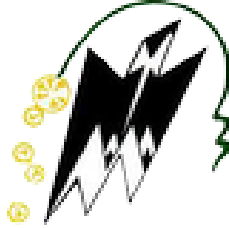


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Électrique et d'Informatique
Département de Télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes

de Master Académique

Filière :

Télécommunications

Spécialité :

Réseaux et Télécommunications

Par

LAOUARI Ouardia

ADMER Tassadit Dite Chanez

Thème

Etude et simulation d'une antenne 5G

Soutenu le : 24/06/2025

Président :	Dr. DJEFFAL Nadhir	MCB	Univ. UMMTO
Encadrant :	Dr. AMIR Mounir	MCA	Univ. UMMTO
Co-Encadrant :	Dr. AMAR Hichem	MRA	CRTI sétif
Examineur :	Dr. ZOUAK Belkacem	MCB	Univ. UMMTO

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à rendre grâce à **Allah**, pour Sa guidance infinie, Sa miséricorde et la force qu'Il nous a accordée tout au long de ces années d'études. C'est grâce à Sa lumière que nous avons pu avancer avec patience, courage et persévérance jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et à la réussite de cette année universitaire méritent une profonde reconnaissance.

Un grand merci est adressé à l'ensemble du corps enseignant et administratif de la **Faculté de Génie Électrique et Informatique** de l'Université **Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**, pour la qualité de leur enseignement et leur engagement constant à offrir une formation moderne et enrichissante.

Une gratitude toute particulière est exprimée à **M. AMIR Mounir**, promoteur de ce travail,
et à **Dr. AMAR Hachem**, co-promoteur, pour leur encadrement rigoureux, leur disponibilité et leurs conseils avisés. Leur accompagnement a été essentiel à l'aboutissement de ce mémoire.

Monsieur OUDAH mérite également des remerciements sincères pour sa présence constante,
son soutien et sa bienveillance tout au long du parcours universitaire.

Enfin, un hommage du cœur est rendu à la **famille**, aux **proches** et aux **amis**, pour leur appui inconditionnel, leurs encouragements et leur présence précieuse tout au long de cette aventure académique.

Merci à toutes et à tous.

Dédicace

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma reconnaissance,
à ceux qui occupent une place irremplaçable dans mon cœur.

À mon cher père, Ali

Aucune parole ne saurait exprimer l'attachement profond,
l'amour immense et la gratitude infinie que je ressens pour toi.

Tu as toujours été là, à mes côtés, pour me soutenir,
me consoler et m'encourager.

J'espère avoir été à la hauteur de tes espoirs.

Ce jour que tu attendais avec impatience, je te le dédie,
avec tout l'amour qu'un cœur peut porter à un père.

Merci pour tes sacrifices, ta patience et ta foi en moi.

À ma douce maman, Zahra

Depuis ma naissance, ton amour ne m'a jamais quittée.

Tu m'as portée avec tendresse, soutenue avec force
et aimée avec une constance inébranlable.

Ton regard m'a guidée, ton cœur m'a protégée.

Tu es la source de mes valeurs,
le pilier de ma réussite.

Rien n'aurait été possible sans toi.

À mes frères adorés, Anis et Momouh

Merci pour votre affection sincère,
vos encouragements puissants, et votre présence réconfortante
dans les moments les plus décisifs.

Vous êtes mes piliers,
et je vous souhaite tout le bonheur que vous méritez.

À ma chère binôme, Ouardia

Lorsque ce travail a commencé, je ne savais pas encore combien
ta présence allait compter pour moi.

J'ai parfois douté, j'ai parfois regretté. . . mais aujourd'hui, je réalise à quel
point j'ai eu de la chance de t'avoir à mes côtés.

Douce, compréhensive, patiente et toujours bienveillante, tu as été un véritable soutien dans les moments difficiles.

Merci pour ta gentillesse, ton calme et ta lumière.

Je t'admire, je t'estime, et surtout... je t'adore.

Ce mémoire est aussi le tien.

À mes précieuses amies, Ghenima et Hadda

Depuis notre rencontre en L2, vous êtes devenues bien plus que des amies : des sœurs de cœur.

Merci pour vos rires, vos encouragements, votre loyauté et votre présence constante.

Votre amitié est une lumière précieuse, qui m'a accompagnée dans ce parcours.

Je vous porterai toujours dans mon cœur.

Chanez

Dédicace

Parce qu'aucune réussite n'a de sens sans ceux qui l'inspirent, la soutiennent et la rendent possible, je dédie ce travail et cette joie aux êtres les plus chers à mon cœur, ceux qui, par leur amour, leur foi et leur présence, ont illuminé mon chemin. .

À mon prince papa

Toi qui as toujours veillé sur moi avec tendresse et force, merci pour ton amour discret, ta sagesse rassurante et tes sacrifices silencieux. Tu m'as appris la valeur de l'effort, du courage et de la patience, sans jamais avoir besoin de mots. Ta foi en moi a été mon ancrage.

À ma douce maman

Ton amour m'a portée et protégée, même dans le silence. Par ta patience, ta tendresse et tes prières discrètes, tu m'as donné la force d'avancer quand tout vacillait. Dans ton regard, j'ai toujours trouvé le courage, et dans ton cœur, un refuge. Chaque réussite que je célèbre est aussi la tienne. Je te dois bien plus que des mots. . . je te dois tout.

À mes merveilleux frères, Aziz et Yazid

Merci d'avoir toujours cru en moi, parfois plus que moi-même. Votre présence prépondérante, vos encouragements et votre fierté me touchent profondément. Vous êtes bien plus que des frères : vous êtes mes repères, mes soutiens, mes amis, des morceaux de mon cœur avec qui j'ai grandi, et que je n'oublierai jamais, peu importe où la vie nous mène..

À mon tendre époux, Samy

Merci pour ton soutien fidèle, ta patience, ton calme et ta présence dans chaque moment clé. Tu as été ma force tranquille.

À mes beaux-parents, Djamila et Rachid

Merci pour votre accueil si chaleureux, votre bienveillance et votre présence apaisante. Vous m'avez offert bien plus qu'un foyer : une famille.

À Chanez, mon binôme

mon binôme, ma partenaire de travail et de persévérance. Merci pour ton soutien constant, ton sérieux, et les nombreux moments de collaboration

constructive que nous avons partagés tout au long de ce projet. Cette aventure aurait été bien différente sans toi.

À ma chère Ryma

Sœur de cœur, merci pour ton amitié sincère, ton écoute fidèle et ton rire qui réchauffe les jours gris.

À mes précieuses amies, Taoues, Ghenima et Hadda,

Merci pour vos sourires, vos encouragements, votre présence lumineuse.

Vos attentions ont embelli ce parcours.

OUARDIA

Abstract

This dissertation focuses on emerging communication technologies, particularly 5G, which demands compact and high-performance antennas suitable for high-frequency operation. Special attention is given to printed antennas due to their advantages in cost, compactness, and ease of integration. After analyzing the main types of antennas used in 5G networks, a rectangular patch antenna optimized for the 38 GHz band was designed and simulated using HFSS software. The results demonstrate a wide bandwidth ranging from 34.5 GHz to 61.6 GHz, with a resonance frequency around 38 GHz. The antenna exhibits an S11 reflection coefficient below -10 dB, a VSWR below 2, and a satisfactory gain at 38 GHz, making it a suitable candidate for 5G applications in dense environments and directional communication links.

Keywords : 5G, printed antenna, rectangular patch, HFSS, millimeter band.

Résumé

Ce mémoire porte sur les technologies de communication émergentes, en particulier la 5G, qui exige des antennes compactes et performantes adaptées aux hautes fréquences. Une attention particulière est portée aux antennes imprimées en raison de leurs avantages en termes de coût, de compacité et de facilité d'intégration. Après avoir analysé les principaux types d'antennes utilisés dans les réseaux 5G, une antenne patch rectangulaire optimisée pour la bande des 38 GHz a été conçue et simulée à l'aide du logiciel HFSS. Les résultats obtenus montrent une large bande passante allant de 34,5 GHz à 61,6 GHz, avec une fréquence de résonance autour de 38 GHz. L'antenne présente un coefficient de réflexion S11 inférieur à -10 dB, un VSWR inférieur à 2, ainsi qu'un gain satisfaisant à 38 GHz, ce qui en fait une candidate appropriée pour les applications 5G dans des environnements denses et pour des liaisons directionnelles.

Les mots clés : 5G, antenne imprimée, patch rectangulaire, HFSS, bande millimétrique

Table des matières

Remerciments	i
Table des figures	x
Liste des tableaux	xii
Introduction Générale	1
Bibliographie	3
I Généralités sur les technologies de communication mobile	4
I.1 Introduction	4
I.2 Présentation d'un réseau sans fil	5
I.3 L'évolution des réseaux et la transition vers la 5G :	5
I.3.1 La première génération :	6
I.3.2 La deuxième génération :	6
I.3.3 Le GPRS :	7
I.3.4 L'UMTS (Universal Mobile Télécommunications System),	8
I.3.5 Le LTE :	8
I.4 La 5G, Réponse aux défis des technologies numériques et des connexions mobiles	10
I.4.1 Les bandes de fréquence de la 5G : caractéristiques et enjeux	10
I.4.2 Architecture, Fonctions et Évolutions par Rapport à la 4G :	11
I.4.3 Les objectifs et les usages de 5G :	13
I.5 Solutions proposées pour répondre aux exigences de la 5G :	14
I.5.1 Massive MIMO :	14
I.5.2 Full duplex :	16
I.5.3 Small Cells :	19
I.5.3.1 Réseau Hétérogène :	19
I.5.3.2 Réseau Ultra Dense (UDN) :	20
I.5.3.3 Bandes Millimétriques	20
I.5.3.3.1 Caractéristiques des Fréquences Millimétriques :	20
I.5.3.3.2 Capacité de Shannon	20
I.5.3.3.3 Modèles de propagation :	21
I.5.3.3.4 Contraintes des Bandes Millimétriques :	22
I.5.4 Impact économique et industriel de la 5G : un catalyseur de pro- ductivité et d'innovation :	23
I.6 Lien entre la technologie 5G et la conception d'antennes :	24

I.7	Conclusion :	24
II	Étude des différents types d'antennes adaptées à la 5G	26
II.1	Introduction	26
II.1.1	Contexte et enjeux des communications sans fil	26
II.1.2	Définition et rôle d'une antenne	27
II.1.3	Architecture typique d'une antenne :	28
II.1.4	Évolution des technologies d'antennes	29
II.2	Classification des antennes :	29
II.2.1	Les antennes filaires :	29
II.2.2	Les antennes à ouverture rayonnante	30
II.2.2.1	Antennes cornet :	31
II.2.2.2	Antennes à fente :	31
II.2.3	Antennes imprimées et Patch micro-ruban	32
II.2.3.1	Présentation générale des antennes imprimées :	32
II.2.3.2	Caractéristiques des antennes imprimées :	32
II.2.3.2.1	Diagramme de rayonnement :	32
II.2.3.2.2	Polarisation	33
II.2.3.2.3	Gain :	33
II.2.3.2.4	Directivité :	34
II.2.3.3	Caractéristiques électriques :	34
II.2.3.3.1	Impédance d'entrée :	34
II.2.3.3.2	Adaptation d'une antenne :	34
II.2.3.3.3	Le coefficient de réflexion S11 :	34
II.2.3.3.4	Le rendement :	35
II.2.3.3.5	La bande passante :	35
II.2.4	Introduction aux antennes patch micro-ruban (MPA)	35
II.2.4.1	Structure de base d'une antenne micro-ruban :	35
II.2.4.2	Méthodes d'alimentation pour l'antenne micro ruban unique :	36
II.2.4.2.1	lignes d'alimentation en micro-ruban :	36
II.2.4.2.2	Feed de sonde coaxiale :	37
II.2.4.3	Alimentation de la ligne de micro ruban à couplée de proximité	38
II.2.4.3.1	Flux couplé à l'ouverture :	40
II.2.4.3.2	Flux d'iris :	41
II.2.5	Types de l'antenne patch micro-ruban. :	42
II.2.6	Avantages et inconvénients des antennes patch micro-ruban :	43
II.2.7	Application des antennes patch micro-ruban :	44
II.3	Technologies d'Antennes pour la 5G :	45
II.3.1	Les antennes MIMO :	45
II.3.1.1	Définition :	45
II.3.1.2	Le fonctionnement des antennes MIMO :	45
II.3.1.3	Avantage des antennes MIMO :	45
II.3.2	Antennes à réseau phasé	46
II.3.2.1	Définition :	46
II.3.2.2	Fonctionnement des antennes a réseaux phasés :	46
II.3.2.3	Types d'antennes à réseau phasé multifaisceaux :	46

III Étude et simulation d'une antenne patch 5G dans sous HFSS	48
III.1 Introduction :	48
III.2 Présentation du logiciel de simulation HFSS :	48
III.2.1 Rappels sur les équations de Maxwell :	48
III.3 Méthode de résolution utilisée dans HFSS :	49
III.4 Description de la construction d'une antenne patch rectangulaire sous HFSS :	50
III.4.1 Description de la structure de l'antenne étudiée :	50
III.4.2 Description des paramètres utilisés :	50
III.5 Calcul des dimensions de l'antenne patch rectangulaire étudiée :	51
III.5.1 Formules utilisées :	51
III.5.2 Les dimensions finales retenues :	52
III.6 Étapes de conception :	52
III.7 Évaluation et interprétation des résultats de la simulation	56
III.8 Comparaison avec d'autres topologies d'antennes :	58
III.9 Discussion critique des résultats obtenus :	58
III.10 Conclusion :	59
III.11 Perspectives futures :	59
Conclusion Générale	60
Bibliographie	61

Table des figures

I.1	Architecture globale du GSM [6]	7
I.2	Architecture du réseau GPRS : composant et interaction[7].	7
I.3	Architecture de la 3G [9]	8
I.4	Architecture de la 4G [10]	9
I.5	Évolution des standards des réseaux cellulaires [11]	9
I.6	les trois bandes de fréquences de la 5G [12]	11
I.7	Fonctions logiques du NG-RAN et du cœur de réseau 5G[13]	12
I.8	Sessions PDU et flux QoS : plan utilisateur[13]	13
I.9	illustration des diverses formes de distribution [16]	17
I.10	Différences entre le mode Half duplex et le mode Full duplex [8]	18
I.11	Résultats des évaluations de diffusion pour une antenne à 3 GHz et pour un système d'antennes à 30 GHz[16]	22
I.12	Atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence aux ondes millimétriques [16]	23
II.1	structure générale d'une antenne[20]	28
II.2	Exemples d'antennes filaires[22]	30
II.3	Guide d'onde [21].	30
II.4	Illustration d'une antenne cornet	31
II.5	Exemple d'antenne à réflecteur parabolique	31
II.6	Tracé du diagramme et description des lobes ainsi que de leurs largeurs[15].	33
II.7	Différents types de polarisation d'une onde électromagnétique[15].	33
II.8	Structure de base d'une antenne micro-ruban	36
II.9	La géométrie d'une antenne de pointe micro ruban à micro ruban direct (a) la vue de dessus et (b) vue latérale[24]	37
II.10	La géométrie d'une antenne du patch micro ruban à lignes micro rubanes encastrées (a) la vue de dessus et (b) la vue latérale[24]	37
II.11	La géométrie de l'antenne du patch à micro ruban à un air de sonde coaxiale (A) Vue de dessus et (b) vue latérale.[24]	38
II.12	La géométrie d'une antenne de plaquette à micro ruban à micro ruban à couplé de proximité (a) vue de dessus et (b) vue latérale.[24]	39
II.13	La géométrie d'une antenne patch alimentée par une ligne de microruban adjacente (a) la vue de dessus et (b) la vue latérale[24].	40
II.14	La géométrie d'une antenne de pointe à microrubans d'ouverture d'ouverture (a) Vue de dessus, (b) Vue latérale (c) Vue illustrée [24]	41
II.15	Antenne micro ruban à l'iris(a) Vue de dessus (b) Vue inférieure[24]	42
II.16	Techniques d'alimentation couramment utilisées pour les antennes micro-ruban[24]	42

II.17	Différentes géométries possibles du patch dans une antenne micro-ruban[24]	43
III.1	Schéma de la structure de l'antenne patch micro-ruban	50
III.2	Attribution de la condition Perfect E au plan de masse	53
III.3	Attribution de la condition Perfect E au Patch Attribution de la condition Perfect E au Patch	54
III.4	Attribution de la condition Perfect E au Patch	54
III.5	tableau des paramètres insérés sous HFSS.	55
III.6	Conception du modèle 3D de l'antenne micro-ruban avec ligne d'alimen- tation.	55
III.7	Tracé de la courbe S11 de l'antenne étudiée.	56
III.8	Comportement du VSWR de l'antenne dans la bande simulée	57
III.9	Représentation 3D du gain de l'antenne à 38 GHz	58

Liste des tableaux

II.1	Tableau comparatif des classifications d'antennes	47
III.1	Dimensions physiques de l'antenne patch rectangulaire	52

Introduction Générale

Le développement rapide des technologies de communication a profondément changé notre vie quotidienne, notamment l'émergence des réseaux mobiles. De la 1G, introduite dans les années 1980, à la 4G, chaque génération a apporté des améliorations importantes en termes de débit, de latence et de services disponibles. Aujourd'hui, ce processus se poursuit avec la 5G, la cinquième génération de technologie de communication mobile, marquant une avancée technologique majeure.

La 5G vise à répondre aux nouvelles attentes de la société numérique : des débits ultra-rapides, une latence quasi nulle, une densité de connexion accrue, ainsi qu'une consommation énergétique optimisée. Ces avancées permettent de nouvelles applications innovantes telles que les véhicules autonomes, la chirurgie à distance, l'Internet des objets à grande échelle, et les villes intelligentes. Pour soutenir ce développement, les antennes jouent un rôle central car elles constituent le lien physique entre les équipements utilisateurs et l'infrastructure réseau.

Parmi les nombreuses structures d'antennes, les antennes patch micro-ruban sont largement utilisées dans la bande d'ondes millimétriques (au-dessus de 24 GHz) grâce à leur structure compacte, leur intégration aisée, leur coût réduit et leurs bonnes performances haute fréquence, et elles contribuent de manière considérable à la 5G. Dans ce contexte, ce travail vise à étudier, concevoir et simuler une antenne patch micro-ruban fonctionnant à 38 GHz, la fréquence caractéristique des communications 5G à haut débit. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel de simulation électromagnétique HFSS (High Frequency Structure Simulator), qui permet de modéliser avec précision le comportement des champs électromagnétiques. La structure de ce travail est la suivante :

Le chapitre 1 présente des informations générales sur l'évolution du réseau mobile et les caractéristiques spécifiques de la 5G.

Le chapitre 2 est consacré aux différents types d'antennes, avec un accent sur les antennes patch et leurs applications en 5G.

Le troisième chapitre détaille la conception et la simulation d'une antenne patch rectangulaire sous le logiciel HFSS, avec l'interprétation des résultats obtenus.

Cette étude vise donc à apporter une contribution concrète à la compréhension et à l'optimisation des antennes pour les réseaux 5G tout en fournissant un support pratique pour les futures implémentations expérimentales.

Cette étude aborde la problématique de la conception et de la simulation d'une antenne patch micro-ruban fonctionnant à 38 GHz, capable de répondre aux exigences spécifiques de la 5G. Elle se concentre sur les enjeux liés à l'adaptation d'impédance, à la réduction du coefficient de réflexion, et à l'obtention d'un gain satisfaisant dans des environnements denses.

Bibliographie

[1] [https ://www.techniques-ingenieur.fr/](https://www.techniques-ingenieur.fr/). Consulté le 15/06/2024.

Chapitre I

Généralités sur les technologies de communication mobile

I.1 Introduction

Les systèmes de télécommunication ont subi une évolution significative au cours des dernières décennies, marquée par l'essor des réseaux mobiles. Depuis la fin des années 1980, ces réseaux ont pris une place centrale dans la recherche, les investissements et l'usage quotidien, transformant profondément la manière dont les individus communiquent et accèdent à l'information. L'intégration des services mobiles aux communications sans fil a été l'un des développements les plus importants du secteur des télécommunications depuis le début des années 1990 [1].

L'internet mobile s'est progressivement imposé comme une réalité pour le grand public, d'abord avec les réseaux sans fil en entreprises, puis dans les lieux publics grâce aux hotspots Wi-Fi (Wireless Fidelity), et enfin en déplacement avec le développement des technologies cellulaires comme le GPRS (General Packet Radio Services) et les réseaux 3G. Ces avancées ont profondément modifié les habitudes de vie et de travail, en favorisant la mobilité et l'accessibilité aux services numériques.

Dans les années 2000, les besoins croissants en connectivité et en débit ont conduit au développement des réseaux de quatrième génération (4G), beaucoup plus rapides que la 3G et facilitant l'essor d'applications comme la vidéo en streaming, les jeux en ligne et les services cloud. Le déploiement de la 4G marque une étape clé dans le développement des réseaux mobiles, s'adaptant à la demande grandissante en matière de communication en direct et de contenus de haute définition. Aujourd'hui, avec l'explosion du trafic de données, l'évolution de l'Internet des objets (IoT) et l'essor des applications nécessitant une faible latence, la 4G a atteint ses limites. La cinquième génération de réseaux mobiles (5G) est donc née dans ce contexte. Cette nouvelle technologie promet des débits encore plus élevés, une latence quasi nulle et une connectivité massive, ouvrant la voie

à des innovations majeures comme les véhicules autonomes, la télémédecine et les villes intelligentes. L'évolution des réseaux mobiles ne s'arrête pas à la 5G. Les chercheurs et industriels travaillent déjà sur la future génération de réseaux (6G) .

Ce chapitre vise à montrer la progression des réseaux mobiles de la première à la cinquième génération, en soulignant leurs caractéristiques techniques, les évolutions significatives de chaque génération et les changements d'utilisation qu'ils ont engendrés. On portera une attention spéciale à la 5G, à son architecture, à ses objectifs ainsi qu'aux bandes de fréquences qui lui sont associées. Ensuite, cette étude mettra en lumière les trois principaux cas d'usage de la 5G (IMT-2020), en analysant leurs impacts, les perspectives d'évolution des applications potentielles ainsi que les opportunités offertes à l'avenir des télécommunications.

I.2 Présentation d'un réseau sans fil

Un réseau de téléphonie mobile correspond à un système qui permet l'utilisation simultanée de nombreux appareils portables ou fixes, qu'ils soient mobiles ou stationnaires, même lorsqu'ils se déplacent à grande vitesse. L'objectif de l'utilisation de la technologie radio est d'attribuer le spectre radio à une pluralité d'utilisateurs, eux-mêmes répartis dans des cellules radio individuelles en fonction de leur localisation spatiale. Pour communiquer via votre téléphone portable, vous devez être à portée d'une antenne relais gérée par votre opérateur téléphonique qui peut recevoir un signal radio suffisamment fort [3]. Le signal est symbolisé par de petites barres qui se trouvent généralement positionnées en haut à droite de l'écran du téléphone mobile. Ceux-ci sont associés aux symboles correspondant à la technologie (H+, Edge, 3G, 4G, etc.) que le téléphone reçoit dans la zone d'utilisation.

