

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

– جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications.

Réalisé par :

MASSOUM Assawer & RAKHROUKH Rabia

Thème

**Conception D'un Réseau D'antenne à Haute
Performance Pour Les Applications 5G**

Soutenu, le 28/ 06 / 2025, devant le jury composé de :

Mr N. BOUKLI HACENE	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr A. BERKAT	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr M. ABRI	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme H. METAHRI	Doctorante	Université de Tlemcen	Co-encadrante

Année Universitaire 2024-2025

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur **Mr N. BOUKLI HACENE**, président à qui nous témoignons une haute considération du fait de l'humilité de son engagement habituel en faveur des étudiants.

Nous remercions aussi Monsieur **Mr A. BERKAT**, examinateur du jury, pour avoir accepté notre invitation à dominer la soutenance de ce mémoire, avec tous nos remerciements et notre profond respect.

Nos remerciements vont à notre encadrant Monsieur **Mr M. ABRI**, pour ses remarques judicieuses, son calme chaleureux et ses mots sympathiques qui ont positivement influencé le statut d'avancement de ce travail.

Nous remercions avec une prévenance toute particulière notre encadrante assistante **Mme H. METAHRI**, pour ses conseils, pour sa bienveillance, pour sa disponibilité.

DEDICACE

À moi-même...

À celle que je n'étais plus,
À celle qui a décidé de changer, de briser les anciens schémas et d'affronter ses peurs avec
courage,
À celle qui est tombée puis s'est relevée, qui a pleuré en silence et mené ses combats dans
l'ombre,
À toi, mon moi... toi qui as semé l'espoir dans une terre aride, et arrosé les jours difficiles
avec patience,

Je te dédie ce travail, car il témoigne que tu n'as jamais abandonné,
Et parce que le véritable changement commence quand on choisit de se voir comme on le
mérite.

À ma famille,

Vous restez le poulx et le but de chacune de mes étapes.
Tout ce que j'ai déjà réalisé vient de vos prières, et chaque nouveau sommet cherchera vos
visages en retour.
C'est avec vous que les premiers pas ont été donnés, et grâce à votre amour j'avance encor.

À Rabia, ma partenaire et complice de route...

Tu n'as pas seulement partagé le chemin ; tu es devenue une part de mon cœur.
Dans la fatigue, nos mains se sont croisées, et dans le doute notre voix commune a rallumé la
flamme.
Ta présence ici n'est donc pas un hasard : elle est, à mes yeux, une véritable bénédiction.

ASSAWER

DEDICACE

Allhamdoulilah, grâce à qui les objectifs se réalisent après la certitude en lui, le chemin se termine par son succès, et le rêve se concrétise par sa grâce. Le voyage n'a pas été facile et ne devrait pas être rempli de défis entourés de réalisations passionnantes.

Ma mère, tu étais le cœur tendre et l'invitation qui m'a accompagné à chaque pas, et tu étais ma source de force à chaque moment de faiblesse.

Mon père, dont je porte le nom, qui a rassemblé les épines de mon chemin pour me préparer la voie de la connaissance.

Mon grand-père et ma grand-mère, pour leur sagesse et leurs prières qui m'accompagnent chaque jour. Grâce à votre amour, je suis arrivé à ce jour spécial. Votre présence remplit mon cœur de chaleur et de bonheur. Je demande à Dieu de vous accorder une santé et un bien-être durables.

À ma sœur Souhila et mes frères, à mon pilier inébranlable, et à ceux sur qui Dieu a fondé mon soutien, vous avez été les meilleurs alliés.

À Assawer, compagne de route, ma chère amie, ta présence à mes côtés allège le poids du chemin. Nous avons toujours été ensemble, nous nous soutenions mutuellement lorsque le chemin devenait lourd, et nous riions jusqu'à oublier nos douleurs. Tu étais la plus belle chose qui me soit arrivée à l'université.

À Marwa, ma cousine et complice d'âme, ma deuxième sœur, le refuge de mes secrets, tu as été avec moi tout au long du voyage avec tes prières, ton soutien et tes encouragements. Ta présence me rassure.

À Youssef, mon cousin, tu as été avec moi avec tes conseils, tes orientations et tes recommandations. Que Dieu te récompense en bien.

À toute la famille Rakhroukh, pour leur amour et leur solidarité.

RABIA

Résumé

Cette recherche a trait au concept d'un ensemble d'antennes de haute performance pour les applications relatives à la cinquième génération. Il commence avec les principes basiques concernant les antennes, leurs caractéristiques et leur rôle dans les transmissions sans fil. Cette mémoire met particulièrement l'accent sur les antennes micro-ruban (patch), du fait de leur compacité et de la facilité avec laquelle elles sont en mesure d'être intégrées et adaptées. Par la suite, il traite de l'avancement des réseaux sans fil jusqu'à la 5G, en mettant en évidence leurs spécificités, leur architecture, leurs applications dans plusieurs domaines et les perspectives inédites offertes par la technologie 5G. Tel que la miniaturisation des antennes pour appuyer les réseaux denses et à haute vitesse, des simulations et des résultats de réseaux d'antennes constitués de 2, 4 et 8 éléments ont été effectuées, démontrant une nette amélioration du gain ainsi qu'une optimale concordance (faible coefficient de réflexion) et diagramme de rayonnement, adéquate ainsi aux principes de performance de la cinquième génération.

Mots clés : antenne patch microstrip, réseau d'antennes, technologie de cinquième génération.

Abstract

This research deals with the concept of a set of high-performance antennas for fifth-generation applications. It begins with the basic principles regarding antennas, their characteristics, and their role in wireless transmissions. This memory places particular emphasis on microstrip (patch) antennas, due to their compactness and the ease with which they can be integrated and adapted. Subsequently, it addresses the advancement of wireless networks up to 5G, highlighting their specific features, architecture, applications in various fields, and the unprecedented prospects offered by 5G technology. Such as the miniaturization of antennas to support dense and high-speed networks. Simulations and results of antenna arrays consisting of 2, 4, and 8 elements were conducted, demonstrating a significant improvement in gain as well as optimal matching (low reflection coefficient), and radiation diagram suitable for the performance principles of the fifth generation.

Keywords: microstrip patch antenna, antenna array, fifth-generation technology

ملخص

يتناول هذا العمل تصميم مجموعة هوائيات عالية الأداء لتطبيقات الجيل الخامس. يبدأ بالمفاهيم الأساسية حول الهوائيات وخصائصها ودورها في الاتصالات اللاسلكية يركّز العمل بشكل خاص على هوائيات المايكرو شريط (Patch) نظرًا لحجمها الصغير وسهولة دمجها وتكيفها. ثم يتناول تطور الشبكات اللاسلكية وصولاً إلى 5G، مبيّنًا خصائصها وبنيتها وتطبيقاتها في مجالات مختلفة والفرص الجديدة التي تتيحها تقنية 5G كتصغير حجم الهوائيات لدعم الشبكات الكثيفة وعالية السرعة. تم إجراء محاكاة وتحليل لشبكات هوائيات مكونة من 2، 4، و 8 عناصر، أظهرت تحسينًا ملحوظًا في الكسب وتوافقًا جيدًا (معامل انعكاس منخفض) ومخطط الإشعاع ، مما يلبي متطلبات أداء الجيل الخامس.

