le Massive MIMO, qui utilise plusieurs antennes pour envoyer et recevoir simultanément plusieurs flux de données.

1.3.2.2 Latence ultra-faible

La latence correspond au temps nécessaire pour qu'une donnée circule dans le réseau. Dans les réseaux 4G, elle pouvait atteindre 50 millisecondes, tandis que la 5G vise à réduire ce délai à moins de 1 milliseconde. Cette réduction permet de nouvelles applications critiques, comme les véhicules autonomes, qui nécessitent des communications instantanées pour éviter les collisions, la chirurgie à distance avec des robots médicaux, et l'automatisation industrielle, où la réactivité rapide des machines est primordiale.

1.3.2.3 Capacité réseau accrue

La capacité réseau désigne le nombre d'appareils qu'un réseau peut gérer simultanément. Avec l'essor de l'IoT, la 5G peut supporter jusqu'à un million de connexions par kilomètre carré, contre 100 000 pour la 4G. Cette augmentation est rendue possible grâce à des innovations telles que le Network Slicing, qui divise le réseau en tranches pour des usages spécifiques, le Massive MIMO et le beamforming, qui augmentent la capacité en focalisant les signaux, ainsi qu'une optimisation pour les communications M2M.

1.3.2.4. Fiabilité

La 5G met un accent particulier sur la fiabilité, avec un taux de disponibilité de 99,999%, pour des applications critiques. Cela inclut les services d'urgence, qui dépendent d'une connectivité continue pour coordonner les opérations, l'automatisation industrielle où les machines doivent fonctionner en temps réel sans interruption, et les systèmes de santé, où les dispositifs médicaux

connectés requièrent une fiabilité maximale pour garantir la sécurité des patients et l'efficacité des soins à distance.

1.3.2.5. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est essentielle pour les dispositifs IoT à faible consommation. La 5G améliore cette efficacité par plusieurs mécanismes : la modulation adaptative ajuste dynamiquement la puissance selon les conditions de signal, le mode de veille optimisé permet aux appareils IoT d'économiser de l'énergie en étant activés uniquement en cas de besoin, et l'utilisation de petites cellules et du beamforming concentre les signaux, réduisant les pertes d'énergie dans les zones moins fréquentées.

1.3.2.6 Flexibilité du spectre

La 5G exploite une large gamme de fréquences, offrant une grande flexibilité d'utilisation. Les bandes basses (moins de 1 GHz) fournissent une couverture étendue, idéales pour les zones rurales, tandis que les bandes intermédiaires (1 à 6 GHz) équilibrent portée et capacité, adaptées aux environnements urbains. Les ondes millimétriques (au-delà de 24 GHz) offrent des vitesses et capacités très élevées, mais leur portée est réduite, ce qui les rend utiles dans des zones densément peuplées, comme les centres-villes ou les stades.

1.3.3 Architecture de la 5G

1.3.3.1 Réseau cœur (Core Network)

Le réseau cœur 5G, ou 5G Core (5GC), est une composante fondamentale pour gérer le trafic de données et fournir des services avancés. Il se distingue par sa flexibilité, évolutivité et adaptabilité, grâce à une architecture basée sur des logiciels (SDN) et des fonctions réseau virtualisées (NFV). Cette approche permet une plus grande agilité et simplifie les processus de déploiement.

Les principales fonctions du réseau 5GC comprennent [26] :

- **AMF (Access and Mobility Management Function)** : Gère l'accès, l'authentification, la mobilité et les connexions des utilisateurs au réseau.

- **SMF (Session Management Function)** : Responsable de la gestion des sessions de données utilisateurs, incluant l'établissement, la modification et la terminaison des sessions.
- **UPF (User Plane Function)** : Traite le trafic de données utilisateur, notamment le routage, la gestion de la qualité de service (QoS) et la gestion des flux de trafic.
- **SMSF** (Short Message Service Function) : Fonction dédiée à la gestion des services de messagerie courte (SMS).
- **NSSF (Network Slice Selection Function)** : Sélectionne et attribue des tranches de réseau (slices) selon les exigences des services ou des applications.
- **AUSF (Authentication Server Function)** : Assure l'authentification des abonnés et des dispositifs connectés.
- **UDM (Unified Data Management)** : Gère les données des utilisateurs, incluant les informations d'abonnement et d'authentification.
- **PCF (Policy Control Function)** : Définit et applique les politiques de gestion du réseau, telles que les règles de QoS et les priorités des services.
- **AF (Application Function)** : gère de manière particulière les flux de données dans le réseau 5G [27].

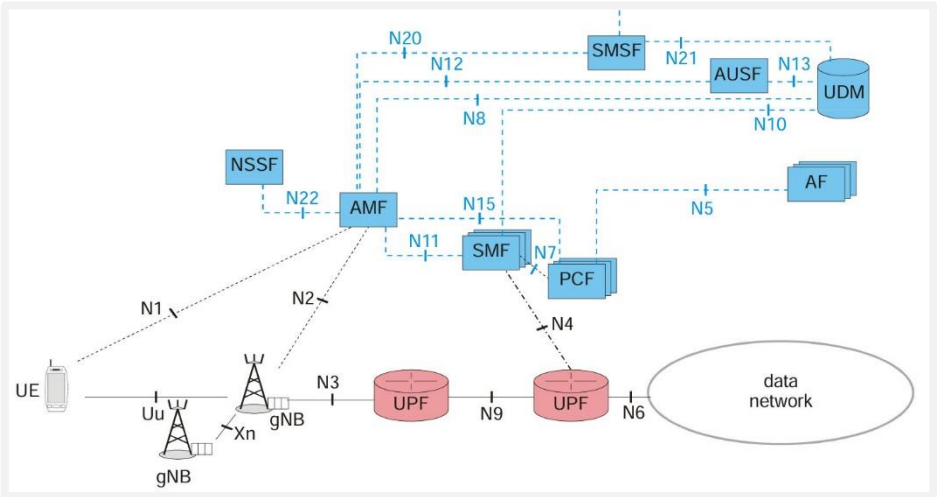


Figure 1.8 : Architecture 5G [21]

Conformément à la norme 3GPP, le nouveau cœur 5GC adopte une architecture de services (SBA) qui englobe toutes les fonctions et interactions de la 5G, telles que l'authentification, la sécurité, la gestion des sessions et l'agrégation du trafic des appareils terminaux. Le cœur 5G

met en avant la virtualisation des fonctions réseau (NFV), permettant le déploiement de fonctions logicielles virtualisées au moyen de l'infrastructure MEC [3].

1.3.3.2 Réseaux d'accès (Access Networks)

Le réseau d'accès radio (RAN) est chargé de la gestion des communications radio entre les UE et le gNodeB dans un réseau 5G. Étant donné que le réseau 5G propose de nombreuses fonctionnalités, comme le eMBB spécifié dans la release 15 (2018), les URLLC spécifié dans la release 16 (2020) et les mMTC spécifié dans la release 16 (2020) [3]- [21], il nécessite un ensemble de protocoles pour transmettre les données utilisateur et les informations de contrôle [26]. Dans la 5G, ce réseau est appelé NG-RAN. Il se compose principalement de deux types de stations de base :

- **gNodeB (gNB)** : Ce sont les stations de base 5G, qui gèrent la connectivité des appareils en utilisant les technologies radio de nouvelle génération.
- **ng-eNodeB (ng-eNB)** : Ce sont des stations de base 4G améliorées pour supporter la 5G, facilitant ainsi la transition entre la 4G et la 5G [21].

Les stations de base communiquent avec les appareils via une interface radio pour fournir des services comme la voix, les données, et la gestion de la mobilité.

- L'interface **Xn** permet la communication entre les stations de base gNB et ng-eNB. Cela facilite la coordination entre les différentes cellules du réseau, assurant ainsi une meilleure gestion du trafic et une meilleure mobilité des utilisateurs.

Les stations de base sont reliées au réseau 5GC via l'interface NG, qui se subdivise en deux parties :

- **NG-C (Control Plane)** : Gère le transport des signaux de contrôle (de la signalisation) tels que la gestion de la connexion, l'authentification et la mobilité.
- **NG-U (User Plane)** : Gère le transport des données utilisateur.

Le NG-RAN communique avec le réseau 5GC pour assurer la gestion des connexions, la sécurité et la fourniture des services tels que la voix, les données, la latence ultra-faible, et bien d'autres services spécifiques à la 5G.

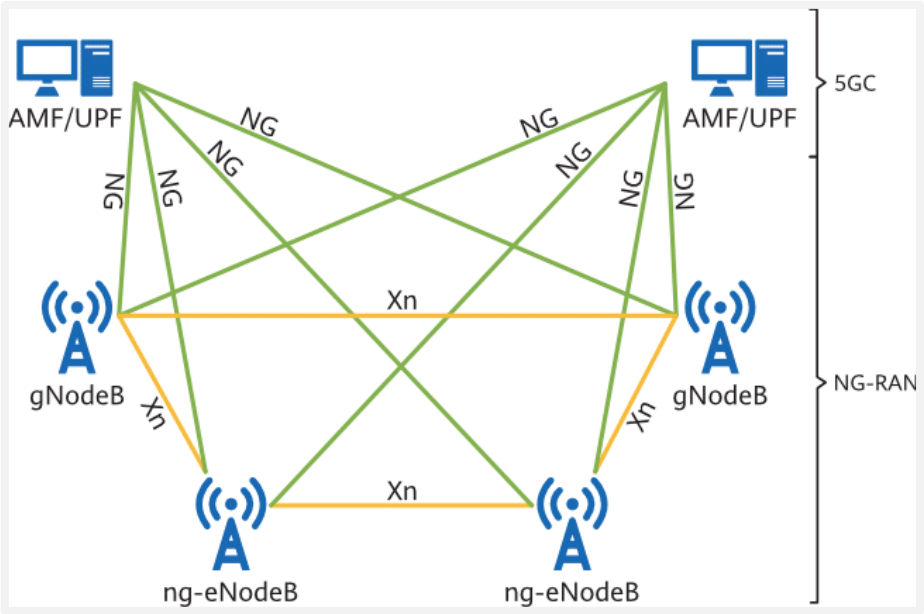


Figure 1.9 : Architecture du NG-RAN [28]

1.3.3.3 Options d'architecture 5G

Le déploiement de la 5G peut être réalisé selon deux modes principaux : le déploiement autonome et le déploiement non-autonome [29]. Chacun de ces modes présente des caractéristiques distinctes en termes d'architecture et de déploiement des réseaux.

1.3.3.3.1 Déploiement non-autonome

Le déploiement non-autonome de la 5G, également appelé 5G non-standalone (5G NSA), implique l'utilisation d'un réseau 4G existant comme support pour la 5G. Dans ce mode, les opérateurs déploient des stations de base 5G gNB qui fonctionnent en collaboration avec les stations de base 4G eNB pour fournir des services 5G [30]. Les fonctionnalités avancées de la 5G, sont rendues possibles grâce à la combinaison des réseaux 4G et 5G.

Le déploiement NSA permet une transition progressive vers la 5G, en tirant parti de l'infrastructure existante des réseaux 4G. Il offre une certaine compatibilité ascendante, permettant aux utilisateurs de bénéficier des améliorations apportées par la 5G tout en

conservant la connectivité avec les services 4G existants. Cependant, les performances optimales de la 5G ne sont atteintes que lorsque le déploiement autonome est mis en place.

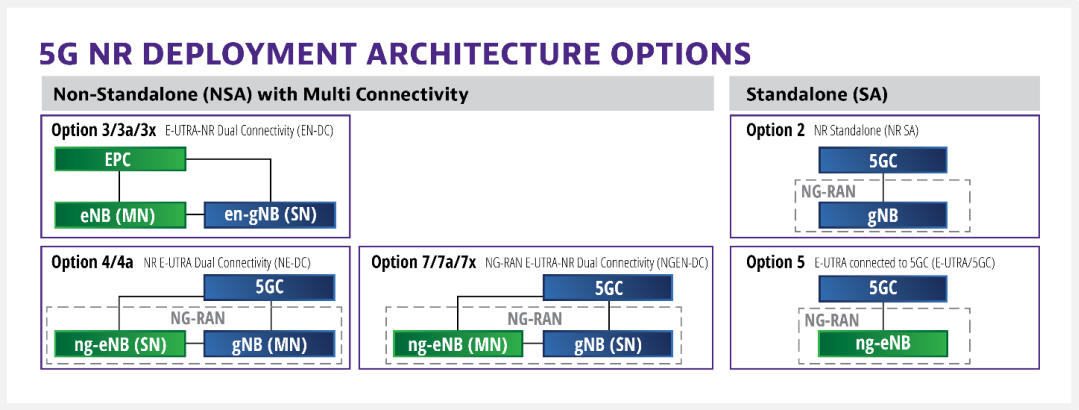


Figure 1.10 : Modes de déploiement autonome et non-autonome du réseau 5G [30]

1.3.3.3.2 Déploiement autonome

Le déploiement autonome ou standalone (SA) de la 5G fait référence à la mise en place d'un réseau 5G indépendant qui opère de manière autonome, sans dépendre d'un réseau 4G existant. Dans ce mode, les opérateurs déploient des stations de base gNB et une infrastructure de réseau 5GC distincte et spécifique à la 5G [29]. Cela permet de bénéficier pleinement des fonctionnalités et des avantages offerts par la 5G, tels que des débits plus élevés, une latence minimale et une capacité accrue.

1.3.4 Les technologies et normes sous-jacentes à la 5G

1.3.4.1 5G New Radio (NR)

La cinquième génération de la technologie d'accès sans fil est connue sous le nom de 5G New Radio (5G NR) et a été développée par la 3GPP au cours des dernières années dans le but de répondre à une variété de scénarios qui seront rendus possibles par les futures technologies mobiles améliorées [31].

1.3.4.2 Catégories de services de la 5G

Les types de services offerts par la 5G se divisent principalement en trois grandes catégories, également connus sous le nom « triangle de la 5G » [32], chacun répondant à des besoins spécifiques :

- **Enhanced mobile broadband (eMBB) :** services nécessitant des débits de données élevés, des volumes de trafic importants et une couverture à large échelle. L'eMBB s'adresse aux communications centrées sur l'humain.
- **Massive machine-type communication (mMTC) :** services caractérisés par un nombre massif de dispositifs, tels que des capteurs, objets connectés, appareils IoT, etc., qui n'ont pas besoin d'une forte consommation d'énergie et à un coût faible. Ces dispositifs consomment et génèrent de petites quantités de données, donc le support de débits élevés n'est pas essentiel. C'est un cas d'usage centré sur les machines.
- **Ultra-reliable and low-latency communication (URLLC) :** services nécessitant une latence extrêmement faible ainsi qu'une fiabilité et une disponibilité très élevées. Des exemples incluent la sécurité routière, l'automatisation industrielle, les services de santé connectés, la distribution automatisée d'énergie dans les réseaux intelligents, etc [3]. Il couvre à la fois les communications centrées sur l'humain et sur la machine.

Bien que ces trois cas d'utilisation soient bien définis, il est possible de les combiner dans certains scénarios, en raison de la diversité des services que cette technologie permet d'offrir [31].

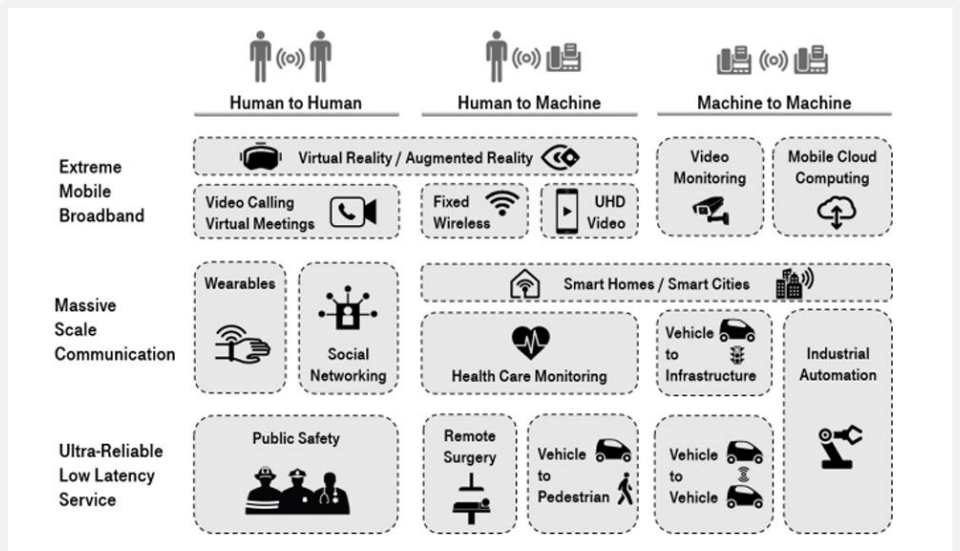


Figure 1.11 : Types de services de la 5G NR [31]

1.3.4.3 Transmission multi-antennes

La transmission à multiples antennes, via l'intégration de la technologie Massive MIMO et du beamforming, contribue à optimiser les performances des systèmes de communication mobile. Il s'agit d'un système de communication où une BS équipée de centaines ou milliers d'antennes sert simultanément plusieurs dizaines de terminaux utilisateurs, chacun avec une seule antenne, sur la même ressource temps-fréquence. Cela signifie que la station de base peut envoyer plusieurs flux de données indépendants à différents utilisateurs en même temps et sur la même bande de fréquence [3].

Si l'emetteur possède N_t anntennes et le récepteur N_r antennes, le modèle de transmission s'exprime par :

$$y = Hx + n \quad (1.1)$$

Où

- y : vecteur de signaux reçus
- H : matrice de canal, représentant les gains de transmissions entre chaque antenne émettrice et réceptrice
- x : vecteur de signaux émis
- n : vecteur de bruit ajouté

La matrice de canal H modélise les différentes liaisons entre antennes de transmission et de réception, prenant en compte les trajets multiples [33].