Lorsque l'appel est lancé depuis un téléphone mobile, ce dispositif cherche principalement à trouver l'antenne-relais la plus proche de son fournisseur de services pour établir une connexion radio. La procédure est la même lors de la réception d'un appel, sauf que c'est l'antenne-relais qui établit la connexion au lieu du téléphone portable. Ainsi, l'opérateur doit déterminer la localisation du destinataire de l'appel au sein du réseau. Dans ce but, les téléphones mobiles envoient régulièrement leurs positions au réseau[3].

I.3 L'évolution des réseaux et la transition vers la 5G :

Depuis leurs apparitions, les réseaux mobiles se sont vite développés afin de satisfaire des besoins de plus en plus importants en communication ainsi qu'en transfert de données. Chaque nouvelle génération a introduit des progrès importants en matière de vitesse, de latence et de connexion. Chaque génération, ou « G », de communications mobile prend

environ une décennie pour arriver à maturité. La transition d'une génération à l'autre est principalement motivée par la nécessité, pour les opérateurs, de réutiliser ou de réaffecter le spectre limité disponible. Chaque nouvelle génération présente une meilleure efficacité spectrale, permettant aux données d'être transmises plus rapidement et plus efficacement sur le réseau[4]. Nous allons étudier l'évolution des réseaux mobiles en nous intéressant aux différentes générations précédant la 5G, nous analysons les principes caractéristiques des technologies 2G, 3G et 4G, en mettant particulièrement l'accent sur la cinquième génération 5G, qui constitue le sujet central de notre chapitre.

I.3.1 La première génération :

La première génération des réseaux mobiles a commencé à la fin des années 70, avec l'instauration complète de normes durant les années 80. La 1G utilisait des signaux radio analogiques, ce qui impliquait que la voix était modulée à une fréquence supérieure plutôt que convertie en signaux numériques. Les signaux analogiques se détériorent au fil du temps et de la distance, ce qui entraîne fréquemment une dégradation de la qualité sonore lors d'une conversation. Pour les communications numériques, il est possible de transmettre un plus grand flux d'informations de manière efficace, comparé aux signaux analogiques [2].

I.3.2 La deuxième génération :

La deuxième génération (2G), quant à elle, a été développée à la fin des années 1980 et commercialisée à partir de 1991 avec la norme GSM. [5], qui est une norme numérique destinée aux communications vocales via un téléphone mobile. Son fonctionnement repose sur l'émission d'appels téléphoniques grâce aux transmissions numériques en exploitant les fréquences de 850 MHz et 900 MHz, offrant un taux de transfert de données de 906 Kbps. Elle a pour but de faciliter la communication entre les utilisateurs mobiles et ceux du réseau RTC. Trois principales techniques d'accès et de réservation sont employées : l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA), l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).

Bien que le réseau GSM permet la communication téléphonique et offre un accès à Internet ainsi qu'à certaines applications, il reste limité en matière de services multimédias dans un contexte de mobilité. C'est pourquoi le GPRS a été introduit en complément du GSM afin d'assurer la transmission des données et l'accès aux contenus multimédias[2].

La figure I.1 illustre l'architecture de la norme GSM

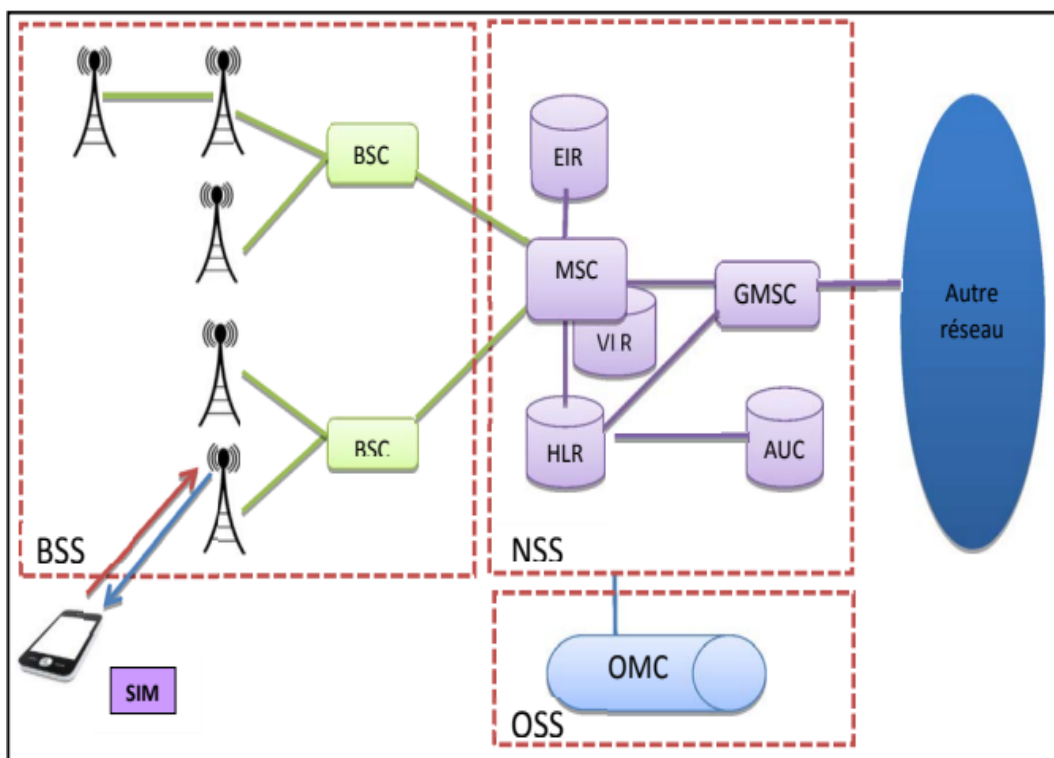


FIGURE I.1 – Architecture globale du GSM [6]

I.3.3 Le GPRS :

Il représente une évolution vers une nouvelle génération du GSM. Il a intégré plusieurs modules au sein du réseau GSM, sans modifier la structure actuelle du réseau. Par conséquent, son objectif est de maintenir tous les modules de l'architecture GSM [2].

la figure I.2 présente l'architecture du réseau GPRS ainsi que ses composants et leurs interactions.

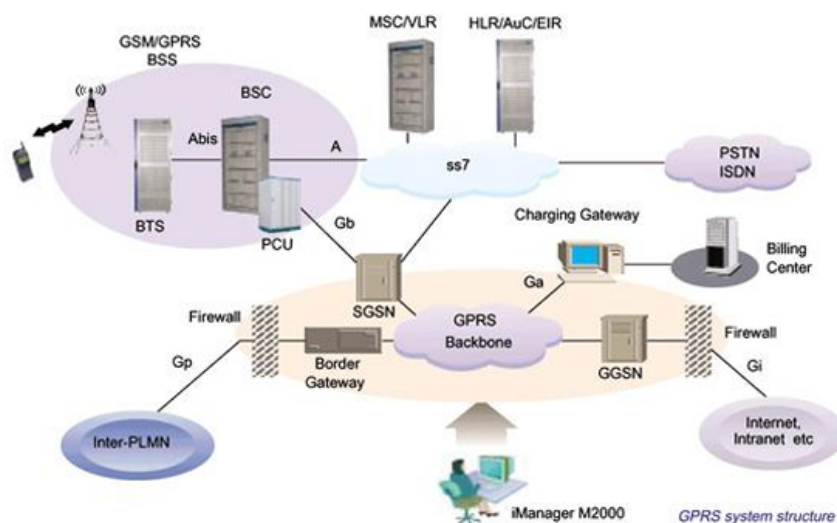


FIGURE I.2 – Architecture du réseau GPRS : composant et interaction[7].

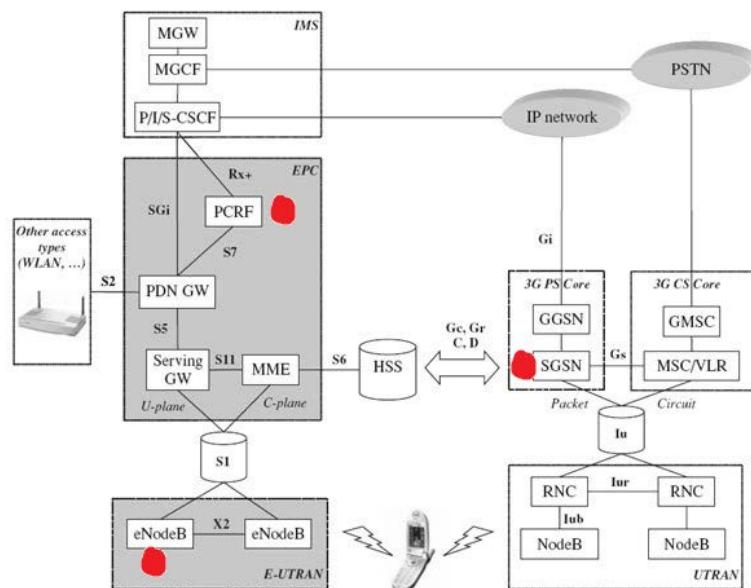


FIGURE I.4 – Architecture de la 4G [10]

La figure I.6 montre l'évolution des réseaux mobiles de la 1G à la 5G, avec les services offerts et les capacités associées à chaque génération.

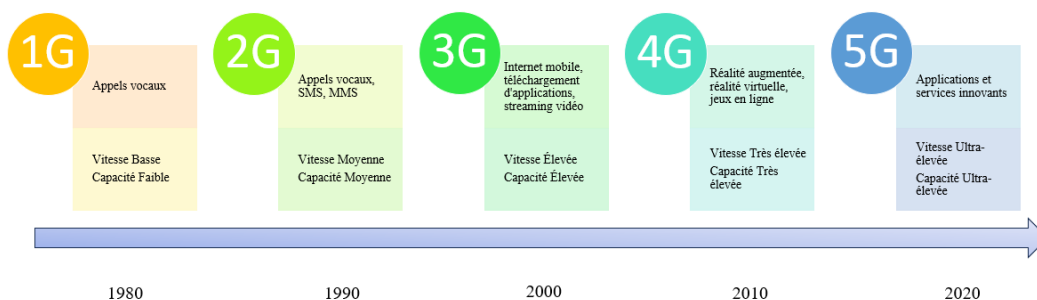


FIGURE I.5 – Évolution des standards des réseaux cellulaires [11]

L'essor des technologies numériques et l'augmentation constante des connexions ont conduit à une demande accrue en ressources, rendant l'utilisation des services plus exigeante, aussi bien pour les utilisateurs que pour les objets connectés via diverses applications. Pour répondre à ces nouveaux défis, la 5G, dernière avancée dans le domaine des communications mobiles, s'impose comme une solution innovante.

I.4 La 5G, Réponse aux défis des technologies numériques et des connexions mobiles

La 5G représente une progression des normes et des structures des réseaux mobiles, jugée suffisamment significative pour être qualifiée de « nouvelle génération »[4]. Elle se distingue par des débits élevés, une faible latence et une fiabilité optimisée.

De plus, la 5G ouvre la voie à des applications de pointe comme la réalité virtuelle augmentée, des véhicules autonomes, les villes intelligentes et les dispositifs médicaux connectés, tout en facilitant le développement et l'intégration de nouvelles infrastructures réseau.

I.4.1 Les bandes de fréquence de la 5G : caractéristiques et enjeux

La réalisation d'une architecture de réseau 5G est capable de prendre en charge des applications à fortes exigences représente un défi complexe. Il n'existe pas d'approche unique : la diversité des applications nécessite que les données couvrent des distances, traitent de grands volumes de données ou soient combinées d'une manière ou d'une autre. Pour concrétiser pleinement la vision 5G, l'architecture 5G doit être capable de gérer le spectre des bandes basses, moyennes et hautes provenant de sources sous licence, partagées et privées.

C'est pourquoi la 5G a été conçue pour fonctionner sur des fréquences radio s'étendant de moins de 1 GHz à des bandes de très haute fréquence, appelées « ondes millimétriques » (ou mmWave)[4].

Les réseaux 5G reposent sur trois bandes de fréquences principale :

- La bande basse 5G fonctionne en dessous de 1 GHz elle inclut des fréquences telles que 700 MHz, utilisée sur le territoire français et ailleurs en Europe. Elle propose une étendue de couverture importante. Cette bande exploite le spectre actuellement disponible et utilisé pour la 4G LTE, offrant principalement une couverture 4G LTE pour les équipements 5G qui sont déjà opérationnels. Les performances offertes par cette génération à bande basse sont donc comparables à celles de la 4G LTE, et elles sont adaptées à l'usage des appareils 5G actuellement disponibles sur le marché [4].
- La bande intermédiaire 5G opère dans la plage de fréquences 2 à 6 GHz et offre une couche de capacité adaptée aux zones urbaines et suburbaines. Cette gamme de fréquences offre des vitesses maximales atteignant plusieurs centaines de Mbps[4].
- La 5G à large bande (mmWave) fonctionne sur les plages de fréquences les plus élevées de cette technologie. Ces fréquences varient de 24 GHz jusqu'à 100 GHz. Étant donné que les fréquences élevées ne permettent pas de franchir les obstacles, la 5G à haute bande a une portée limitée. Par ailleurs, la couverture mmWave est

restreinte et exige une infrastructure cellulaire plus vaste [4]. Cette bande est spécialement conçue pour les milieux urbains saturés où le besoin en bande passante est important, mais sa couverture reste limitée en raison de la faible portée des ondes à fréquence élevée.

La figure I.7 montre la répartition des bandes de fréquences de la 5G

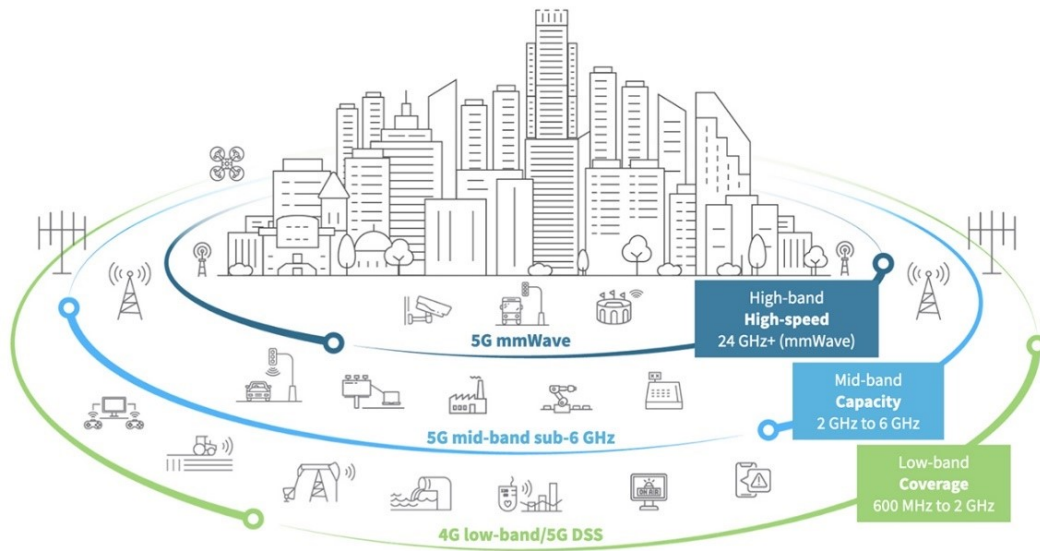


FIGURE I.6 – les trois bandes de fréquences de la 5G [12]

I.4.2 Architecture, Fonctions et Évolutions par Rapport à la 4G :

Deux éléments principaux constituant le réseau 5G : le réseau d'accès 5G (5G Access Network - 5G AN), qui intègre la nouvelle interface radio (New Radio - NR) par le biais du NG-RAN, et le cœur de réseau 5G (5G Core - 5GC). Le 5G AN est également capable d'intégrer des technologies qui ne proviennent pas du 3GPP, telles que le Wi-Fi ou le xDSL. Ces composants sont reliés par un réseau de transport IP, garantissant une qualité de service différenciée (DiffServ QoS).

Les standards fondamentaux de cette architecture ont été développés par le 3rd Generation Partnership Project (3GPP), organisme international chargé de spécifier les normes mondiales des communications mobiles. Les exigences et objectifs pour chaque génération sont définis environ tous les dix ans par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). La 5GC a mis en place une architecture basée sur les services (SBA - Service Based Architecture), innovante par rapport à la 4G. Les fonctionnalités du réseau sont virtualisées, exposées sous forme d'API (REST, HTTP2) et peuvent être assemblées dynamiquement. Cela favorise la capacité d'évolution, la modularité et l'interopérabilité avec des services externes.

Plusieurs fonctions logiques composent le cœur de réseau 5G : Fonction de plan Utilisateur (UPF) : responsable de la gestion du flux de données IP entre l'équipement utili-

sateur (UE) et les réseaux extérieurs.

Fonction de Gestion d'Accès et de Mobilité (AMF) : prend en charge la gestion de l'accès initial de l'UE au réseau ainsi que la mobilité.

Fonction de Gestion de Session (SMF) : crée et contrôle les sessions utilisateur.

Fonction de Serveur d'Authentification (AUSF) : assure une authentification sécurisée de l'utilisateur.

Gestion Unifiée des Données (UDM) : elle est responsable de la gestion des données d'abonnement, des identités utilisateur et des autorisations.

Fonction de sélection de Tranche de Réseau (NSSF) : opte dynamiquement pour la tranche de réseau correspondant aux exigences de l'utilisateur.

Fonction de Référencement des Fonctions Réseau (NRF) : elle dresse la liste et facilite l'identification des fonctions accessibles au sein du cœur de réseau.

Fonction d'Exposition du Réseau (NEF) : elle met en avant certaines fonctionnalités du réseau pour les services externes grâce à des interfaces sécurisées.

Fonction Applicative (AF) : offre des services liés aux applications, qu'ils soient internes ou provenant de tiers, tels que la gestion de la latence ou la configuration des sessions.

La figure I.8 présente les principales fonctions logiques du réseau d'accès NG-RAN et du cœur de réseau 5G (5GC) [13].

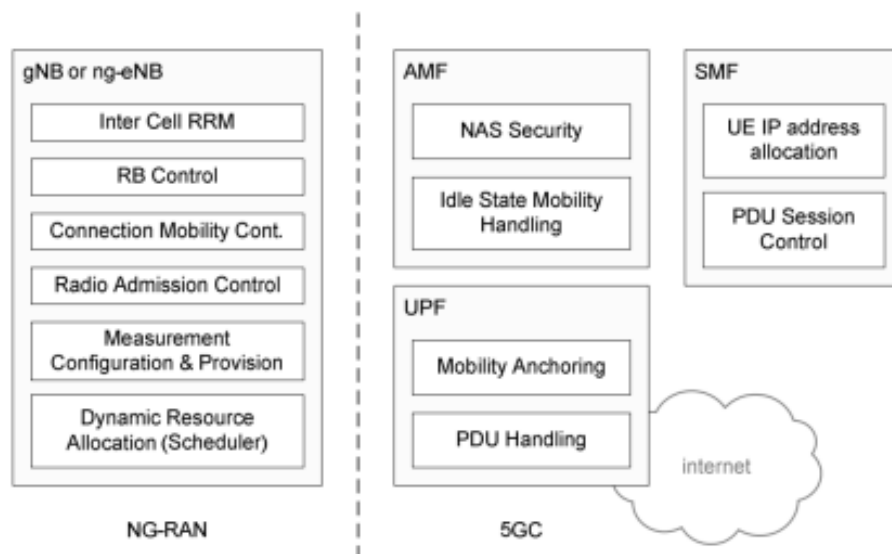


FIGURE I.7 – Fonctions logiques du NG-RAN et du cœur de réseau 5G[13]

Grâce à la liaison de ces différentes fonctions, les sessions PDU peuvent être établies. Ces dernières sont en mesure de transporter non seulement des paquets IP, mais également d'autres formats de données tels qu'Ethernet ou non structurés. Le tout est orchestré par un modèle QoS (Quality of Service) finement ajusté, qui repose sur des flux QoS.

La figure I.9 illustre une session PDU et les flux QoS dans l'architecture 5G entre l'UE, le NG-RAN et le cœur de réseau (5G).

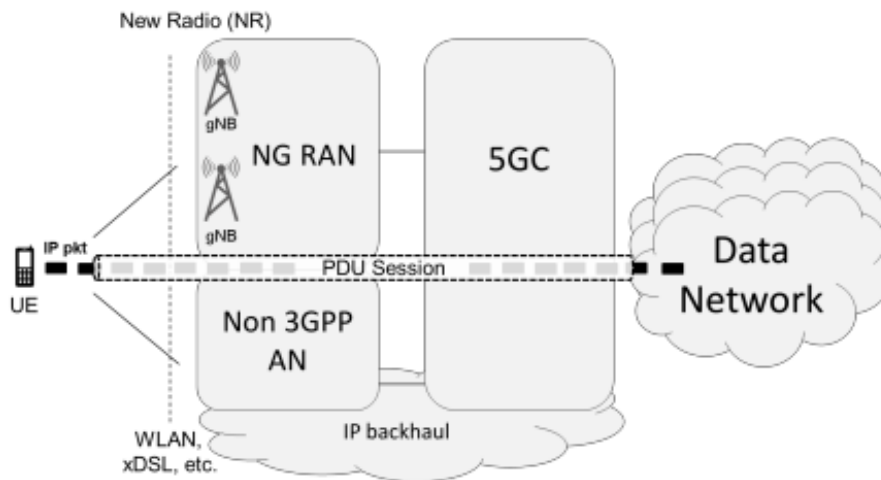


FIGURE I.8 – Sessions PDU et flux QoS : plan utilisateur[13]

La composante d'accès radio (NG-RAN) se compose de stations de base gNB, qui sont réparties entre les unités centrales (CU) et les unités distribuées (DU). Elles sont responsables de la gestion des communications radio, handover, de la qualité du signal et du multiplexage des sessions.

Cette structure modulaire est élaborée pour supporter des applications très variées, de l'Internet des objets (IoT) aux applications critiques nécessitant une latence ultra-faible, sans oublier la réalité augmentée. Le découpage réseau (network slicing) permet la création de multiples réseaux logiques, chacun adapté à des usages divers, sur une même structure physique [13].