الكلمات المفتاحية: هوائي باتش ميكروستريب، شبكة هوائيات، الجيل الخامس

Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Liste des Figures.....	X
Liste des Tableaux	XIII
Acronymes et Abréviations.....	XIV
Introduction Générale.....	XV'

CHAPITRE I : Notions sur les antennes

I.1	Introduction.....	1
I.2	Définition de l'antenne	1
I.3	Rôle d'une antenne.....	2
I.4	Caractéristiques d'une antenne	2
I.4.1	Impédance d'entrée de l'antenne	2
I.4.2	Diagramme de rayonnement	2
I.4.3	Directivité.....	3
I.4.4	Gain.....	3
I.4.5	Polarisation	3
I.4.6	Coefficient de réflexion.....	4
I.4.7	Fréquence de résonance et bande passante	4
I.4.8	Rapport d'onde stationnaire (ROS).....	4
I.5	Réseau d'antennes	5
I.5.1	Réseau D'antenne Linéaire.....	6
I.5.2	Réseau D'antenne Planaire	6
I.5.3	Réseau d'antenne circulaire	7
I.6	Types d'antennes	7
I.6.1	Antenne dipolaire	7
I.6.2	Antenne Yagi-Uda	8
I.6.3	Antenne à réflecteur parabolique	9
I.6.4	Antenne hélicoïdale	9
I.6.5	Antenne monopole	10
I.6.6	Antenne patch	10
I.6.6.1	Différentes formes d'une antenne patch	11
I.7	Les équations de maxwell	12

I.8	Techniques d'alimentation des antennes patch	12
I.8.1	Alimentation par contacte.....	13
I.8.1.1	Alimentation par Sonde coaxiale.....	13
I.8.1.2	Alimentation par ligne micro ruban	13
I.8.2	Alimentation par couplage sans contact	14
I.8.2.1	Alimentation par couplage à fente (ouverture)	14
I.8.2.2	Alimentation par couplage de proximité	15
I.9	Applications Des Antennes	15
I.9.1	Communication sans fil	15
I.9.1.1	WIFI	16
I.9.1.2	Bluetooth	16
I.9.2	Système de satellites	16
I.9.3	Navigation radio	17
I.9.4	Radar	18
I.10	Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées	18
I.10.1	Les avantages des antennes patch	18
I.10.2	Les inconvénients des antennes patch	20
I.11	Conclusion	20

CHAPITRE II : Généralités sur la 5G

II.1	Introduction	21
II.2	Systèmes de télécommunications mobiles	21
II.3	Évolution de la téléphonie mobile cellulaire	22
II.3.1	Deuxième génération (2G)	22
II.3.2	Troisième génération (3G)	23
II.3.3	Quatrième génération (4G)	23
II.3.4	Cinquième génération (5G)	23
II.4	Caractéristiques principales	24
II.5	Pourquoi la 5G	25
II.6	L'objectif De la 5G	26
II.7	Les opportunités et défis de la 5G	26
II.8	La 5G dans le monde	27
II.9	Architecture de la technologie 5G.....	27
II.9.1	Nouvel génération réseaux d'accès (NG-RAN).....	29
II.9.2	5G Réseau central (5G).....	29
II.10	Fondements techniques de la 5G.....	30
II.11	Spectre radio utilisation des bandes de fréquences basses, moyennes et hautes	30

II.11.1	Fréquences à basse bande 5G : Les fréquences en-dessous de 1GHZ	31
II.11.2	Fréquences en bande moyenne 5G : Les fréquences de 1 à 6 GHz	31
II.11.3	Fréquences à haute bande 5G : au-dessus de 6 GHz	31
II.12	Les technologies fondamentales de la 5G.....	32
II.13	Les fréquences utilisées par la 5G.....	34
II.14	Types de modulation dans la 5G.....	34
II.15	Domaines d'utilisation	35
II.16	L'application industrielle	36
II.17	Conclusion	36

CHAPITRE III : Simulation, résultats et interprétations

III.1	Introduction.....	37
III.2	Définition du logiciel CST Micro ave studio	37
III.3	Fonctionnalités du logiciel CST Microwave Studio	38
III.4	Objectif	38
III.5	Conception d'une antenne patch pour la 5G à une fréquence de résonance de 25 GHz.....	39
III.6	Résultats de la simulation d'antenne	40
III.7	Conception de réseau d'antennes pour la 5G à une fréquence de résonance de 25 GHz.....	44
III.8	Les résultats de la simulation du réseau d'antennes.....	45
III.9	Conclusion	50

Conclusion générale	XVI
----------------------------------	------------

Listes des figures

CHAPITRE I : Notion sur les antennes

Figure I.1: Système de télécommunication radio.....	1
Figure I-2 : Schéma d'une antenne	1
Figure I-3: Système global de transmission et réception sans fil de données	2
Figure I-4: Diagramme de rayonnement de Réseau D'antenne.....	3
Figure I-5 : Les types de polarisation	4
Figure I-6 : Conception d'antennes microstrip monopole et en réseau 1×2 , 1×4 et 1×8	6
Figure I-7 : Antenne réseau linéaire.....	7
Figure I-8 : Conception de réseau d'antennes planaires avec 4×4 éléments pour le côté supérieur ou inférieur du CubeSat.....	7
Figure I-9 : la conception de l'antenne de réseaux 1×4 se compose de 4 antennes patch circulaires avec une technique d'alimentation en retrait, conçues sur un substrat FR4.....	8
Figure I-10 : Antenne dipolaire.....	9
Figure I-11 : Monsieur Yagi et sa célèbre antenne	9
Figure I-12 : Antenne à réflecteur parabolique.....	10
Figure I-13 : Schéma d'une antenne à hélice.....	10
Figure I-14 : Monopole quarte d'onde.....	11
Figure I-15 : Antenne patch microstrip rectangulaire.....	12
Figure I-16 : Alimentations typiques des antennes patch microstrip. (a) Alimentation par sonde coaxiale, (b) Alimentation par ligne microstrip, (c) Technique d'alimentation par couplage d'ouverture.....	12
Figure I-17: Alimentation par sonde coaxial.....	14
Figure I-18 : Alimentation par ligne microruban.....	15
Figure I-19 : Alimentation par fente.....	15
Figure I-20 : Alimentation de proximité.....	16
Figure I-21: Schéma pour la communication sans fil.....	16
Figure I-22 : Structure générale des ponts d'accès Wi-Fi	17
Figure I-23 : L'évolution du Bluetooth.....	17
Figure I-24 : Schéma du système de communications par satellite.....	18
Figure I-25 : Navigation radio.....	18
Figure I-26 : Diagramme radar pour l'analyse de la centralité.....	19

CHAPITRE II : Généralités sur la 5G

Figure II-1 : Comparaison entre 4G et 5G.....	21
Figure II- 2: De la 1G à la 5G.....	24
Figure II-3 : Un réseau cellulaire de base	27
Figure II-4 : Session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP).....	28
Figure II-5 : La séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC.....	28
Figure II-6 : Architecture de NG-RAN.....	29
Figure II-7 : Architecture du système 5G, no-roaming.....	30
Figure II-8 : Les principales technologies mises en œuvre pour 5G	30
Figure II-9: Le spectre radio	31
Figure II-10 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques)	32
Figure II-11: La petite cellule	33
Figure II-12: MIMO Massive	33
Figure II-13: Technologie Beamforming	34
Figure II-14 : Les bandes de fréquences 5G	34
Figure II-15 : Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation	35
Figure II-16: Les diverses applications de la 5G	36

CHAPITRE III : Simulation, résultats et interprétations

Figure III-1 : Bande de fréquences et leurs applications.....	37
Figure III-2 : Structure de l'antenne conçue.....	40
Figure III-3 : Représentation du coefficient de réflexion.....	40
Figure III-4: Structure de l'antenne conçue.....	41
Figure III-5 : Représentation du coefficient de réflexion.....	41
Figure III-6: Structure de l'antenne conçue.....	41
Figure III-7 : Représentation du coefficient de réflexion.....	41
Figure III-8 : Structure de l'antenne conçue avec des fentes.....	42
Figure III-9: Paramètres l'antenne conçue.....	42
Figure III-10 : étapes de conception de l'antenne conçue avec des fentes.....	42
Figure III-11 : Représentation du coefficient de réflexion.....	43
Figure III-12: Diagramme de rayonnement à 24.92 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire($\phi=90$) (c) plan polaire ($\phi=0$).....	43