Le MIMO massif repose sur le multiplexage spatial qui permet à la station de base de transmettre plusieurs flux de données simultanément en fonction de sa connaissance du canal radio, maximisant ainsi l'efficacité spectrale et augmentant le débit. Sur le lien montant (UL), la station de base estime le canal grâce à des signaux pilotes envoyés par les terminaux. Cependant, l'estimation du canal sur le lien descendant (DL) est plus complexe, ce qui pose un défi pour l'implémentation de Massive MIMO.

La technologie MIMO représente un axe stratégique dans le déploiement des infrastructures 5G, offrant une solution innovante pour maximiser la capacité réseau. En améliorant l'efficacité spectrale, elle autorise une augmentation substantielle du nombre d'utilisateurs desservis, sans investissement complémentaire en bande passante. Grâce au beamforming, MIMO améliore la couverture en concentrant les signaux vers des utilisateurs spécifiques, réduisant ainsi le nombre de BS nécessaires. Elle contribue également à réduire les interférences intercellulaires

en optimisant la performance dans les zones densément peuplées. Cependant, le dimensionnement doit tenir compte de l'augmentation du nombre d'antennes pour faciliter une meilleure gestion de la capacité et des utilisateurs simultanés [3].

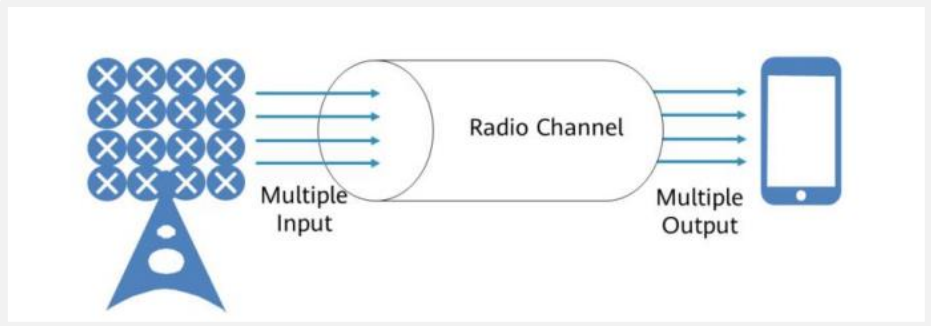


Figure 1.12 : Massive MIMO [34]

1.3.4.4 Beamforming

Le beamforming est une technique qui permet de diriger les signaux radio dans une direction spécifique, en concentrant la puissance du signal dans la direction des utilisateurs spécifiques. Cela permet d'améliorer la qualité du signal, d'augmenter la portée et de réduire les interférences. Les stations de base conventionnelles diffusent des signaux dans toutes les directions, sans prendre en compte la position des utilisateurs ou des appareils ciblés [30]. Cependant, grâce à l'utilisation de matrices MIMO composées de multiples petites antennes regroupées en une configuration spécifique, il devient possible d'exploiter des algorithmes de traitement de signal pour déterminer le chemin de transmission le plus optimal vers chaque utilisateur. Cela permet d'améliorer l'efficacité de la transmission en adaptant les signaux aux besoins individuels de chaque utilisateur.



Figure 1.13 : Beamforming [30]

1.3.4.5 Carrier aggregation

La Carrier Aggregation (CA) ou agrégation de porteuses permet la transmission simultanée sur plusieurs bandes de fréquences (porteuses) pour augmenter la capacité et le débit du réseau. Cette technologie est utilisée à la fois en 4G et en 5G [21], avec des améliorations significatives dans cette dernière génération :

- En 4G :
  - Jusqu'à 5 porteuses peuvent être agrégées.
  - Chaque porteuse peut atteindre une largeur de bande maximale de 20 MHz.
  - La bande passante totale peut aller jusqu'à 100 MHz.
- En 5G :
  - Jusqu'à 16 porteuses peuvent être utilisées simultanément.
  - Chaque porteuse peut atteindre une largeur de bande maximale de 400 MHz dans la gamme de fréquences de 24,25 à 52,6 GHz.
  - La bande passante maximale théorique peut atteindre 6 400 MHz, offrant des débits extrêmement élevés pour répondre aux besoins des applications avancées.

CA fonctionne en regroupant plusieurs bandes de fréquence séparées pour créer une bande passante cumulée. Par exemple, si chaque bande individuelle a une largeur de 20 MHz, en agrégeant 5 bandes, on obtient une bande passante totale de 100 MHz. Cela est réalisé en utilisant des techniques de multiplexage et en synchronisant les différentes porteuses pour qu'elles fonctionnent ensemble de manière harmonieuse. La technologie CA optimise l'utilisation du spectre disponible, améliore l'efficacité spectrale et réduit le besoin d'allouer de nouvelles bandes de fréquences.

1.3.5 Network Slicing

Le network slicing (NS) est une fonctionnalité de la 5G qui permet de diviser le réseau en plusieurs « tranches » virtuelles, adaptées à des besoins et des cas d'utilisation spécifiques [21]. Chaque tranche peut être configurée avec des paramètres de qualité de service (QoS) et des fonctionnalités réseau spécifiques, offrant ainsi une flexibilité accrue pour prendre en charge une variété d'applications et de services avec des exigences différentes.

La technologie NS apporte une valeur ajoutée à la NFV en permettant la simultanéité de plusieurs réseaux logiques sur une infrastructure physique partagée [35]. Cette capacité soutient

l'architecture 5G en établissant des réseaux virtuels complets qui intègrent des fonctionnalités de mise en réseau et de stockage. Ainsi, cette approche offre une solution souple et efficace pour la création et la gestion de réseaux virtuels complets, répondant ainsi aux exigences de l'architecture 5G.

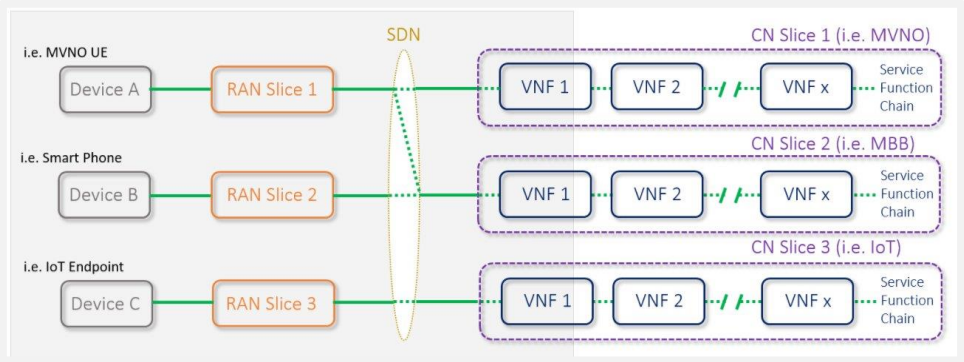


Figure 1.14 : Architecture du Network Slicing [27]

1.3.6 Edge Computing

L'Edge Computing est une approche informatique qui consiste à traiter les données localement, près de l'endroit où elles sont générées, plutôt que de les envoyer à un centre de données centralisé ou à un cloud pour traitement. Dans le contexte des réseaux 5G, cette technique est cruciale pour réduire la latence et améliorer la réactivité des applications, en particulier celles qui nécessitent une prise de décision rapide, comme les véhicules autonomes, l'Internet des objets (IoT), et la réalité augmentée [36].

L'Edge Computing permet de décharger une partie du traitement des données des centres de données en rapprochant les capacités de calcul des utilisateurs finaux, ce qui améliore la vitesse d'exécution des services et diminue la charge du réseau principal [34]. Cela est particulièrement utile dans les environnements nécessitant une grande bande passante et des temps de réponse très courts.

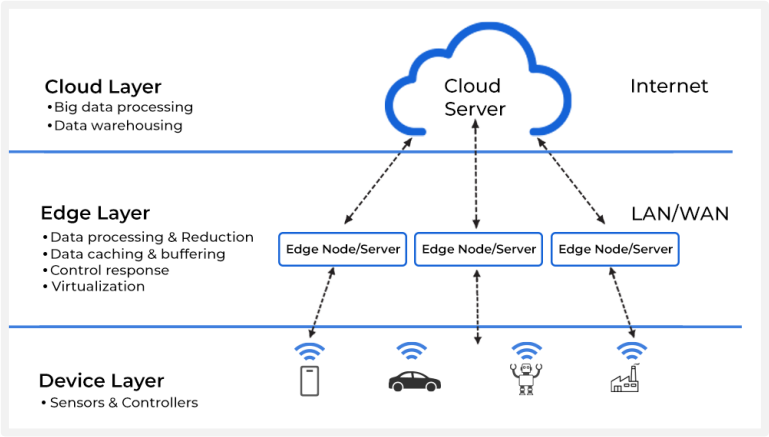


Figure 1.15 : Architecture du Edge Computing [34]

1.3.7 Virtualisation des fonctions réseau (NFV) et SDN

La virtualisation des fonctions réseau (NFV) et la gestion définie par logiciel (SDN) sont des technologies utilisées dans la 5G pour offrir une flexibilité et une évolutivité accrues. NFV permet de virtualiser les fonctions réseau [29], tandis que SDN permet de gérer et de contrôler les réseaux de manière programmable, simplifiant ainsi le déploiement et la gestion des services réseau. La virtualisation des dispositifs réseau par le biais de la NFV est un élément essentiel de l'écosystème 5G. Cette approche comprend notamment la technologie NS, qui permet la création de plusieurs réseaux virtuels fonctionnant simultanément [35]. La NFV répond aux défis spécifiques de la 5G en offrant des ressources informatiques, de stockage et réseau virtualisées, adaptées aux besoins des applications et des différents profils de clients. En d'autres termes, elle permet une personnalisation des ressources en fonction des utilisations et des demandes spécifiques de chaque segment du réseau.

1.3.8 Modulation et accès multiple

La 5G utilise plusieurs techniques de modulation pour améliorer l'efficacité et la capacité du réseau :

- **BPSK (Binary Phase Shift Keying)** : Une technique de modulation de base qui utilise deux états de phase pour coder l'information, généralement utilisée pour des communications à faible débit ou dans des conditions de signal difficiles.

- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** : Cette technique combine la modulation d'amplitude et de phase pour augmenter le débit de données. Les versions les plus courantes dans la 5G sont :
    - **16-QAM** : Utilise 16 états possibles pour transmettre 4 bits par symbole.
    - **64-QAM** : Utilise 64 états possibles, ce qui permet de coder 6 bits par symbole.
    - **256-QAM** : Utilise 256 états possibles pour transmettre 8 bits par symbole, offrant ainsi une densité de données plus élevée, mais nécessitant une qualité de signal optimale [21].

Avec 256-QAM, la 5G atteint une transmission de 8 bits par symbole, augmentant considérablement la capacité de transmission des données et améliorant le débit maximal du réseau [21].

1.3.9 Fréquences et bandes de spectre

La technologie 5G utilise un large éventail de fréquences et de bandes de spectre pour la transmission des données. Voici quelques-unes des bandes de fréquences utilisées en 5G :

- **Ondes millimétriques (mmWave) :** Ce sont les fréquences les plus élevées utilisées en 5G, généralement supérieures à 24 GHz. Elles offrent une grande capacité et des débits de données élevés, mais ont une portée plus limitée et sont sensibles aux obstacles physiques.
- **Fréquences sub-6 GHz :** Ce sont des fréquences inférieures à 6 GHz, y compris les bandes de spectre 2.5 GHz, 3.5 GHz et 4.9 GHz. Elles offrent un équilibre entre la portée et la capacité, permettant une couverture plus étendue et des débits de données élevés.
- **Bande de fréquences des 700 MHz :** Cette bande est utilisée pour la 5G, notamment dans les zones rurales, car elle offre une excellente portée et une pénétration des obstacles améliorée.
- **Bandes de fréquences existantes :** La 5G utilise également des bandes de fréquences déjà utilisées par les réseaux 2G, 3G et 4G, telles que les bandes de fréquences 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz. Cela permet une compatibilité ascendante avec les technologies de génération précédentes et une meilleure couverture [3].

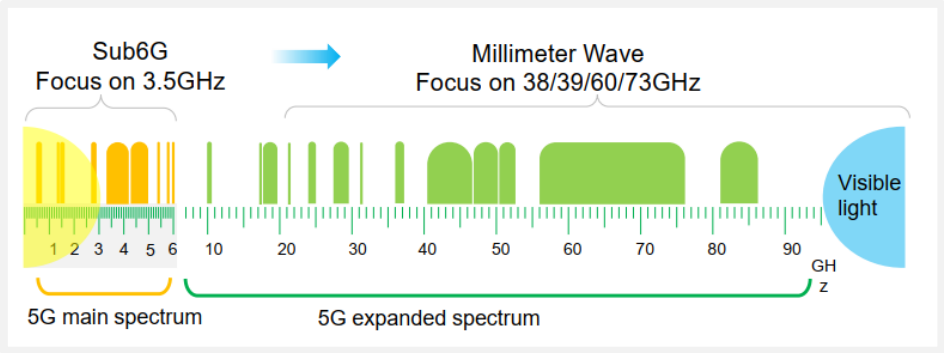


Figure 1.16 : 5G Network Spectrum [37]

1.3.10 IoT et M2M

L'IoT (Internet of Things) et les communications machine-à-machine (M2M) sont deux concepts étroitement liés, en facilitant la connectivité entre des milliards de dispositifs et en automatisant des processus dans divers secteurs.

L'IoT désigne un réseau d'appareils interconnectés capables de collecter et d'échanger des données. Grâce à la 5G, l'IoT profite de vitesses de connexion plus rapides, d'une latence réduite et d'une capacité à gérer un grand nombre d'appareils. Ses applications incluent les villes intelligentes, la gestion de l'énergie et l'agriculture connectée. La 5G améliore la fiabilité des communications, offre une couverture étendue et optimise l'efficacité énergétique, notamment pour les dispositifs à faible consommation [38].

Les M2M se réfèrent à l'interaction directe entre machines sans intervention humaine. Ces dispositifs automatisés collectent des données, exécutent des tâches et communiquent entre eux. Avec la 5G, le M2M bénéficie de connexions plus rapides, d'une latence quasi nulle et d'une capacité à gérer de nombreuses connexions simultanées. Ces améliorations sont essentielles dans des secteurs tels que l'industrie 4.0, l'automatisation industrielle, la santé connectée et les véhicules autonomes [3].

1.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur l'évolution des réseaux mobiles, des premières générations analogiques jusqu'à la révolution introduite par la 5G. Nous avons examiné les caractéristiques et les objectifs qui ont façonné chaque génération de réseau, mettant en évidence les avancées technologiques et les transitions majeures vers une connectivité plus rapide, fiable et efficiente.

La 5G, avec ses technologies telles que le Massive MIMO, les bandes millimétriques et les réseaux ultra-denses, ne constitue pas simplement une amélioration incrémentale, mais une rupture technologique. Elle établit les bases d'un écosystème hyperconnecté où l'IoT, les communications M2M et les applications à faible latence redéfinissent les standards de connectivité et ouvrent de nouvelles opportunités pour les utilisateurs et les entreprises à travers le monde.

Dans le prochain chapitre, nous entrerons dans le vif du sujet en abordant le dimensionnement des réseaux 5G. Nous explorerons les scénarios de déploiement, les modèles de propagation, les exigences de capacité et de couverture, ainsi que les outils et méthodologies nécessaires pour concevoir un réseau capable de répondre aux besoins diversifiés de cette technologie révolutionnaire.

Chapitre 2 : Dimensionnement du réseau 5G

2.1 Introduction

Le dimensionnement d'un réseau est une étape fondamentale qui influence directement les stratégies adoptées par les opérateurs pour déployer un réseau. Il est essentiel pour assurer le succès du déploiement en minimisant les coûts liés à l'infrastructure et à la liaison radio, tout en tenant compte de la distribution des abonnés, des caractéristiques géographiques de la zone à couvrir, ainsi que des exigences en termes de qualité de service. La première phase du dimensionnement consiste à analyser le bilan de liaison, permettant d'estimer l'affaiblissement maximal supporté entre un abonné et une station de base.

Ce chapitre se penche sur les principes essentiels du dimensionnement d'un réseau 5G. Nous débuterons par l'examen des différents scénarios d'implantation pour les macros et micro cellules, en intégrant des modèles de propagation adaptés aux environnements concernés. L'analyse du bilan de liaison sera également effectuée pour déterminer la portée maximale d'une station de base ou d'un relais. Avant d'aborder ces aspects techniques, il est primordial de bien comprendre les types de cellules et les environnements physiques dans lesquels le réseau sera déployé.

2.2 Les divers scénarios de déploiement dans la 5G

Le déploiement de la 5G repose sur différents scénarios qui visent à répondre aux besoins variés des utilisateurs et des environnements. Ces scénarios peuvent être classés en deux grandes catégories : ceux pour les macro cellules et ceux pour les micro cellules.

2.2.1 Scénarios pour les Macro cellules

2.2.1.1 eMBB (enhanced Mobile Broad Band)

L'eMBB représente l'un des trois principaux scénarios d'usage définis par l'ITU-R pour la 5G (IMT-2020) [39]. Conçu comme une évolution naturelle des réseaux 4G LTE-Advanced, ce service cible principalement les zones urbaines à forte densité de population. Son objectif majeur est d'atteindre des débits descendants pouvant culminer à 10 Gbps, soit une amélioration d'un facteur 10 à 100 par rapport à la 4G [40].

Pour garantir une expérience utilisateur optimale, particulièrement pour les applications multimédias comme la réalité virtuelle et augmentée, la latence de bout en bout est maintenue sous le seuil de 10 ms. Cette performance est rendue possible grâce à l'implémentation de plusieurs technologies avancées :

- L'utilisation des ondes millimétriques (mmWave) dans les bandes de fréquences supérieures à 24 GHz
- Le déploiement du Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
- L'exploitation des techniques de transmission coopérative multipoints (CoMP)

Dans les déploiements Macro Urbains (UMa), la couverture cellulaire peut s'étendre jusqu'à 1000 mètres, avec des stations de base positionnées à des hauteurs comprises entre 15 et 35 mètres. Cette configuration permet de desservir efficacement les utilisateurs aussi bien en intérieur qu'en extérieur, y compris dans les bâtiments multi-étages [41].