I.4.3 Les objectifs et les usages de 5G :

o **eMBB (enhanced Mobile Broadband)** : ce modèle d'usage vise à offrir des débits de données importants et une latence réduite, principalement pour les applications demandant des débits importants, tels que les vidéos en 4K, en réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR), c'est une amélioration des services 4G, offrant de meilleures performances avec des connexions à la fois rapides et fiables. Le eMBB se caractérise par sa capacité à transmettre une grande quantité de données et par son temps d'activation relativement long [14].

o **URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)** : L'URLLC est conçu pour des applications qui exigent une fiabilité exceptionnelle (atteignant jusqu'à 99.9999 %) et une latence très réduite (environ 1 ms). Ce genre de communication est crucial pour des secteurs tels que la santé (chirurgie à distance), les véhicules autonomes et l'automat-

tisation industrielle. Les transmissions sont souvent sporadiques, avec des segments de données de petite taille [14].

o **mMTC (Massive Machine-Type Communication)** : ce cas d'usage concerne l'internet des objets (IOT), en particulier dans le cadre des villes intelligentes, où le besoin d'interconnecter un nombre considérable d'appareils est essentiel. mMTC est capable de gérer des centaines de milliers de connexions par kilomètre carré, cependant, l'imprévisibilité du trafic complique l'optimisation prédictive des ressources [15].

I.5 Solutions proposées pour répondre aux exigences de la 5G :

I.5.1 Massive MIMO :

Afin de réaliser les objectifs de la 5G en matière de haut débit, de réduction de la consommation d'énergie et de faible latence, l'intégration de plusieurs technologies est cruciale. Parmi les solutions envisagées, l'adoption massive du MIMO (Massive Multiple Input Multiple Output) constitue une avancée importante. La technologie repose sur l'exploitation d'un large éventail d'antennes dans les stations de base, ce qui optimise les performances du réseau.

Le principe de MIMO a suscité une attention significative dans le domaine de la recherche au cours de la dernière décennie. Il a été initialement intégré dans les normes 3G et a évolué avec la 4G grâce à des méthodes telles que la transmission MIMO multi-utilisateur monocellulaire (MU-MIMO) et la transmission multipoint coordonnée par réseau multicellulaire (CoMP). L'objectif principal du MIMO massif est d'exploiter les avantages des systèmes MIMO classiques en augmentant considérablement le nombre d'antennes dans la station de base, ce qui augmente la capacité des canaux et permet d'obtenir des gains élevés en multiplexage et en diversité en liaison montante et descendante. Les performances de cette technologie dépendent en grande partie du rapport entre le nombre d'antennes de stations de base et le nombre d'utilisateurs connectés simultanément. Le fonctionnement du Massive MIMO repose sur la connaissance de l'état du canal (CSI - Channel State Information) par la station de base, lui permettant ainsi d'effectuer le précodage et la détection de manière optimale.[16]

Au cas où le nombre d'antennes émettrices dépasse largement celui des antennes de réception, l'utilisation de précodeurs et de détecteurs linéaires simples suffit à garantir des performances quasi optimales. En revanche, dans le cas où le nombre d'antennes émettrices est équivalent ou inférieur à celui des antennes de réception, la conception de ces éléments devient plus complexe et exige des solutions adaptées pour garantir un bon compromis entre performances et complexité de calcul. Des recherches théoriques sur les

canaux de transmission Massive MIMO montrent que dans les réseaux multicellulaires, chaque station de base (contenant une multitude de N antennes) fournit des services aux utilisateurs K en même temps, et chaque utilisateur est équipé d'une antenne. Dans cette recherche, la transmission en liaison montante fait référence à l'envoi de signaux des utilisateurs aux stations de base, tandis que la liaison descendante fait référence à la diffusion de données des stations de base aux utilisateurs. Le canal de transmission entre un utilisateur et une antenne spécifique est généralement représenté par des coefficients qui dépendent de divers facteurs, notamment des phénomènes d'évanouissement à petite et à grande échelle. Mathématiquement, la relation entre ces facteurs s'exprime comme suit :

$$\mathbf{H}_{i,k,l,n} = \mathbf{G}_{i,k,l,n} (\mathbf{D}_{i,k,l,n})^{1/2} \quad [16] \quad (\text{I.1})$$

$G_{i,k,l,n}$ Facteur d'évanouissement à petite échelle $D_{i,k,l,n}$ facteur d'évanouissement à grande échelle

Dans un même environnement cellulaire, les coefficients d'atténuation à large échelle sont habituellement comparables pour l'ensemble des utilisateurs qui se servent de la même station de base. Tandis que ceux à petite échelle varient en fonction de la position de chaque utilisateur et de l'antenne considérée.

Ainsi, la matrice de canaux reliant les KK utilisateurs à une station de base peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\mathbf{H}_{i,l} = \mathbf{G}_{i,l} \mathbf{D}_{i,l}^{1/2} [16] \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$$\mathbf{H}_{i,l} = \begin{pmatrix} h_{i,1,1,l} & \cdots & h_{i,K,1,l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,1,N,l} & \cdots & h_{i,K,N,l} \end{pmatrix} [16] \quad (\text{I.3})$$

$$\mathbf{G}_{i,l} = \begin{pmatrix} h_{i,1,1,1} & \cdots & h_{i,K,1,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,1,N,1} & \cdots & h_{i,K,N,1} \end{pmatrix} [16] \quad (\text{I.4})$$

$$\mathbf{D}_{i,l} = \begin{bmatrix} d_{i,1,l} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{i,2,l} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{i,K,l} \end{bmatrix} [14] \quad (\text{I.5})$$

La capacité à utiliser un grand nombre d'antennes pour diriger avec précision les faisceaux vers plusieurs utilisateurs en même temps. Cette approche basée sur la formation de faisceaux ajoute de manière cohérente différentes composantes du signal reçu, améliorant ainsi considérablement l'efficacité spectrale. Le MIMO massif peut améliorer l'efficacité

spectrale d'un facteur 10 par rapport aux systèmes MIMO traditionnels utilisés en 4G. D'autre part, cette technologie permet à chaque utilisateur d'ajuster sa puissance d'émission en fonction du nombre d'antennes disponibles dans la station de base. Si la station dispose d'une estimation parfaite de l'état du canal (CSI parfait), la puissance d'émission de l'utilisateur peut être réduite proportionnellement au nombre d'antennes. Dans le cas de CSI imparfait, la puissance diminue proportionnellement à la racine carrée du nombre d'antennes [16].

En conclusion, le MIMO massif représente une avancée technologique majeure pour satisfaire aux exigences imposées par la 5G. Cependant, son utilisation à grande échelle nécessitera des solutions sur mesure pour surmonter les obstacles liés à la réalisation des systèmes d'antennes à grande échelle et les contraintes physiques d'installation.

I.5.2 Full duplex :

La transmission sans fil en mode Full duplex est aujourd'hui au centre des recherches concernant la conception et le développement de la 5G. De nouvelles études universitaires récentes ont prouvé la viabilité technique. Dans le cadre de son déploiement, le canal sans fil représente une ressource partagée et restreinte. Les systèmes de communication sans fil continuent donc à répartir ces ressources entre les différents utilisateurs selon une répartition temporelle ou fréquentielle selon le principe semi-duplex, qui nécessite l'émission et la réception de signaux dans deux intervalles de temps distincts ou dans deux bandes de fréquences différentes. De plus, un émetteur-récepteur ne peut simultanément émettre et recevoir des signaux sur la même fréquence. Comme illustration, LTE utilise des canaux de liaison montante et descendante indépendants de même largeur pour permettre la communication entre les stations de base et les utilisateurs. Contrairement à la technologie full-duplex, celle-ci limite considérablement la capacité des réseaux cellulaires. Cette technologie offre la possibilité d'une transmission et d'une réception simultanées, tant en termes de temps que sur une seule bande de fréquence, pouvant théoriquement multiplier par deux le débit du système comparé aux systèmes Half duplex traditionnels.

La Figure 1.10 illustre les deux distributions temporelles et fréquentielles dans le mode Half duplex ainsi que dans le mode Full duplex. Cette figure montre que toutes les ressources de temps et de fréquence sont exploitées en mode Full duplex, dans les deux directions de communication.

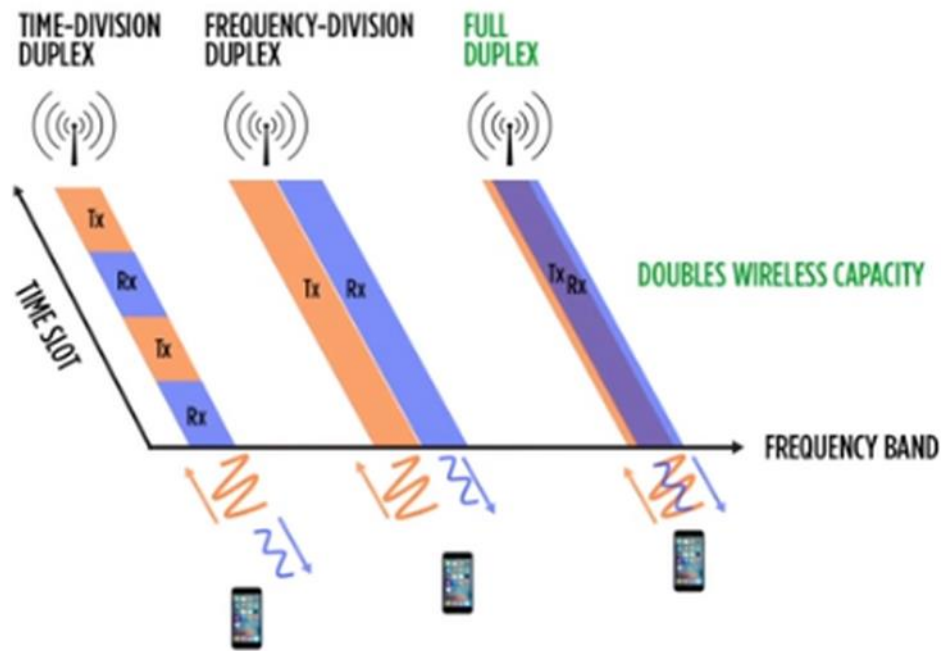


FIGURE I.9 – illustration des diverses formes de distribution [16]

L'idée de la technologie duplex intégral était jugée impossible au sein des systèmes de communication sans fil à cause du niveau d'interférence potentiel extrêmement élevé généré par le dispositif émetteur-récepteur lorsqu'il tente d'émettre et de recevoir un signal simultanément, sur une fréquence identique (appelé auto-interférence). De plus, le projet de création d'un émetteur-récepteur radio flexible à la même fréquence fonctionnelle capable de traiter simultanément deux sortes de signaux distincts de demeure extrêmement complexe. Cela ouvre un nouveau domaine d'étude visant à diminuer cette intense auto-interférence.

La Figure 1.11 illustre la comparaison des performances en termes de débit entre un système Half duplex (HD) et un système Full duplex (FD), tous deux employant un nombre d'antennes identique. Il est observable que le système Full duplex procure un plus grand débit que le système Half duplex [8].

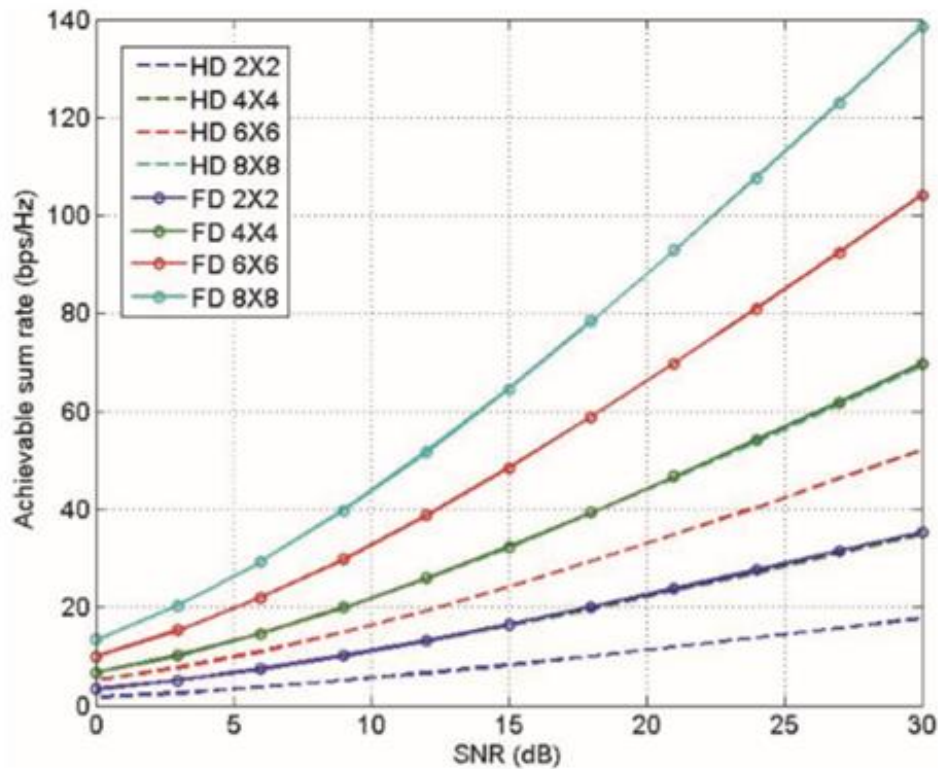


FIGURE I.10 – Différences entre le mode Half duplex et le mode Full duplex [8]

Les avancées récentes en matière de suppression d'interférences ont considérablement amélioré l'atténuation de l'auto-interférence, renforçant ainsi la viabilité de la technologie Full Duplex comme solution prometteuse pour les prochaines générations de systèmes de communication sans fil. Les approches adoptées pour minimiser cette auto-interférence se classent en deux grandes classes : l'annulation passive et l'annulation active

A- Annulation passive ou électromagnétique : Cette technique se base essentiellement sur la diminution du couplage mutuel entre les antennes émettrices et réceptrices. Cette méthode a permis d'obtenir une atténuation de 55 dB sur une bande passante de 10 MHz dans les applications WiMAX, pour un système 2x2 entre les antennes d'émission « Tx » et celle de réception « Rx ».

B- Annulation active : Basée sur le traitement du signal, cette approche peut être mise en œuvre soit de manière numérique, ou de manière analogique. Dans la bande ISM, une atténuation de 40 dB a été atteinte en utilisant une méthode analogique avec une seule antenne à polarisation circulaire. Quant à la suppression numérique, les expérimentations ont démontré qu'elle pouvait réduire l'auto-interférence jusqu'à 60 dB dans un système MIMO 7x3. Les performances optimales ont été obtenues en combinant les deux méthodes actives (analogique et numérique), avec une réduction atteignant 110 dB pour un système 1x1 et 103 dB pour un système 3x3, notamment dans le cadre du standard 802.11ac. [8].

Contrairement au mode Half Duplex, où uniquement une portion de la bande passante est employée afin de la transmission dans un seul sens à la fois (de la station vers

l'utilisateur ou inversement), le Full Duplex exploite simultanément l'intégralité de la bande pour les transmissions bidirectionnelles. Cette caractéristique permet de doubler l'efficacité spectrale.

I.5.3 Small Cells :

Le standard 5G vise à garantir une couverture haut débit aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des infrastructures. Pour assurer cette couverture tout en maintenant une qualité de service optimale. L'un des concepts clés repose sur le rapprochement des points d'accès aux utilisateurs, réduisant ainsi la distance entre eux et le réseau. Cette approche est actuellement considérée comme la seule alternative permettant de répondre aux exigences de couverture.

Dans le cas des macrocellules, la capacité par utilisateur diminue en raison du grand nombre de connexions simultanées. Une solution à ce problème consiste à diviser ces grandes cellules en unités plus petites, dans lesquelles seront déployés les équipements de communication radio de la 5G. Ces unités, appelées « Small Cells » permettent ainsi d'optimiser la couverture et d'améliorer les performances du réseau.

On distingue trois types principaux de Small Cells, classés selon leur puissance d'émission et leur zone de couverture :

- Femtocellules : Elles émettent avec une puissance maximale de 24 dBm et offrent une couverture pouvant atteindre 100 mètres. Ces cellules sont principalement utilisées pour desservir un nombre restreint d'utilisateurs en milieu résidentiel.

- Picocellules : Leur puissance de transmission varie entre 24 et 30 dBm, avec un rayon de couverture compris entre 200 et 300 mètres. Elles sont généralement déployées pour améliorer la connectivité à l'intérieur et à l'extérieur des environnements professionnels et commerciaux, ou d'autres lieux nécessitant une couverture étendue.

- Microcellules : Avec une puissance d'émission pouvant aller jusqu'à 40 dBm, ces cellules assurent une couverture plus large, atteignant un rayon de deux kilomètres. Elles sont employées tant en intérieur qu'en extérieur et peuvent gérer jusqu'à 2000 utilisateurs simultanés [16].

I.5.3.1 Réseau Hétérogène :

Dans le domaine des télécommunications, un réseau homogène utilise un type unique de stations de base, généralement des macrocellules. À l'inverse, un réseau hétérogène combine plusieurs types de stations de base, comme les macrocellules et les petites cellules (micro, pico, femto). Cette diversité contribue à l'amélioration de la couverture ainsi que à la capacité du réseau, surtout face à la demande croissante en données.

Les réseaux hétérogènes sont reconnus comme une solution essentielle pour la 5G. Ils ont été largement étudiés dans la Release 12 du 3GPP. Leur déploiement repose sur l'intégration de petites cellules sous la couverture d'une macrocellule. Cependant, la gestion des transitions entre cellules (handover) pose des défis en temps réel, en particulier dans le cadre d'applications à haut niveau d'exigence comme les véhicules sans conducteur. Pour y remédier, les opérateurs doivent développer des méthodes innovantes de prédiction de la mobilité.

I.5.3.2 Réseau Ultra Dense (UDN) :

Avec la popularité croissante des smartphones, des objets connectés et des services en ligne axés sur les données, le volume du trafic mobile connaît une croissance exponentielle. Pour atténuer cette augmentation, les réseaux ultra denses (UDN) ont été proposés comme solution pour augmenter le nombre de petites cellules, notamment dans les zones à forte demande. Les petites cellules sont importantes dans les espaces confinés et occupés tels que les bureaux, les centres commerciaux, les gares et les aéroports, car plus de 80 % du trafic mobile mondial y est généré. En plaçant des stations de base rapprochées, les UDN permettent de réduire la congestion du réseau macro cellulaire et d'accroître la connectivité des utilisateurs finaux.

I.5.3.3 Bandes Millimétriques

Les réseaux mobiles actuels utilisent des fréquences comprises entre 800 MHz et 2,6 GHz, avec une bande passante limitée. Or, avec l'augmentation du trafic, ce spectre devient insuffisant. Pour répondre à cette demande, la 5G exploite un nouveau spectre de fréquences, incluant des bandes dites millimétriques (au-delà de 6 GHz), allant jusqu'à 100 GHz. Ces nouvelles fréquences offrent des débits bien plus élevés.

I.5.3.3.1 Caractéristiques des Fréquences Millimétriques : Historiquement, les ondes millimétriques ont d'abord été utilisées dans des applications militaires et scientifiques, comme les radars et la radioastronomie. Ce n'est qu'à partir des années 1990 que leur potentiel commercial a été exploré, notamment pour :

- Les radars automobiles (ex : capteurs anti-collision à 77 GHz).
- Les communications sans fil à courtes distances (ex : WiGig à 60 GHz).
- Les transmissions satellites et militaires.

Avec la 5G, ces fréquences permettent d'augmenter considérablement les débits, offrant une largeur de bande bien plus importante par rapport aux technologies existantes.

I.5.3.3.2 Capacité de Shannon D'après les principes établis par Shannon, l'exploitation d'un spectre à large bande constitue une approche efficace pour satisfaire les exi-

gences croissantes des futurs systèmes de communication. L'équation suivante illustre la relation entre la capacité d'un canal de transmission (C), sa bande passante (B) et le rapport signal / bruit (SNR).

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) [15] \quad (\text{I.6})$$

Cette formule met en évidence deux leviers renforçant la capacité du canal de transmission :

- L'augmentation de la bande passante (B), qui permet de transmettre davantage d'informations par unité de temps.
- L'élévation de la puissance du signal émis, afin d'améliorer le rapport signal/bruit et ainsi optimiser la qualité de transmission.

I.5.3.3 Modèles de propagation : La conception d'un système de communication sans fil performant repose sur une compréhension approfondie du canal radio, des bande de fréquence utilisées et des cas d'application. Cette analyse permet d'exploiter pleinement les avantages des technologies de transmission et d'anticiper les défis liés à la propagation des ondes.

En espace libre, la formule de Friis permet d'évaluer la puissance reçue en fonction de divers paramètres tels que la puissance transmise, les gains des antennes et la distance qui sépare l'émetteur du récepteur. Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} + 20 \log_{10}(c / 4Rf) \text{ [dB]} [16] \quad (\text{I.7})$$

Où :

- P_{tx} et P_{rx} représentent respectivement la puissance transmise et reçue,
- G_{tx} et G_{rx} désignant les gains des antennes d'émission et de réception,
- R est la distance entre les antennes.
- C est la vitesse de la lumière.
- F correspondent à la fréquence de travail.

fin d'illustrer l'impact de la fréquence sur la propagation des ondes, la figure I.12 compare les résultats des simulations de diffusion pour une antenne opérant à 3 GHz et un système à 30 GHz [16].

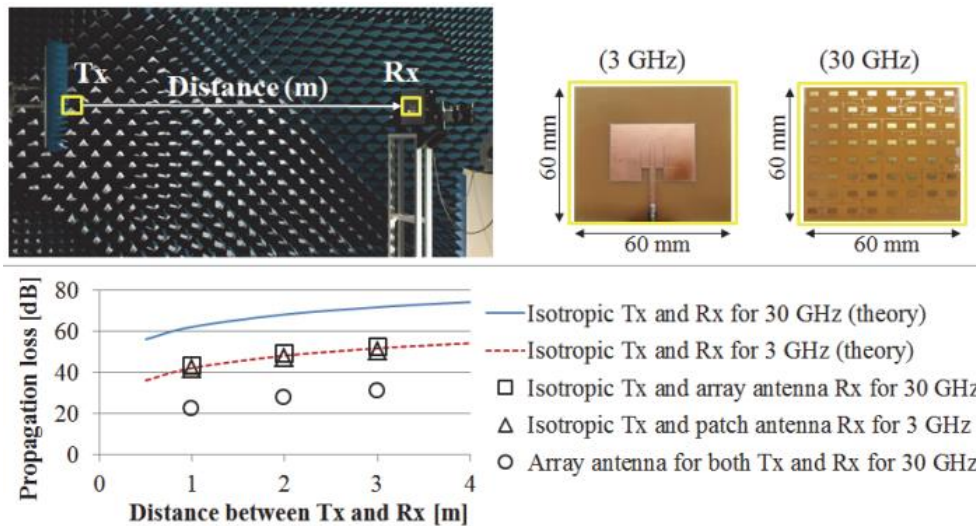


FIGURE I.11 – Résultats des évaluations de diffusion pour une antenne à 3 GHz et pour un système d’antennes à 30 GHz[16]

Cette relation montre que la puissance reçue diminue avec l’augmentation de la fréquence, ce qui signifie que les ondes millimétriques subissent une atténuation plus importante par rapport aux basses fréquences. Ainsi, les communications utilisant ces bandes sont principalement adaptées aux transmissions à courte portée, comme celles déployées en environnement urbain dense ou en intérieur

I.5.3.3.4 Contraintes des Bandes Millimétriques : L’absorption atmosphérique est un facteur important du problème qui affecte la qualité de la transmission dans les bandes de fréquences des ondes millimétriques. Ce phénomène, qui se manifeste par l’absorption ou la diffusion, affecte la quantité de signal effectivement reçue par le récepteur, tandis qu’une partie du signal est perdue dans l’atmosphère. La perte de signal due à l’environnement atmosphérique est généralement exprimée en décibels par kilomètre de propagation (dB/km). D’autres facteurs environnementaux, tels que la pluie, l’humidité ambiante, les chutes de neige et le brouillard, ont également un effet sur la propagation des ondes dans les communications sans fil.