Figure III-13: Le gain en fonction de la fréquence.....	44
Figure III-14 : Diviseur pour réseau d'antennes à deux éléments.....	44
Figure III-15 : Représentation du coefficient de réflexion.....	45
Figure III-16 : Structure d'un réseau d'antennes à deux éléments.....	45
Figure III-17: Coefficient de réflexion d'un réseau d'antennes à deux éléments.....	45
Figure III-18 : Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes deux éléments à 25.06 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ($\phi=90$) (c) plan polaire ($\phi=0$).....	46
Figure III-19 : Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau d'antennes à deux éléments.....	46
Figure III-20 : Structure d'un réseau d'antennes à quatre éléments avec alimentation par câble coaxial	47
Figure III-21 : Coefficient de réflexion d'un réseau antennes à quatre éléments.....	47
Figure III-22: Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne à quatre éléments à 25.19 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ($\phi=90$) (c) plan polaire ($\phi=0$).....	48
Figure III-23: Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau d'antennes à quatre éléments	48
Figure III-24 : Structure d'un réseau d'antennes à quatre éléments avec alimentation par câble coaxial	48
Figure III-25 : Coefficient de réflexion d'antennes à huit éléments.....	49
Figure III-26: Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne à huit éléments à 24.95 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ($\phi=90$) (c) plan polaire ($\phi=0$).....	49
Figure III-27 : Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau d'antenne à huit éléments	50

Liste des tableaux

Tableau II-1: Comparaison de 2G 3G 4G 5G.....	24
Tableau II- 1: Principales caractéristiques des domaines d'utilisation de la 5G.....	35
Tableau III-1 : Matériaux constitutifs de l'antenne.....	40
Tableau III-2 : dimensions de conception de l'antenne.....	41

Liste des abréviations

ADS : **A**dvanced **D**esign **S**ystem
AM : **A**mplitude **M**odulation
CDMA : **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess
CST : **C**omputer **S**imulation **T**echnology
FDMA : **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess
FHSS : **F**requency **H**opping **S**pread **S**pectrum
FIT : **F**ull **I**ntegration **T**est
FR4 : Type de substrat
Gbps : **G**iga**B**its **P**ar **S**econde
GNSS : **G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem
GPS : **S**ystèmes de **P**ositionnement par **S**atellite
GSM : **G**lobal **S**ystem for **M**obile communications
HD : **H**aute **D**éfinition
HSPA : **H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess
IEEE : **I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers
IMT : **I**nternational **M**obile **T**elecommunications

IR : **I**ntelligent **R**outing

LOT : **I**nternet **O**f **T**hings
LTE : **L**ong **T**erm **E**volution
Mbps : **M**éga**B**its **P**ar **S**econde
MIMO : **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput
MMS : **M**ultimedia **M**essaging **S**ervice

NG-RAN: **N**ouvel **G**énération **R**éseaux d'**A**ccès **R**adio

OFDM : **O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing
PDU : **P**rotocol **D**ata **U**nit

QOS : **Q**uality **O**f **S**ervice

RDF: **R**esource **D**escription **F**ramework

RF: **R**adio **F**réquence

ROS : **R**apport d'**O**nde **S**tationnaire

SMS : **S**horts **M**essage **S**ervice

TDMA : **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess

UIT : l'**U**nion **I**nternationale des **T**élécommunications

UMTS : **U**niversal **M**obile **T**élécommunications **S**ystem

VSWR : **V**oltage **S**tanding **W**ave **R**atio

VPN : **V**irtual **P**rivate **N**etwork

WECA : **W**ireless **E**thernet **C**ompatibility **A**lliance

WIMAX : **W**orldwide **I**nteroperability for **M**icrowave **A**ccess

Wi-Fi : **W**ireless **F**idelity

WLAN : **W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etwork

3D : 3-**D**imensional

2D : 2-**D**imensional

1G : la première **G**énération

2G : la deuxième **G**énération

3G : la troisième **G**énération

4G : la quatrième **G**énération

5G : la cinquième **G**énération



Introduction Générale

Introduction Générale

Avec l'évolution rapide des technologies de communication sans fil, une question très importante se pose : comment atteindre des vitesses élevées, une stabilité améliorée et une efficacité spectrale optimale face à une congestion réseau toujours croissante ?

La cinquième génération de télécommunications mobiles (5G) a introduit des réponses basées sur l'intégration de nouvelles technologies avancées : les antennes intelligentes et les antennes multi-éléments, désormais considérées comme la pierre angulaire des nouveaux réseaux de télécommunication.

Chacun des composants d'un système a une influence sur la performance globale. Les antennes sont, sans aucun doute, la partie la plus importante du système de communication sans fil. Elles reçoivent et transmettent des signaux, et par conséquent soutiennent efficacement la performance de l'ensemble du système. Au cours des dernières décennies, un nombre significatif de recherches et de développements commerciaux ont été observés dans ce domaine, allant des antennes conventionnelles aux systèmes complexes capables de diriger dynamiquement le faisceau et de contrôler la direction. Dans le cas des systèmes mobiles de cinquième génération, de tels progrès sont nécessaires pour répondre pleinement aux exigences de plusieurs centaines de mégabits par seconde, de périodes de latence très faibles et de connexions massivement évolutives caractéristiques de l'Internet des objets (IoT) et des applications industrielles intelligentes.

Ce travail de recherche fait partie d'un problème technique très spécifique : la conception d'antennes à plusieurs éléments avec un haut gain et une directivité améliorée conformes aux normes 5G. Malgré de nombreuses études ayant été réalisées sur les antennes, il existe encore un besoin très réel de solutions pratiques qui soient efficaces, compactes et faciles à intégrer dans les systèmes existants. C'est pourquoi cette thèse vise à concevoir un réseau de 8 antennes conforme à la 5G et compatible avec CST.

La question principale qui guidera cette recherche est formulée comme suit :

« Comment répondre aux exigences 5G d'un réseau d'antennes à plusieurs éléments en termes d'efficacité de rayonnement, de directivité et de bande passante de fonctionnement ? »

Les objectifs principaux de cette étude sont :

Rechercher la littérature théorique pertinente sur les antennes et leurs configurations.

Rechercher les spécifications techniques des réseaux 5G.

Concevoir et simuler un réseau d'antennes de huit éléments en utilisant le logiciel CST.

Introduction Générale

Déterminer l'efficacité du modèle proposé par rapport aux principales caractéristiques de rayonnement du système.

Ainsi, le mémoire est articulé autour de trois chapitres clés, à savoir :

Les bases des antennes telles que généralités, principe de fonctionnement, les différents types, etc. formant le premier chapitre.

Les caractéristiques des réseaux 5G et leurs enjeux, avec l'importance d'antennes avancées, forme le deuxième chapitre.

La simulation du réseau d'antennes à huit éléments par CST et le rapport des simulations abouties constituant le chapitre trois.

Chapitre I : Notions sur les antennes

I.1 Introduction

Les antennes occupent une place centrale dans les communications sans fil, puisqu'elles permettent d'établir des connexions entre des points géographiquement éloignés. Elles interviennent dans divers domaines tels que la téléphonie mobile, la radioastronomie, les systèmes de positionnement par satellite (GPS), la diffusion des signaux radio et télévisés, ainsi que dans les systèmes de contrôle aérien et maritime, entre autres.