2.2.1.2 BLUF (Basse Latence Ultra Fiable)

Le scénario BLUF représente l'un des cas d'usage les plus exigeants de la 5G, destiné aux applications critiques nécessitant une fiabilité exceptionnelle (99.999%) et une latence ultra-faible inférieure à 1 milliseconde [42].

Pour répondre aux exigences strictes du scénario BLUF, une série d'innovations technologiques a été développée, combinant l'utilisation de trames de petite taille pour réduire les délais de transmission, l'implémentation de codes correcteurs d'erreurs (FEC) avancés comme les codes polaires et LDPC, et l'adoption de schémas de transmission plus performants en remplacement des mécanismes ARQ traditionnels [43].

Ces solutions sont renforcées par le déploiement de technologies MIMO massif et de beamforming, optimisant ainsi la qualité du signal. L'ensemble de ces techniques s'intègre dans une architecture réseau entièrement repensée, exploitant le network slicing et le edge computing pour garantir les niveaux de performance exigés [44], créant ainsi un écosystème technologique complet capable de répondre aux besoins les plus exigeants en termes de latence et de fiabilité.

2.2.1.3 AIRE (Accès à l'Internet pour les régions éloignées)

Le scénario AIRE répond à l'objectif crucial de réduction de la fracture numérique en fournissant une connectivité haut débit dans les zones rurales et isolées [45].

Le scénario AIRE se distingue par ses caractéristiques techniques spécifiquement adaptées aux zones rurales, avec une capacité cellulaire optimisée pour les régions à faible densité démographique, offrant des débits atteignant 100 Mbps et une latence de bout en bout comprise entre 50 et 100 [46].

Pour répondre aux défis uniques de ces environnements, plusieurs innovations technologiques sont déployées, notamment une attribution dynamique et une fragmentation intelligente du spectre, l'utilisation d'une couche physique basée sur une forme d'onde avec préfixe cyclique (CP-OFDM), des solutions spécifiques pour l'optimisation des canaux à long retard, ainsi que des technologies de couverture étendue pour maximiser la portée des cellules [47].

2.2.2 Scénarios pour les Micro cellules

2.2.2.1 UMi dans la gorge de la rue et dans une place ouverte

Le scénario UMi représente une configuration de déploiement critique pour les environnements urbains denses, caractérisée par des stations de base installées sous la hauteur moyenne des toits (< 10 mètres) [48]. Ce type de déploiement répond aux défis spécifiques des zones urbaines à forte densité d'utilisateurs.

Le scénario UMi se caractérise par un déploiement cellulaire compact avec un rayon typique de 100-200 mètres, capable de gérer une densité d'utilisateurs particulièrement élevée atteignant 25,000 utilisateurs par kilomètre carré [49], tout en maintenant des débits utilisateurs cibles de 100-300 Mbps en conditions normales d'utilisation. Pour atteindre ces objectifs de performance, l'architecture s'appuie sur des technologies clés incluant le déploiement stratégique de small cells pour une couverture optimisée, l'implémentation de MIMO massif couplé à du beamforming adaptatif, une gestion dynamique sophistiquée des interférences inter-cellulaires, ainsi que des techniques avancées de réutilisation du spectre [50], permettant ainsi de répondre efficacement aux exigences de connectivité des environnements urbains denses.

2.2.2.2 InH (Indoor Hotspot)

Le scénario InH représente un cas d'usage critique pour les déploiements 5G en environnements intérieurs à forte densité d'utilisateurs [51]. Ce scénario est particulièrement pertinent pour les espaces comme les bureaux modernes et les centres commerciaux, où la demande en connectivité haute performance est intense.

Le déploiement des points d'accès InH se caractérise par une installation stratégique à 2-3 mètres de hauteur, avec une densité adaptative allant d'un point d'accès par étage à un par pièce selon les besoins spécifiques, permettant de gérer efficacement jusqu'à 250 utilisateurs actifs par point d'accès [52]. Face aux défis techniques inhérents aux environnements intérieurs, notamment la gestion des réflexions multiples et les interférences inter-cellules, diverses solutions technologiques sont mises en œuvre, incluant l'implémentation de MIMO massif adapté et le déploiement optimisé de small cells. L'optimisation des performances repose sur des technologies clés comme le beamforming intelligent, la coordination multi-points, et une gestion dynamique des ressources radio [53], assurant ainsi une couverture optimale et une qualité de service élevée dans ces environnements complexes.

2.2.2.3 Communication entre objets /ou communication entre les machines (M2M)

La communication M2M représente un pilier fondamental de l'architecture 5G, offrant de nouvelles opportunités de revenus pour les opérateurs télécoms. Cette technologie permet l'interconnexion massive d'objets communicants dans l'écosystème IoT [54].

La communication M2M se distingue par ses caractéristiques exceptionnelles, permettant la gestion de plus de 50,000 dispositifs par cellule, avec une durée de vie de batterie dépassant 10 ans [55], des débits variant de 1 kbps à 10 Mbps, et une latence adaptative de 1 à 100 ms selon les besoins applicatifs [39]. Pour répondre à ces exigences techniques spécifiques, le système intègre une optimisation énergétique de la couche physique, des mécanismes d'accès aléatoire au canal, une synchronisation autonome des dispositifs, ainsi qu'une gestion efficace des interférences en environnement dense. Ces défis sont relevés grâce au déploiement de solutions technologiques avancées, comprenant des protocoles de communication économes en énergie, l'utilisation de techniques d'accès multiple non-orthogonal (NOMA), et la mise en œuvre de mécanismes de gestion autonome des connexions, garantissant ainsi une performance optimale du réseau M2M.

2.3 Dimensionnement d’un réseau 5G

2.3.1 Processus de dimensionnement du réseau 5G

Le dimensionnement d'un réseau 5G est un processus visant à optimiser la couverture, la capacité et la qualité de service (QoS), tout en minimisant les coûts liés à la liaison radio et à l’infrastructure [56]. Cette étape permet de définir la disposition optimale des stations de base en fonction des caractéristiques géographiques, de la densité des abonnés et de la demande en trafic. Le dimensionnement repose sur une analyse approfondie des besoins en bande passante, des objectifs de latence, ainsi que des spécifications des équipements et des bandes de fréquences à utiliser [57].

Il s'agit également de choisir les modèles de propagation les mieux adaptés pour estimer l'affaiblissement du signal et garantir une couverture radio complète. L’objectif final est de concilier l’aspect économique avec les contraintes techniques, en s’assurant que les services offerts, qu’il s’agisse du haut débit (eMBB), de la faible latence (URLLC) ou de la communication massive entre objets (mMTC), répondent aux exigences des utilisateurs tout en maintenant la qualité du réseau [41].

2.3.2 Choix de la bande de fréquence

Le choix des bandes de fréquences pour la 5G est essentiel pour garantir une couverture et une qualité de service optimales [57]. Actuellement, les systèmes de télécommunications mobiles disposent d'environ 500 MHz de bande dédiée, répartie entre 450 MHz et 3,6 GHz [58].

La Conférence Mondiale des Radiocommunications (WRC-2015) a rendu disponibles des bandes comme la bande L (1427 - 1518 MHz), la bande C (3,4 - 3,6 GHz) et la bande 700 MHz pour soutenir la 3G, 4G et 5G à l'échelle mondiale [59].

L’utilisation de bandes de fréquences millimétriques, au-dessus de 6 GHz, est envisagée pour répondre aux besoins de débits plus élevés [60]. Ces bandes, longtemps jugées inadaptées aux communications mobiles en raison de l'augmentation de l'atténuation à ces fréquences et de l'absorption par l'eau et l'oxygène, offrent l'avantage de ne pas souffrir de l'encombrement spectral des bandes inférieures à 3 GHz. Bien que leur propagation en milieu urbain soit limitée, des solutions telles que l’utilisation de larges réseaux d’antennes et des infrastructures de type « backhaul » permettent de surmonter ces défis.

Les fréquences millimétriques sont peu encombrées car elles étaient autrefois jugées inadaptées aux communications mobiles. En effet, plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation dans l'air augmente. De plus, certaines de ces fréquences coïncident avec les pics d'absorption de l'eau et de l'oxygène, ce qui intensifie encore cette atténuation. Étant donné que les ondes millimétriques ont une longueur d'onde très courte, elles pénètrent mal les objets, ce qui les rend idéales pour l'imagerie, mais moins adaptées aux communications mobiles, surtout en milieu urbain. Ces fréquences souffrent également d'un important bruit de phase. Cependant, il est désormais possible de surmonter ces limitations en utilisant de vastes réseaux d'antennes pour compenser l'atténuation [61].

2.3.3 Choix du type de dimensionnement

Le dimensionnement d'un réseau de télécommunications repose sur trois objectifs principaux : la portée, la capacité, et la qualité de service (QoS) [62]. Le déploiement peut être limité soit par la portée du signal, soit par la capacité à gérer un nombre élevé d'utilisateurs [57]. Dans les services fixes, la disponibilité restreinte du spectre influence généralement la capacité, sauf dans les zones rurales où la faible densité de population et les pertes de propagation significatives sont prédominantes [63].

La première phase de déploiement [56], vise à maximiser la couverture avec un nombre d'abonnés initialement réduit. Avec l'augmentation de la demande de trafic, les opérateurs procèdent à une densification du réseau soit par l'ajout de canaux, soit par le déploiement de stations de base supplémentaires.

Pour atteindre ces objectifs, trois types de dimensionnement principaux sont identifiés [64] :

- Dimensionnement basé sur la couverture
- Dimensionnement axé sur la capacité
- Dimensionnement centré sur la QoS

L'adoption de technologies de relais [65], contribue à accroître la capacité du réseau tout en maintenant une bonne couverture. Le choix final du type de dimensionnement doit être adapté aux spécificités du réseau, en équilibrant les impératifs de portée, de capacité et de qualité de service.

2.3.4 Modèles de propagation

2.3.4.1 Le modèle de propagation en espace libre

L'affaiblissement en espace libre (FSPL, *Free Space Path Loss*) représente la diminution de la puissance d'un signal lors de sa propagation dans un environnement sans obstacle, entre une antenne d'émission et une antenne de réception [63]. Ce modèle fondamental, initialement développé par Friis [66], permet d'estimer les pertes de puissance en fonction de la distance et de la fréquence dans des conditions idéales.

L'équation de l'affaiblissement en espace libre est donnée par :

$$FSPL(f, 1m) = 20log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right) = 20log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

Paramètres :

- d : Distance entre les deux antennes (en m)
- f : Fréquence du signal (en MHz)
- c : Vitesse de la lumière dans le vide ($3.10^8\ m/s$)
- λ : Longueur d'onde du signal (en mètres)

Cette équation montre que les pertes augmentent avec la distance d et la fréquence f. Plus la fréquence est élevée ou plus l'antenne est éloignée, plus l'atténuation sera importante.

2.3.4.2 Modèle de propagation Alpha Beta Gama (UMi, UMa)

Le modèle de propagation Alpha Beta Gama (ABG) est couramment utilisé pour simuler la propagation des ondes radio dans des environnements complexes, en particulier pour les fréquences supérieures à 6 GHz [60]. Ce modèle, développé pour les scénarios UMi (Urban Micro) et UMa (Urban Macro), s'applique aux déploiements de réseaux urbains à petite et grande échelle respectivement [49].

Le modèle ABG repose sur une équation qui exprime la perte de propagation (Path Loss) en fonction de la distance et de la fréquence [67] :

$$PL^{ABG}(f, d)[db] = 10\alpha log_{10}\left(\frac{d}{1m}\right) + \beta + 10\gamma log_{10}\left(\frac{f}{1GHZ}\right) + X_6^{ABG} \quad (2.3)$$

Description des paramètres :

- α : Coefficient montrant la dépendance de la perte de propagation à la distance.
- β : Valeur excentrée, optimisée en fonction des pertes en dB.
- γ : Coefficient représentant l'influence de la fréquence porteuse sur la perte de signal.
- d : Distance entre l'émetteur et le récepteur, exprimée en mètres.
- f : Fréquence porteuse utilisée, en GHz.
- X_6^{ABG} : Effet de masque aléatoire (paramètre statistique tenant compte des obstacles).

2.3.4.3 Modèle Close-In (CI)

Le modèle Close-In (CI) est un modèle de propagation à grande échelle, largement utilisé pour estimer les pertes de signal dans différents scénarios de réseaux sans fil, notamment en 5G [63]. Ce modèle se distingue par sa simplicité et son adaptabilité, puisqu'il peut être appliqué à différentes fréquences et distances. Contrairement à d'autres modèles plus complexes, le modèle CI prend pour référence une distance fixe de 1 mètre, facilitant ainsi l'interprétation des pertes de propagation en fonction de l'augmentation de la distance [49].

Équation du modèle CI :

$$PL^{ABG}(F,d)[dB] = FSPL(f,1m) + 10nlog_{10}(d) + X_6^{CI} \quad (2.4)$$

- $PL^{ABG}(F,d)[dB]$: Perte de signal en dB en fonction de la fréquence *F* et de la distance d.
- $FSPL(f,1m)$: Pertes en espace libre pour une distance de référence de 1 mètre.
- n : Exposant de Path Loss, traduisant la rapidité avec laquelle le signal se dégrade en fonction de la distance.
- $10nlog_{10}(d)$: Terme décrivant la perte de propagation en fonction de la distance d, exprimée en décades.
- X_6^{CI} : Variable aléatoire prenant en compte les effets de masquage et d'autres phénomènes de propagation.

2.3.4.4 Modèle Close-In with Frequency weight (CIF)

Le modèle CIF (Close-In with Frequency Weight) est une extension du modèle CI, spécifiquement conçu pour prendre en compte la dépendance du Path Loss vis-à-vis de la fréquence [63]. Ce modèle multifréquence est particulièrement utile dans les environnements où le signal radio est affecté par des variations de fréquence, comme les bandes de fréquence élevées en 5G. Il repose sur l'ancrage d'affaiblissement en espace libre (FSPL) à une distance de 1 mètre, tout comme le modèle CI, mais introduit un facteur d'ajustement de la perte en fonction de la fréquence.

Équation du modèle CIF :

$$PL^{CIF}(F,d)[dB] = FSPL(F,1m)[dB] + 10n(1 + b(\frac{f - f_0}{f_0}))log_{10}\left(\frac{d}{1m}\right) + X_6^{CL} \quad (2.5)$$

Description des paramètres :

- n : Exposant de Path Loss (PLE), représentant la décroissance du signal en fonction de la distance.
- b : Paramètre d'optimisation capturant la dépendance linéaire entre la fréquence et l'exposant de Path Loss. Un positif implique que la perte augmente avec la fréquence.
- f_0 : Fréquence de référence utilisée comme point d'ancrage pour les calculs (en GHz).
- X_6^{CL} : Variable aléatoire représentant l'effet de masque et les variations aléatoires dues aux obstacles et aux interférences.
- $FSPL(F,1m)$: Atténuation en espace libre pour une fréquence donnée FFF, à une distance de 1 mètre.

2.3.4.5 Modèle Alpha Beta Gama et close-in F à double-pente

Les modèles de propagation à double pente ont émergé comme des solutions essentielles pour les environnements intérieurs InH. Ces modèles offrent une précision supérieure dans la modélisation des pertes de propagation, particulièrement pour les scénarios Non-Line-of-Sight (NLOS) [68].

Dans ces cas, deux variantes du modèle sont souvent appliquées :

- Le **modèle ABG à double pente**.
- Le **modèle CIF à double pente**.

Ces approches sont particulièrement adaptées aux environnements où la portée varie considérablement, comme dans les centres commerciaux ou les grands espaces intérieurs (avec des distances **supérieures à 50 m**). Cependant, dans des contextes plus simples comme les bureaux (InH-Office), un modèle CIF à **simple pente** est souvent suffisant, car il réduit la complexité en nécessitant uniquement **deux paramètres d'optimisation**.

Formule du Modèle ABG à Double Pente :

$$PL_{Dual}^{ABG} = \begin{cases} 10\alpha_1 log_{10}(d_{BP}) + \beta_1 + 10\gamma log_{10}(f) & 1 < d \leq d_{BP} \\ 10\alpha_1 log_{10}(d_{BP}) + \beta_1 + 10\gamma log_{10}(f) + 10\alpha_2 log_{10}\left(\frac{d}{d_{BP}}\right) & d > d_{BP} \end{cases} \quad (2.6)$$

- d_{BP} : Distance de rupture (breakpoint).
- α_1, α_2 : Coefficients de pente du modèle.
- β_1 : Décalage d'ajustement pour le Path Loss.
- f : Fréquence en GHz.

Modèle CIF à Double Pente avec Pondération en Fréquence :

$$PL_{Dual}^{CIF}(d) = \begin{cases} FSPL(f, 1m) + 10n_1(1 + b_1(\frac{f - f_0}{f_0}))log_{10}\left(\frac{d_{BP}}{1m}\right) \\ FSPL(f, 1m) + 10n_1(1 + b_1(\frac{f - f_0}{f_0}))log_{10}\left(\frac{d_{BP}}{1m}\right) + 10n_2(1 + b_2(\frac{f - f_0}{f_0}))log_{10}\left(\frac{d}{d_{BP}}\right) \end{cases} \quad (2.7)$$

- n_1, n_2 : Exposants de Path Loss (PLE) pour chaque pente.
- b_1, b_2 : Paramètres de pondération en fréquence.
- f_0 : Fréquence de référence.
- $FSPL(f, 1m)$: Path Loss en espace libre à 1 mètre.

Ces modèles se montrent particulièrement performants dans l'optimisation des réseaux 5G, car ils ajustent la propagation des signaux en tenant compte non seulement de la distance, mais aussi de l'effet des fréquences. En particulier, lorsque la distance dépasse un certain seuil (breakpoint d_{BP}), une seconde pente est introduite pour mieux modéliser l'évolution des pertes.