La Figure illustre l’ampleur des pertes causées par l’atténuation atmosphérique dans les différentes bandes de fréquences millimétriques. Trois catégories de fréquences y sont représentées, chacune identifiée par un cercle de couleur distincte, en fonction du niveau d’atténuation observé

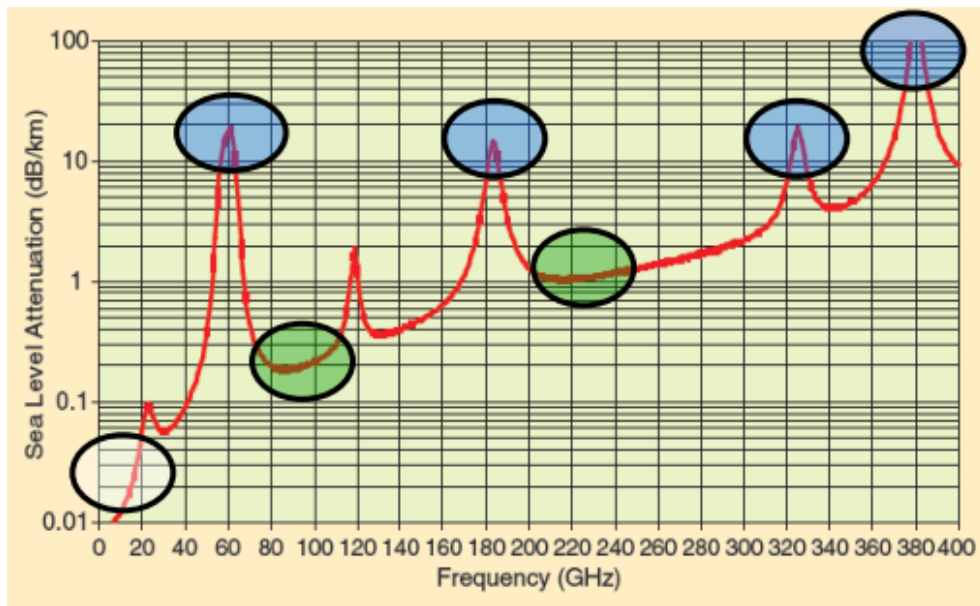


FIGURE I.12 – Atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence aux ondes millimétriques [16]

- Cercle blanc : Correspond aux bandes de fréquences faiblement atténuées, situées entre 26 GHz et 38 GHz. Ces fréquences sont particulièrement adaptées aux communications 5G, offrant un bon compromis entre capacité et portée.
- Cercle vert : Désigne des fréquences comme 73 GHz, dont les propriétés de propagation en espace libre sont comparables à celles des bandes utilisées dans les réseaux cellulaires actuels.
- Cercle bleu : Représente les bandes fortement atténuées, telles que 60 GHz, qui sont essentiellement adaptées aux communications à courte portée en intérieur. L'absorption par l'oxygène et l'atténuation due à la pluie sont particulièrement marquées dans les bandes 60 GHz et 73 GHz, tandis que ces phénomènes sont moins prononcés dans les bandes à 28 GHz et 38 GHz.

Cette analyse met en évidence l'importance du choix des fréquences en fonction du contexte d'application et des contraintes environnementales pour optimiser la performance des systèmes de communication sans fil [16].

I.5.4 Impact économique et industriel de la 5G : un catalyseur de productivité et d'innovation :

Selon la GSMA, la 5G augmentera la productivité par personne de 1 000 à 1 700 € pendant les dix premières années suivant son déploiement (Lombardi, 2021). Il augmentera l'efficacité du secteur industriel en améliorant les processus de fabrication ainsi que les entreprises au quotidien, notamment grâce au transfert d'informations tel qu'une messagerie plus rapide ou une navigation Web plus rapide. De plus, grâce à l'accès omniprés-

sent à Internet, les employés peuvent effectuer plus facilement leur travail sans limitations physiques ou technologiques, ce qui rendra les entreprises plus productives et compétitives (Escadrille, 2019). D'autres entreprises prévoient d'augmenter leur productivité en lançant plus rapidement de nouveaux produits et services.

L'émergence de la 5G, avec ses principales caractéristiques de faible latence et de large bande passante, a contribué au développement d'applications de nouvelle génération et de nouveaux modèles économiques. Par exemple, le streaming vidéo et l'Internet des objets, ainsi que la réalité virtuelle, se sont des applications qui ont créé de nouvelles opportunités. Bien que la plupart des applications soient déjà prises en charge par les réseaux actuels, les nouvelles applications nécessitant une faible latence font de la 5G un catalyseur important (IEEE, 2017).

D'après des estimations préliminaires réalisées par PwC Chine (Chow, 2019), l'implémentation de la 5G pourrait apporter environ 1 300 milliards de dollars au PIB mondial dans les dix prochaines années. Même si ces prévisions remontent au début de la mise en place de la 5G, elles témoignent des anticipations économiques importantes liées à cette technologie. On s'attend à ce que l'impact se ressente particulièrement dans cinq secteurs principaux : la santé, les services publics intelligents, les médias de masse, la production industrielle et les services financiers [17].

I.6 Lien entre la technologie 5G et la conception d'antennes :

La technologie 5G se base sur l'emploi de bandes de fréquences élevées, en particulier les bandes millimétriques, afin de fournir des débits plus importants et une latence réduite. Néanmoins, l'utilisation de ces fréquences hautes comporte de nouveaux défis comme l'atténuation du signal, la réactivité face aux obstructions et la portée limitée.

Ces restrictions influencent directement la conception des antennes : il est indispensable de concevoir des antennes compactes, orientées et à fort gain, en mesure de pallier les pertes. Par conséquent, les antennes patch micro-ruban se distinguent comme une option de choix en raison de leur taille réduite, leur aisance de production et leur capacité d'intégration dans des systèmes miniatures. La relation forte entre les besoins de la 5G et les décisions technologiques concernant les antennes explique l'analyse détaillée de ces structures dans les chapitres à venir.

I.7 Conclusion :

Le passage de la 1G à la 5G dans l'évolution des réseaux mobiles illustre efficacement les changements majeurs du domaine des télécommunications au cours des décennies.

Chaque génération a su répondre à des exigences technologiques particulières, en réalisant des progrès significatifs en termes de vitesse, de latence, de qualité du service et de capacité de liaison. Ce segment a facilité le suivi des principales phases de cette avancée, en soulignant les aspects techniques et les percées significatives qui ont jalonné chaque transition, jusqu'à l'introduction de la 5G.

La 5G marque une rupture technologique importante : elle ne se limite pas à améliorer les performances des générations précédentes, elle redéfinit les usages possibles du numérique. Grâce à ses trois cas d'usage (eMBB, URLLC, mMTC), elle ouvre la voie à des applications révolutionnaires telles que les véhicules autonomes, la réalité augmentée, la télémédecine ou encore les villes intelligentes. Son architecture complexe mais modulable, sa gestion avancée du spectre et sa faible latence en font un pilier essentiel de l'ère numérique à venir.

Toutefois, malgré ses nombreuses promesses, la 5G n'est pas la fin en soi. L'accroissement sans précédent de la demande de connectivité, l'avancement de l'intelligence artificielle et la révolution digitale mondiale incitent d'ores et déjà les intervenants du domaine à envisager le futur, à savoir la 6G .

Ce chapitre a permis de comprendre l'évolution des réseaux mobiles jusqu'à la 5G, en abordant ses caractéristiques, ses objectifs et ses cas d'usage. Nous pouvons maintenant nous tourner vers le chapitre suivant, qui traitera des types d'antennes utilisées, en particulier celles déployées dans les réseaux 5G, essentielles pour leur performance.

Chapitre II

Étude des différents types d'antennes adaptées à la 5G

II.1 Introduction

Les progrès rapides des réseaux mobiles et des technologies sans fil ont profondément transformé les exigences imposées aux systèmes de communication. Parmi les éléments clés de cette évolution, les antennes jouent un rôle central, en assurant la transmission et la réception efficaces des signaux. Dans le cadre de la 5G, de nouveaux défis apparaissent, liés à l'augmentation des débits, à la densité du trafic et à l'utilisation de fréquences plus élevées.

Cette section se propose de poser les bases nécessaires à la compréhension des technologies d'antennes, en commençant par un aperçu du contexte et des enjeux des communications sans fil, avant d'explorer les principes fondamentaux et les structures les plus adaptées aux exigences de la 5G.

II.1.1 Contexte et enjeux des communications sans fil

Face à l'avancement rapide des systèmes de communication sans fil et des technologies de radiocommunication, le besoin d'antennes aux performances améliorées ne cesse de croître. Ces antennes doivent répondre à des normes strictes : compacité, large bande passante, amplification élevée, faibles pertes, adaptabilité à une demande croissante en matière de trafic et de transmission à haut débit.

Ces contraintes ont conduit à l'émergence de multiples conceptions visant à trouver un équilibre entre compacité, rendement élevé, pertes minimales, large bande passante, efficacité d'émission supérieure à 70 %, coût modique et capacité à gérer des débits très élevés.

La technologie 5G, largement supérieure à la 4G en matière de performances, se caractérise par des débits de données extrêmement rapides, une bande passante élargie et une

capacité de transmission accrue. Les ondes millimétriques, qui se situent entre 30 GHz et 300 GHz, représentent une ressource spectrale jusqu'à présent sous-utilisée et offrent un potentiel considérable pour répondre aux exigences de la 5G. Pour les applications 5G, les fréquences utilisées varient entre 20 GHz et 90 GHz. Les bandes opérationnelles typiques incluent 28 GHz, 38 GHz et 72 GHz, offrant respectivement des largeurs de bande de 500 MHz, 1 GHz et 2 GHz.

Ces antennes sont conçues pour assurer une forte directionnalité ; cependant, elles sont plus sensibles aux obstructions, en raison de la largeur étroite de leur faisceau. Cela les rend particulièrement appropriées pour des environnements à forte densité de cellules, où une gestion rigoureuse du signal est indispensable pour fournir une couverture étendue et une qualité de service optimale.

Concernant les matériaux, même si une multitude de substrats sont proposés sur le marché, la majorité d'entre eux présentent des constantes diélectriques adaptées à des fréquences inférieures à 10 GHz. Les substrats Rogers se distinguent parmi ceux-ci pour les applications en ondes millimétriques, grâce à leur faible constante diélectrique et à leurs pertes minimales. Ils sont spécialement conçus pour les fréquences extrêmement élevées et les systèmes à hautes performances, dans le cadre de la 5G [18].

Ce chapitre a pour objectif d'exposer les principes de base associés aux antennes, notamment dans le cadre des réseaux 5G. Après la définition de l'antenne, la présentation de sa structure et un aperçu historique de son évolution, nous aborderons les technologies actuellement dominantes : les antennes MIMO, les réseaux à commande de phase et les antennes imprimées. Une attention particulière sera accordée à ces dernières, en particulier aux antennes patch micro-ruban, en raison de leur coût réduit, de leur taille compacte et de leur intégration aisée dans les systèmes 5G. Ces caractéristiques justifient le choix de cette structure comme base pour l'étude et la simulation présentées dans le chapitre suivant.

II.1.2 Définition et rôle d'une antenne

Une antenne peut être définie comme un dispositif électromagnétique capable de transmettre ou de recevoir des ondes électromagnétiques. Autrement dit, une antenne est un système de conducteurs surélevés qui couple ou adapte l'émetteur ou le récepteur à l'espace libre.

Une antenne émettrice, connectée à un émetteur, force les ondes électromagnétiques à se propager dans l'espace libre, lesquelles voyagent ensuite à la vitesse de la lumière. De manière similaire, une antenne réceptrice, connectée à un récepteur radio, reçoit ou intercepte une partie des ondes électromagnétiques transitant dans l'espace.

L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) définit une antenne comme : « Un système servant à émettre ou à recevoir des ondes radio ».

On peut simplement dire qu'une antenne est un élément de liaison entre l'espace libre et un dispositif de guidage [20].

Après avoir établi ce qu'est une antenne, il est maintenant nécessaire d'analyser sa structure générale afin de mieux comprendre son fonctionnement physique.

II.1.3 Architecture typique d'une antenne :

La configuration globale d'une antenne d'émission est illustrée dans la figure II.1. (Le dispositif récepteur présente une architecture équivalente, dans laquelle la source d'énergie est remplacée par un récepteur, et le sens du vecteur représentant le transfert d'énergie est inversé.)

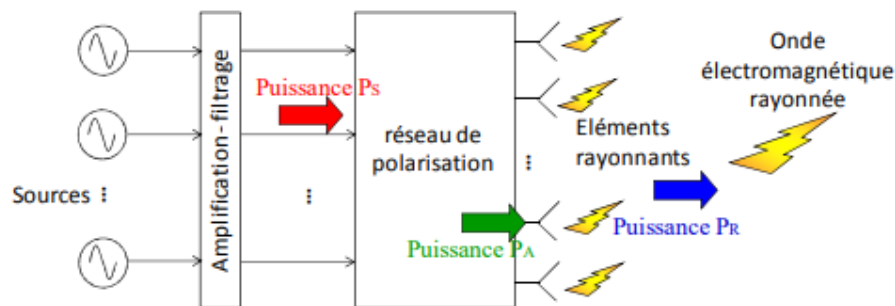


FIGURE II.1 – structure générale d'une antenne[20]

Le signal à diffuser peut provenir d'une ou plusieurs sources (les sources sont indépendantes en amplitude et en phase). P_s représente la puissance électrique fournie par l'alimentation électrique. Entre la source et l'antenne, des amplificateurs et des filtres peuvent être installés pour fournir de l'énergie. Fournit une puissance suffisante aux composants rayonnants pour assurer le fonctionnement de la transmission (ou de la réception) dans le spectre de fréquences limité. L'unité émettrice ou réceptrice est connectée à l'antenne via une ligne de transmission, généralement constituée d'un câble coaxial ou d'un guide d'ondes. Ils aident à transférer l'énergie électrique P_A aux éléments rayonnants.

La puissance du P_A est différente de celle du P_S en raison des pertes introduites par divers composants entre l'alimentation et les éléments rayonnants.

Le réseau de polarisation permet d'alimenter les signaux vers les radiateurs, tout en assurant leur déphasage et/ou leur combinaison pour optimiser le rayonnement.

Des composants rayonnants assurent la diffusion de l'énergie émise par l'émetteur dans l'espace de libre propagation de l'onde électromagnétique. L'antenne émet une puissance qui est désignée par la notation P_R . Inversement, elle garantit le transfert de l'énergie d'une onde électromagnétique en direction du récepteur [20].

La connaissance de cette structure offre une perspective sur l'évolution des antennes au cours du temps, en réponse à la demande croissante de connectivité.

II.1.4 Évolution des technologies d'antennes

Depuis les débuts de la communication sans fil, les antennes ont toujours été un sujet d'intérêt majeur pour les ingénieurs, scientifiques et planificateurs de réseaux sans fil. Ces dernières décennies, les antennes ont connu une évolution considérable, passant de formes traditionnelles et encombrantes — telles que les antennes filaires paraboliques utilisées pour la télévision ou la communication spatiale, les antennes dipôles ou Yagi — vers des modèles plus compacts et intégrables.

Bien que ces formes traditionnelles soient efficaces, elles présentaient des contraintes quant à leur compacité et leur intégration dans les dispositifs électroniques. Avec le progrès technologique, les antennes imprimées, en particulier les antennes patch micro-ruban, ont constitué un tournant majeur. Leur structure plane, leur légèreté et leur facilité de fabrication en ont fait des candidates idéales pour les applications mobiles modernes. De nos jours, face à la demande toujours croissante de connectivité, le développement se poursuit vers des antennes dites « intelligentes », capables de modifier leur fonctionnement en temps réel. C'est le cas des antennes MIMO et des antennes à réseau phasé, qui sont employées dans les réseaux 5G [19].

Ci-après, nous exposons les principales catégories d'antennes déployées dans les réseaux 5G, y compris les antennes MIMO, les antennes à réseau phasé et les antennes patch micro-ruban.

II.2 Classification des antennes :

On peut catégoriser les antennes en fonction de plusieurs paramètres, tels que leurs configurations géométriques, leur principe de fonctionnement, leurs gains, la direction de leurs faisceaux ou leur bande passante.

II.2.1 Les antennes filaires :

Les antennes filaires comptent parmi les plus courantes. Elles sont utilisées pour divers types de transmissions : sur des automobiles, des bâtiments, des navires ou des aéronefs. Il existe plusieurs variantes, comme le dipôle à fil rectiligne, en boucle ou en hélice, parmi d'autres. Les antennes les plus fréquemment utilisées. On peut aussi fusionner ces divers types de base pour concevoir une antenne unique. Dans les systèmes de radiocommunication mobile, l'antenne dipôle est fréquemment choisie comme référence. Effectivement, c'est le type le plus simple [21].

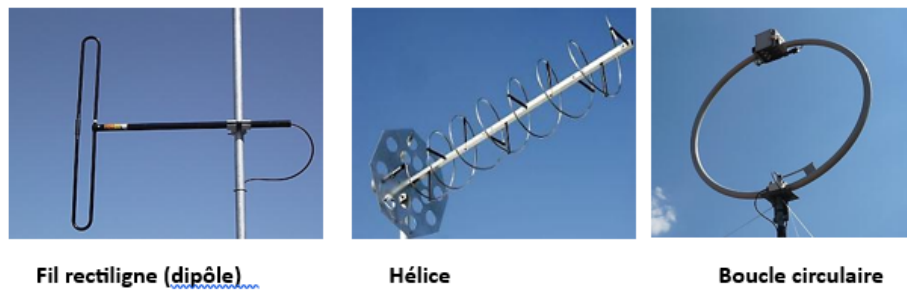


FIGURE II.2 – Exemples d’antennes filaires[22]

II.2.2 Les antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante sont plus plus récentes que les antennes traditionnelles. Leur adoption est stimulée par la transmission à des fréquences supérieures. Ces antennes, grâce à leur installation aisée, sont utilisées dans le secteur de l’aviation. Il est possible de les recouvrir d’un matériau diélectrique pour les protéger contre les fluctuations imprévisibles de l’environnement [21].



FIGURE II.3 – Guide d’onde [21].

II.2.2.1 Antennes cornet :

Ce type d'antenne appartient à la famille des antennes à ouverture rayonnante, c'est-à-dire que le rayonnement s'effectue via une ouverture dans un guide d'ondes ou une structure. Elles sont souvent utilisées dans les bandes de fréquences élevées (GHz) ces antennes se distinguent par sa forte directivité et son gain important [21].

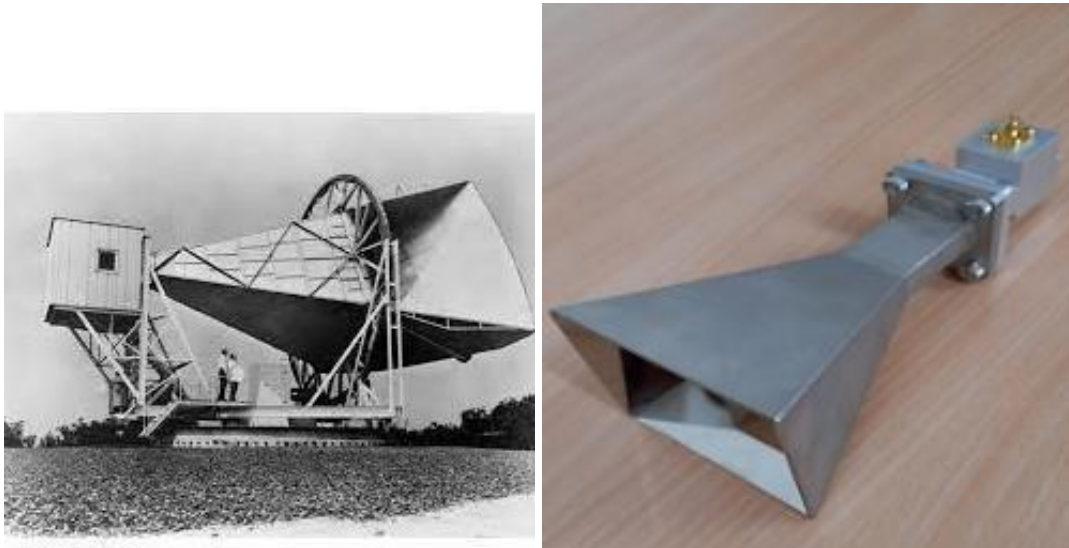


FIGURE II.4 – Illustration d'une antenne cornet [21][19]

II.2.2.2 Antennes à fente :

Ces systèmes d'antenne se composent essentiellement d'une source émettrice diffusant un signal vers une surface qui renvoie ce dernier. L'utilité principale de ces antennes se situe dans les applications de communication spatiale qui nécessitent des connexions sur de grandes étendues qui peuvent parfois s'étendre sur des millions de kilomètres. Le modèle de réflecteur parabolique reste le plus courant parmi cette catégorie d'antennes[21].



FIGURE II.5 – Exemple d'antenne à réflecteur parabolique [22]

II.2.3 Antennes imprimées et Patch micro-ruban

II.2.3.1 Présentation générale des antennes imprimées :

Les antennes imprimées sont des dispositifs conçus pour émettre et capter des ondes électromagnétiques, notamment les signaux radio, Wi-Fi et télévision. On les appelle « imprimés » car ils sont réalisés à l'aide d'une technologie d'impression, généralement sur des supports flexibles. L'une de ses principales caractéristiques est son faible encombrement et sa forme plate.