Leur rôle est essentiel pour assurer le bon fonctionnement de tout système de télécommunication.

Avec la miniaturisation croissante des équipements, notamment des récepteurs GNSS, il devient nécessaire d'utiliser des antennes compactes et efficaces. C'est dans ce contexte que les antennes patch se sont imposées comme une solution adaptée.

Ce chapitre aborde dans un premier temps les propriétés générales des antennes, avant de se concentrer plus précisément sur l'antenne patch et ses spécificités [1].

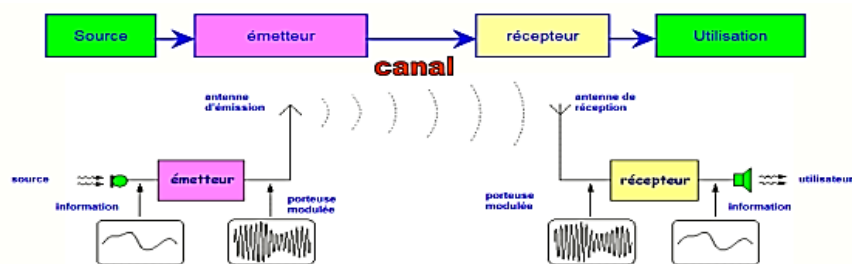


Figure I-1 : Système de télécommunication radio. [2]

I.2 Définition de l'antenne

L'IEEE propose la définition la plus exacte d'une antenne. D'après cette définition, une antenne est un appareil qui sert à transmettre ou à capter des ondes radioélectriques. Plus précisément, une antenne capte les signaux provenant d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les propage dans l'espace lorsqu'elle fonctionne en mode émission. En mode de réception, elle se contente de détecter les ondes électromagnétiques qui l'atteignent et de les transformer en signaux [3].

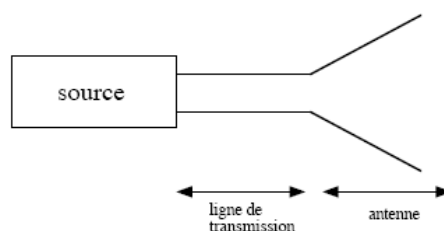


Figure I-2 : Schéma d'une antenne.

I.3 Rôle d'une antenne

L'antenne joue plusieurs rôles, dont les principaux sont les suivants :

- Assurer une adéquation appropriée entre l'équipement radioélectrique et l'environnement de propagation.
- Garantir la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- Communiquer l'information de la manière la plus précise possible [4].

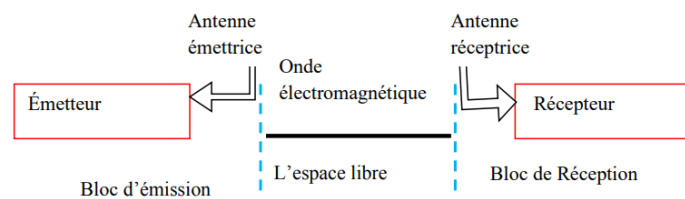


Figure I-3 : Système global de transmission et réception sans fil de données. [1]

I.4 Caractéristiques d'une antenne

Les caractéristiques d'une antenne sont des éléments qui influenceront son rendement et nous guideront dans l'évaluation de ses performances [5].

I.4.1 Impédance d'entrée de l'antenne

La relation entre la tension d'entrée V_i et le courant d'entrée I_e On le désigne souvent comme l'impédance à l'entrée d'une antenne [5] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (I.1)$$

I.4.2 Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'une antenne est une illustration graphique qui dépeint la répartition de la puissance émise dans l'espace par l'antenne en fonction des multiples orientations. Il illustre comment l'antenne émet ou capte l'énergie électromagnétique dans diverses orientations, facilitant ainsi l'évaluation de ses performances dans un contexte spécifique. L'illustration du schéma de rayonnement peut être faite comme suit [5] : En détaillant l'évolution de la puissance par unité d'angle solide selon la direction :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{\text{max}}} \quad (I.2)$$

En fonction du champ rayonné $E(\theta, \varphi)$ ($\frac{V}{m}$):

$$P(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{|E|^2}{120} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (I.3)$$

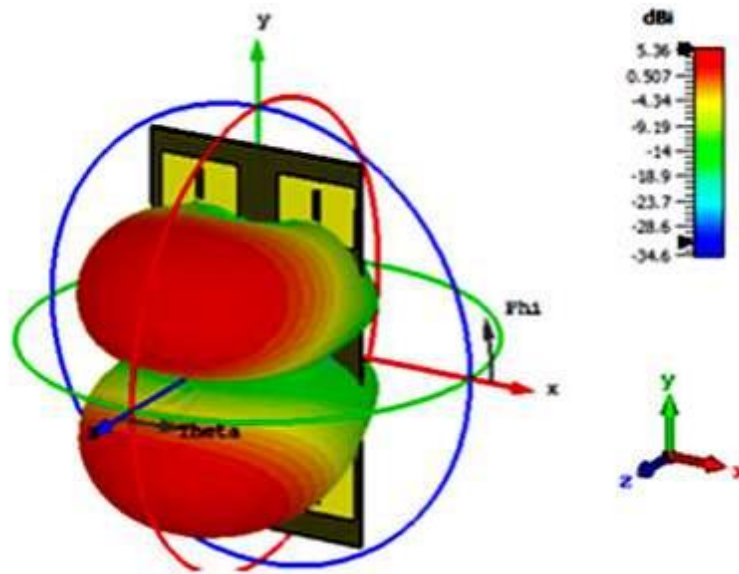


Figure I-4 : Diagramme de rayonnement de Réseau D'antenne.

I.4.3 Directivité

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope.[6]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{\frac{r}{4\pi}}} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (I.4)$$

I.4.4 Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonne la source isotrope par unité d'angle solide. Il est exprimé en dB et présenté par l'équation [7] :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_a}{4\pi}\right)} \quad (I.5)$$

I.4.5 Polarisation

La polarisation d'une antenne fait référence à la direction exacte dans laquelle les ondes planes émises par cette antenne sont orientées. La polarisation d'une onde plane est généralement caractérisée par la modification du champ électrique E en fonction d'un point d'observation spécifique dans le temps. On distingue trois types de polarisation : la polarisation linéaire, la polarisation circulaire et la polarisation elliptique [5].

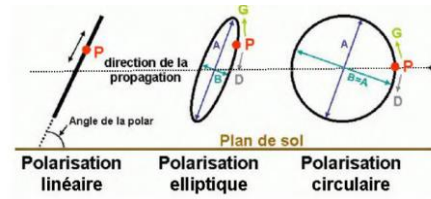


Figure I-5 : Les types de polarisation.[8]

I.4.6 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident [9], généralement ce coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et l'impédance caractéristique Z_c par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{I.6})$$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20\log(\Gamma) \quad (\text{I.7})$$

I.4.7 Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante de l'antenne détermine la bande de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur au seuil arbitrairement défini. La bande passante est généralement proportionnelle à la bande de fréquence avec un facteur de réflexion inférieur à -10 dB. Dans certaines applications, ce niveau peut être augmenté à -6 dB, ce qui permet certaines limitations dans la conception de l'antenne, par exemple, pour certaines antennes mobiles. La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minima donc plusieurs fréquences de résonance [10].