2.4 Bilan de Liaison

Le bilan de liaison dans les systèmes de télécommunications mobiles nécessite un équilibrage des puissances entre les liaisons montante et descendante [63]. Cette symétrie de

fonctionnement est essentielle pour garantir une couverture optimale dans l'ensemble de la zone de service.

La caractérisation des liaisons peut être définie comme suit [69] :

- Liaison montante (uplink) : Transmission du signal depuis l'équipement utilisateur (EU) vers la station de base (SB) ou la station relais (SR).
- Liaison descendante (downlink) : Transmission du signal depuis la station de base (SB) ou relais (SR) vers l'équipement utilisateur (EU).

Létablissement d'un bilan de liaison vise principalement à déterminer l'atténuation maximale admissible sur le trajet radioélectrique entre les différents éléments du réseau pour un service spécifique [70]. Cette analyse est fondamentale pour :

1. L'optimisation de la sélection des antennes et de leurs configurations
2. La planification optimale de la puissance de sortie des stations, en tenant compte des contraintes de canaux et des objectifs de couverture

L'importance de l'atténuation maximale se manifeste à plusieurs niveaux [71] :

- Elle détermine la portée effective de chaque station (base ou relais)
- Elle permet de dimensionner efficacement le réseau en définissant le nombre optimal de stations nécessaires pour une couverture donnée

2.4.1 Puissance isotrope rayonnée équivalente

La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) constitue un paramètre fondamental dans l'analyse du bilan de liaison [72]. La PIRE dépend de l'ensemble de la chaîne de transmission comprenant l'équipement émetteur, le câble et l'antenne.

Dans cette chaîne, trois éléments principaux interviennent :

- La puissance émise par l'appareil P_e
- Les pertes dans le câble L
- Le gain de l'antenne G_e

En utilisant une notation en décibels (dB), la PIRE se calcule selon la formule suivante :

$$PIRE = P_e - L + G_e \quad (2.8)$$

La PIRE représente la puissance qu'une antenne isotrope théorique devrait émettre pour produire la même densité de puissance maximale dans la direction du lobe principal de l'antenne réelle [73].

Le gain d'une antenne s'exprime en décibels selon la relation :

$$G[dB] = 20log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (2.9)$$

Avec :

- P_1 : puissance émise par l'appareil (en mW)
- P_2 : puissance de référence égale à 1mW

Dans la pratique, le gain d'antenne est généralement exprimé en dBi, faisant référence à une antenne isotrope idéale comme standard de comparaison [74]. Cette antenne isotrope théorique, rayonnant uniformément dans toutes les directions, sert de référence absolue pour évaluer les performances des antennes réelles.

Concernant les pertes dans les câbles, exprimées en dB/m, la perte totale se calcule selon [75] :

$$Pertes\ cable = Longeur\ cable\ x\ Perte\ par\ métre \quad (2.10)$$

2.4.2 Sensibilité de réception

La sensibilité de réception constitue un paramètre critique dans les systèmes de communication sans fil, déterminant la capacité du récepteur à décoder correctement les signaux reçus [76]. La fiabilité du décodage dépend directement de la puissance du signal reçu, nécessitant une analyse approfondie de toute la chaîne de réception.

La sensibilité effective S_{RX} s'obtient par la combinaison des paramètres suivants :

$$S_{RX} = S_e + G_s + L \quad (2.11)$$

S_e : Sensibilité de l'équipement – G_s : Gain d'antenne – L : Perte de câble

Ces mêmes gains et pertes ont déjà été utilisés dans les calculs de puissance lors de l'analyse de la PIRE. La puissance du signal reçu doit impérativement être supérieure à cette sensibilité

pour que le récepteur puisse correctement exploiter l'information transmise. Si la puissance du signal est inférieure à cette valeur minimale, le signal sera inutilisable.

La sensibilité du récepteur se réfère à la puissance minimale, exprimée en dBm, nécessaire pour que le détecteur atteigne une performance donnée [63]. Cette performance peut être définie en termes de :

- Taux d'erreur binaire (BER) acceptable
- Rapport signal sur bruit (SNR) requis

Ces critères garantissent que la transmission est suffisamment robuste pour répondre aux exigences de la bande de base du système.

La sensibilité du récepteur peut être calculée à l'aide de la formule suivante [77] :

$$S_{RX} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) - 10\log\left(\frac{w}{R_b}\right) + NW + NF \quad (2.12)$$

Où :

- $\frac{E_b}{N_0}$: Énergie par bit sur densité spectrale de bruit (en dB)
- w : Largeur de bande du signal (en Hz)
- R_b : Débit binaire (en bits/s)
- NW : Puissance du bruit blanc (en dBm)
- NF : Facteur de bruit du récepteur (en dB)

2.4.3 Affaiblissement maximum tolérable

L'affaiblissement maximum tolérable, représente l'écart maximal admissible entre la PIRE de l'émetteur et la sensibilité du récepteur. Cette valeur définit la perte maximale que peut subir le signal tout en maintenant une communication efficace [78].

Dans un système de communication bidirectionnel, l'affaiblissement doit être évalué dans les deux sens de transmission (montant et descendant), la valeur la plus restrictive étant retenue comme référence [69].

L'équation de l'affaiblissement en ligne PL (Path Losss) prend en compte ces différents paramètres et est définie ainsi [63] :

$$PL = PIRE - S_{RX} - G_s - L_{SH} - L_{env} - L_r - MG_{link} - MG_{fade} \quad (2.13)$$

- $PIRE$: Puissance émise après application du gain de l'antenne émettrice.
- S_{RX} : Sensibilité du récepteur, soit la puissance minimale nécessaire pour que le signal soit capté.
- G_s : Gain de l'antenne réceptrice, qui améliore la puissance perçue.
- L_{SH} : Atténuation causée par les obstacles, comme les ombres portées des bâtiments.
- L_{env} : Pertes dues aux conditions environnementales (par exemple, pertes liées à la pluie).
- L_r : Pertes internes au récepteur, principalement les pertes de câblage entre l'antenne et le récepteur.
- MG_{link} et MG_{fade} : Marges pour garantir une communication fiable en dépit des variations du signal.

2.5 Dimensionnement selon la couverture

Le dimensionnement selon la couverture vise à optimiser le déploiement des stations pour une zone géographique donnée [76]. Cette approche, nécessite une analyse approfondie de la portée maximale des stations de base et des relais, en s'appuyant sur le bilan de liaison radio (RLB).

Le calcul de couverture repose principalement sur l'estimation de l'affaiblissement du signal (Path Loss) à travers le canal de propagation [63]. En effet, le signal émis depuis la station de base se dégrade au fur et à mesure de sa propagation en raison des divers obstacles physiques (bâtiments, arbres, etc.) et des effets environnementaux (pluie, humidité, etc.). Pour cette raison, la sélection un modèle de propagation adapté au contexte est nécessaire.

Le résultat final de ce processus est la taille de la cellule, c'est-à-dire la zone de couverture d'une seule station. Une fois la taille de la cellule déterminée, il est possible d'estimer le nombre total de sites nécessaires pour couvrir l'ensemble de la région d'intérêt [77].

2.5.1 Système de réseau d'accès 5G

L'architecture du réseau d'accès 5G repose sur une infrastructure hétérogène (HetNet) qui intègre intelligemment différents types de cellules pour optimiser la couverture et la capacité. Cette architecture combine des macro-cellules, assurant une couverture étendue avec une forte

puissance d'émission, et des petites cellules (femto, pico, micro), optimisées pour les zones urbaines et intérieures [80].

Au sein de l'écosystème des réseaux cellulaires, les stations relais émergent comme des composants stratégiques, permettant d'étendre le périmètre de couverture et d'optimiser la capacité de transmission. L'infrastructure backhaul, s'organise autour de deux types de liens : le backhaul central, assurant une connexion directe entre station de base et relais, et le backhaul de distribution, gérant l'interconnexion entre relais et la connexion aux utilisateurs finaux. Cette architecture hiérarchique, permet une gestion efficace du trafic réseau tout en maintenant une stabilité optimale des connexions [81].

2.5.2 Portée d'une station de base et d'une station de relais

Les petites cellules dans les réseaux 5G utilisent principalement des antennes omnidirectionnelles pour couvrir une zone circulaire [78]. Afin de minimiser les interférences entre stations voisines, chaque station est assignée à des groupes de canaux distincts. Les rayons de couverture des stations de base et des stations de relais doivent être correctement déterminés pour assurer une couverture efficace.

La portée d'une cellule dépend de la puissance de transmission de la station, ce qui influence directement le rayon de la cellule. La relation entre la puissance de transmission d'une station et son rayon s'exprime ainsi [82]:

$$P_{OP} = a \cdot P_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\alpha} + b \quad (2.14)$$

Avec :

- P_0 : Puissance de transmission de référence (40 W) pour un rayon standard de 1 km.
- α : Coefficient d'affaiblissement du signal (Path Loss).
- $a\ et\ b$: Paramètres d'ajustement pour les macro-cellules et les petites cellules.

Le rayon r d'une station de base ou de relais est donné par :

$$r = \sqrt[\alpha]{\frac{r_0^{\alpha} \cdot (P_{Trx} - b)}{\alpha P_0}} \quad (2.15)$$

Cette approche permet d'établir un compromis entre la couverture et la consommation énergétique [80].

2.5.3 Détermination du nombre de stations de relais à utiliser

La planification d'un réseau de télécommunications nécessite une méthodologie rigoureuse pour déterminer le nombre et l'emplacement des stations de base et des stations de relais [63]. Le calcul prend en compte le rayon de couverture des stations afin d'éviter les interférences entre les sites.

Les étapes de calcul incluent l'estimation de l'affaiblissement maximal via le bilan de liaison, le calcul de la portée maximale avec des modèles de propagation adaptés au terrain, et la détermination du nombre de stations de relais nécessaires à l'aide d'une formule spécifique :

$$N_{SR} = \frac{S_{Total} - C_{SB}}{C_{SR}} \quad (2.16)$$

Avec

- N_{SR} : Nombre de stations de relais requis.
- S_{Total} : Surface totale à couvrir.
- C_{SB}: Surface couverte par une station de base à puissance maximale.
- C_{SR} : Surface couverte par une station de relais à puissance maximale.

Calcul des surfaces de couverture :

$$C_{SB} = 2.6 \cdot r_{SB}^2$$

$$C_{SR} = 2.6 \cdot r_{SR}^2$$

Cette approche, validée par des études empiriques [83], permet d'optimiser le déploiement du réseau tout en respectant les contraintes de qualité de service.

2.5.4 Répartition des stations de relais dans une zone à couvrir

L'optimisation de la distribution spatiale des stations de base et des stations de relais peut être réalisée grâce au diagramme de Voronoi, une technique mathématique fondamentale en géométrie computationnelle [84]. Le diagramme de Voronoi, développé par Georgy Voronoi en 1908, constitue une partition de l'espace en régions basée sur la distance à des points

spécifiques. Pour un ensemble de points P = {p1, ..., pn} dans un espace euclidien, la cellule de Voronoi V(pi) associée au point pi est définie par [85]:

$$V(pi) = \{x \mid d(x, pi) \leq d(x, pj), \quad \forall j \neq i\} \quad (2.17)$$

La structure géométrique des cellules de Voronoi, caractérisée par des polygones convexes, joue un rôle fondamental dans la conception des réseaux de télécommunications modernes [84]. Chaque cellule contient une station unique et englobe tous les points qui sont plus proches de cette station que de toute autre, avec des bords qui représentent les frontières équidistantes entre stations adjacentes et des sommets marquant les points équidistants de trois stations distinctes. Cette configuration géométrique [86], permet une planification optimale de la couverture réseau, où chaque cellule définit la zone de service d'une station de base ou d'un relais. Cette approche non seulement garantit une couverture complète de la zone tout en optimisant l'allocation des ressources, mais assure également une minimisation des interférences entre stations voisines, conduisant à une couverture homogène et efficace du réseau [87].

2.5.5 Contrôle d'admission d'utilisateur

Le contrôle d'admission des utilisateurs (CAU) constitue un mécanisme fondamental pour la gestion des ressources dans les réseaux de communication hétérogènes modernes [88]. Pour un utilisateur j connecté à une station i, la sortie réalisable r_{ij} est directement liée à la ressource qui lui est allouée, notée γ_{ij}. La sortie r_{ij} peut être calculée en multipliant la largeur de bande assignée à l'utilisateur γ_{ij} par l'efficacité spectrale A_{ij} de la connexion entre la station i et l'utilisateur j [89] :

$$r_{ij} = \gamma_{ij} A_{ij} \quad (2.18)$$

Cette équation démontre comment les performances de transmission pour un utilisateur dépendent des ressources allouées et des caractéristiques du lien. Toutefois, la capacité totale du secteur de la station i est limitée par une capacité maximale C_i. Par conséquent, la somme des ressources allouées à tous les utilisateurs connectés à cette station doit respecter cette contrainte :

$$\sum_{j \in n_i} \gamma_{ij} \leq C_i, \quad \forall i \quad (2.19)$$

Où n_i représente l'ensemble des utilisateurs attachés à la station i.

La sortie globale obtenue pour un utilisateur j dans le système peut être formulée comme suit :

$$r_j = \sum_{i \in N_s} x_{ij}\, y_{ij} \quad (2.20)$$

Où y_{ij} =1 si l'utilisateur j est relié à la station i, $x_{ij} = 0$ sinon. Une contrainte importante pour garantir un service de qualité est que chaque utilisateur doit être connecté à une seule station à la fois :

$$\sum_{i \in N_s} x_{ij} = 1, \qquad X_{ij} \in \{0, 1\}, \qquad \forall j \quad (2.21)$$

La sortie minimale requise pour que l'utilisateur j soit autorisé à accéder au système est déterminée par une contrainte de qualité de service (QoS), qui peut être exprimée comme suit :

$$r_j \geq r_{min} \quad (2.22)$$

Cette contrainte assure que les utilisateurs reçoivent un niveau de service adéquat.

L'objectif principal du contrôle d'admission dans ce cadre est de maximiser le nombre d'utilisateurs qui peuvent être admis dans le système, tout en respectant les contraintes de capacité et de qualité de service. Cela se traduit par le problème d'optimisation suivant [90] :

$$max \sum_{i,j} x_{ij} \quad (2.23)$$

Sous les conditions :

$$\sum_{j \in n_i} \gamma_{ij} \leq C_i, \qquad \forall i \ et \ r_j \geq r_{min}, \qquad \forall j \quad (2.24)$$

2.5.6 Contrôle de puissance

Le contrôle de puissance permet la gestion des ressources dans les réseaux de communication sans fil [91]. Son rôle principal est d'optimiser la transmission des signaux tout en garantissant une qualité de service (QoS) minimale pour chaque utilisateur du réseau.

L'efficacité spectrale réalisée pour un utilisateur j de la station i est donnée par [92] :

$$A_{ij} = log_2(1 + P_{ij}) \quad (2.25)$$

Où P_{ij} représente la puissance reçue par l'utilisateur j de la station i. Cette puissance peut être exprimée en tenant compte de plusieurs facteurs influents :

$$P_{i,j} = \frac{p_i^{max}}{PL_j^i(N_0 + I_j)} \qquad (2.26)$$

Avec :

- p_i^{max} : Niveau de puissance maximum de transmission de la station i.
- PL_j^i : Perte de parcours (Path Loss) du canal sans fil entre la station i et l'utilisateur j, qui est déterminée par les conditions spécifiques des scénarios précédemment considérés.
- N_0 : représente le bruit moyen par sous-porteuse.
- I_j : correspond à l'interférence reçue par l'utilisateur j provenant des stations voisines.

Pour qu'un utilisateur j puisse maintenir une connexion stable à la station i, il est essentiel que la puissance reçue atteigne un certain seuil minimal, noté P_{thr}. Cela se traduit par la contrainte suivante :

$$P_{ij} \geq P_{thr}, \qquad \forall j \in n_i \quad (2.27)$$

Où n_i est l'ensemble des utilisateurs connectés à la station i.

Dans le contexte hétérogène des systèmes de communication, l'objectif est souvent de minimiser la puissance maximale de transmission pour optimiser l'efficacité et réduire les interférences. Pour cela, le problème de contrôle de puissance peut être formulé comme suit :

$$min \sum_i P_i^{max} \quad (2.28)$$

Sous les conditions :

$$P_{ij} \geq P_{thr}, \qquad \forall j \in n_i$$

$$p_{i,max} \leq P'_{SC}, \qquad \forall i \in n_S$$

Où P'_{SC} représente une limite supérieure sur la puissance maximale de transmission pour la station i.

2.5.7 Arrangement d'association d'utilisateurs basé sur le diagramme de Voronoi

L'organisation spatiale des utilisateurs dans un réseau de communication sans fil peut être modélisée de manière analytique afin d'optimiser l'efficacité et la qualité de service [91]. Dans cette optique, l'utilisation du diagramme de Voronoi permet d'illustrer comment les utilisateurs se connectent aux stations en fonction de leur proximité.

Dans un scénario idéal sans contraintes de ressources, chaque utilisateur se connecterait à la station la plus proche, analogue à l'attraction électrostatique entre charges de signes opposés. Ce potentiel électrostatique peut s'exprimer sous la forme :

$$\Phi(X,Y) = \sum \frac{q_i}{\sqrt{(X-X_i)^2 + (Y-Y_i)^2}} \quad (2.29)$$

Où q_i est la charge de la station i et X, Y, X_i, Y_i sont respectivement les coordonnées de l'utilisateur et de la station i.