Contrairement aux antennes traditionnelles, qui sont généralement grandes et encombrantes, les antennes imprimées sont conçues pour être compactes et invisibles, Ce qui leur confère une compatibilité optimale avec les applications requérant une miniaturisation, telles que les appareils électroniques portables, les téléphones portables, les tablettes et les objets connectés.

Ils offrent également une flexibilité de conception importante. Grâce à la technologie d'impression, une grande variété de formes et de motifs d'antennes peuvent être créés, leur permettant de s'adapter à différentes contraintes de conception et d'optimiser leurs performances selon les exigences particulières de l'application .

Outre leur petite taille et leur flexibilité de conception, ces antennes présentent d'autres avantages. Elles sont souvent moins chères à produire que les antennes traditionnelles car elles peuvent être produites en masse à l'aide de procédés d'impression industriels. De plus, ils peuvent être intégrés directement sur les substrats PCB, simplifiant ainsi l'assemblage des dispositifs électroniques.

Ce chapitre s'attache sur l'antenne patch micro-ruban parmi les diverses catégories d'antennes imprimées (fente, fractale, Vivaldi, micro-ruban...), non seulement pour sa large utilisation dans les systèmes 5G, mais aussi parce qu'elle représente un modèle idéal pour l'optimisation et la simulation, grâce à sa géométrie simple, son architecture plane et sa compatibilité avec les technologies de production modernes.

II.2.3.2 Caractéristiques des antennes imprimées :

II.2.3.2.1 Diagramme de rayonnement : Le diagramme de rayonnement de l'antenne décrit la variation de la puissance émise en fonction de la distance et selon différentes directions spatiales. Ces représentations se caractérisent par la présence d'un lobe principal ainsi que de lobes secondaires.

— Lobe principale

Dans le lobe principal, la quasi-totalité de la puissance rayonnée est concentrée dans la direction du maximum de rayonnement.

— Lobes secondaires

Ce sont des lobes latéraux, définis par leur niveau relatif de rayonnement et caractérisés par leur forme ainsi que leur position angulaire. La figure II.2 représente le diagramme des lobes et leurs caractérisations .

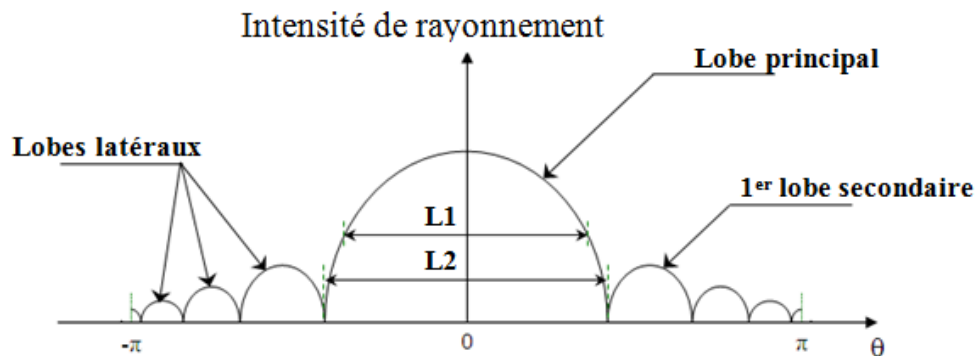


FIGURE II.6 – Tracé du diagramme et description des lobes ainsi que de leurs largeurs[15].

II.2.3.2.2 Polarisation La polarisation d'une onde électromagnétique rayonnée par une antenne correspond à l'orientation du champ électrique \vec{E} ou du champ magnétique \vec{H} . Lorsque le vecteur \vec{E} (ou \vec{H}) conserve une orientation fixe dans le temps, on parle de polarisation linéaire (voir Fig. III.3 A). En revanche, si cette direction évolue au fil du temps, de sorte que l'extrémité du vecteur décrit une trajectoire circulaire ou elliptique en un point de l'espace, on qualifie alors la polarisation de circulaire ou elliptique, respectivement. (fig III.3 B et C).

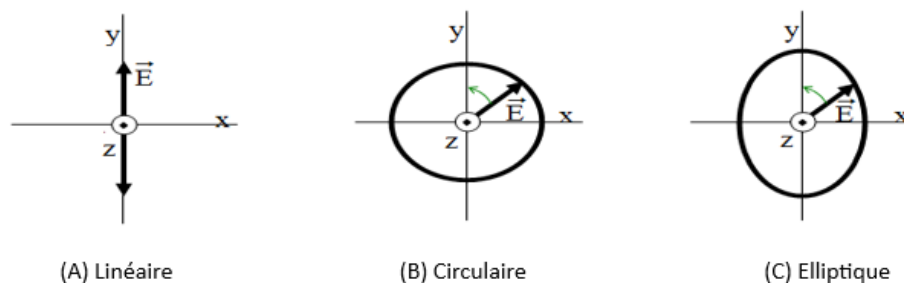


FIGURE II.7 – Différents types de polarisation d'une onde électromagnétique[15] .

II.2.3.2.3 Gain : Le gain d'une antenne représente un indicateur de son efficacité à diriger l'énergie électromagnétique rayonnée. On s'intéresse particulièrement au gain maximal, qui peut être exprimé par la relation suivante :

$$G = \frac{\text{(puissance rayonnée dans la direction du maximum)}}{\text{(puissance rayonnée par une antenne isotropique)}} [15] \quad (\text{II.1})$$

Le gain est généralement exprimé en décibels (dB), selon la formule :

$$G_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(G) [15] \quad (\text{II.2})$$

II.2.3.2.4 Directivité : La directivité définit la focalisation du rayonnement dans une direction spécifique. Sur la base de ce paramètre, on peut différencier les antennes directrices des antennes non directrices.

La capacité directionnelle de rayonnement est définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction spécifique dans une direction donnée de l'antenne, relativement à l'intensité moyenne rayonnée dans toutes les directions de l'espace.

II.2.3.3 Caractéristiques électriques :

II.2.3.3.1 Impédance d'entrée : L'impédance d'entrée représente une grandeur électrique essentielle, assurant l'adaptation entre l'antenne et le générateur (lors de l'émission) ou entre l'antenne et le récepteur (en réception). Cette correspondance est cruciale pour permettre un transfert optimal de la puissance active. Elle dépend de plusieurs paramètres, notamment la constante diélectrique du matériau, l'épaisseur et la largeur du substrat, ainsi que la position du point d'alimentation de l'antenne [15].

II.2.3.3.2 Adaptation d'une antenne : Prenons le cas d'une antenne présentant une impédance d'entrée Z_e , reliée à une ligne de transmission dont l'impédance caractéristique est Z_c (généralement $Z_c=50$ ohm). Une adaptation correcte vise à réduire au maximum le coefficient de réflexion Γ , afin de limiter les pertes de puissance. Ce coefficient s'exprime par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} [12] \quad (\text{II.3})$$

Lorsque l'adaptation est parfaite, l'intégralité de la puissance est transférée de la source à l'antenne (ou l'inverse), sans réflexion. Dans le cas contraire, une partie de l'onde est renvoyée vers la source.

II.2.3.3.3 Le coefficient de réflexion S_{11} : Dans les systèmes électriques caractérisés par les paramètres S, le coefficient S_{11} représente la part du signal électromagnétique qui est réfléchi à l'entrée du dispositif. Une réduction significative de S_{11} à une fréquence donnée, généralement la fréquence de résonance, indique un transfert optimal de puissance entre la source (générateur) et la charge (antenne).

Ce coefficient permet également de déterminer le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS), qui est un indicateur de la qualité de l'adaptation d'impédance entre les deux éléments. Les relations mathématiques associées sont les suivantes :

$$\text{ROS} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} [13] \quad (\text{II.4})$$

$$S_{11} = \frac{|\text{ROS}| - 1}{|\text{ROS}| + 1} [14] \quad (\text{II.5})$$

II.2.3.3.4 Le rendement : Le rendement ρ d'une antenne, aussi appelé efficacité d'antenne, correspond au rapport entre la puissance rayonnée par l'antenne et la puissance totale qu'elle reçoit. Il permet d'évaluer les pertes internes de l'antenne, notamment celles liées à des effets de dissipation résistive (ohmique) et diélectrique. Ce paramètre est crucial pour quantifier la performance globale de l'antenne dans un système de transmission.

II.2.3.3.5 La bande passante : La bande passante d'une antenne imprimée représente l'intervalle de fréquences pour lequel l'élément rayonnant maintient une adaptation optimale avec son système d'alimentation. Autrement dit, elle désigne la plage de fréquences où les performances de l'antenne restent conformes aux spécifications requises. La bande passante (BP) se calcule selon la relation [14] :

$$BP = \frac{f_h - f_b}{f_r} \quad (\text{II.6})$$

II.2.4 Introduction aux antennes patch micro-ruban (MPA)

Au cours des quinze dernières années, les antennes patch à micro-ruban (MPA – Microstrip Patch Antennas) sont devenues les systèmes les plus développés dans le domaine des antennes. Elles ont suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs du monde entier, donnant lieu à de nombreux brevets, articles et ouvrages. En outre, plusieurs sessions de symposiums et cours spécialisés ont été organisés. En conséquence, les MPAs sont rapidement passées du statut de nouveauté académique à celui de réalité commerciale, avec des applications dans une grande variété de systèmes à micro-ondes [19].

Dans les réseaux 5G, ces antennes sont déployées aussi bien au sein des stations de base que dans les équipements des utilisateurs, utilisant des bandes millimétriques (28 GHz, 38 GHz, etc.) afin de fournir un fort gain et une directivité appropriée pour les connexions à haut débit. Grâce à leur petite taille et leur adéquation avec les architectures Massive MIMO, ils sont préférés pour la densification du réseau et l'amplification de la capacité spectrale.

II.2.4.1 Structure de base d'une antenne micro-ruban :

L'antenne micro-ruban est une structure à une seule couche, généralement composée de quatre éléments : le patch, le plan de masse, le substrat et le système d'alimentation. L'antenne patch peut être classée comme une antenne résonante à élément unique. Une fois la fréquence donnée, tout (diagramme de rayonnement, impédance d'entrée, etc.) est fixé. La figure II.4 dépeint l'architecture fondamentale d'une antenne patch à micro-ruban, présente le patch rayonnant, le substrat, la surface de référence conductrice et l'emplacement de l'alimentation

Le patch est une bande métallique rayonnante très fine ($t \ll \lambda_0$, où $\lambda_0 \in \mathbb{R}$) est la longueur d'onde en espace libre), située sur un côté d'un substrat mince non conducteur.

Le substrat : matériau diélectrique supportant le patch

Le plan de masse : une couche métallique continue, identique à celle du patch, située sur l'autre face du substrat.

La partie alimentation : ligne microstrip, sonde coaxiale ou autre technique de couplage.

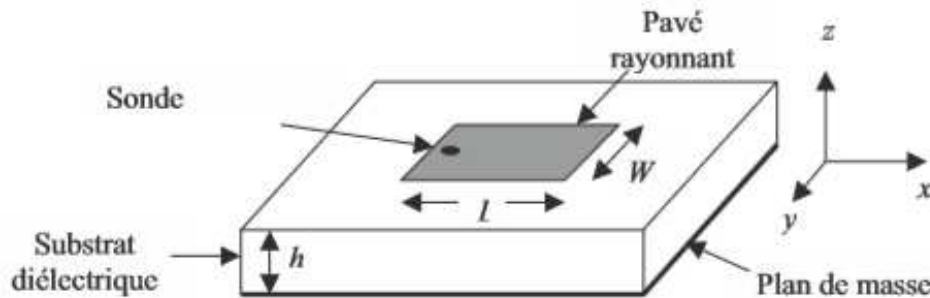


FIGURE II.8 – Structure de base d'une antenne micro-ruban .

II.2.4.2 Méthodes d'alimentation pour l'antenne micro ruban unique :

De nombreuses techniques sont disponibles pour assurer l'alimentation des antennes micro-rubans; elles se divisent en deux catégories : les techniques d'alimentation par contact et celles sans contact. Ces techniques sont brièvement illustrées comme suit :

II.2.4.2.1 lignes d'alimentation en micro-ruban : Dans ce mode d'alimentation, une ligne conductrice est directement reliée au bord du patch micro-ruban. Le conducteur est généralement plus étroit que la surface du patch. Cette méthode est la plus facile à fabriquer car ce dispositif d'alimentation et le patch rayonnant peuvent être imprimés sur le même substrat diélectrique. Avec l'approche d'alimentation en ligne micro ruban, un éventail d'éléments de patch et leurs lignes de division de puissance micro ruban peuvent tous être conçus et gravés chimiquement sur le même substrat avec un coût de fabrication relativement faible par élément. Cependant, le rayonnement des fuites des lignes de transmission peut être suffisamment grand pour élever le lobe latéral ou les niveaux polarisés croisés du rayonnement du réseau. Au bord d'un patch, l'impédance est généralement bien supérieure à 50 ohms. Pour éviter l'inadéquation d'impédance, des sections de transformateurs en quart d'onde peuvent être utilisées pour transformer une grande impédance d'entrée en une ligne de 50 ohms comme illustré dans la figure ci-dessous [24].

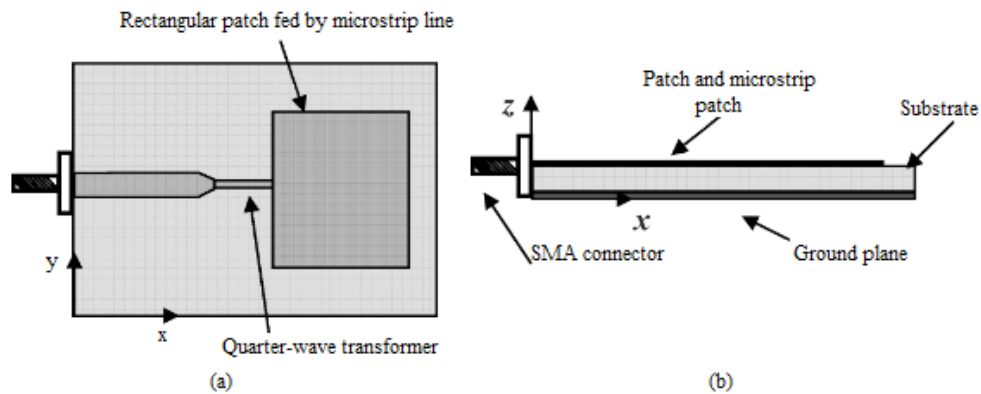


FIGURE II.9 – La géométrie d’une antenne de pointe micro ruban à micro ruban direct (a) la vue de dessus et (b) vue latérale[24]

La disposition des aliments pour le patch peut également avoir une coupe d’encart dans le patch comme illustré à la figure II.10 Le but de la coupe d’encart dans le patch est de faire correspondre l’impédance de la ligne d’alimentation au patch sans avoir besoin d’un élément correspondant supplémentaire. Ceci est réalisé en contrôlant correctement la position d’encart. Ce schéma d’alimentation est apprécié pour sa simplicité, sa facilité de fabrication, sa modélisation aisée et sa bonne adaptation d’impédance[24].

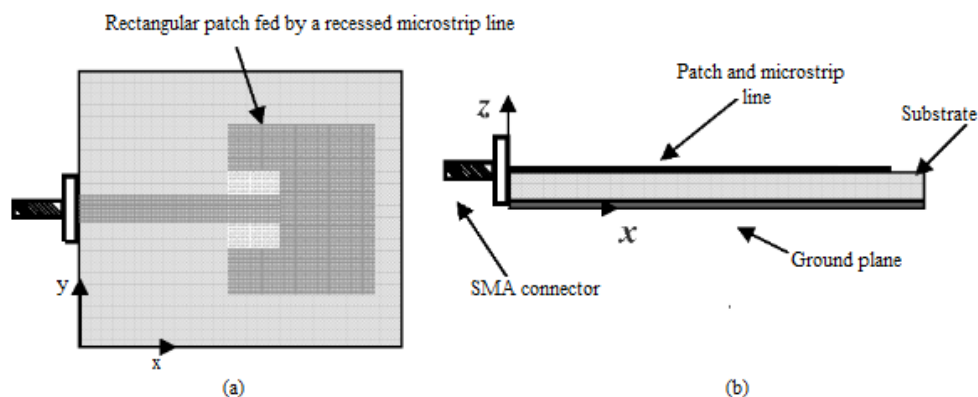


FIGURE II.10 – La géométrie d’une antenne du patch micro ruban à lignes micro rubanes encastrées (a) la vue de dessus et (b) la vue latérale[24]

II.2.4.2.2 Feed de sonde coaxiale : L’alimentation par sonde coaxiale fait partie des méthodes les plus répandues pour alimenter les antennes patch imprimées (voir figure II.11). Ce flux peut être donné à n’importe quel emplacement souhaité dans le correctif pour atteindre la correspondance d’impédance. Le conducteur central du connecteur coaxial traverse le substrat diélectrique pour être soudé directement au patch rayonnant, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse. La méthode d’alimentation coaxiale ou de sonde donne une faible perte de rayonnement. Le principal avantage de ce flux est qu’il peut être placé à n’importe quel emplacement souhaité à l’intérieur du patch

pour correspondre à son impédance d'entrée.

Cette méthode d'alimentation est facile à fabriquer et a un faible rayonnement parasite. Cependant, son principal inconvénient est qu'il donne moins de bande passante et n'est pas si facile à utiliser car un trou doit être introduit dans le substrat diélectrique. De plus, il est nécessaire de percer un trou dans le substrat pour permettre au connecteur de dépasser du plan de masse inférieur.

Il n'est pas complètement planté et cet arrangement d'alimentation rend la configuration asymétrique. Pour les substrats diélectriques de plus grande épaisseur, l'allongement de la ligne d'alimentation coaxiale ou par sonde rend l'impédance d'entrée plus inductive, ce qui peut entraîner des difficultés d'adaptation d'impédance. Pour les substrats épais, qui sont généralement utilisés pour atteindre une large bande, les méthodes ci-dessus d'alimentation directe de l'antenne micro ruban ont des problèmes.

Dans le cas d'un aliment coaxial, L'élongation de la sonde entraîne une augmentation du caractère inductif de l'impédance d'entrée, conduisant au problème de correspondance. Pour l'alimentation micro ruban, une augmentation de l'épaisseur du substrat augmente sa largeur, ce qui augmente à son tour le rayonnement d'alimentation indésirable. Dans un substrat diélectrique à grande épaisseur, l'alimentation des lignes micro rubanes et l'alimentation coaxiale souffrent d'un problème avec la réactance de la sonde et l'excitation des ondes de surface. Le flux indirect, comme discuté ci-dessous, résout ces problèmes[24].

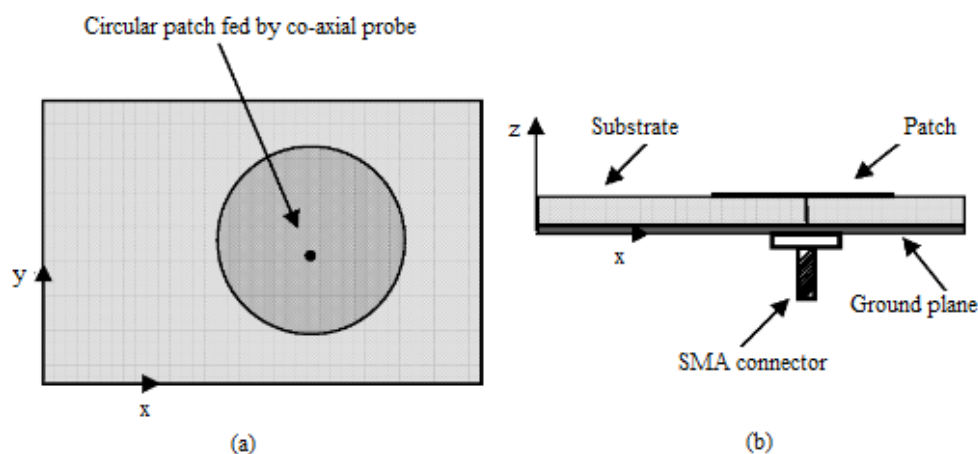


FIGURE II.11 – La géométrie de l'antenne du patch à micro ruban à un air de sonde coaxiale (A) Vue de dessus et (b) vue latérale.[24]

II.2.4.3 Alimentation de la ligne de micro ruban à couplée de proximité

Une configuration de ce flux de micro ruban sans contact a utilisé un substrat à deux couches avec la ligne micro ruban sur la couche inférieure et l'antenne de patch sur la couche supérieure. Cette méthode d'alimentation, contient deux couches diélectriques, c'est-à-dire que l'une est une couche de patch rayonnante et sur la ligne d'alimentation

de la couche inférieure est fabriquée avec un plan de sol à l'arrière. Les deux substrats sont séparés par un plan de masse commun. Le circuit d'alimentation micro ruban sur le substrat inférieur est connectée électromagnétiquement au patch par une ouverture de la fente dans le plan de masse commun. La fente peut être n'importe quelle forme ou taille et ces paramètres peuvent être utilisés pour améliorer la bande passante. Le rayonnement de l'extrémité ouverte de la ligne d'alimentation n'interfère pas avec le modèle de rayonnement du patch en raison de l'effet de blindage du plan de sol.

Cette caractéristique améliore également la pureté de polarisation. La fente de couplage est habituellement positionnée au centre sous le patch, ce qui permet de réduire la polarisation croisée grâce à la symétrie de la structure. Pour optimiser le rayonnement de l'antenne, le substrat inférieur est souvent constitué d'un matériau à permittivité élevée, tandis que le substrat supérieur utilise un matériau plus épais avec une permittivité relativement faible. La caractéristique notable de cette configuration de flux est une bande passante plus large, ce qui est principalement dû à une augmentation inclusive de l'épaisseur de l'antenne du patch micro ruban. Cette technique a pour disposition de choisir un substrat séparé pour le correctif et la ligne d'alimentation, dans le but d'améliorer les performances globales de l'antenne.. L'inconvénient majeur de cette méthode est une difficulté de fabrication en raison de plusieurs couches qui nécessitent un alignement approprié. De plus, dans cette méthode, l'épaisseur de l'antenne augmente. La ligne de micro ruban ouverte peut également être utilisée pour alimenter une antenne de patch par couplage de proximité, comme le montre la figure II.12. Par exemple, l'extrémité ouverte d'une ligne de 100 ohms peut être placée sous le patch à son emplacement à 100 ohms[24] .