I.4.8 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou, en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales (+V) et minimales (-V) de l'amplitude de l'onde stationnaire, il est donné par la relation suivante [11] :

$$ROS = \frac{(+v) + (-v)}{(+v) - v} \quad (\text{I.8})$$

Il est lié au coefficient de réflexion Γ par la relation :

$$ROS = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)} \quad (\text{I.9})$$

I.5 Réseau d'antennes

Dans le secteur des télécommunications, les utilisateurs privilégient généralement l'emploi d'appareils légers, économiques et peu volumineux. Les antennes imprimées offrent en grande mesure une solution à ces exigences. La conception de ces antennes flexibles et conformes facilite leur incorporation dans différents systèmes de communication. Ces derniers, malheureusement, présentent certaines contraintes : la puissance émise, la fréquence d'usage, l'amplification et la largeur de bande. En réseau, l'association de plusieurs antennes imprimées permet de pallier les contraintes liées aux caractéristiques d'une seule antenne et d'améliorer leur rendement en termes de gain et de rayonnement... etc. À l'heure actuelle, les réseaux imprimés sont couramment employés car ils offrent des solutions à de nombreuses exigences imposées par les systèmes. Il se définit par le diagramme de rayonnement, la fonction caractéristique, l'angle d'ouverture, la dynamique d'une antenne, ainsi que le gain et la directivité. Ces antennes sont couramment utilisées dans divers systèmes de communication, tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédias sans fil (WIFI, Bluetooth, WIMAX, etc.) et même dans les communications spatiales. On les retrouve aussi dans divers systèmes de radar ou de télédétection et elles sont employées dans des gammes de fréquences s'étendant de 1GHz jusqu'aux bandes millimétriques. Ces applications sont assujetties à des normes de sélection et à des restrictions concernant le poids, le volume et l'épaisseur [12][13][14].

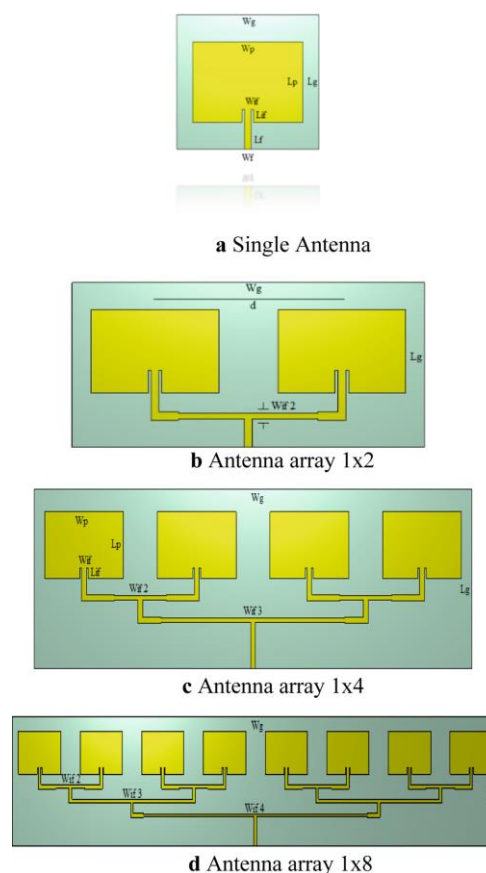


Figure I-6 : Conception d'antennes microstrip monopole et en réseau 1×2 , 1×4 et 1×8 . [15]

I.5.1 Réseau D'antenne Linéaire

Les réseaux d'antennes linéaires trouvent leur origine dans les premières avancées de la communication radio, où des antennes basiques comme les dipôles étaient agencées de manière linéaire pour transmettre ou capter des signaux. Ces configurations simples ont été couramment employées dans les systèmes de télégraphie sans fil des débuts à la fin du 19^{ème} siècle. Avec le temps, les réseaux d'antennes linéaires ont trouvé leur place dans diverses applications, y compris la communication en point à point et les radars directionnels [16].

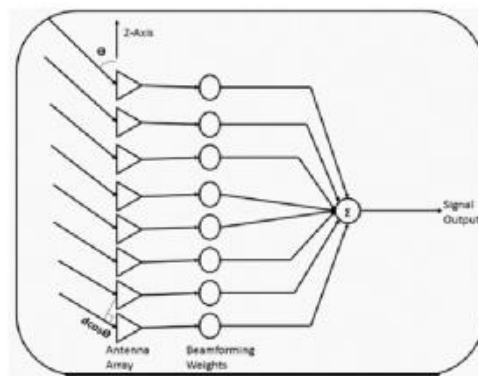


Figure I-7 : Antenne réseau linéaire.[17]

I.5.2 Réseau D'antenne Planaire

L'émergence des réseaux d'antennes planaires a eu lieu ultérieurement, grâce à l'évolution des technologies de micro-ondes et de substrats diélectriques durant les années 1950 et 1960. Ces réseaux sont composés d'éléments rayonnants placés sur un support plat, facilitant leur intégration dans les circuits imprimés et appareils micro-ondes. Les réseaux d'antennes planaires initiaux étaient fréquemment déployés dans les antennes patch et les réseaux d'antennes à ouverture, fournissant une réponse compacte adaptée à diverses utilisations, telles que les communications sans fil et les systèmes radars [18].

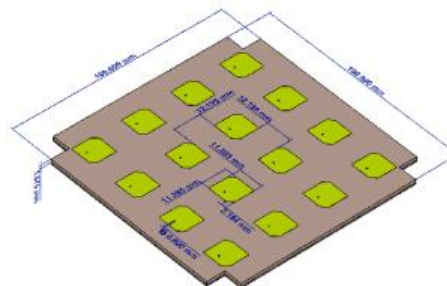


Figure I-8 : Conception de réseau d'antennes planaires avec 4×4 éléments pour le côté supérieur ou inférieur du CubeSat. [19]

I.5.3 Réseau d'antenne circulaire

Les réseaux d'antennes circulaires représentent une avancée plus récente, tirant profit des caractéristiques de symétrie circulaire afin de générer des diagrammes de rayonnement omnidirectionnels ou orientés. On utilise fréquemment ces réseaux dans les applications qui requièrent une couverture à 360 degrés, tels que les antennes de télécommunication pour les réseaux mobiles ou encore les systèmes radar de détection pour la surveillance aérienne [3]. Les réseaux d'antennes circulaires ont aussi été utilisés dans les antennes à balayage électronique, où la rotation du réseau permet d'orienter le faisceau radar dans diverses directions sans avoir besoin de déplacement mécanique de l'antenne [18]. Pour faire court, l'histoire des réseaux d'antennes linéaires remonte aux débuts de la communication sans fil, tandis que les réseaux d'antennes planaires et circulaires ont vu le jour plus récemment grâce à l'avancement des technologies micro-ondes. Ces derniers ont trouvé un vaste éventail d'applications dans les domaines de la communication sans fil, du radar et d'autres secteurs liés à la technologie des antennes.

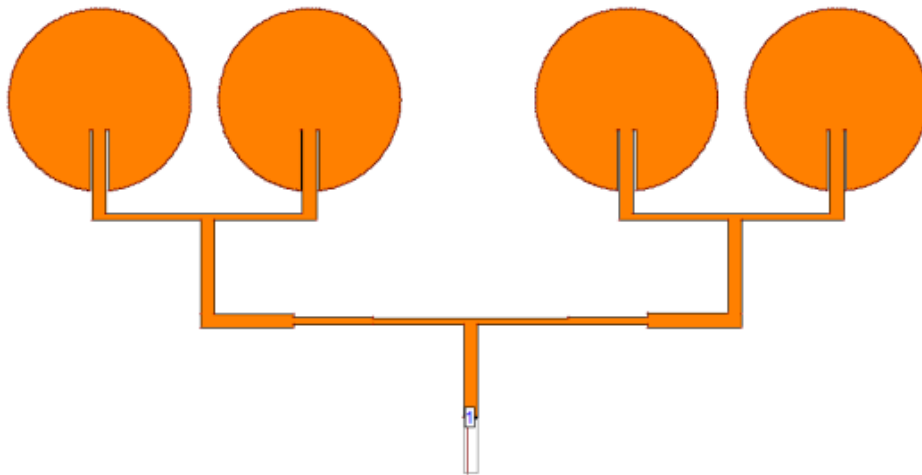


Figure I-9 : la conception de l'antenne de réseaux 1x4 se compose de 4 antennes patch circulaires avec une technique d'alimentation en retrait, conçues sur un substrat FR4. [20]

I.6 Types d'antennes

I.6.1 Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles est très proches constituant une ligne bifilaire. En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur. À l'extrémité de chaque fil apparaissent des charges de signes opposées dont l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant. (I.10) D'autres antennes de même type sont obtenues avec des fils rayonnants plus longs. Ces antennes de type filaires ont de nombreuses applications.