Cependant, dans un contexte réel, il est crucial de prendre en compte les limitations de ressources de chaque station, représentées par la variable C_i, qui dénote le nombre maximal d'utilisateurs pouvant être connectés à la station. Parallèlement, la bande passante minimale requise pour assurer une connexion acceptable doit également être considérée [88]. Celle-ci peut être calculée comme suit :

$$(\gamma_{ij})_{min} = \frac{r_{min}}{A_{i,j}} \quad (2.30)$$

En intégrant les contraintes de bande passante et de capacité, nous obtenons :

$$\sum (\gamma_{ij})_{min} = r_{min} \sum_j \frac{1}{A_{ij}} \leq C_i, \qquad \forall i \quad (2.31)$$

Pour chaque station i, il est nécessaire de calculer toutes les distances dijPour chaque station i, il est nécessaire de calculer toutes les distances d_{ij} entre la station et les utilisateurs, ordonnées de manière croissante. L'utilisateur n_i est déterminé par les conditions :

$$r_{min} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{A_{ij}(d_{ij})} \leq C_i \qquad (2.31)$$

Et

$$r_{min} \sum_{j=1}^{n_i+1} \frac{1}{A_{ij}(d_{ij})} > C_i \qquad (2.32)$$

Le rayon d'attraction R_i pour chaque station est défini par la distance maximale à laquelle un utilisateur j peut être connecté à la station tout en respectant les conditions susmentionnées. Ce rayon dépend des ressources disponibles C_i et de la répartition des utilisateurs autour de la station [93].

Un utilisateur j sera attiré par la station i si sa distance d_{ij} est inférieure ou égale à R_i. En attribuant une charge $q_i = R_i$ à la station, le potentiel à une distance d_{ij} est donné par :

$$\Phi(d_{ij}) = \frac{R_i}{d_{ij}} \qquad (2.33)$$

La condition pour qu'un utilisateur soit attiré vers une station est que : $\Phi(d_{ij}) \geq 1$

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner en détail les aspects du dimensionnement des réseaux 5G, une étape indispensable pour garantir une couverture optimale, une capacité suffisante et une qualité de service répondant aux exigences des utilisateurs. À travers l'analyse des divers scénarios de déploiement, des modèles de propagation et des paramètres techniques comme la bande de fréquence et le bilan de liaison, nous avons mis en évidence les éléments fondamentaux nécessaires à la conception d'un réseau performant.

Les approches de dimensionnement, qu'elles soient basées sur la couverture ou sur la capacité, montrent l'importance d'une planification adaptée aux caractéristiques des environnements ciblés (urbains, ruraux ou mixtes). Par ailleurs, l'utilisation de modèles avancés, comme ceux basés sur les techniques Voronoi, illustre l'évolution des outils et méthodes employées pour optimiser le placement des stations de base et des relais.

Ces analyses posent les bases de la conception et de l'implémentation de l'outil de dimensionnement présenté dans le chapitre suivant. Celui-ci s'appuiera sur les principes étudiés pour fournir une solution automatisée, capable de répondre aux défis posés par la complexité et la diversité des scénarios d'un déploiement 5G.

Chapitre 3 : Conception et implémentation de l'outil

3.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous abordons la conception et la mise en œuvre d'un outil de dimensionnement dédié aux réseaux 5G, en nous appuyant sur les fondements théoriques et techniques explorés dans les chapitres précédents. Après avoir exposé les caractéristiques de la 5G dans le premier chapitre, puis analysé les spécificités du dimensionnement d'un réseau 5G dans le deuxième, nous nous concentrons ici sur le développement d'un outil qui permet de simuler et d'optimiser le déploiement de ce type de réseau.

Ce chapitre s'ouvre sur la définition des besoins fonctionnels et non fonctionnels de l'outil. Ensuite, une étude technique justifie les choix matériels et logiciels ainsi que les langages de modélisation employés pour sa conception. Enfin, nous détaillerons les interfaces de l'outil et présenterons une simulation de dimensionnement appliquée à une zone cible, illustrant les calculs de pertes de signal et le nombre de stations relais nécessaires pour garantir une couverture de celle-ci.

3.2 Définitions des besoins

L'architecture de notre outil de dimensionnement de réseau 5G repose sur un stack technologique moderne et robuste. La partie front-end est développée avec Angular, un framework JavaScript qui nous permet de créer une application web évolutive avec une architecture orientée composants, enrichie par Tailwind CSS, un framework utilitaire qui accélère le développement en garantissant une cohérence visuelle et une expérience utilisateur optimale sur tous les appareils. Cette approche modulaire facilite la maintenance et les futures évolutions des besoins.

Côté back-end, notre choix s'est porté sur Spring Boot, un framework Java reconnu pour sa robustesse et sa maturité dans le développement d'applications d'entreprise. Spring Boot offre une solution complète avec une architecture robuste basée sur l'IoC et l'injection de dépendances, garantissant des performances optimales pour les calculs de dimensionnement réseau, une gestion efficace des API RESTful via Spring Web, une sécurité renforcée avec Spring Security, une intégration flexible des systèmes de persistance, le tout au sein d'un écosystème riche en modules facilitant l'extension des fonctionnalités.

3.2.1 Exigences fonctionnels

L'outil de dimensionnement de réseau 5G est conçu pour offrir une expérience utilisateur fluide et intuitive grâce à des interfaces graphiques bien structurées. Ces interfaces permettent de simplifier la saisie des données nécessaires à la phase de prédimensionnement.

Pour effectuer le dimensionnement d'un réseau 5G, on doit :

- Saisir les paramètres d'entrée
- Choisir un modèle de propagation selon le scénario à analyser
- Calculs spécifiques :
    - Calculer le Path Loss (pertes de trajet) pour évaluer l'atténuation du signal
    - Déterminer le rayon de la cellule de couverture pour chaque station
    - Calculer le nombre de stations relais nécessaires pour couvrir la zone cible

L'outil doit :

- Fournir des résultats exploitables par l'équipe de planification pour analyser et comparer les scénarios de simulation.
- Permettre à l'équipe de recommander un modèle de planification en fonction des objectifs de couverture et des contraintes de la zone étudiée.

3.2.2 Exigences non fonctionnels

Notre outil de dimensionnement a été conçu en accordant une attention particulière aux exigences non fonctionnelles, garantissant ainsi une solution à la fois performante et pérenne. L'accent a été mis sur l'expérience utilisateur avec une interface épurée et intuitive, démocratisant l'accès aux fonctionnalités de dimensionnement sans nécessiter d'expertise technique approfondie. La plateforme assure une navigation fluide et des temps de réponse optimaux, permettant aux utilisateurs d'accéder rapidement aux fonctionnalités essentielles.

Sur le plan technique, l'architecture logicielle suit les principes de clean code et les bonnes pratiques de développement, avec une documentation claire et une structure modulaire facilitant la maintenance et l'évolution du système. Un point d'honneur a été mis sur la qualité et la fiabilité du traitement des données : des mécanismes de validation rigoureux et des contrôles de cohérence sont implémentés à chaque étape, de la saisie jusqu'au calcul final pour garantir ainsi la fiabilité des résultats fournis aux utilisateurs.

3.3 Analyse technique

L'analyse technique établit le blueprint détaillé de notre solution, orchestrant l'architecture, les composants et les technologies choisies pour leur pertinence et leur efficacité. Cette conception optimise l'utilisation des ressources matérielles et logicielles, en respectant les exigences fonctionnelles du projet.

3.3.1 Equipements de base

La réalisation de l'outil de dimensionnement a été effectuée sur une machine présentant les caractéristiques suivantes :

- **Processeur** : Intel® Core™ i7-7600U CPU @ 2.80 GHz (2.90 GHz).
- **Mémoire RAM** : 16 Go.
- **Disque dur** : 500 Go SSD.
- **Système d'exploitation** : Windows 11 Professionnel, processeur x65.

3.3.2 Outils de conception

Notre outil de dimensionnement de réseau 5G s'appuie sur un stack technologique moderne et robuste. L'architecture front-end repose sur Angular et l'expérience visuelle est enrichie par Tailwind CSS. Côté back-end, Spring Boot constitue le pilier central de notre architecture, offrant un framework Java robuste pour la gestion des services REST et le traitement de la logique métier complexe du dimensionnement réseau.

L'environnement de développement a été optimisé grâce à des outils spécialisés : IntelliJ IDEA pour le développement Java back-end et WebStorm pour le développement front-end. Postman est utilisé pour tester l'API.

3.3.2.1 Outil d'envoi de requêtes API

Postman est un outil populaire conçu pour le développement, le test et la documentation d'APIs. Il simplifie le processus d'interaction avec les APIs en fournissant une interface conviviale et des fonctionnalités robustes pour envoyer des requêtes, visualiser les réponses, et analyser les données échangées.

- Prend en charge divers types de requêtes HTTP : GET, POST, PUT, DELETE, PATCH, etc.
- Permet de configurer facilement les en-têtes, les paramètres d'URL, les corps de requête, et l'authentification.

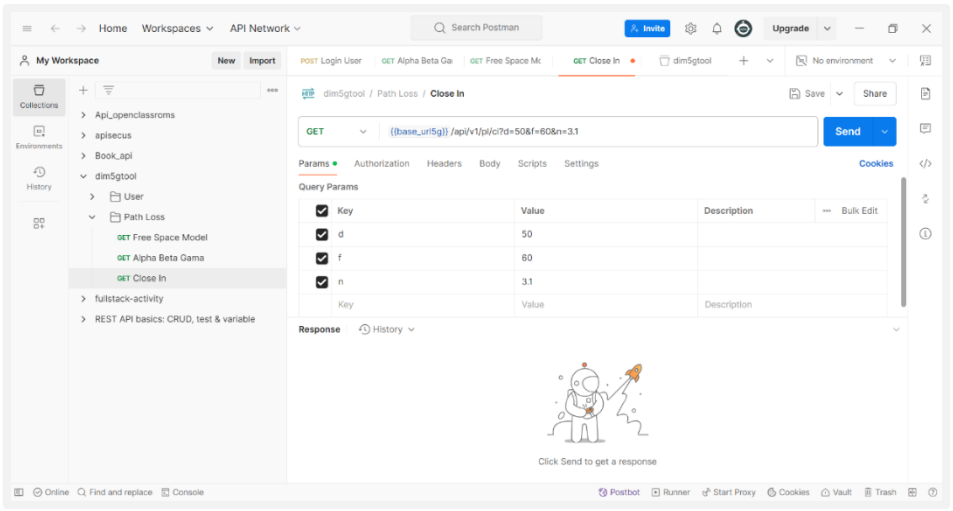


Figure 3.17 : Outil de test endpoint API

3.3.2.2 Outil de développement

IntelliJ IDEA est un environnement de développement intégré polyvalent, conçu principalement pour les développeurs Java. Développé par JetBrains, il est également adapté à d'autres langages de programmation comme Kotlin, Groovy, Scala, et de nombreux autres via des plugins. IntelliJ est reconnu pour sa convivialité, sa performance, et ses fonctionnalités intelligentes qui facilitent le développement.

Bien que focalisé sur Java, il prend en charge de nombreux langages via des plugins (Python, JavaScript, TypeScript, PHP, etc.).

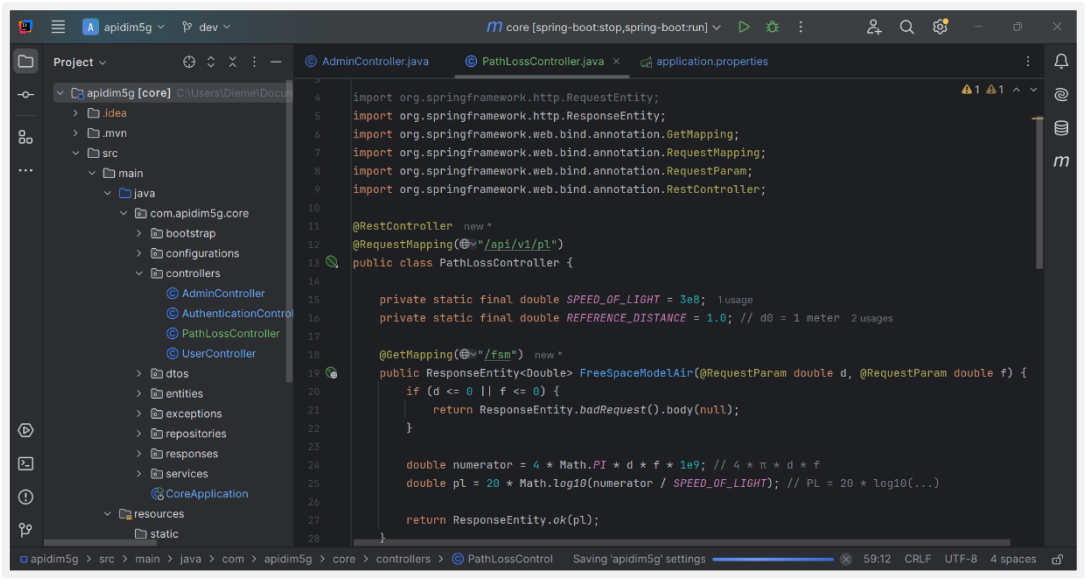


Figure 3.18 : Outil de développement InteliJ

Les cas d'utilisation permettent de structurer les besoins des utilisateurs et les objectifs correspondants d'un système. Un cas d'utilisation représente une fonction que doit effectuer le système afin de répondre à un besoin des acteurs. Conventionnellement, les cas d'utilisation sont schématisés par des cercles et les acteurs (utilisateur principal) par des symboles d'homme.

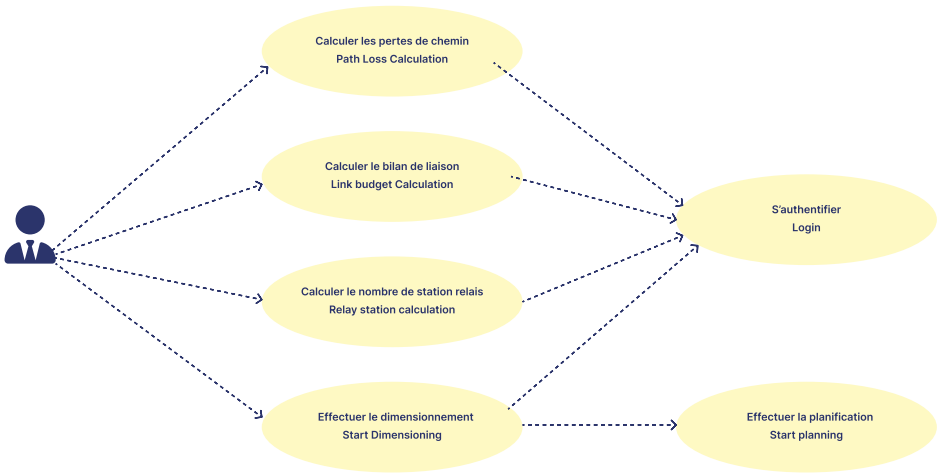


Figure 3.19 : Diagramme des cas d'utilisation de l'outil

3.3.3 Choix du langage de modélisation

Notre outil de dimensionnement réseau 5G s'appuie sur un ensemble de langages de modélisation, chacun jouant un rôle spécifique dans l'architecture globale de la solution.

Au niveau de l'interface utilisateur, nous avons mis en place une structure en trois couches complémentaires :

- HTML constitue le squelette de l'interface, organisant les éléments de manière logique et accessible.
- Tailwind CSS apporte une couche de style moderne et flexible, permettant une personnalisation fine de l'apparence en maintenant une cohérence visuelle.
- JavaScript anime l'interface en gérant l'interactivité, les calculs dynamiques et la communication avec le back-end via l'API.

L'architecture back-end repose sur Spring Boot, un framework Java qui assure :

- Le développement rapide et robuste de l'API
- Une gestion efficace des services métier
- Une excellente performance et scalabilité
- Une sécurité renforcée des données et des transactions

Cette architecture multicouche permet une séparation des responsabilités tout en fournissant une communication fluide entre les différents composants du système, répondant ainsi aux exigences techniques et fonctionnelles du projet.

3.4 Présentation de l'outil

L'outil de dimensionnement de réseau 5G, baptisé 5G DimTool, est une application web et Desktop conçue pour assister les opérateurs et planificateurs dans le processus de dimensionnement et de planification des réseaux 5G. Dans les sections qui suivent, nous présentons certaines des interfaces de cet outil, illustrant son fonctionnement et ses fonctionnalités principales.

3.4.1 Interface de connexion

L'interface de connexion permet aux utilisateurs d'accéder à l'outil 5G DimTool. Dès l'exécution de l'application, cette interface s'affiche, demandant aux utilisateurs de s'authentifier à l'aide de leur adresse e-mail et de leur mot de passe. Après avoir saisi ces informations, l'utilisateur clique sur le bouton « Se connecter » pour valider son identité.

En cas d'oubli du mot de passe, une option « Mot de passe oublié » est accessible depuis l'interface de connexion. En cliquant sur ce bouton, les utilisateurs sont redirigés vers une nouvelle interface où ils peuvent entrer leur adresse e-mail pour recevoir un lien de réinitialisation. Ce processus sécurisé assure que seuls les utilisateurs authentiques peuvent récupérer l'accès à leur compte.



Figure 3.20 : Interface de connexion



Figure 3.21 : Interface de réinitialisation

3.4.2 Interface d'accueil

L'interface d'accueil de l'outil 5G DimTool est conçue pour offrir un accès intuitif à ses fonctionnalités principales à travers une barre de navigation structurée. Cette interface comporte cinq modules, chacun dédié à une fonction spécifique, comme illustré sur la figure 3.20. Ces onglets permettent de naviguer facilement entre les différentes fonctionnalités de l'outil.

- Path Loss : Cet onglet est dédié au calcul des pertes de trajet (Path Loss) en utilisant les modèles de propagation sélectionnés, permettant d'analyser les caractéristiques du signal dans un environnement donné.
- Link Budget : Permet de calculer les paramètres de bilan de liaison, comme la puissance émise, les pertes dues à l'environnement, et la puissance reçue.
- Relay Station : Cet onglet offre des outils pour déterminer le nombre optimal de stations relais nécessaires afin d'assurer une couverture pour chaque station de base 5G.

- Dimensioning : Ici, les utilisateurs peuvent réaliser des simulations complètes pour le dimensionnement d'une zone. Cela inclut le positionnement des stations de base et des relais, ainsi que la répartition des utilisateurs 5G dans la zone couverte.
- About : Cet onglet fournit une description générale de l'outil, expliquant ses objectifs, ses fonctionnalités, et son rôle dans le dimensionnement des réseaux 5G.