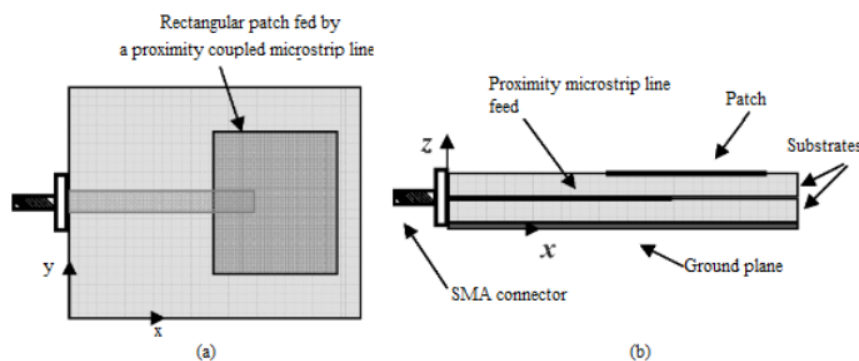


FIGURE II.12 – La géométrie d'une antenne de plaque à micro ruban à micro ruban à couplé de proximité (a) vue de dessus et (b) vue latérale.[24]

La ligne de microruban ouverte peut également être placée en parallèle et très proche du bord d'un patch, pour réaliser l'excitation par couplage de champs franges, Comme représenté dans la figure II.13. Ces deux méthodes évitent toute connexion à souder qui, dans certains cas, pourrait obtenir une meilleure fiabilité mécanique.

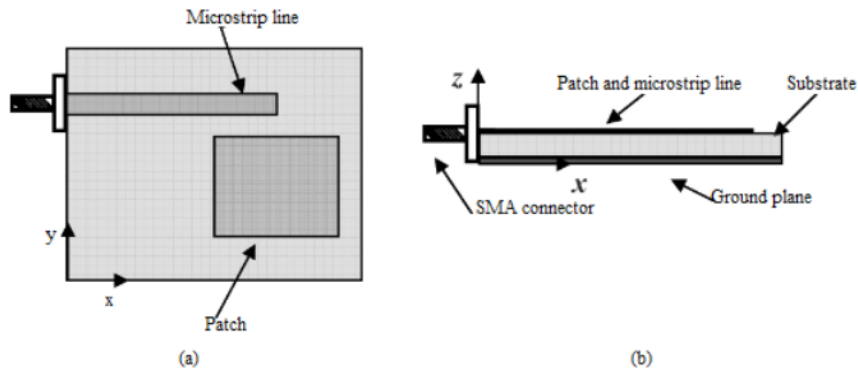


FIGURE II.13 – La géométrie d’une antenne patch alimentée par une ligne de microruban adjacente (a) la vue de dessus et (b) la vue latérale[24].

II.2.4.3.1 Flux couplé à l’ouverture : La technique couplée à l’ouverture a été présentée pour la première fois par D.M. Pozar en 1985. Il se composait de deux substrats séparés par un plan de sol conducteur commun entre les deux. Le patch est positionné sur la face supérieure du substrat, tandis que la ligne d’alimentation se trouve sur la face inférieure. Le plan de sol conducteur entre l’alimentation et l’antenne patch force le rayonnement électromagnétique « Dirigé » vers le patch à travers la fente sans aucune connexion physique comme illustré Figure II.9.

En fait, cette technique est utilisée pour éviter la connexion à la soudure ainsi que pour éviter le rayonnement de fuite de la ligne pour interférer avec le rayonnement du patch. De plus, en utilisant un substrat épais. Cette méthode d’alimentation permet au patch d’obtenir une bande passante supérieure à celle obtenue avec une alimentation par sonde coaxiale [24].

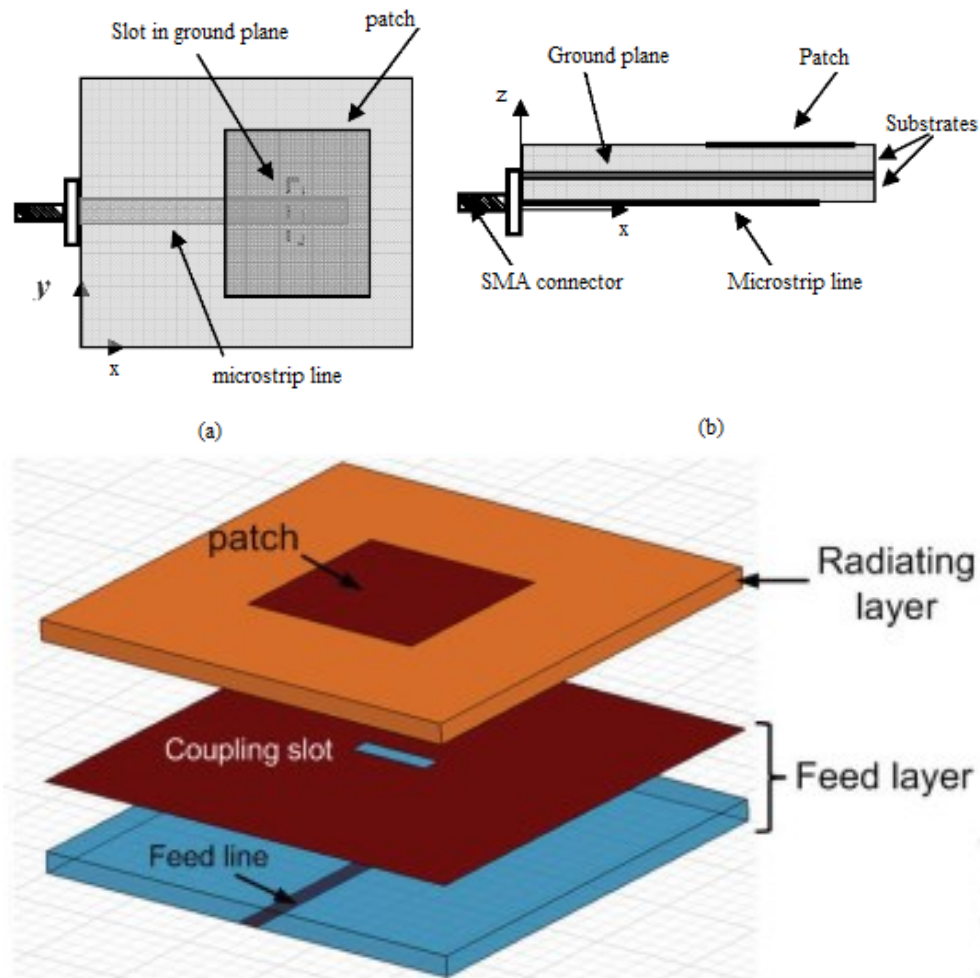


FIGURE II.14 – La géométrie d'une antenne de pointe à microgries d'ouverture d'ouverture (a) Vue de dessus, (b) Vue latérale (c) Vue illustrée [24]

II.2.4.3.2 Flux d'iris : L'utilisation d'un guide d'ondes en tant que mangeoire pour exciter l'antenne du patch micro-ruban via un iris de la paroi d'extrémité a été proposée par et depuis lors, cette technique a été largement adoptée pour les dispositifs de télécommunications. L'antenne à patch micro-ruban alimentée par iris, illustrée sur la figure II.15, est composée d'un dispositif à trois couches comprenant une couche diélectrique placée entre un patch émetteur et un guide d'onde excitateur. Le guide d'onde et la couche diélectrique sont séparés par un plan de masse conducteur commun. En effet, ce plan de masse permet au rayonnement électromagnétique d'être guidé depuis le guide d'onde tronqué vers le patch à travers la fente de couplage.

L'utilisation d'un guide d'onde comme mangeoire pour exciter le patch micro-ruban via un iris placé sur la paroi d'extrémité offre plusieurs avantages par rapport à l'alimentation par ligne de transmission ou câble coaxial, notamment : de faibles pertes, une grande précision de fabrication, une bonne robustesse mécanique, ainsi qu'une large plage de fréquences passantes [24].

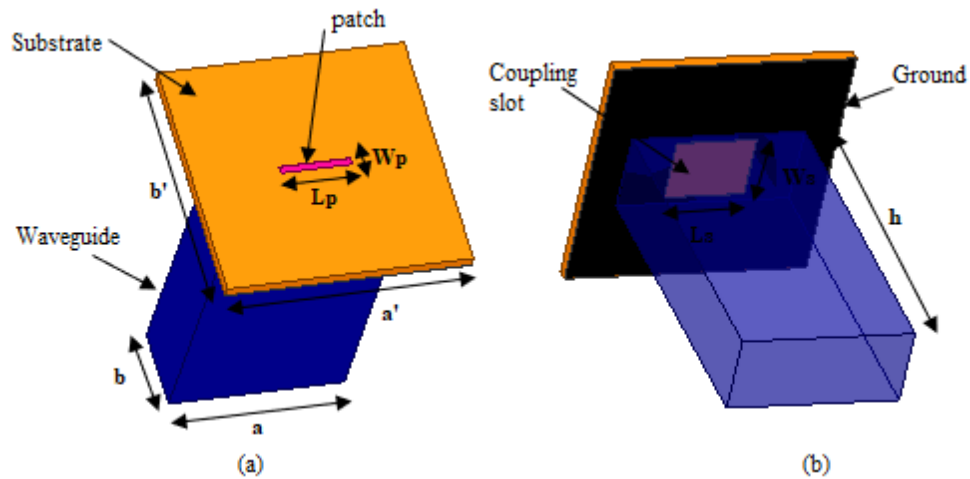


FIGURE II.15 – Antenne micro ruban à l'iris(a) Vue de dessus (b) Vue inférieure[24]

La figure ci-après résume les configurations typiques des techniques d'alimentation abordées.

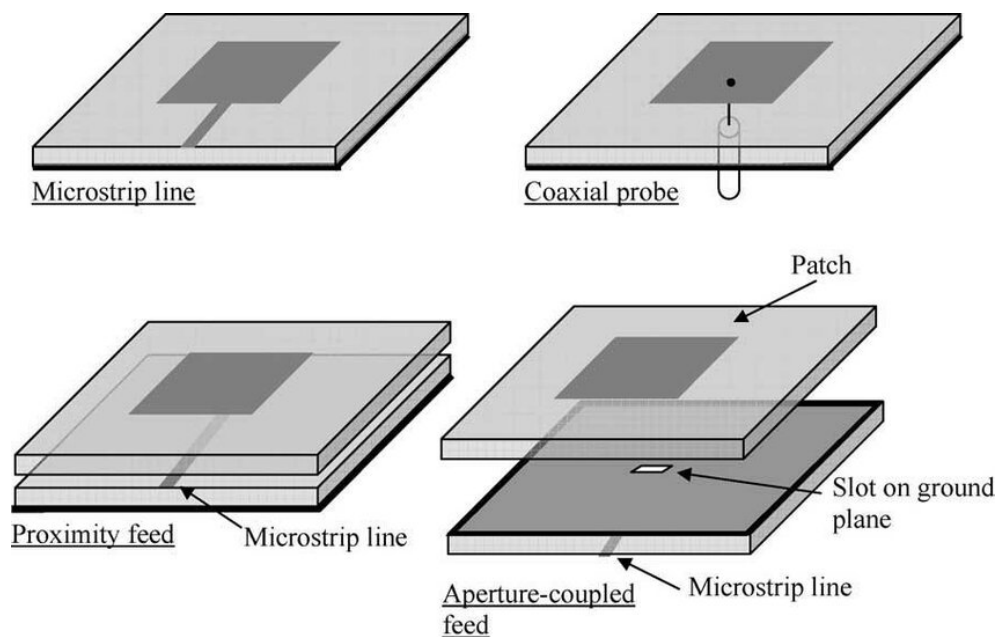


FIGURE II.16 – Techniques d'alimentation couramment utilisées pour les antennes micro-ruban[24]

II.2.5 Types de l'antenne patch micro-ruban. :

Ces antennes peuvent être faites de diverses conceptions. Les formes de base comme la circulaire, le rectangulaire, carré, semi-circulaire, etc. forment une section majeure de la recherche dans ce domaine. Ils peuvent être modifiés en fonction de l'utilisation en ajoutant des machines à sous, des monopoles, des tableaux, etc. Il y a des exemples de certains types de base d'antennes de correctif [23].

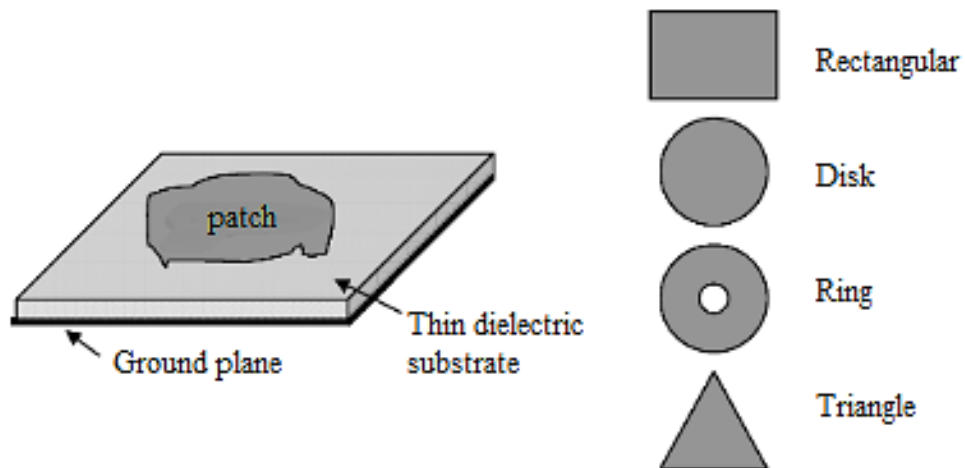


FIGURE II.17 – Différentes géométries possibles du patch dans une antenne micro-ruban[24]

— **Antenne Patch micro ruban rectangulaire :**

Malgré la diversité des antennes patch la structure rectangulaire est la configuration d'antenne micro ruban la plus couramment utilisée, grâce à sa conception aisée, son analyse théorique simple et ses performances adéquates dans diverses applications parmi les nombreuses configurations possibles.

Ce format facilite une modélisation efficace et une intégration facile dans les circuits imprimés. Effectivement, l'antenne patch rectangulaire est fréquemment le premier sujet d'étude et de conception dans le domaine des antennes micro ruban, particulièrement pour les applications qui opèrent dans les bandes de fréquence ISM, telles que le Wi-Fi ou le Bluetooth. Elle représente un équilibre idéal entre compacité, performance et directivité, faisant d'elle une candidate parfaite pour une première analyse détaillée [16].

II.2.6 Avantages et inconvénients des antennes patch micro-ruban :

Cette section présente les avantages et les inconvénients de l'utilisation du patch micro ruban ainsi que les différentes zones de son application.

A)Avantages des antennes Patch micro-ruban : Cette section résume les principaux atouts des antennes patch, tout en mettant en lumière

Leurs applications pratiques variées, même si plusieurs de leurs caractéristiques ont déjà été discutées précédemment. Les antennes patch micro-ruban offrent des bénéfices qui expliquent leur adoption massive dans les systèmes de communication contemporains.

Grâce à leur conception légère et leur profil bas, elles s'intègrent facilement sur des surfaces planes ou irrégulières, offrant ainsi une vaste flexibilité mécanique. Elles sont librement et économiquement produites en grande quantité, et peuvent être facilement combinées avec d'autres circuits sur un substrat identique.

Ces antennes sont capables de réaliser une polarisation linéaire comme circulaire grâce à des mécanismes d'alimentation simples. Elles peuvent être réduites en taille pour s'adapter aux exigences des appareils mobiles, et permettre un fonctionnement à fréquence double ou triple, élargissant ainsi leur éventail d'utilisations. Leur performance en tant que radiateurs, leur discrétion, ainsi que leur résistance aux impacts et vibrations renforçant leur fiabilité pour les appareils.

La ligne d'alimentation peut être directement inscrite sur le même substrat que le patch, ce qui facilite encore plus le processus de fabrication. Ces caractéristiques font des antennes patch un choix idéal pour diverses applications commerciales, comme le GPS, Zigbee, Bluetooth, WiMAX, Wi-Fi, la RFID, les radars, ou encore la télédétection [24].

B) Inconvénients des antennes Patch micro-ruban :

Il existe plusieurs inconvénients associés aux antennes de patch micro-ruban :

- Dans sa forme de base, l'antenne micro-ruban a une largeur de bande d'impédance étroite, généralement inférieure à 5 %. Cependant, diverses techniques de largeur de bande passante ont été développées. Jusqu'à 50% de bande passante ont été réalisées. Il est généralement vrai que la bande passante plus large est réalisée avec le sacrifice d'un accroissement de la taille globale de l'antenne.

- En raison de la petite séparation entre le patch rayonnant et son plan de masse, l'antenne micro-ruban peut gérer une puissance RF relativement faible. La puissance moyenne considérée comme sûre est de quelques dizaines de watts.

- Bien qu'un seul élément de patch entraîne généralement très peu de perte car il ne dure qu'environ une demi-vague, les réseaux de micro-ruban ont généralement une perte ohmique plus importante que les tableaux d'autres types d'antennes de taille d'ouverture équivalente. Cette perte ohmique se produit principalement dans le substrat diélectrique et le conducteur métallique du réseau d'alimentation en ligne de microruban et du circuit de division de puissance [24].

II.2.7 Application des antennes patch micro-ruban :

Ces dernières années, de nombreux concepteurs d'antennes ont porté une attention particulière à l'amélioration des différentes caractéristiques des MPAs pour des applications spécifiques comme les ondes millimétriques, les technologies WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), WLAN (Wireless Local Area Network) et Ultra-Wideband (UWB) systems [24].

II.3 Technologies d'Antennes pour la 5G :

II.3.1 Les antennes MIMO :

II.3.1.1 Définition :

Les systèmes d'antennes MIMO (Multiple Input - Multiple Output) exploitent l'emploi simultané de plusieurs antennes tant à la transmission qu'à la réception. À la différence des antennes traditionnelles, MIMO autorise l'échange de plusieurs canaux de données en parallèle, permettant d'améliorer la capacité du canal sans nécessiter une augmentation de la bande passante [26].

II.3.1.2 Le fonctionnement des antennes MIMO :

Dans les réseaux 5G, diverses méthodes sont utilisées pour tirer parti de la technologie MIMO afin d'optimiser les performances.

- **Multiplexage spatial** : La technologie MIMO autorise des taux de transfert de données supérieurs en comparaison avec les systèmes traditionnels à un seul point d'entrée et de sortie (SISO), car plusieurs flux de données peuvent être acheminés en même temps sur la même fréquence grâce au multiplexage spatial. Plus le nombre de couches MIMO s'accroît, plus le taux de transfert global du système se renforce également.

- **Diversité spatiale** : es paramètres de diversité MIMO, y compris le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC), le coefficient de réflexion actif total (TARC), la capacité du canal, le gain effectif moyen (MEG) et l'efficacité spectrale, jouent un rôle crucial dans les performances et l'efficacité des antennes MIMO. Ces paramètres contribuent collectivement à la performance, la fiabilité et l'efficacité des antennes MIMO. En optimisant ces paramètres, les systèmes MIMO peuvent atteindre des débits de données plus élevés, une meilleure qualité de signal, une capacité système améliorée et une meilleure utilisation des ressources sans fil disponibles, permettant ainsi la mise en œuvre d'applications avancées de communication sans fil.

- **Beamforming** : Cette méthode permet de cibler un utilisateur spécifique en focalisant l'énergie du signal dans un certain sens. Cela permet d'améliorer la qualité de la connexion tout en minimisant les perturbations avec d'autres utilisateurs.

- **Massif MIMO** : En 5G, on déploie des stations de base dotées de dizaines, voire de centaines d'antennes. Cela permet de satisfaire plusieurs utilisateurs en même temps tout en offrant un haut débit et une grande efficacité spectrale [26].

II.3.1.3 Avantage des antennes MIMO :

- Augmentation significative du débit.
- Amélioration de l'étendue et de la fiabilité.

- Efficacité spectrale améliorée.
- Capacité de connexion à grande échelle (IoT, villes intelligentes, etc.).

II.3.2 Antennes à réseau phasé

II.3.2.1 Définition :

Les Antennes à réseau phasé, également connues sous le nom de Phased Array Antennas, sont des équipements qui permettent de contrôler électroniquement les faisceaux d'ondes radio sans avoir besoin de bouger physiquement l'antenne. En introduisant des décalages de phase dans les signaux acheminés vers divers composants du réseau, on génère une interférence constructive dans une direction donnée, formant ainsi un faisceau orienté. Cette méthode est particulièrement bénéfique dans les technologies sans fil telles que la 5G, où la précision et la flexibilité revêtent une importance capitale [27].

II.3.2.2 Fonctionnement des antennes a réseaux phasés :

Les antennes à réseau phasé opèrent en modifiant la phase des signaux transmis aux divers composants du réseau. En modifiant la phase des signaux transmis à chaque antenne, on peut orienter le faisceau radio de manière électronique sans nécessiter un déplacement physique de l'antenne.

Cette déviation électronique du faisceau offre une grande flexibilité comparée aux antennes classiques, qui exigent un mouvement physique pour modifier l'orientation du faisceau. Cette méthode permet d'orienter le faisceau de manière instantanée et précise, ce qui est essentiel dans des applications telles que les réseaux 5G, où l'étendue de la couverture et la gestion efficace des utilisateurs sont indispensables [27].

II.3.2.3 Types d'antennes à réseau phasé multifaisceaux :

- **MULA-analog-PA (Array à Phases Analogiques ULA Multibeam)** C'est un réseau linéaire multifaisceaux à phase analogique. Les composants sont organisés en une ligne droite et contrôlés de manière analogique, présentant un décalage de phase graduel entre chacun d'eux. Ce modèle est facile à déployer, toutefois son champ de couverture en azimut est restreint à approximativement 180°.

- **MULA-digital-PA (Multibeam ULA Digital Phased Array)** : Ce réseau est aussi linéaire, cependant, la commande se fait de manière numérique. Chaque composant peut être ajusté avec une plus grande précision (phase et amplitude). Cela offre une flexibilité et une performance accrues, mais entraîne une augmentation de la complexité et des coûts. L'amplitude en azimut est toujours restreinte à 180°.

- **analog-PA (Multibeam Cylindrical Analog Phased Array)** : Ce modèle emploie une structure cylindrique pour les composants, accompagnée d'un contrôle analogique.

Cette géométrie offre une couverture azimutale complète de 360°. Il est plus sophistiqué que les réseaux linéaires tout en demeurant moins onéreux que son homologue numérique.

- **MC-digital-PA (Multibeam Cylindrical Digital Phased Array)** : Il s'agit du type le plus évolué. Il associe une structure en forme de cylindre à une commande numérique. Il propose une portée de 360°, la création simultanée de multiples faisceaux, et une grande souplesse dans l'ajustement du faisceau. Toutefois, cela le rend plus complexe et onéreux[27].