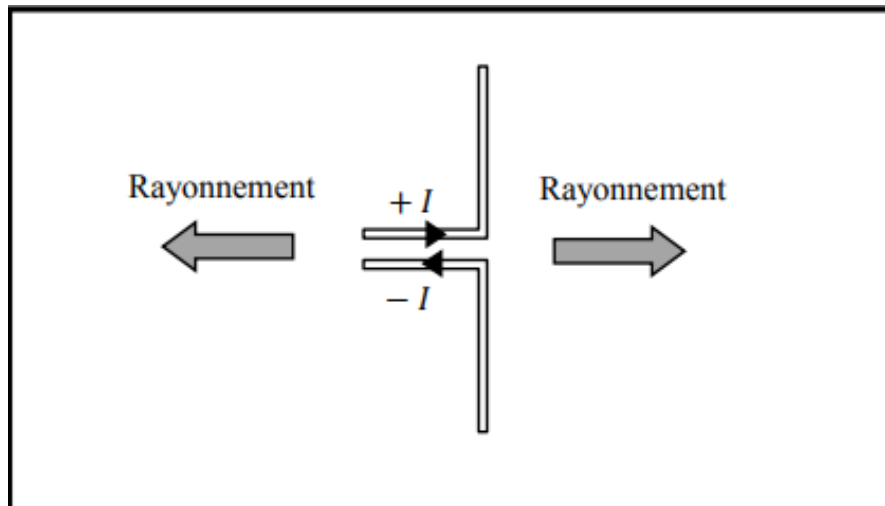


Figure I-10 : Antenne dipolaire.

Dans les sections suivantes, nous allons citer les antennes pour récepteur radio, les antennes des talkies-walkies...etc [21]

I.6.2 Antenne Yagi-Uda

L'antenne Yagi ou antenne Yagi-Uda (du nom de ses inventeurs, Hidetsugu Yagi et Shintaro Uda) est une antenne se caractérisant par une forme qui se rapproche de celle d'un râtelier ; c'est l'antenne la plus utilisée par les particuliers pour recevoir la télévision (terrestre). Cette antenne a été brevetée en 1926 [22]



Figure I-11 : Monsieur Yagi et sa célèbre antenne [22]

I.6.3 Antenne à réflecteur parabolique

Une antenne à réflecteur parabolique se compose d'une source d'émission couplée à une surface métallique réfléchissante, généralement en forme de parabole. La source, positionnée au foyer de cette parabole, émet une onde qui est réfléchi de manière à produire des rayons parallèles, conformément aux propriétés géométriques de la parabole. Ce type d'antenne est utilisé pour cibler une direction spécifique avec une grande précision, car tous les rayons issus du foyer ressortent parallèlement. Si la source est déplacée dans le plan focal, les rayons réfléchis peuvent adopter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole. Ces antennes sont couramment employées pour capter les signaux des satellites situés à des distances considérables. Elles sont notamment répandues pour la réception des chaînes de télévision, nécessitant un alignement précis vers un satellite donné. Pour minimiser les interférences causées par les intempéries telles que la pluie ou la neige, certaines de ces antennes sont recouvertes d'un radôme. Cela est particulièrement important pour les antennes exposées à des conditions climatiques extrêmes, notamment celles utilisées pour les transmissions hertziennes. Ces antennes se distinguent par leur structure, combinant une partie arrière parabolique et une partie avant conique, due à la forme du radôme qui protège la source placée au foyer [23].

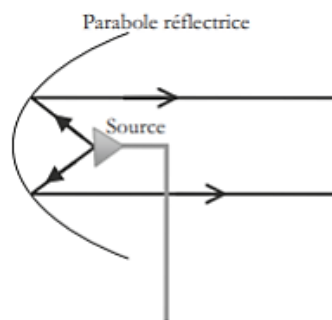


Figure I-12 : Antenne à réflecteur parabolique. [23]

I.6.4 Antenne hélicoïdale

Ces antennes (Figure I-13) possèdent une configuration intermédiaire entre l'antenne linéaire et l'antenne en boucle. Cette caractéristique est définie par l'angle formé entre le plan des hélices et leur axe de symétrie. Lorsque cet angle atteint 90° , l'antenne se rapproche d'une structure en boucle, tandis qu'un angle nul la rend similaire à une antenne linéaire. En général, ces antennes présentent une polarisation elliptique, bien qu'il soit possible, selon certaines plages de fréquences, d'obtenir des polarisations linéaires ou circulaires [24]

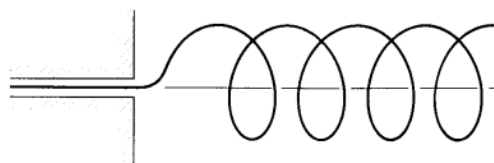


Figure I-13 : Schéma d'une antenne à hélice.

I.6.5 Antenne monopole

Une antenne monopôle (ou unipolaire) est une antenne constituée d'un élément rayonnant unique monté perpendiculairement à un plan de masse. Elle est caractérisée par une impédance d'entrée, une bande passante, une directivité, un gain, un rendement, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et une polarisation.

Elle est utilisée dans plusieurs applications, notamment la communication et la radionavigation aérienne, et peut prendre différentes formes géométriques (circulaire, elliptique, rectangulaire, trapézoïdale, etc.). Ses performances dépendent de ses paramètres géométriques, qui influencent la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité. [25] [26]

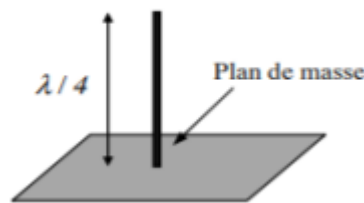


Figure I-14 : Monopole quart d'onde

I.6.6 Antenne patch

Lorsque des critères tels que la dimension, le poids, le coût, l'efficacité et la facilité d'installation ainsi que le profil aérodynamique sont des facteurs déterminants, il peut s'avérer nécessaire d'opter pour des antennes à profil réduit. On trouve actuellement diverses applications, comme la radio sur mobile et les communications sans fil, qui présentent des caractéristiques semblables. Pour satisfaire ces critères, l'utilisation d'antennes micro-ruban est envisageable. Ces antennes ont un profil réduit et sont conformables. Sur des surfaces variées, simple à produire et peu coûteux, mécaniquement résistant. Lorsqu'ils sont installés sur des surfaces dures, compatibles avec des conceptions de circuits intégrés RF, et Quand une version spécifique du patch et un mode particulier sont Dans les applications où la dimension, le poids, le coût, l'efficacité, la simplicité d'installation et le design aérodynamique représentent. Les désavantages principaux des antennes micro-ruban incluent une efficacité réduite, une puissance faible, un rapport Q élevé (parfois jusqu'à 100), une polarisation de qualité inférieure, une performance de balayage restreinte et une radiation non désirée ainsi qu'une bande passante extrêmement étroite. Toutefois, il y a des techniques pour améliorer la performance et le débit, comme l'accroissement de la hauteur du substrat. Cependant, l'augmentation de la hauteur entraîne l'apparition d'ondes de surface, ce qui n'est généralement pas souhaitable. Les ondes de surface se déplacent à travers le substrat et sont diffusées par les courbures et les irrégularités de surface, ce qui dégrade le diagramme d'antenne et les propriétés de polarisation. Il est possible de supprimer les ondes de surface tout en préservant des bandes passantes larges, grâce à l'utilisation de cavités. Ainsi, l'empilement de l'élément micro ruban [27].