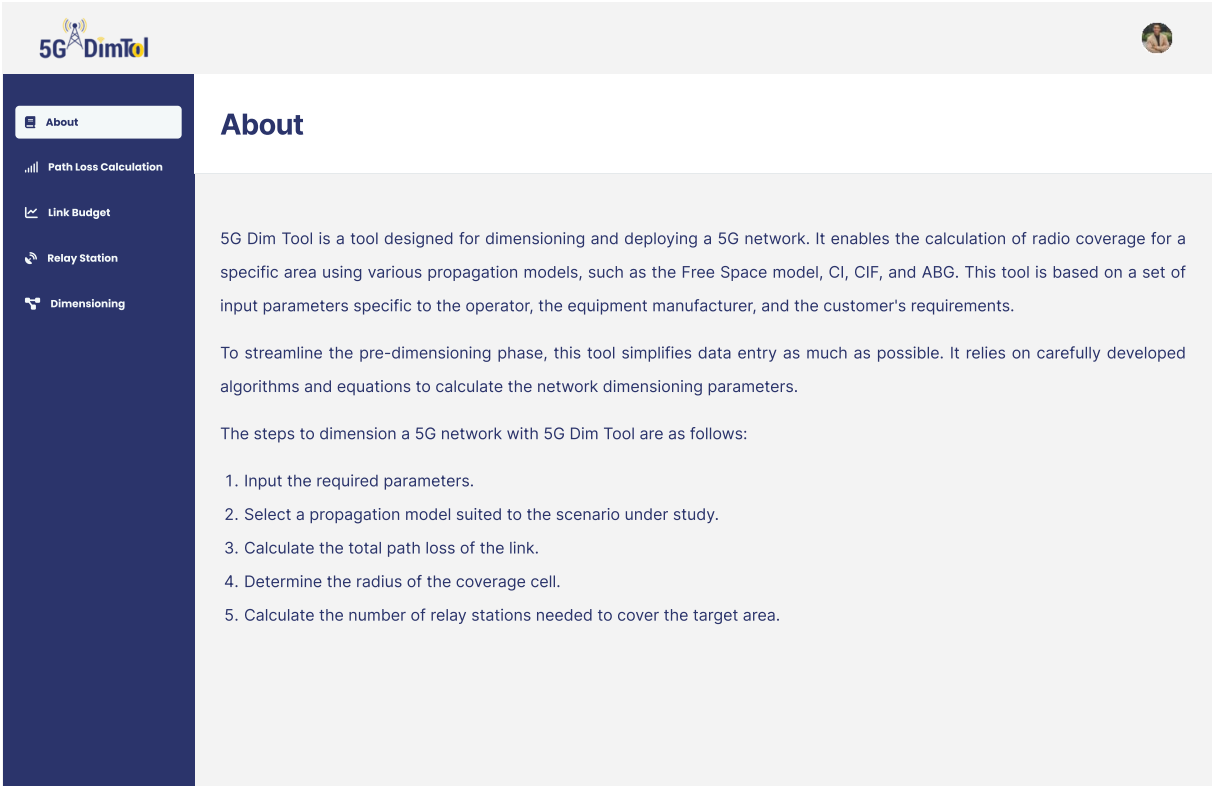


Figure 3.22 : Interface d'accueil

3.5 Simulation de dimensionnement

3.5.1 Calcul de pertes du chemin

L'outil de dimensionnement intègre une interface dédiée au calcul des pertes de chemin pour les modèles de propagation Free Space, ABG, Close-In (CI/CIF), CI Dual Frequency. L'utilisateur peut sélectionner le modèle de propagation souhaité en fonction des caractéristiques du terrain (urbain, périurbain, rural) et des paramètres radio (fréquence, distance, gain des antennes, etc.). Le résultat des pertes de chemin, exprimé en dB, est automatiquement affiché dans une section dédiée de l'interface.

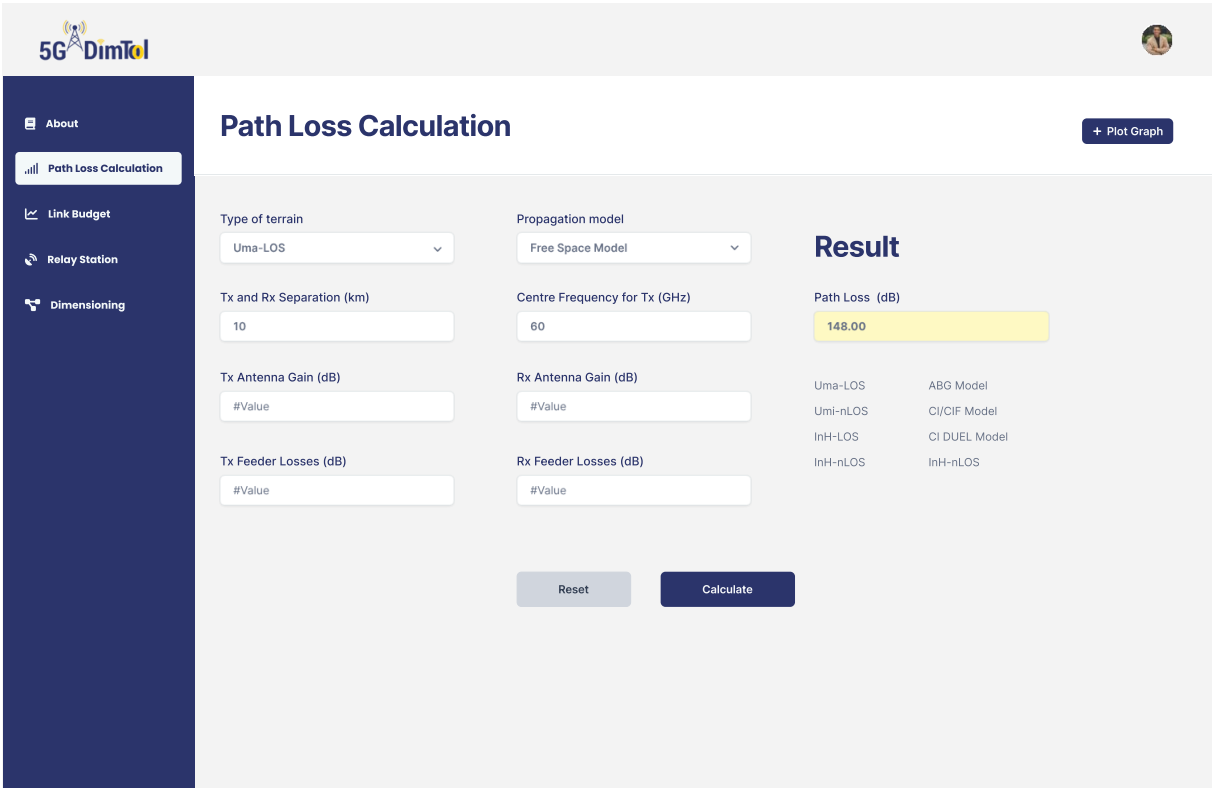


Figure 3.23 : Interface de calcul du Path Loss

Le tableau suivant compile les valeurs de pertes pour différents types de terrains : UMa, UMi, et InH, dans les deux environnements LOS et nLOS, à une fréquence de 60 GHz. Ces pertes sont analysées en fonction des distances séparant l'émetteur et le récepteur.

Tableau 3.5 : Pertes en chemin pour différents environnements

Distance Tx-Rx (m)	Uma-LOS	Uma-LOS	Uma-nLOS	Umi-nLOS	InH-nLOS	InH-LOS	InH-nLOS
	Espace Libre	CI/CF	ABG	ABG	CI Dual	CI/CF	ABG
10	88.00	148.08	91.27	107.41	159.01	160.01	95.34
20	94.02	154.03	101.81	115.83	168.34	169.64	107.08
30	97.54	155.57	107.97	120.76	173.80	175.25	113.94
40	100.04	160.05	112.37	124.26	177.67	179.27	118.82
50	101.98	161.99	115.73	126.98	180.68	182.38	122.60

Les quatre modèles étudiés (Espace Libre, CI/CF, ABG et CI Dual) présentent des caractéristiques distinctes dans la prédiction des pertes de propagation. Le modèle Espace Libre présente les pertes les plus faibles, ce qui le rend idéal pour les environnements dégagés en vue directe (LOS), tandis que le modèle ABG excelle dans les environnements urbains complexes. À l'inverse, le modèle CI affiche des pertes modérées sur de courtes distances, mais celles-ci augmentent rapidement avec la distance, limitant son efficacité pour les scénarios NLOS. Le modèle CI Dual se distingue par sa capacité à modéliser des scenarii mixtes LOS et NLOS.

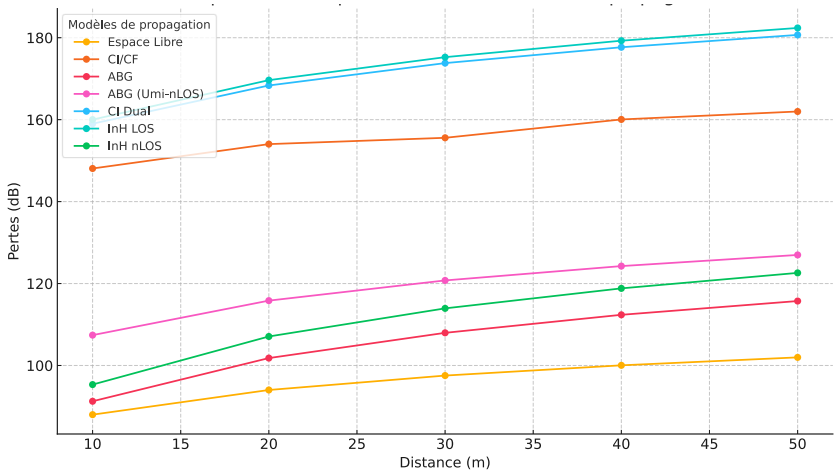


Figure 3.24 : Comparaison du Path Loss en fonction de la portée pour différents modèles

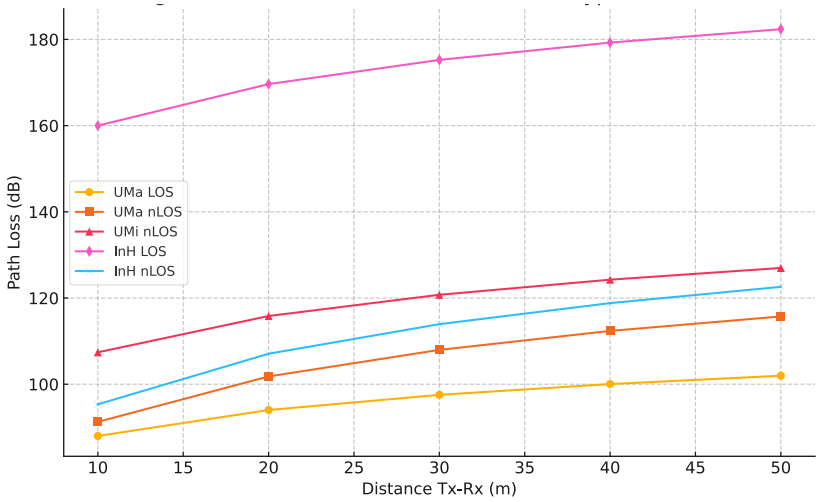


Figure 3.25 : Path Loss en fonction de la portée pour différents types de terrain

Les résultats montrent que les courbes suivent une tendance ascendante, indiquant une augmentation de l'affaiblissement du signal à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur s'accroît. Cette augmentation est principalement causée par des phénomènes physiques tels que l'obstruction « shadowing », la diffraction, la réflexion et l'absorption des ondes radio, qui influencent le signal pendant sa transmission.

Le modèle ABG utilise un plus grand nombre de paramètres par rapport aux modèles CI et CIF. Cependant, les modèles CI et CIF présentent de meilleures performances en termes de stabilité et de précision de prédiction sur une large gamme de fréquences. Cette différence s'explique par la simplicité des modèles CI et CIF, qui reposent sur un nombre réduit de paramètres, principalement l'exposant de perte de chemin (PLE) et le facteur d'atténuation X_{σ}^{CI}, pour fournir des prédictions fiables.

En revanche, le modèle ABG intègre quatre paramètres $\alpha, \beta, \gamma \; et \; X_{\sigma}^{ABG}$, offrant une plus grande flexibilité. Malgré cela, les modèles CI et CIF surpassent le modèle ABG en termes de concordance avec les données expérimentales, en particulier dans la bande de fréquence des 60 GHz.

3.5.2 Calcul de la portée des stations de base/relai (Bilan de liaison)

Pour établir efficacement la portée radio d'une zone spécifique, l'ingénieur réseau doit impérativement réaliser au préalable une analyse du budget de liaison, étape technique indispensable dans la planification des télécommunications. Le Bilan de Liaison permet d'évaluer si une liaison radio entre une station de base et un utilisateur peut être établie avec des performances satisfaisantes, en tenant compte des paramètres de transmission et des pertes de propagation.

Le calcul du bilan de liaison implique une analyse détaillée des caractéristiques techniques à différents points du trajet du signal. On considère successivement les propriétés de l'émetteur (Puissance d'émission, Gain de l'antenne d'émission, Pertes occasionnées par les câbles de raccordement), les caractéristiques du récepteur (Sensibilité du récepteur, Gain de l'antenne de réception, Pertes liées aux câbles de connexion, Facteur de bruit), et les différentes marges nécessaires pour garantir une transmission fiable.

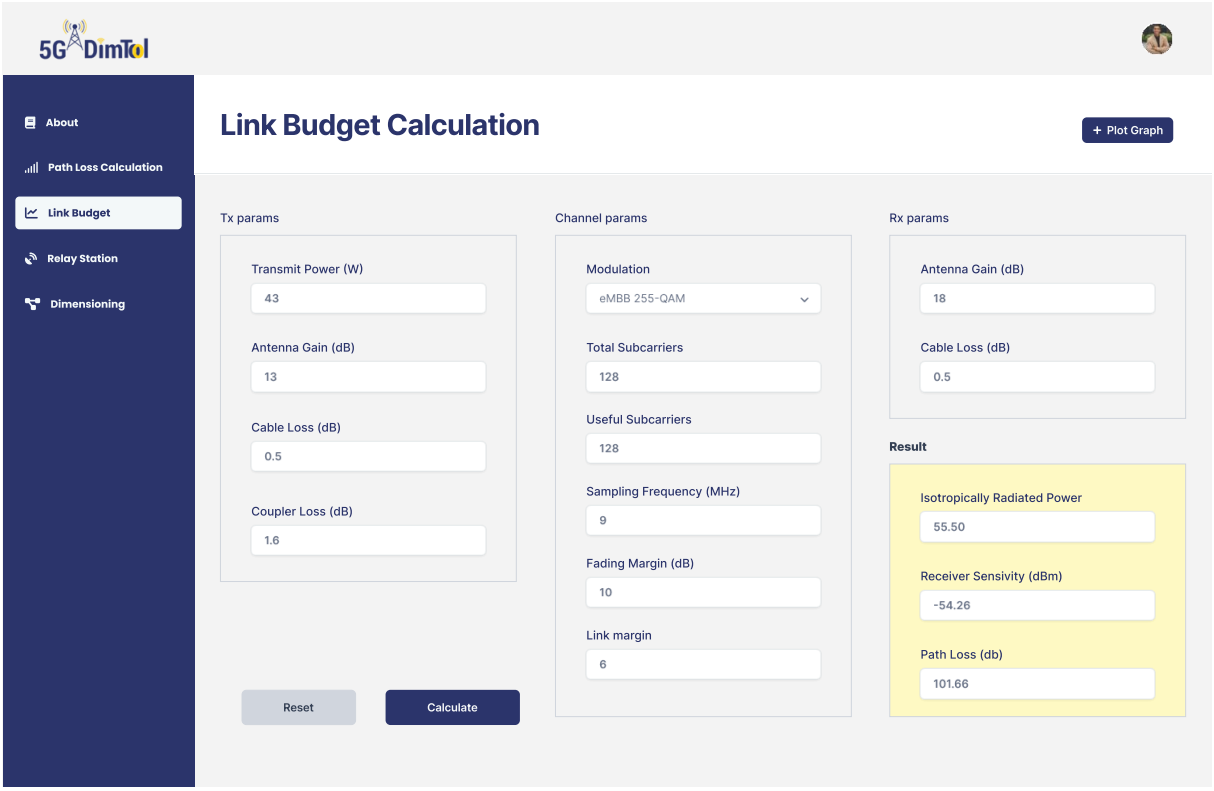


Figure 3.26 : Interface de calcul du bilan de liaison

La limite maximale des pertes de signal définit l'étendue de couverture potentielle d'une station de base ou d'un relais. Ce paramètre critique permet de déterminer la configuration du réseau, en établissant le nombre d'infrastructures nécessaires pour desservir efficacement un territoire donné.

La simulation de réseau 5G a porté sur quatre cas d'usage distincts : eMBB (très haut débit mobile) avec modulation 256-QAM, BLUF (communications à très basse latence), IoT (interconnexion d'objets) et AIRE (connectivité des zones isolées) utilisant une modulation 16-QAM. Les résultats obtenus via l'interface de calcul du bilan de liaison mettent en évidence des portées cellulaires variables selon les modèles de propagation employés.

Tableau 3.6 : PIRE, la sensibilité et l'affaiblissement selon la zone

Scénarios	Modulation	Rapport Signal/Bruit (dB)	PIRE (dB)	Sensibilité (dBm)	Perte de chemin maximal (dB)
eMBB	256-QAM	17.26	55.5	-54.26	101.66
BLUF	16-QAM	1.36	55.5	-33.64	81.04
IOT	16-QAM	3.25	55.5	-36.74	84.14
AIRE	16-QAM	-1.89	55.5	-31.30	78.70

La couverture dépend significativement du contexte de transmission. En environnement rural, par exemple, où les obstacles entre station de base (BS), stations relais (SR) et équipement utilisateur (EU) sont minimaux, le modèle de propagation se rapproche d'une transmission en ligne directe (LOS), impliquant principalement des pertes liées à l'espace libre.