TABLE II.1 – Tableau comparatif des classifications d'antennes

Critère de classification	Types d'antennes	Caractéristiques principales	Applications typiques
Par géométrie / structure physique	Filaires (dipôle, monopôle, hélice) Ouverture rayonnante (cornet, fente) Réflecteur (parabole, Cassegrain) Imprimée (patch, micro-ruban) Réseaux (linéaire, planaire) Fractale	Structure déterminée physiquement; performances dépendant des dimensions et formes	Radio, radar, satellite, 5G, Wi-Fi, IoT
Par directivité	Omnidirectionnelle Semi-directionnelle Directionnelle	Décrit le motif de rayonnement (dans toutes les directions ou dans une direction précise)	Wi-Fi, téléphonie mobile, liaisons point-à-point
Par technologie / intelligence	MIMO Massive MIMO Réseau phasé Adaptative Intelligente Reconfigurable	Antennes modernes contrôlables par électronique; optimisation de la direction, la fréquence, etc.	Réseaux 5G/6G, radar, véhicules autonomes, IoT avancé
Par bande de fréquence	HF/VHF/UHF SHF (micro-ondes) EHF (ondes millimétriques)	Couvre selon la gamme de fréquence utilisée; influence les matériaux et application	Communication sans fil, radar, spatial, mmWave, 5G
Par application	Télécom (MIMO, patch, phasé) IoT (miniature, imprimée) Militaire (réseau, directivité) Médical (implantables)	Dépend des besoins de l'environnement ou de l'usage final	Smartphones, satellites, capteurs, hôpitaux, drones

Chapitre III

Étude et simulation d'une antenne patch 5G dans sous HFSS

III.1 Introduction :

L'expansion constante des outils de simulation numériques est portée par l'amélioration continue de la capacité de calcul des ordinateurs. Ces techniques facilitent la modélisation de structures de plus en plus complexes, simplifiant par conséquent le calcul des grandeurs électriques et magnétiques. L'outil numérique s'est donc imposé comme un élément essentiel pour la conception et la simulation de dispositifs électromagnétiques, notamment dans le domaine des antennes à large bande et des communications sans fil.

Il existe actuellement une multitude de logiciels de simulation disponibles. Le choix de ces programmes est essentiellement déterminée par le genre d'application, l'exactitude souhaitée, la capacité de traitement requise et le type de paramètres à simuler [29].

III.2 Présentation du logiciel de simulation HFSS :

HFSS (High Frequency Simulator Structure) est un simulateur électromagnétique de haute performance, spécialisé dans les hyperfréquences, il permet de modéliser et simuler en trois dimensions (3D) les champs globaux rayonnés par diverses structures hyperfréquences telle que les antennes, les filtres, les guides, les connecteurs et les cartes PCB... Ce logiciel permet de fournir les paramètres essentiels pour l'analyse des antennes, notamment le gain, le SAR, le VSWR et le S11.... [22]

III.2.1 Rappels sur les équations de Maxwell :

Avant d'aborder la phase de simulation de l'antenne patch à l'aide du logiciel HFSS, il convient de rappeler les lois fondamentales qui gouvernent le comportement des champs

électromagnétiques, à savoir **les équations de Maxwell**.

Ces lois expriment la manière dont les champs électrique (\vec{E}) et magnétique (\vec{B}) interagissent entre eux, se propagent dans l'espace, et sont produits par la présence de charges électriques (ρ) et de courants électriques (\vec{J}).

Dans un milieu supposé linéaire, homogène, isotrope et non conducteur, ces lois peuvent être exprimées sous leur forme différentielle comme suit [6] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Loi de Gauss pour l'électricité}) \quad (\text{III.1})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Loi de Gauss pour le magnétisme}) \quad (\text{III.2})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Loi de Faraday}) \quad (\text{III.3})$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Loi d'Ampère-Maxwell}) \quad (\text{III.4})$$

L'ensemble de ces quatre équations, intimement liées, permet de décrire avec précision le phénomène de rayonnement électromagnétique généré par une antenne. Dans le cas spécifique de ce mémoire, l'antenne patch conçue pour fonctionner à 38 GHz émet des ondes planes qui se propagent dans l'air à partir d'un substrat diélectrique.

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) résout ces équations par le biais de la **méthode des éléments finis (FEM)**, une technique numérique puissante adaptée à l'analyse des structures électromagnétiques complexes. Cette approche prend en compte :

- les conditions aux limites imposées (telles qu'un plan de masse ou une surface rayonnante ouverte);
- les caractéristiques physiques des matériaux (comme la permittivité relative, la conductivité ou l'épaisseur);
- le type de source excitatrice utilisée (ligne micro-ruban, alimentation coaxiale, etc.).

Ainsi, les équations de Maxwell constituent le socle théorique indispensable à toute simulation électromagnétique rigoureuse, notamment dans le contexte des hautes fréquences exploitées par la technologie 5G [6].

III.3 Méthode de résolution utilisée dans HFSS :

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel qui utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour résoudre de manière numérique les équations de Maxwell dans un espace tridimensionnelle. Cette approche implique la fragmentation de l'espace examiné en petites unités (maillage), où les équations sont localement résolues. Cela permet

une modélisation précise du comportement des champs électromagnétiques tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'antenne.

III.4 Description de la construction d'une antenne patch rectangulaire sous HFSS :

III.4.1 Description de la structure de l'antenne étudiée :

La figure III.1 illustre la géométrie d'un patch rectangulaire de longueur L_p et de largeur w_p imprimée sur un substrat diélectrique d'une épaisseur h , caractérisé par une permittivité ϵ_1 et une perméabilité μ_1 .

Ce substrat repose sur un plan de masse parfaitement conducteur de dimension $L_s * W_s$.

Le plan de masse, bien que de dimensions finies dans notre modélisation, est considéré comme suffisamment étendu pour se comporter comme un plan infini sur le plan électromagnétique. Le patch est alimenté par une ligne de transmission de type micro-ruban de dimensions $L_f * W_f$, connectée à un port d'excitation de type Wave Port. L'ensemble est entouré d'un domaine d'air (air box), servant de milieu de propagation et de limite du domaine de simulation.

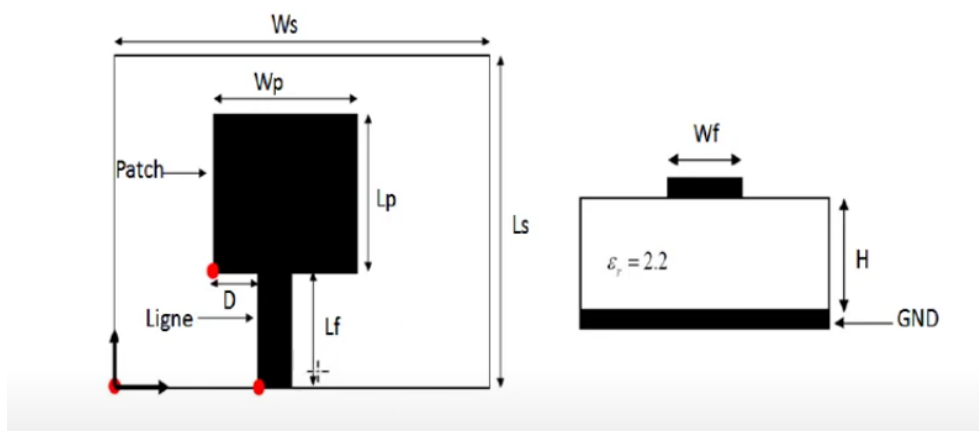


FIGURE III.1 – Schéma de la structure de l'antenne patch micro-ruban

III.4.2 Description des paramètres utilisés :

1. choix de la fréquence Dans le cadre de notre projet, nous visons une fréquence centrale de 38 GHz, qui se situe dans la bande n260 définie par le 3GPP pour la technologie 5G NR (New Radio). Cette gamme de fréquences, qui couvre de 37 GHz à 40 GHz, est classée comme appartenant aux bandes millimétriques (mmWave) de la 5G, reconnues pour proposer des débits très élevés (plusieurs Gbps), une latence très faible ainsi qu'une densité élevée de connexion.

Malgré leur portée réduite, ces ondes sont parfaitement adaptées aux applications dans des environnements denses tels que les centres-villes, les stades ou les gares.

2. Choix du substrat : Le matériau choisi est le RT/Duroid 5880, un substrat de haute performance fréquemment utilisé pour les hautes fréquences. Il est utilisé pour les applications RF et micro-ondes exigeantes.

Voici ses caractéristiques principales :

- Permittivité relative faible (ϵ_r) : 2.2, favorisant une réduction des dimensions de patch tout en garantissant un confinement efficace du champ électromagnétique.
- Facteur de perte diélectrique ($\tan \delta$) : 0.0009, ce qui réduit significativement les pertes dans le substrat et optimise l'efficacité générale de l'antenne.
- Épaisseur du substrat (H) : 1.27 mm

Cette décision est justifiée par la faible dissipation diélectrique, essentielle à ces fréquences, ainsi que par la stabilité des performances dans les bandes millimétriques.

3. Choix de la ligne de transmission : La transmission utilisée pour l'alimentation de notre antenne est de type micro-ruban, elle permet de faciliter la fabrication sur des substrats plats. Son principal avantage réside dans sa compacité et sa facilité d'intégration aux circuits imprimés, et dans la flexibilité de son impédance caractéristique, grâce à l'ajustement de la largeur de la ligne. Cette dernière est exploitée pour une impédance de 50 ohms, garantissant une adaptation optimale avec la source et une transmission efficace de la puissance.

III.5 Calcul des dimensions de l'antenne patch rectangulaire étudiée :

L'estimation des dimensions du patch a été réalisée via le modèle de ligne de transmission, qui offre la possibilité d'évaluer les dimensions de résonance en relation avec la fréquence visée, la permittivité du substrat et sa hauteur.

III.5.1 Formules utilisées :

1. Largeur du patch W :

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad [11] \quad (\text{III.5})$$

2. Permittivité effective ϵ_{eff} :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad [11] \quad (\text{III.6})$$

3. Longueur effective du patch L_{eff} :

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} [11] \quad (\text{III.7})$$

4. Correction de frange ΔL :

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \Delta L = 0.412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} [11] \quad (\text{III.8})$$

5. Longueur réelle du patch L :

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L [11] \quad (\text{III.9})$$

III.5.2 Les dimensions finales retenues :

Les dimensions initiales du patch (longueur et largeur) ont été définies en utilisant un calculateur d'antenne patch rectangulaire en ligne, en mentionnant la fréquence de résonance désirée (38 GHz), la permittivité relative ($\epsilon_r = 2.2$) ainsi que l'épaisseur du substrat ($H = 1.27$ mm).

Ces dimensions ont par la suite été modifiées manuellement dans HFSS pour améliorer le coefficient de coefficient de réflexion (S11) qui doit être inférieur à -10 dB ($S_{11} < -10$ dB) et obtenir une adaptation d'impédance se rapprochant de 50 ohms, mais aussi un meilleur rapport d'onde stationnaire (VSWR) inférieur à 2 ($VSWR < 2$) et un schéma de rayonnement optimal à la fréquence visée.

Le tableau ci-dessous englobe les paramètres des éléments de la structure :

Nom	Symbole	Valeur	Unité
Largeur du substrat	W_s	6	mm
Longueur du substrat	L_s	6	mm
Épaisseur du substrat	H	1.27	mm
Largeur de patch	W_p	3.119	mm
Longueur de patch	L_p	1.7375	mm
Longueur de la ligne d'alimentation	L_f	2.2	mm
Largeur de la ligne d'alimentation	W_f	0.8	mm
Espacement entre patche	D	1.2	mm

TABLE III.1 – Dimensions physiques de l'antenne patch rectangulaire

III.6 Étapes de conception :

Pour pouvoir simuler la structure précédente, il est essentiel de suivre les prochaines étapes :

- Créer un nouveau projet sous HFSS
- Sélectionner le mode de simulation : Driven Modal.
- Dessiner le substrat sous forme d'un box de dimensions mentionnées dans le tableau 3.1

Longueur = l_s , Largeur = ω_s , Hauteur = h .

- Attribuer au substrat le matériau Rogers RT/Duroid 5880 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 2.2$
- Modéliser trois plaques rectangulaires

Tracer deux sur la face supérieure du substrat, une représentant le patch avec les dimensions $l_p * \omega_p$, l'autre représentant la ligne d'alimentation avec les dimensions $l_f * \omega_f$. Une troisième plaque imprimée sur la face inférieure représentant le plan de masse ($l_s \times \omega_s$).

- Fusionner les entités (patch et ligne micro-ruban)

Cette étape se fait à l'aide de l'opération booléenne Unite (Union).

- Attribuer la condition de conducteur électrique parfait (PEC- Perfect E)

Cette condition attribuée aux trois plaques permet de modéliser un métal parfait afin de réfléchir entièrement les ondes électromagnétiques sans aucune perte . Les figures ci-dessous illustrent la condition de perfect E sur les trois plaques.

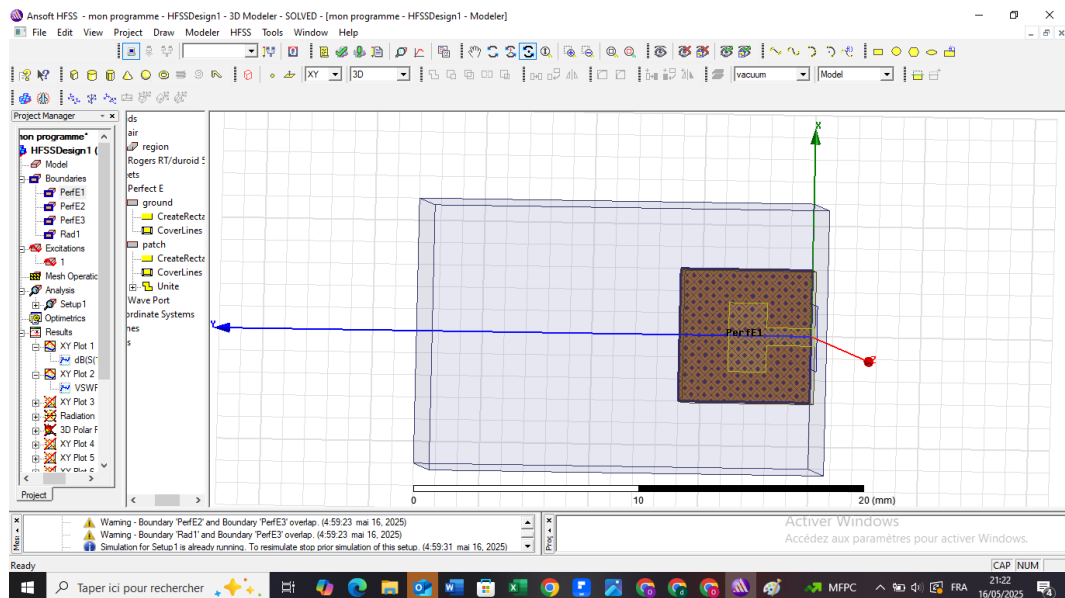


FIGURE III.2 – Attribution de la condition Perfect E au plan de masse

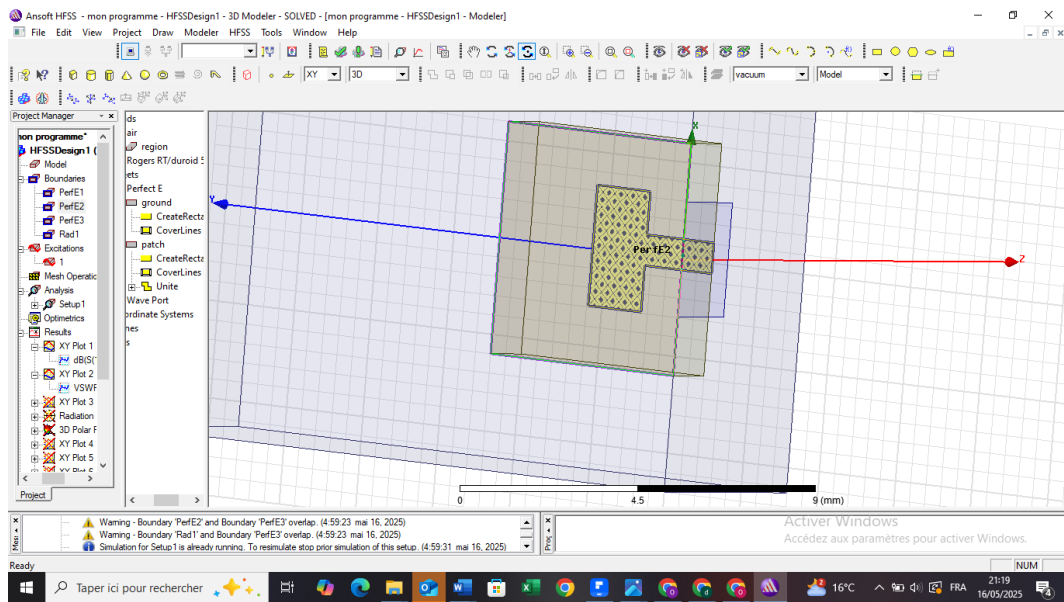


FIGURE III.3 – Attribution de la condition Perfect E au Patch Attribution de la condition Perfect E au Patch

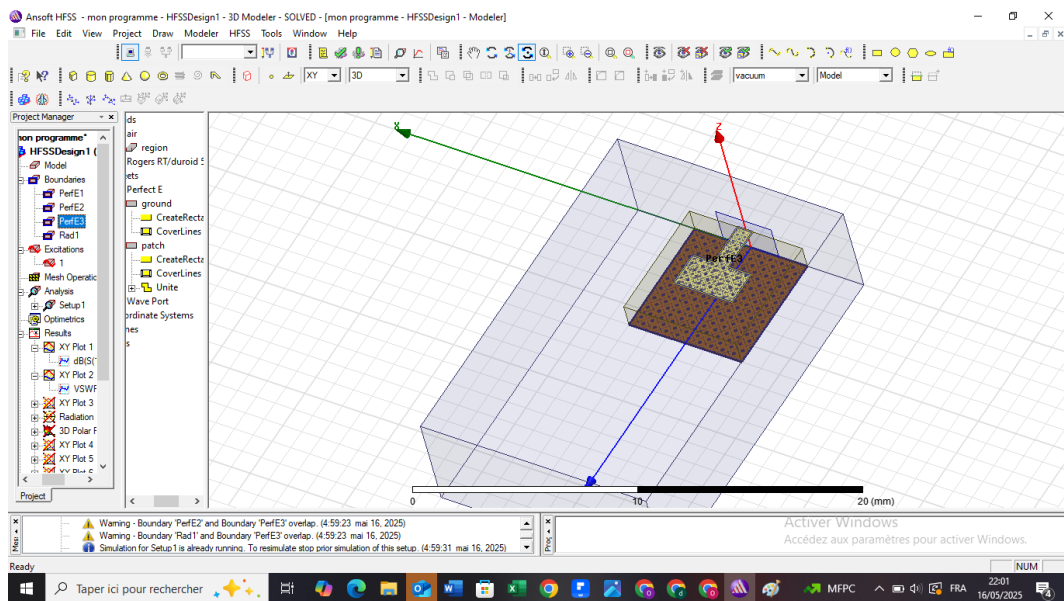


FIGURE III.4 – Attribution de la condition Perfect E au Patch

— Appliquer les dimensions comme illustré dans la figure III.1 et le tableau dans la figure III.1

— Définir l'excitation

Dessiner un rectangle vertical à l'extrémité de la ligne d'alimentation, en respectant les dimensions indiquées dans le tableau puis attribuer à cette surface une excitation de type Wave Port .

Créer une box d'air entourant toute la structure :

- Dimensions typiques : $2 * l_s \times 2 * \omega_s \times 20 * h$.
- Affecter à cette box des conditions de radiation.
- Important : s'assurer que le Wave Port est bien en contact avec la surface des limites de radiation.

— S'assurer de la bonne configuration de tous les paramètres selon le tableau ci-dessous

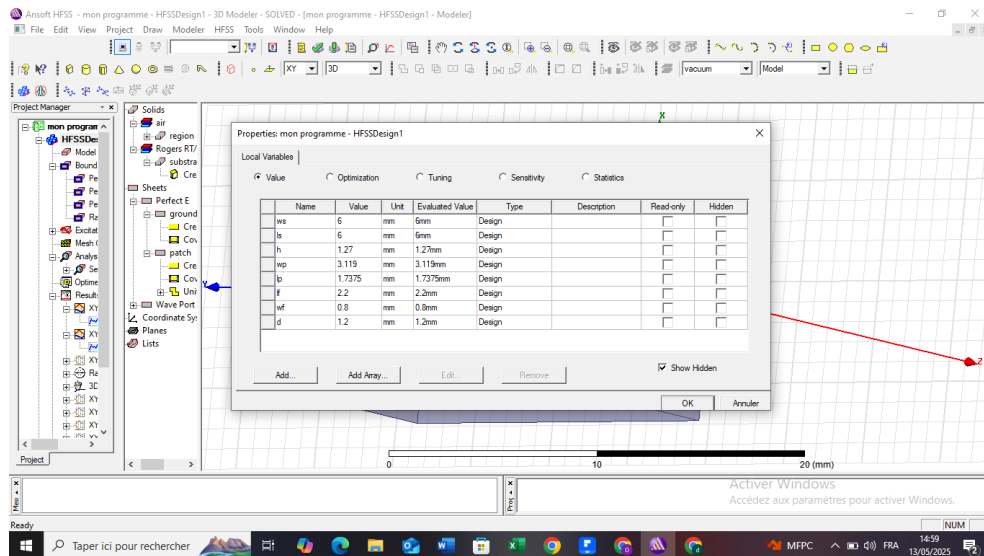


FIGURE III.5 – tableau des paramètres insérés sous HFSS.

— **Définition du setup de simulation :**

Sweep fréquentiel de 20 GHz à 80 GHz

— **Valider et lancer la simulation.**

Le figure ci-dessous illustre la conception finale de l'antenne patch rectangulaire

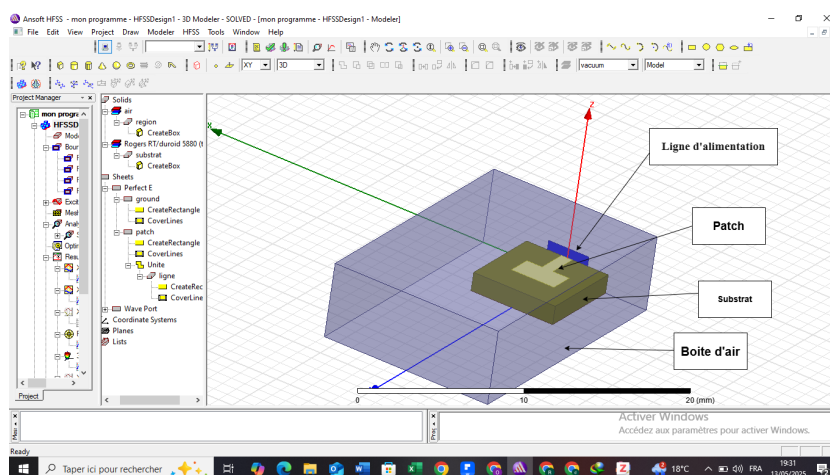


FIGURE III.6 – Conception du modèle 3D de l'antenne micro-ruban avec ligne d'alimentation.