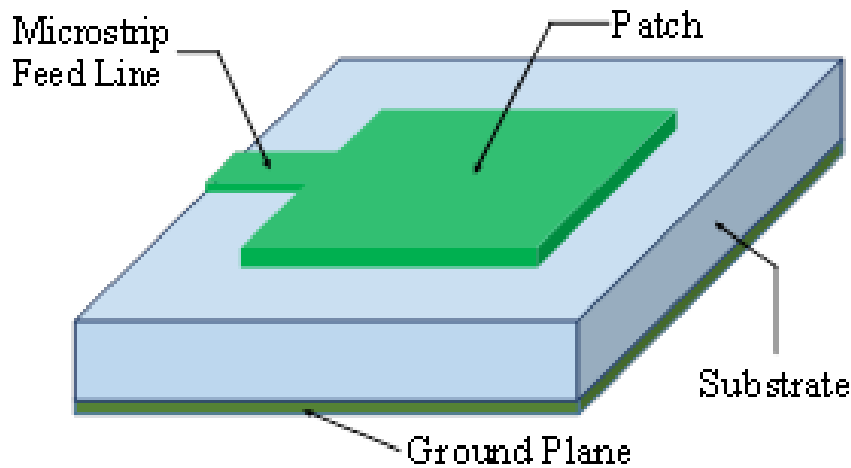


Figure I-15 : Antenne patch microstrip rectangulaire.[28]

I.6.6.1 Différentes formes d'une antenne patch

D'une antenne patch Habituellement, le patch et le plan de masse sont fabriqués en cuivre. Le patch peut se présenter sous diverses formes, comme le rectangle, l'ellipse, le cercle, le triangle, l'anneau, et bien d'autres.

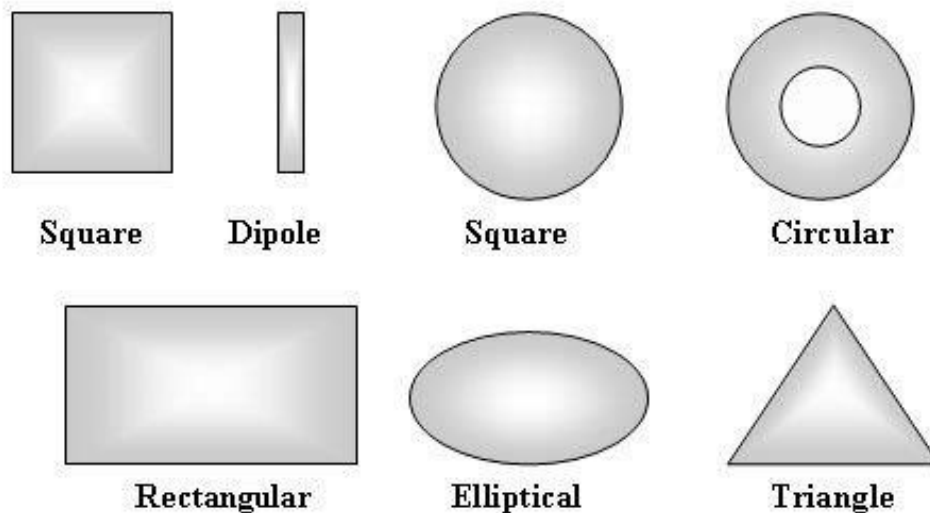


Figure I-16 : Différentes formes d'une antenne patch[29].

Les paramètres souhaités, comme la polarisation, l'amplification, la directivité, la bande passante, entre autres, définissent la configuration du patch. Ils sont habituellement caractérisés par les modes de fonctionnement excités qui dépendent de la forme et de la dimension du patch, du substrat diélectrique et de son épaisseur, ainsi que de l'appareil d'alimentation [30].

I.7 Les équations de maxwell

Les phénomènes électromagnétiques qui se manifestent dans les dispositifs électrotechniques sont gouvernés par les équations de Maxwell ainsi que par les lois constitutives des matériaux. On peut les résumer comme suit :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I.11})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{I.12})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{I.13})$$

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leur joindre des relations qui traduisent le rendement des milieux à étudier :

Alors :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.14})$$

$$\vec{J}_d = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{I.15})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{I.16})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{I.17})$$

Tel que :

$\vec{H}$: Champ magnétique [A. m⁻¹]

$\vec{D}$: Induction Electrique [C. m⁻²]

$\vec{E}$: Champ Electrique [V. m⁻¹]

$\vec{B}$: Induction magnétique [T]

$\vec{J}_c$: Densité volumique du courant électrique total [A. m⁻²]

$\vec{J}_d$: Densité volumique du courant de déplacement [A. m⁻²]

ρ : Densité volumique de la charge électrique [Cb. m⁻²]

σ : conductivité électrique [S.m]

ε : Permittivité diélectrique [F.m⁻¹]

Avec : $\vartheta : 1\mu$

I.8 Techniques d'alimentation des antennes patch

Il existe plusieurs techniques pour alimenter une antenne micro ruban, à savoir les techniques avec ou sans contact :

I.8.1 Alimentation par contacte

I.8.1.1 Alimentation par Sonde coaxiale

Le conducteur interne du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, tandis que le conducteur externe est connecté au plan de masse [31]. Cette méthode est facile à fabriquer et à adapter, et présente un faible rayonnement parasite. Par contre sa bande passante est étroite et elle est plus difficile à modéliser [32].

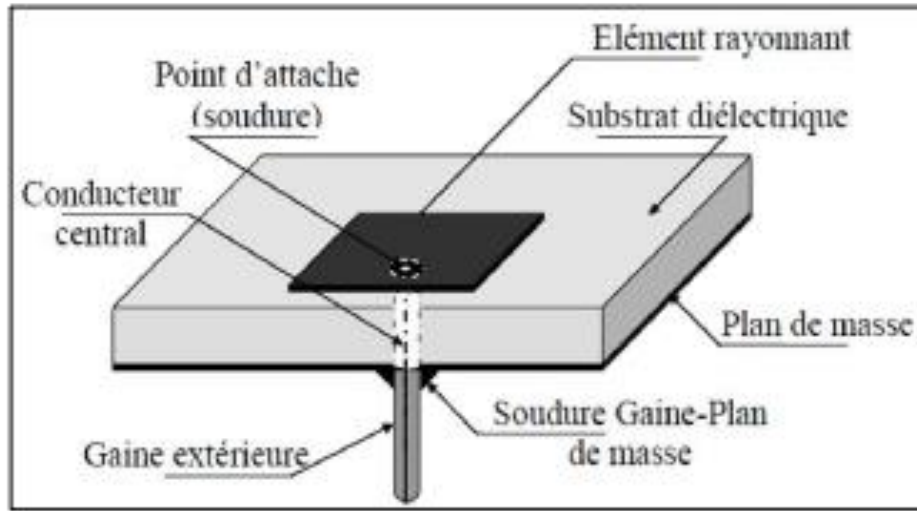


Figure I-17 : Alimentation par sonde coaxial [33].