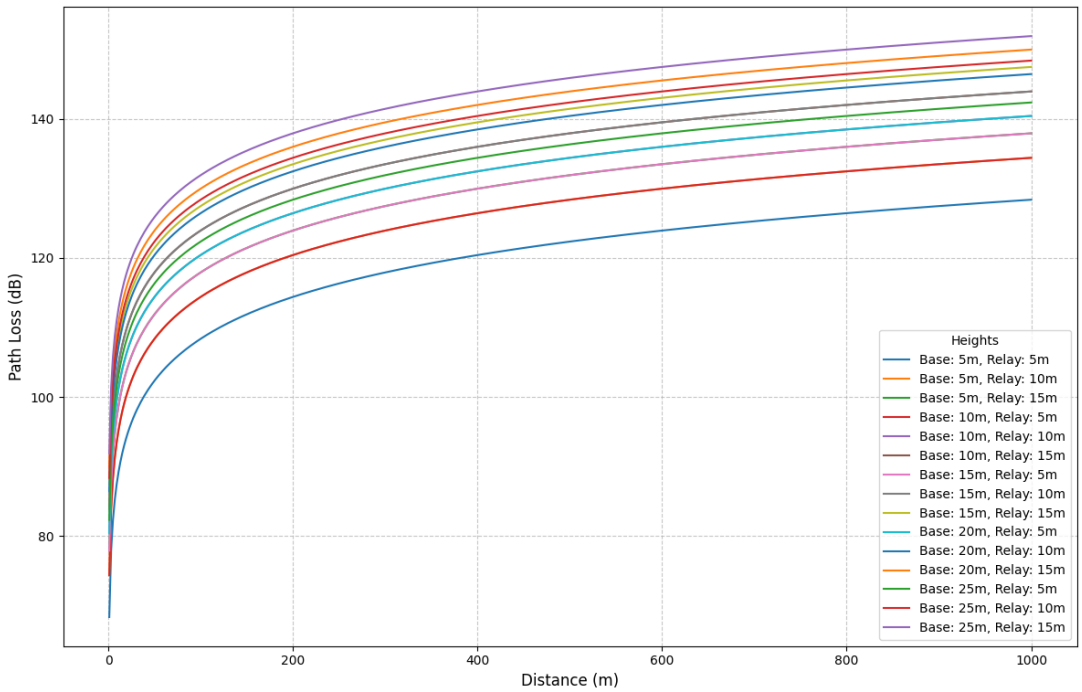


Figure 3.27 : Variation de maximum Path loss (dB) en fonction des portées

Les courbes illustrent l'impact significatif de la hauteur des stations de base et des stations de relais sur les pertes de chemin et la portée dans le modèle de propagation en espace libre. Les résultats montrent que des hauteurs plus élevées pour les stations de base (20 m, 25 m) et les stations de relais (15 m) réduisent les pertes de signal, améliorant ainsi la portée.

Cette observation s'explique par la réduction des effets d'obstruction et une meilleure propagation du signal à des altitudes plus élevées. Cependant, bien que le modèle en espace libre fournisse une base théorique claire, il ne prend pas en compte les obstacles réels présents dans les environnements urbains ou denses. Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation de la hauteur des équipements pour maximiser l'efficacité des réseaux, en particulier dans les environnements dégagés où ce modèle est le plus pertinent.

La conception des réseaux mobiles diffère selon la densité de population. En milieu rural, on déploie quelques stations de base pour couvrir de vastes étendus. En contexte urbain, la logique s'inverse : on multiplie les points de relais sur de courtes distances, améliorant ainsi la qualité de transmission et réduisant les interférences potentielles.

3.5.3 Estimation du nombre de stations relais nécessaires

L'interface d'estimation du nombre de stations relais nécessaires, illustrée par la figure correspondante, permet de calculer le nombre de relais requis pour couvrir une zone spécifique en répondant aux besoins en débit et en capacité. Ce calcul repose sur des hypothèses simplificatrices, telles que l'uniformité des cellules, bien que les cellules de Voronoi générées en conditions réelles soient souvent irrégulières. Après avoir renseigné les caractéristiques de la zone, notamment la superficie, le type de terrain et les paramètres radio comme la puissance d'émission et la fréquence, l'utilisateur peut lancer la simulation en cliquant sur le bouton de calcul.

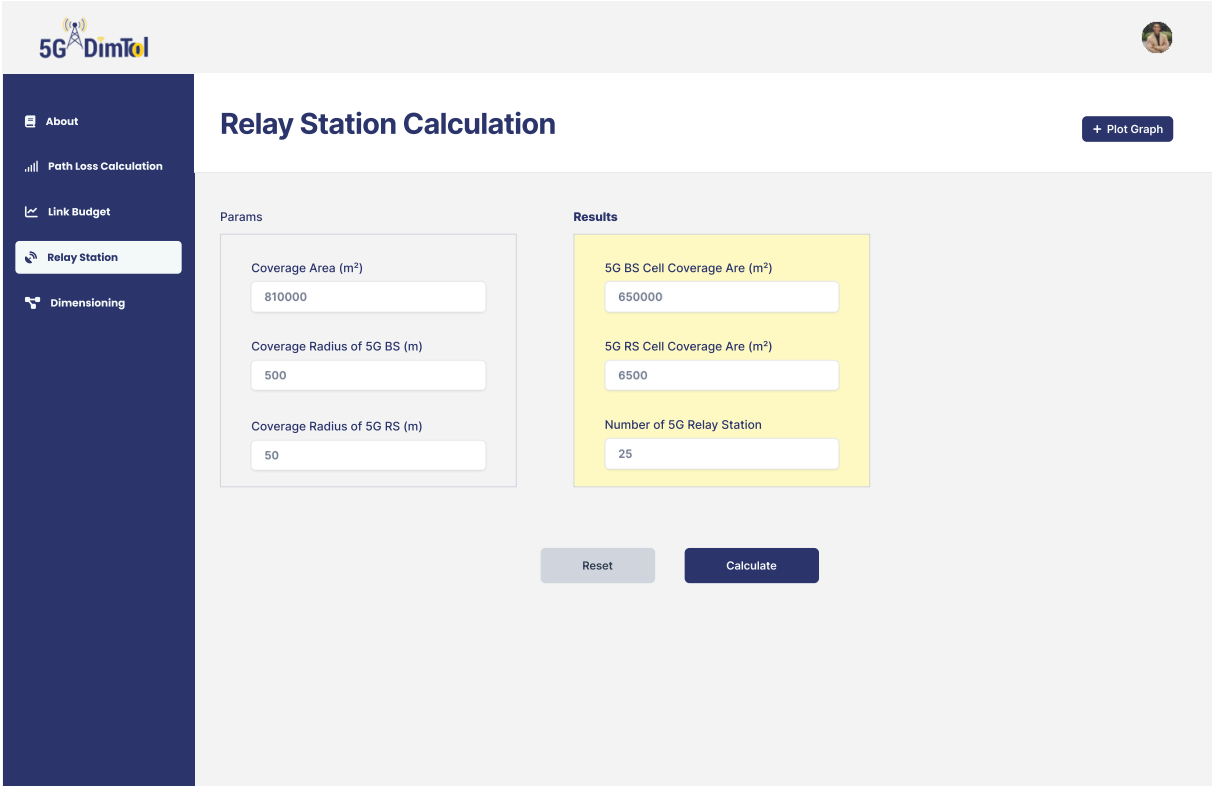


Figure 3.28 : Calcule de nombre de stations de relais

3.5.4 Simulation du dimensionnement d'une zone spécifique

Suite aux analyses techniques préalables, nous passons à la simulation du déploiement réseau sur un territoire de 810 000 m², avec un dispositif de 25 stations relais précédemment dimensionné. L'objectif est double : réguler l'accès des utilisateurs et gérer finement la puissance des équipements.

Notre démarche s'articule autour de la validation d'un modèle de simulation, illustrant l'association des utilisateurs via le diagramme de Voronoi dans une architecture cellulaire hétérogène. Le scénario retenu reproduit un environnement urbain, où une station de base principale est assistée par 25 stations relais complémentaires.

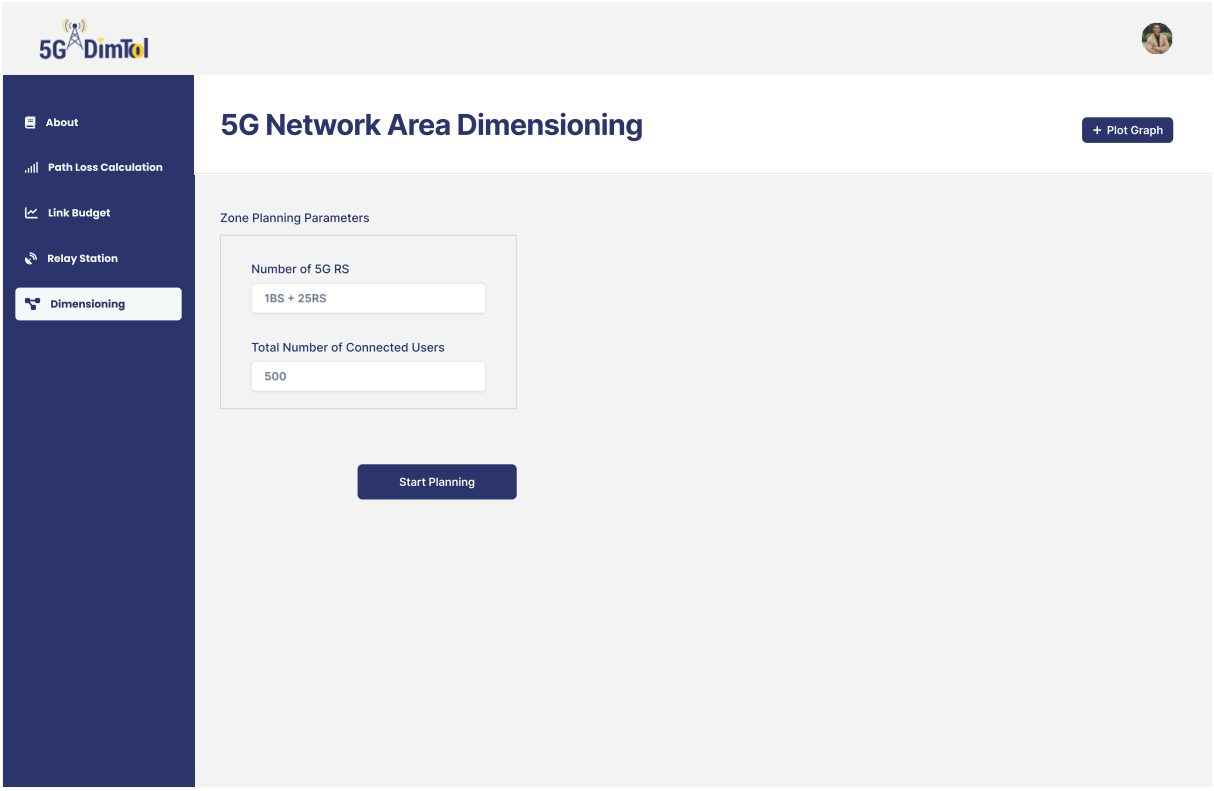


Figure 3.29 : Interface de dimensionnement

L'ensemble des données issues de la simulation a été compilé, incluant les métriques relatives au nombre total d'utilisateurs intégrés au réseau et la puissance moyenne maximale de transmission. Ces informations ont été rassemblées en vue de leur représentation graphique.

Tableau 3.7 : Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
P_{SB}	43 dBm
P_{SR}	30 dBm
P_{thr}	-100 dBm
N	500 abonnés
N_s	27 (1SB + 26SR)
C_i	20MHz(SB) et 5MHz(SR)
r_{min}	1 Mbps

La configuration de simulation reproduit un environnement urbain numérique, articulé autour d'une unique station de base 5G (1BS 5G), assistée par un réseau de 25 stations relais (25 RS). L'activation du processus s'effectue par une simple interaction avec le bouton "Start Planning", déclenchant l'interface de dimensionnement réseau.

La méthodologie d'association des utilisateurs repose sur un critère standard : la connexion à l'infrastructure présentant le signal « downlink » le plus puissant. Préalablement à cette simulation, le positionnement précis des équipements est réalisé notre outil, accessible par le bouton « Add BS/RS » situé en bas à gauche de l'interface.

L'outil procède alors à un déploiement cartographique distinctif : la station de base est représentée en jaune, tandis que les relais sont figurés en bleu, conformément à l'illustration de la figure 3.31.

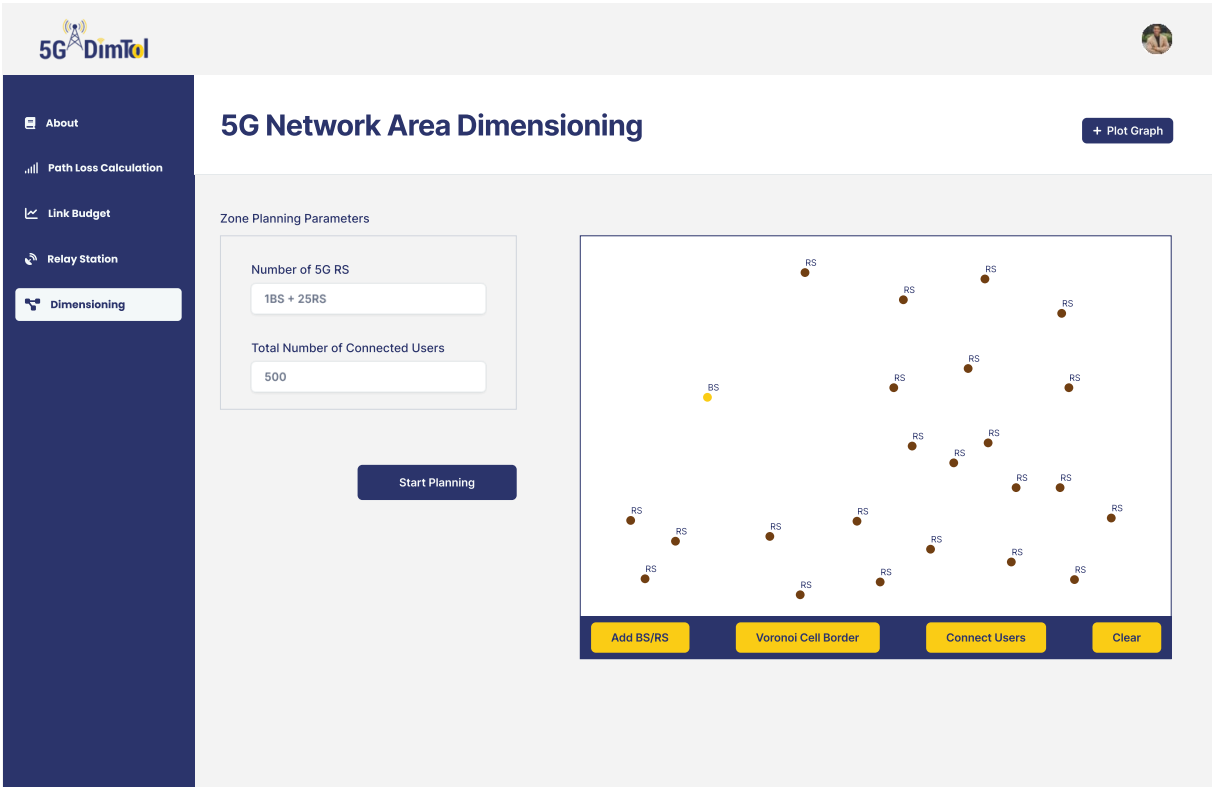


Figure 3.30 : Ajout des sites dans la zone de couverture

Après le déploiement des sites, nous procédons à la génération du diagramme de Voronoi, nous permettant de délimiter les zones de couverture de chaque infrastructure. Cette opération

s'effectue par l'activation du bouton « Voronoi Cell Border », comme le présente la figure 3.29 ci-dessous.

Le diagramme de Voronoi segmente l'espace en polygones distincts, chacun associé à une station. Au sein de chaque polygone, tout point est statistiquement plus proche et plus susceptible de se connecter à la station correspondante qu'à toute autre infrastructure. Une distinction visuelle est opérée, la station de base 5G se distinguant des stations relais par un arrière-plan orangé clair.

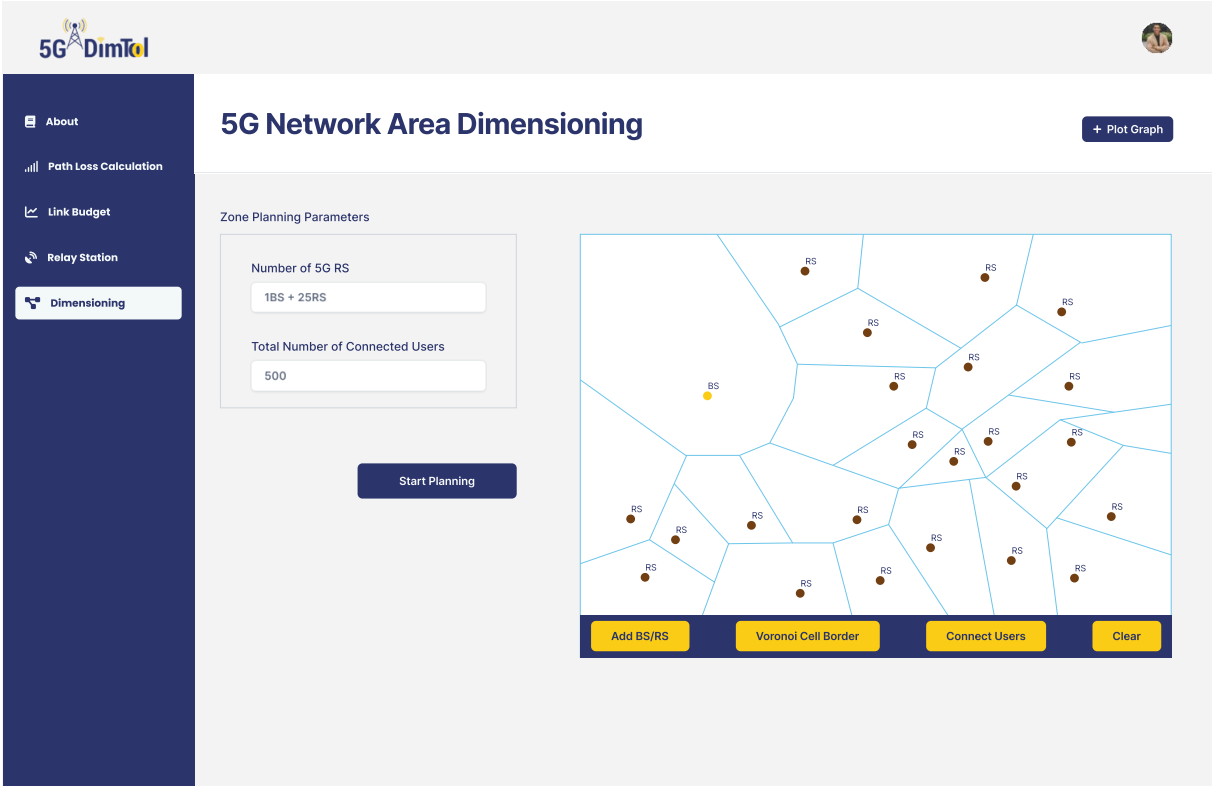


Figure 3.31 : Diagramme de Voronoi pour le réseau sans fil hétérogènes

Après l'élaboration du diagramme de Voronoi, la répartition et l'association des utilisateurs s'opèrent via la commande « Connect Users ».