III.7 Évaluation et interprétation des résultats de la simulation

Lorsque la simulation se termine on va dans la section Project Manager puis dans la section résultats. Ces résultats permettent d'étudier et d'évaluer les performances de l'antenne simulée tels que :

A -Coefficient de réflexion (S11) : Le coefficient de réflexion a pour but de déterminer l'adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation. Le graphique du coefficient de réflexion S_{11} montre une résonance marquée à 38 GHz, correspondant à un creux atteignant environ -20 dB. Cela indique une excellente adaptation d'impédance, avec moins de 1% de puissance réfléchie, ce qui est bien inférieur au seuil critique de -10 dB généralement admis pour les applications en radiofréquence.

La bande passante utile, définie comme la plage de fréquences pour laquelle S_{11} , s'étend approximativement de 37 GHz à 39 GHz, soit une largeur de bande d'environ 2.5 GHz.

Cette bande se situe dans la plage des fréquences millimétriques visée par la norme 5G NR, notamment la bande n260 (de 37 à 40 GHz). Cette compatibilité assure un fonctionnement optimal de l'antenne dans les scénarios de communication 5G à très haut débit, avec un minimum de pertes dues aux réflexions. Par ailleurs, la présence de deux minima secondaires à 34.80 GHz (-9.99 dB) et 61.60 GHz (-9.76 dB) témoigne d'un potentiel multibande intéressant, qui pourrait être exploité avec des ajustements mineurs de la structure.

La figure III.7 représente le résultat du coefficient de réflexion de l'antenne étudiée .

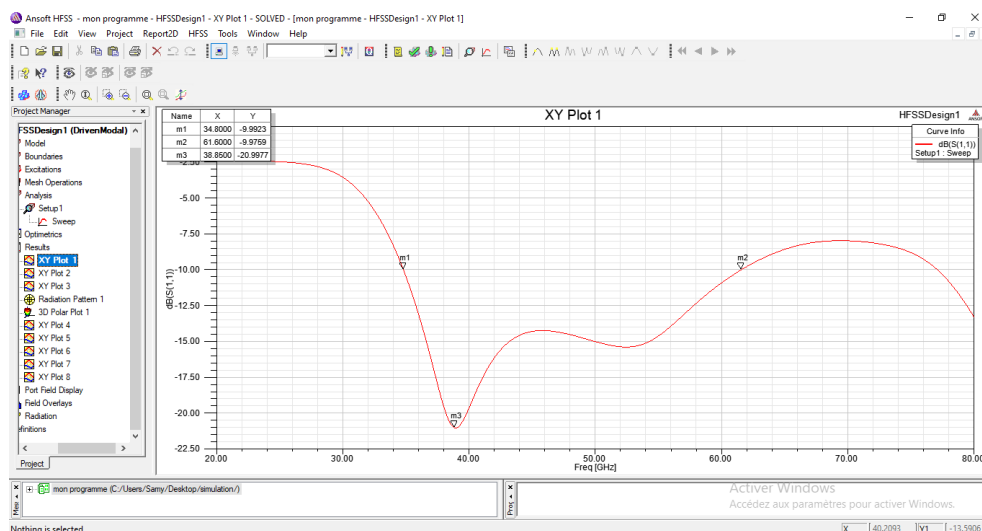


FIGURE III.7 – Tracé de la courbe S11 de l'antenne étudiée.

B - Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La courbe présentée dans la figure III.8 montre clairement l'évolution du VSWR en fonction de la fréquence. On observe que la valeur de VSWR diminue à partir de 35 GHz, ce qui indiquant une amélioration progressive de l'adaptation A 38 GHz (fréquence ciblée), le VSWR atteint jusqu'à 1.23, traduisant une très bonne adaptation d'impédance, cela indique que la puissance réfléchiée est minimale, ce qui est crucial pour assurer une efficacité rayonnante optimale.

De plus, le VSWR reste en dessous de 2 sur une large gamme de fréquences, attestant d'une bande passante utile assez étendue pour les applications 5G.

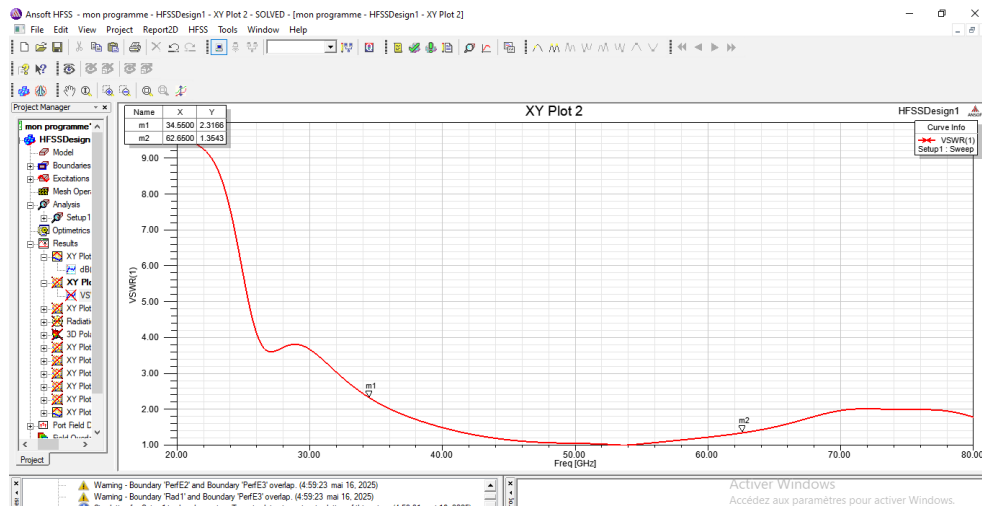


FIGURE III.8 – Comportement du VSWR de l'antenne dans la bande simulée

C -Diagramme en 3D du gain de l'antenne simulée :

Selon les simulations, l'antenne démontre un gain maximal de 4.99 dB à 38 GHz. Ce niveau de gain est acceptable pour une simple antenne patch, qui propose une bonne directivité et un rayonnement approprié pour des applications en 5G, particulièrement dans les milieux denses où les liaisons directionnelles sont favorisées.

La figure III.9 nous permet de visualiser le gain trouvé .

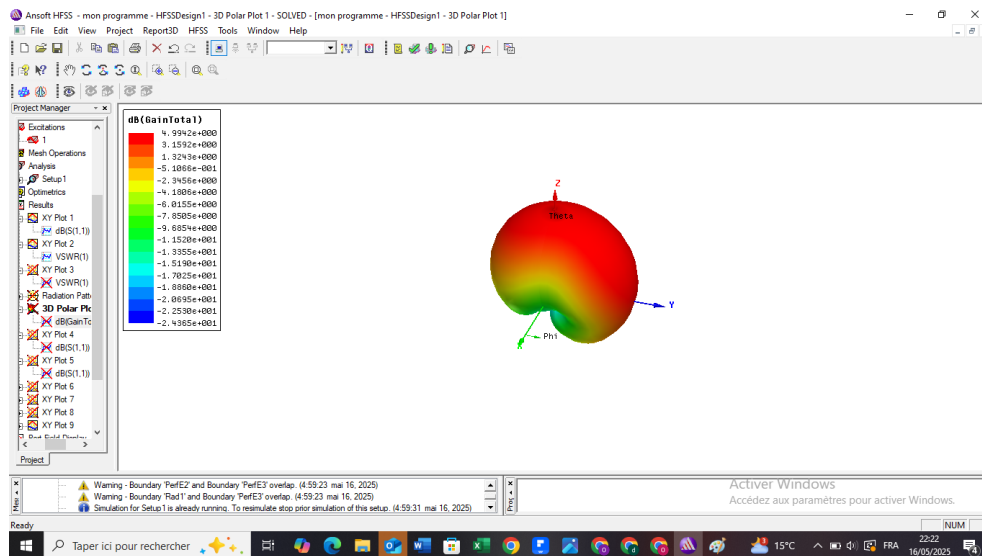


FIGURE III.9 – Représentation 3D du gain de l'antenne à 38 GHz

III.8 Comparaison avec d'autres topologies d'antennes :

Comparativement à d'autres configurations d'antennes telles que l'antenne patch circulaire ou les antennes en réseau (array), l'antenne patch rectangulaire offre une conception plus simple, un processus de fabrication facile et une intégration améliorée sur circuit imprimé. Cependant, les antennes circulaires peuvent apporter une polarisation circulaire bénéfique dans certaines applications mobiles. De plus, les antennes en réseau permettent un gain très élevé et la formation de faisceaux (beamforming), ce qui est crucial pour des environnements 5G hautement directionnels. L'option du patch rectangulaire dans ce contexte représente donc un équilibre entre efficacité, facilité d'utilisation et coût, idéal pour une première étape de conception.

III.9 Discussion critique des résultats obtenus :

La conception suggère de bonnes performances en termes de coefficient de réflexion (S11), de bande passante et de l'adaptation d'impédance. Cependant, certaines limitations persistent. En premier lieu, la bande millimétrique visée (environ 38 GHz) est fortement atténuée par l'atmosphère, ce qui restreint la portée réelle de l'antenne. Par ailleurs, les antennes patch affichent un gain faible et une directivité restreinte lorsqu'elles sont employées de manière individuelle. Dans une situation pratique utilisant la 5G, il est courant d'avoir besoin de réseaux à antennes multiples (MIMO) ou de méthodes d'amplification afin d'optimiser les performances globales. Finalement, bien que l'optimisation manuelle dans HFSS soit efficace en ce moment, l'utilisation de méthodes d'optimisation automatique (comme les algorithmes génétiques ou PSO) pourrait permettre d'obtenir des

résultats supérieurs.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons élaboré et simulé une antenne patch rectangulaire pour 38 GHz prévue pour les applications 5G. L'utilisation du substrat RT/Duroid 5880 garantit une excellente performance en haute fréquence, en particulier grâce à sa permittivité basse et de ses pertes diélectriques minimales. Avec HFSS 13.0, nous avons réussi à modéliser avec précision la structure, à établir les conditions de simulation adéquates et à étudier les résultats obtenus. Les résultats concernant le coefficient de réflexion (S11), le rapport d'onde stationnaire, le diagramme de rayonnement et le gain attestent que l'antenne est parfaitement conçue pour la bande millimétrique recherchée, présentant une excellente efficacité de rayonnement et une adaptation idéale à l'impédance à 38 GHz.

III.11 Perspectives futures :

Pour l'avenir, on peut envisager des progrès tels que l'emploi de structures à substrat multicouche, la réduction de la taille de l'antenne ou encore l'intégration d'éléments à réactance variable pour concevoir une antenne reconfigurable, adaptée aux exigences dynamiques des réseaux 5G.

Conclusion Générale

En conclusion de ce mémoire, nous avons étudié, conçu et simulé une antenne patch micro-ruban spécifiquement destinée à la technologie 5G, avec une fréquence opérationnelle ciblée de 38 GHz. Cette recherche se déroule dans le cadre de la progression rapide des réseaux de télécommunication, avec la cinquième génération (5G) qui constitue une avancée considérable en termes de vitesse, de latence, de densité de connexion et d'innovations en matière d'applications. Initialement, nous avons exposé les principes de base de la technologie 5G, en traçant l'historique des différentes générations de réseaux mobiles. Nous avons également souligné les besoins particuliers de cette nouvelle norme et les approches techniques résultantes, comme le Massive MIMO, les Small Cells ou l'utilisation des bandes millimétriques. Par la suite, nous avons analysé les diverses sortes d'antennes employées dans les systèmes de communication, en mettant l'accent sur les antennes patch micro-ruban. Celles-ci sont favorisées pour la 5G en raison de leur taille réduite, de leur facilité d'intégration et de leurs performances satisfaisantes à des fréquences élevées. Pour finir, une antenne patch rectangulaire a été conçue et simulée en utilisant le logiciel HFSS. Cette phase a permis de déterminer les dimensions de l'antenne, d'analyser ses caractéristiques électromagnétiques (comme le paramètre S11, le VSWR, le diagramme de rayonnement, le gain, etc.) et d'évaluer ses performances en lien avec les exigences de la 5G. Les résultats obtenus confirment que l'antenne étudiée est bien adaptée aux besoins applications 5G ciblées, en particulier dans la gamme des ondes millimétriques. Cependant, comme pour toute recherche de conception, il est toujours possible d'apporter des améliorations. On peut notamment envisager l'exploration de géométries plus sophistiquées, Le déploiement de technologies MIMO, ou encore l'emploi de nouveaux matériaux à faible perte pour optimiser davantage les performances. Ainsi, ce mémoire représente une contribution modeste mais tangible à la compréhension et à l'amélioration des structures d'antennes pour la 5G. Il ouvre également la voie pour des recherches plus avancées à l'avenir, en particulier dans des conditions réelles, avec des validations expérimentales sur banc d'essai et une exploration de générations futures comme la 6G.

Bibliographie

- [1] Badis Hakim, « Etude et conception d'algorithmes pour les réseaux mobiles et ad-hoc », thèse, L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD, France, 2011.
- [2] Ibrahim Mohamat Abdelrahim, simulation d'une architecture de la voix sur LTE. 2017.
- [3] « Réseaux mobile 2G, 3G, 4G, 5G : les différentes technologies expliquées ». Consulté le : 27 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://selectra.info/telecom/guides/technologies/reseaux-mobile>
- [4] « Qu'est-ce que l'architecture de réseau 5G? » Consulté le : 26 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>
- [5] Ines Mansour et Messaoudi Mostefa, « Etude et conception d'une antenne à Ondes millimétriques pour des réseaux 5G », mémoire, UNIVERSITE ABOU BEKR BEL-KAID FFTLEMCEN, algérie, 2021.
- [6] Salim Bennoud et M.Zergoug, « Résolution numérique des équations du Maxwell dans le cas quasistationnaire », Meknès, Maroc, avril 2017. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/321492024>
- [7] K. Md. Sarwar, I. Md. Sarwar Kamal, Uddin Md. Sarwar Kamal, et Imran A.Z.M, « Design of a Tri-Band Microstrip Patch Antenna for 5G Application »
- [8] « Réseaux mobile 2G, 3G, 4G, 5G : les différentes technologies expliquées ». Consulté le : 17 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://selectra.info/telecom/guides/technologies/reseaux-mobile>
- [9] Si Ali Habib et Benamara Imene, « Antenne Patch Pour La 5G Millimétrique », mémoire, Ain-Temouchent- BelhadjBouchaib, Ain-Temouchent, 2022.
- [10] Benelhadjeloul Assia et Larbi Zohra, « Qualité de service (QoS) dans les réseaux mobiles 4G », mémoire, Université d'Ibn Khaldoun – Tiaret, Algérie, 2015.
- [11] Meriem Driss, « Étude et conception d'antennes réseaux intelligentes 5G pour les 'small cell' », thèse, Normandie université, France, 2023
- [12] Ouleha Ouassim et Didouna Salahdine, « Etude des performances de modulation UPMC Pour les réseaux 5G », mémoire, Université 8Mai 1945 – Guelma, Guelma, 2019.

- [13] Marco Ajmone Marsan, Nicola Blefari Melazzi, Stefano Buzzi, et Sergio Palazzo, *The 5G Italy Book 2019 : a Multiperspective View of 5G. ITALY*.
- [14] N. Nathalie, « Impact of slicing on radio resource management in 5G for vehicular URLLC and eMBB », thèse, Institut Polytechnique de Paris, France, 2023.
- [15] Taleb Sarra, « Simulations de systèmes d'antennes pour imagerie micro-ondes », thèse, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2016.
- [16] Assane Ngom, « Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "Small Cells" pour le standard 5G ».
- [17] Carpentier David, et Ho Ho Sing, « Analyse de l'impact de la 5G sur les smart cities européennes », mémoire, 2020.
- [18] D. Imran, M. M. Farooq, M. I. Khattak, Z. Ullah, M. I. Khan, et H. Dar, « Millimeter Wave MicroStrip Patch Antenna for 5G Mobile Communication ».
- [19] Bansal Askach et Richa Gupt, « A review on microstrip patch antenna and feeding techniques », 2018.
- [20] Ghlouci Ismahéne et Gaci Rayhana, « SIMULATION DES NOUVELLES FORMES D'ANTENNES CORNETS EN TECHNOLOGIE SIW HYPERFREQUENCE. », mémoire, Université ABOU BERKR BELKAID, Algérie.
- [21] Bouakez Wafa et Khediri Aida, « CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ANTENNE PATCH POUR LES APPLICATIONS DE COMMUNICATION 5G », mémoire, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi– Tébessa –, Algérie, 2023.
- [22] E. O. A., Oulad-Said A., et M. H. M., « COMPARAISON DU MODELE DES ELEMENTS FINIS ET DU MODELE DE LA CAVITE POUR LA CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE MINIATURISEE ET ALIMENTEE PAR UNE LIGNE COAXIALE POUR LA BANDE ISM de 2.4 GH ».
- [23] Anuj Mehta, « Microstrip Antenna », *International Journal of Scientific & Technology Research*, p. 54-57, mars 2015.
- [24] Mariem Abdi, « Analysis of Wideband Iris-Fed Microstrip Patch Antenna Based on MOM-GEC Method », thèse, 2023.
- [25] Ahmed Fatthi Alsager, « Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays », thèse.
- [26] T. Raj, R. Mishra, P. Kumar, et A. Kapoor, « Advances in MIMO Antenna Design for 5G : A Comprehensive Review », *Sensors*, vol. 23, no 14, p. 6329, juill. 2023, doi : 10.3390/s23146329.
- [27] Tran Cao Quyen, « Réseaux d'antennes à commande de phase vers la 5G », in : *Advanced Radio Frequency Antennas for Modern Communication and Medical Systems*, 2020.

-
- [28] Djebbar Idir, « Etude d'un réseau UMTS, et possibilité de migration vers un réseau 3G. », memoire, Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou, 2013
- [29] Mr S. Tebache et Mr. Benakcha Abdelhamid, « Méthodes de caractérisation hyper fréquence des antennes imprimées », mémoire, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1G	Première génération de réseaux mobiles
2G	Deuxième génération de réseaux mobiles
3G	Troisième génération de réseaux mobiles
4G	Quatrième génération de réseaux mobiles
5G	Cinquième génération de réseaux mobiles
6G	Sixième génération de réseaux mobiles
Wi-Fi	Wireless Fidelity
GPRS	General Packet Radio Service
IoT	Internet of Things
GSM	Global System for Mobile Communication
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
PSK	Phase Shift Keying
LTE	Long Term Evolution
3GPP	3rd Generation Partnership Project
IP	Internet Protocol
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
UIT	Union Internationale des Télécommunications
SBA	Service-Based Architecture
SC	Single Carrier
UPF	User Plane Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AUSF	Authentication Server Function
SMF	Session Management Function
NSSF	Network Slice Selection Function
UDM	Unified Data Management
DN	Data Network

PCF	Policy Control Function
AF	Application Function
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
KPI	Key Performance Indicator
NR	New Radio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
BER	Bit Error Rate
FD	Full Duplex (transmission simultanée bidirectionnelle)
HD	Half Duplex (transmission non simultanée bidirectionnelle)
UE	User Equipment (équipement utilisateur)
BS	Base Station (station de base)
TDD	Time Division Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
HetNet	Heterogeneous Network
RAN	Radio Access Network
CN	Core Network
UDN	Ultra Dense Network
Uplink	Liaison montante (de l'utilisateur vers la station de base)
Downlink	Liaison descendante (de la station de base vers l'utilisateur)
MIMO	Multiple Input Multiple Output
Massive MIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
CoMP	Coordinated Multi-Point
CSI	Channel State Information
MSC	Mobile Switching Centre
VLR	Visitor Location Register
OMC	Operation and Maintenance Center
HLR	Home Location Register
AUC	Authentication Center
OMC	Operation and Maintenance Center
EIR	Equipment Identity Register
GHz	Gigahertz (10^9 Hz)
MHz	Mégahertz (10^6 Hz)
dB	Décibel (unité logarithmique)
dBm	Décibel milliwatt (unité de puissance)
dB/km	Décibel par kilomètre (atténuation par distance)
C	Vitesse de la lumière ($\sim 3 \times 10^8$ m/s)
λ_0	Longueur d'onde dans l'espace libre

mm	Millimètre
µm	Micromètre
ohm	Unité de résistance électrique
Prx	Puissance reçue (Received Power)
Ptx	Puissance transmise (Transmitted Power)
Gtx	Gain de l'antenne émettrice (Transmitter antenna gain)
Grx	Gain de l'antenne réceptrice (Receiver antenna gain)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (rapport signal sur bruit)
C	Capacité du canal (bits par seconde)
B	Bande passante (Hz)
HFSS	High Frequency Structure Simulator (logiciel de simulation électromagnétique)
CST	Computer Simulation Technology (logiciel de simulation)
FR4	Flame Retardant 4 (matériau de substrat)
PCB	Printed Circuit Board
RT/Duroid 5880	Matériau diélectrique à faibles pertes
PEC	Perfect Electric Conductor (conducteur parfait)
Wave Port	Port d'onde (excitation dans HFSS)
Yagi	Antenne directionnelle de type Yagi-Uda
Vivaldi	Antenne à fente large bande
MPA	Microstrip Patch Antenna (antenne patch micro-ruban)
\vec{E}	Champ électrique
\vec{H}	Champ magnétique
Ze	Impédance d'entrée de l'antenne
Zc	Impédance caractéristique de la ligne de transmission
Γ	Coefficient de réflexion
ρ	Rendement (efficacité) de l'antenne
BP	Bande passante
Fh	Fréquence haute de la bande passante
Fb	Fréquence basse de la bande passante
Fr	Fréquence centrale (ou fréquence de résonance)
ϵ_{eff}	Permittivité effective du substrat
ϵ_r	Permittivité relative
H	Épaisseur du substrat
W	Largeur du patch
Leff	Longueur effective du patch (avec correction de franges)
f0	Fréquence de résonance
ΔL	Correction de frange
L	Longueur réelle du patch
Ws	Largeur du substrat

Ls	Longueur du substrat
Wp	Largeur du patch
Lp	Longueur du patch
Lf	Longueur de la ligne d'alimentation
Wf	Largeur de la ligne d'alimentation
D	Espacement entre patches
GSMA	GSM Association
Web	World Wide Web
PIB	Produit Intérieur Brut
PwC	PricewaterhouseCoopers (cabinet d'audit et conseil)