Contrairement aux réseaux cellulaires traditionnels où la connexion dépend uniquement de la puissance du signal, notre simulation mobilise la technique de Voronoi, basée sur la minimisation de la distance entre station et utilisateur. Cette approche résout les ambiguïtés d'association lorsqu'un utilisateur dispose de plusieurs infrastructures potentielles.

La méthode génère des lignes bleues délimitant les zones d'influence, où chaque point frontalier présente un potentiel équivalent entre deux stations voisines. Aux sommets du diagramme, trois stations coexistent avec un potentiel identique. Chaque utilisateur est ainsi connecté à la station de son polygone de Voronoi.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter en détail les étapes de conception et d'implémentation de l'outil de dimensionnement pour les réseaux 5G. Nous avons défini les besoins fonctionnels et non fonctionnels de l'application, analysé les technologies et les équipements requis, et décrit les choix techniques qui ont guidé le développement.

À travers une interface intuitive, l'outil permet de simuler divers scénarios de dimensionnement, tels que le calcul des pertes du chemin, le bilan de liaison, et l'estimation du nombre de stations relais nécessaires. Ces fonctionnalités reposent sur des modèles mathématiques et des algorithmes optimisés.

Les tests réalisés ont confirmé la pertinence de l'outil dans l'estimation des ressources réseau et l'optimisation des configurations pour différents environnements et exigences de couverture. Néanmoins, des améliorations peuvent être envisagées pour intégrer davantage de paramètres dynamiques et perfectionner l’expérience utilisateur.

Conclusion Générale

Ce mémoire a permis d'explorer les multiples facettes du déploiement des réseaux 5G, depuis les concepts théoriques fondamentaux jusqu'à la conception et l'implémentation d'un outil dédié au dimensionnement et à la planification. La cinquième génération de réseaux mobiles représente une avancée technologique majeure, répondant aux exigences croissantes en termes de connectivité, de débit, de latence et de fiabilité, tout en ouvrant la voie à une multitude d'applications telles que l'Internet des Objets (IoT), les villes intelligentes et les services critiques (Télémédecine, …) en temps réel.

L'étude menée a d'abord retracé l'évolution des réseaux mobiles, soulignant l'importance de chaque génération dans la construction de l'écosystème télécom actuel. Elle a ensuite mis en lumière les défis techniques et stratégiques liés au dimensionnement des réseaux 5G, notamment en matière de choix des fréquences, des scénarios de déploiement et des modèles de propagation. Enfin, la conception et l'implémentation de l'outil de dimensionnement proposé constituent une contribution pratique qui, grâce à ses fonctionnalités de simulation et d'évaluation, facilite l'optimisation des ressources et garantit une couverture adaptée aux besoins spécifiques des utilisateurs.

Cette étude n'est cependant qu'une étape dans le vaste domaine des réseaux mobiles. Les futures évolutions, comme la transition vers la 6G, poseront de nouveaux défis et nécessiteront une réflexion continue. Les travaux réalisés dans ce mémoire pourront servir de base pour des recherches et des développements ultérieurs, qu'il s'agisse d'améliorer l'outil proposé, d'étendre son champ d'application, ou d'explorer de nouvelles technologies émergentes.

Bibliographie

[1] K. Tanaka, «The Mobile Communications Environment in the European Union: Systems, Regulations, and Consequences in the Past, Present, and Future,» chez *Conference on the History of Telecommunications*, St. John's, Newfoundland, Canada, 2001.

[2] F. Launay, «Évolution de la 1G vers la 4G,» Blog Universitaire de Poitiers, 22 août 2011. [En ligne]. Available: https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2011/08/22/evolutiondela1gversla4g/. [Accès le 05 août 2024].

[3] N. U. M. O. C. O. a. A. J. A. Opeoluwa Tosin Eluwole, «From 1G to 5G, What Next?,» chez *IAENG International Journal of Computer Science*, 28 August 2018.

[4] DJABOURABI, I., MOKHTARI, A. "Mise en place d'un réseau 4G (LTE) sécurisé" [Mémoire de Master], Université Badji Mokhtar - Annaba, sous la direction de REDJATI, A., 2020.

[5] M. Kouki et H. Askri, "Dimensionnement et planification d'un réseau 5G TDD", Rapport de Projet de Fin d'Etudes, Université de Carthage, Spécialité : Télécommunications, juin 2023.

[6] C. Demoulin et M. Van Droogenbroeck, "Principes de base du fonctionnement du réseau GSM", Revue de l'AIM, vol. 1, no. 4, pp. 3-18, 2004.

[7] BENISNOUS, «GSM Architecture | MS, BTS, BSC, MSC | VLR, HLR, AuC, EIR, OMC | BSS, NSS, OSS | Mobile Computing,» [En ligne]. Available: https://benisnous.com/gsm-architecture-ms-bts-bsc-msc-vlr-hlr-auc-eir-omc-bss-nss-oss-mobile-computing/. [Accès le 19 12 2024].

[8] GPRS, 26 07 2014. [En ligne]. Available: https://www.slideserve.com/oria/gprs. [Accès le 19 12 2024].

[9] Y. Danthasinghe, «Medium,» 08 août 2024. [En ligne]. Available: https://medium.com/@yasithdanthasinghe/understanding-mobile-network-technologies-amps-gsm-gprs-edge-7e5fe9b31c34. [Accès le 24 nov. 2024, 10:06].

[10] S. Aslam, «What is Internet generations: Basic component 1G, 2G, 3G, 4G and 5G,» Medium, 8 août 2024. [En ligne]. Available: https://medium.com/@safiaaslam47/what-is-internet-generations-basic-component-1g-2g-3g-4g-and-5g-dd7daf625f4c. [Accès le 24 nov. 2024, 10:32].

[11] «Equipements Réseaux,» [En ligne]. Available: https://www.slideserve.com/leane/equipements-r-seaux. [Accès le 20 12 2024 à 19:20].

[12] S. Das, UMTS System (3G) Overview, 06/2010, pp. 395-410.

[13] J. F. Elumbe, «Apport du protocole WAP dans le réseau téléphonique cellulaire. « Cas du réseau GPRS et UMTS,» [En ligne]. Available: https://www.memoireonline.com/01/14/8675/m_Apport-du-protocole-WAP-dans-le-reseau-telephonique-cellulaire--Cas-du-reseau-GPRS-et-UMTS-19.html. [Accès le 20 12 2014 à 20:25].

[14] M. a. H. S. a. S. M. Glabowski, Available bandwidth for HSDPA and HSUPA services, 06/2007, pp. 611 - 615.

[15] A. a. A.-J. F. a. A. A. Almutairi, GPRS/EDGE/3G/HSDPA networks performance measurements in the State of Kuwait, 03/2009.

[16] T. Group, «LTE technology,» 13 août 2024. [En ligne]. Available: https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/technology/lte. [Accès le 24 nov. 2024, 03:20].

[17] I. a. M. T. a. H. N. Ed-daoui, Étude d'une vulnérabilité liée au protocole SIP dans l'environnement IMS, 2016.

[18] S. Ahmadi, Chapitre 3 - E-UTRAN and EPC Protocol, Academic Press, 2014, pp. 121-152.

[19] G. Kremer, «Metrology of wireless networks: At the signal and the digital frontier,» 10 2014.

[20] M. B. Ouaissa, «Metrology of wireless networks: At the signal and the digital frontier,» *Springer,* 29 October 2017.

[21] X. Lagrange, «Mooc Explorer la 5G,» 8 juin 2020. [En ligne]. Available: https://lms.fun-mooc.fr/courses/. [Accès le 01 septembre 2024].

[22] K. K. Anass Benjebbour, IMT-2020 Radio Interface Standardization Trends in ITU-R, vol. 19, Technical Journal, 01/2018.

[23] B. MURARA, IMT-2020 NETWORK HIGH LEVEL REQUIREMENTS, HOW AFRICAN COUNTRIES CAN COPE, Draft ITU-T Rec. Y.IMT2020-reqt.

[24] ITU-R, Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio, 2017.

[25] 3GPP, Release 15 Description, 2018.

[26] Aymeric de Javel. 5G RAN : physical layer implementation and network slicing. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Institut Polytechnique de Paris, 2022. English. ffNNT : 2022IPPAT031. ftel-03848017f.

[27] F. Launay, «E2E Network Slicing : le découpage du réseau de bout en bout (Partie 2),» Blog de l'Université de Poitiers, [En ligne]. Available: https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/sdn/. [Accès le 24 nov. 2024, 16:03].

[28] 5gworldpro, «What are the two parts of the NR system architecture ?,» [En ligne]. Available: https://www.5gworldpro.com/blog/2023/11/04/what-are-the-two-parts-of-the-nr-system-architecture/. [Accès le 20 12 2024 à 21:17].

[29] Q. a. S. J. a. M. C. a. H.-A. Y. Pham Tran Anh, «Virtual network function-forwarding graph embedding: A genetic algorithm approach,» *International Journal of Communication Systems,* vol. 33, p. e4098, août 2019.

[30] V. Solutions, «Qu'est-ce que l'architecture 5G ?,» Viavi Solutions, 1 sept. 2024. [En ligne]. Available: https://www.viavisolutions.com/fr-fr/quest-ce-que-larchitecture-5g. [Accès le 24 nov. 2024, 15:43].

[31] R. Ferrús, 5G NETWORK PLANNING AND OPTIMIZATION USING ATOLL, 07-2019.

[32] D. International, «Applications et cas d'usage de la 5G,» Digi Blog, 2 sept. 2024. [En ligne]. Available: https://fr.digi.com/blog/post/5g-applications-and-use-cases. [Accès le 24 nov. 2024, 09:40].

[33] Yuehua Ding. Amélioration des performances d'un système MIMO par l'exploitation des propriétés des signaux de télécommunication. Electronique. UNIVERSITE DE NANTES, 2011. Français. ffNNT : ED503-141ff. fftel-01105051f.

[34] H. Enterprise, «What is Edge Computing,» Huawei Enterprise Forum, 1 sept. 2024. [En ligne]. Available: https://forum.huawei.com/enterprise/en/What-Is-Edge-Computing/thread/667283382104637440-667213860102352896. [Accès le 24 nov. 2024, 16:15].

[35] M. Odida, «Network Slicing in Software DefinedNetworking f,» *Research Square,* 19 Jan 2024.

[36] Mohammed Laroui. Distributed edge computing for enhanced IoT devices and new generation network efficiency. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Université Paris Cité; Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2022. English. ffNNT.

[37] D. Microwave, «5G spectrum range of 3GPP protocol,» Dolph Microwave, 1 sept. 2024. [En ligne]. Available: https://www.dolphmicrowave.com/news/%E3%80%905g%E3%80%915g-spectrum-range-of-3gpp-protocol/. [Accès le 24 nov. 2024, 17:52].

[38] N. a. G. I. a. K. S. a. L. M. a. F. G. Michailow, Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems, 08-2012, pp. 171-175.

[39] ITU-R M.2083-0, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", 2015..

[40] E. Dahlman, et al., "5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology", Academic Press, 2018..

[41] M. Agiwal, et al., "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016..

[42] 3GPP TS 22.261, "Service requirements for the 5G system", v16.12.0, 2020.

[43] J. Sachs, et al., "5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication", IEEE Network, 2018.

[44] A. Nasrallah, et al., "Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research", IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.

[45] ITU-R M.2083-0, "IMT Vision for Rural and Remote Areas", 2019.

[46] J. Cos, et al., "Challenges of 5G-NR Rural Network Deployments", IEEE Access, 2021.

[47] S. Chen, et al., "Rural 5G Access: Challenges and Solutions", IEEE Wireless Communications, 2020.

[48] 3GPP TR 38.901, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz", v16.1.0, 2020.

[49] S. Sun, et al., "Investigation of Prediction Accuracy and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro Environments", IEEE Trans. Vehicular Technology, 2019.

[50] X. Ge, et al., "5G Ultra-Dense Cellular Networks", IEEE Wireless Communications, 2016.

[51] 3GPP TR 38.901, "Study on indoor channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz", v16.1.0, 2020.

[52] H. Zou, et al., "Indoor Positioning System for 5G Networks", IEEE Trans. Wireless Communications, 2020.

[53] R. He, et al., "Indoor Channel Measurements and Modeling for 5G Systems", IEEE Access, 2021.

[54] A. Gharaibeh, et al., "Smart Cities: A Survey on Data Management, Security, and Enabling Technologies", IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017.

[55] Y. Chen, et al., "Energy-Efficient Design for mMTC in 5G Networks", IEEE Wireless Communications, 2019.

[56] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," IEEE J. Sel. Areas Commun., 2014.

[57] A. Gupta et R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," IEEE Access, 2015.

[58] M. Agiwal et al., "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," IEEE Commun. Surv. Tutor., 2016.

[59] ITU-R, "WRC-15 final acts," 2015.

[60] T. S. Rappaport et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" IEEE Access, 2013.

[61] E. Perahia et R. Stacey, "Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac" 2nd ed., Cambridge University Press, 2013.

[62] E. Hossain et M. Hasan, "5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges," IEEE Instrum. Meas. Mag., 2015.

[63] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," 2nd ed., Prentice Hall, 2002.

[64] H. Holma et A. Toskala, "LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced", Wiley, 2011.

[65] J. Zhang et al., "5G Millimeter-Wave Antenna Array: Design and Challenges," IEEE Wireless Commun., 2017.

[66] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proceedings of the IRE, 1946.

[67] T. S. Rappaport et al., "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks," IEEE Trans. Antennas Propag., 2017.

[68] A. M. Al-Samman et al., "Indoor Corridor Wideband Radio Propagation Measurements and Channel Models for 5G Millimeter Wave Wireless Communications at 19 GHz, 28 GHz, and 38 GHz Bands," Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.

[69] Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2019). "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", 3rd Edition, Wiley.

[70] Holma, H., & Toskala, A. (2022). "5G Technology: 3GPP New Radio", Wiley.

[71] Yang, H., & Jorswieck, E. (2021). "Resource Allocation in Next Generation Mobile Networks", Springer.

[72] Balanis, C. A. (2022). "Antenna Theory: Analysis and Design", 5th Edition, Wiley.

[73] Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2021). "Antennas for All Applications", 4th Edition, McGraw-Hill.

[74] Volakis, J. L. (2023). "Antenna Engineering Handbook", 5th Edition, McGraw-Hill.

[75] Pozar, D. M. (2023). "Microwave Engineering", 5th Edition, Wiley.

[76] Goldsmith, A. (2023). "Wireless Communications", 3rd Edition, Cambridge University Press.

[77] Zhang, J. C., & Andrews, J. G. (2023). "Modern Wireless Communications", IEEE Press.

[78] Molisch, A. F. (2022). "Wireless Communications", 4th Edition, IEEE Press-Wiley.

[79] Rodriguez, J. (2022). "Fundamentals of 5G Mobile Networks", Wiley.

[80] Tong, H., & Maharshi, A. (2022). "5G Network Planning and Optimization", Springer.

[81] Wong, V. W. S., & Zhang, R. (2023). "5G Radio Access Network Planning", Cambridge University Press.

[82] Wang, C. X., et al. (2018). "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks", IEEE Communications Magazine.

[83] Aurenhammer, F., Klein, R., & Lee, D. T. (2013). "Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations", World Scientific Publishing Company.

[84] Fortune, S. (1992). "Voronoi diagrams and Delaunay triangulations", Computing in Euclidean Geometry.

[85] González-Brevis, P., et al. (2015). "Base Station Location Optimization for Minimal Energy Consumption in Wireless Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology.

[86] Wang, J., & Wong, V. W. (2020). "Optimal Cell Planning for 5G Networks Using Voronoi Tessellation", IEEE Communications Letters.

[87] A. J. Goldsmith et S. B. Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," IEEE Trans. Commun., 1997.

[88] S. Kandukuri et S. Boyd, "Optimal power control in interference-limited fading wireless channels" Wireless Networks, 2002.

[89] R. D. Yates et C. Y. Huang, "Integrated power control and base station assignment" IEEE Trans. Veh. Technol., 1995.

[90] J. G. Andrews et al., "Fundamentals of WiMAX" Prentice Hall, 2007.

[91] R. P. Feynman, "The Feynman Lectures on Physics" Addison-Wesley, 1964.

[92] F. Baccelli et B. Błaszczyszyn, "Stochastic Geometry and Wireless Networks", Foundations and Trends in Networking, 2009.