I.8.1.2 Alimentation par ligne micro ruban

Dans cette technique d'alimentation, la ligne microruban est reliée directement à la plaque rayonnante via une connexion coaxiale. Elle a pour fonction de guider l'onde électromagnétique jusqu'à l'antenne tout en minimisant les pertes dues au rayonnement. Nous avons adopté cette méthode dans notre étude, comme illustré à la figure I-18. Elle est fréquemment utilisée dans les antennes à patch en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son coût réduit [32]. L'impédance caractéristique de cette ligne dépend principalement de sa largeur ainsi que des caractéristiques du substrat utilisé, notamment la permittivité relative et l'épaisseur. Elle peut être déterminée à l'aide de la formule suivante [34] :

$$\frac{wc}{h} = \left\{ \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \right\} \quad (I.18)$$

$$\left\{ \frac{2}{\pi} \left[B-1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} (\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right] \right\}$$

Où :

$$A = \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}}$$

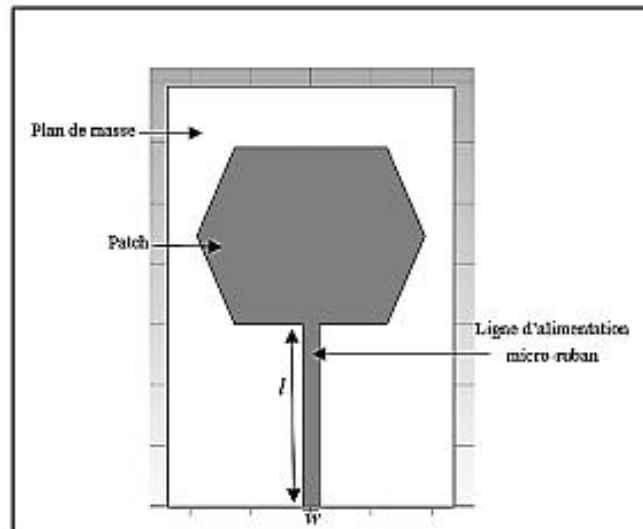


Figure I-18 : Alimentation par ligne micro -ruban.

I.8.2 Alimentation par couplage sans contact

I.8.2.1 Alimentation par couplage à fente (ouverture)

Dans cette méthode, deux substrats disposés en parallèle sont utilisés (voir figure 19). Le substrat supérieur, qui supporte l'élément rayonnant (patch), est généralement caractérisé par une constante diélectrique faible. En revanche, le substrat inférieur peut avoir une constante diélectrique plus élevée. Le transfert d'énergie entre les deux se fait à travers une fente pratiquée dans le plan de masse, assurant ainsi le couplage sans liaison directe entre les couches [35].

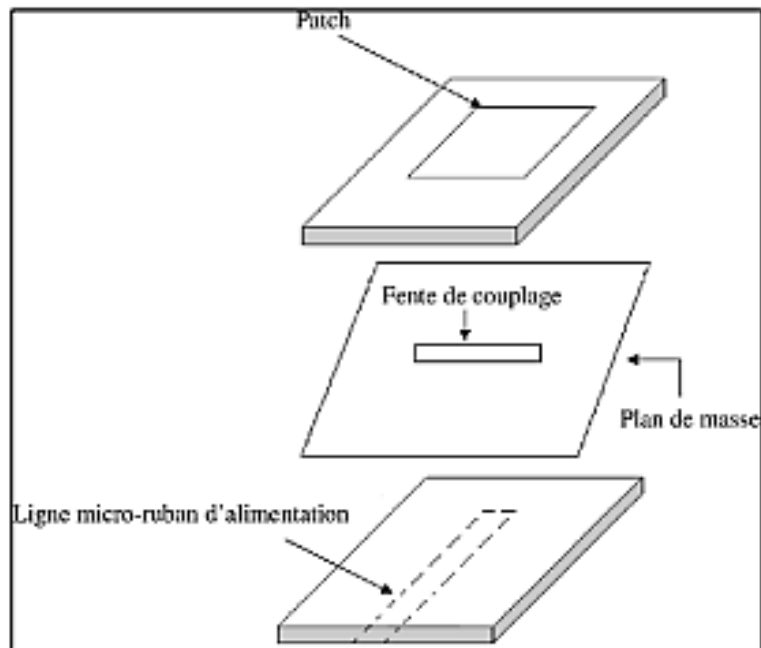


Figure I-19 : Alimentation par fente. [36]

I.8.2.2 Alimentation par couplage de proximité

Cette technique repose sur l'utilisation de deux substrats diélectriques, intégrant une ligne micro-ruban et une source de rayonnement, comme illustré dans la figure I.20. Dans ce schéma, la ligne micro-ruban n'est pas directement reliée à l'élément rayonnant. Cette configuration permet d'élargir la bande passante tout en atténuant les interférences dues au rayonnement parasite de la ligne d'alimentation [32].

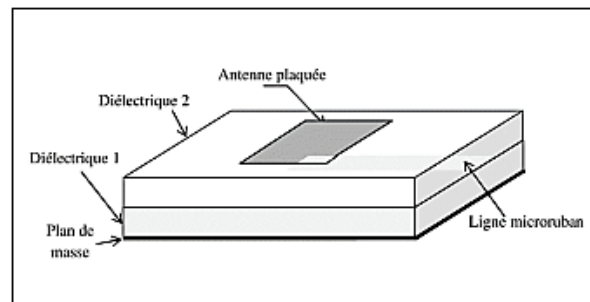


Figure I-20 : Alimentation de proximité.[37]

I.9 Applications Des Antennes

I.9.1 Communication sans fil

Aujourd'hui, la plupart des appareils électroniques, en particulier les dispositifs mobiles tels que les téléphones portables et les micro-ordinateurs, intègrent des technologies de connexion sans fil comme le Wifi, le Bluetooth ou l'infrarouge. Introduite au XIXe siècle, la communication sans fil s'est progressivement développée pour devenir un moyen essentiel de transmission d'informations entre différents appareils. Cette technologie permet l'échange de données à travers les airs, sans recourir à des câbles ou conducteurs physiques, en exploitant des ondes électromagnétiques telles que l'infrarouge (IR), les radiofréquences (RF) ou les signaux satellites. Aujourd'hui, les communications sans fil englobent un large éventail de technologies et d'appareils, allant des smartphones et ordinateurs aux tablettes, imprimantes et dispositifs Bluetooth. Ce paragraphe propose une vue d'ensemble sur les systèmes de communication sans fil [38].

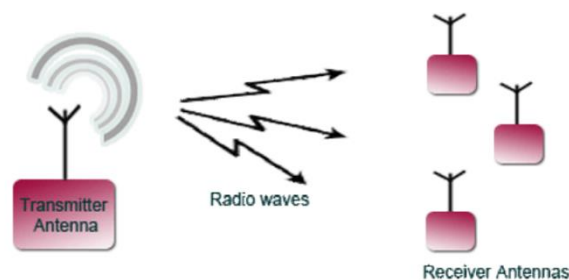


Figure I-21 : Schéma pour la communication sans fil

I.9.1.1 WIFI

Le Wi-Fi est basé sur la norme IEEE 802.11, également connue sous le nom ISO/IEC 8802-11. Il s'agit d'un standard international qui définit les spécifications des réseaux locaux sans fil (WLAN). À l'origine, le terme Wi-Fi, contraction de Wireless Fidélité, désignait une certification attribuée par la Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) aux États-Unis. Cette organisation veillait à garantir l'interopérabilité des équipements conformes à la norme 802.11. [39]

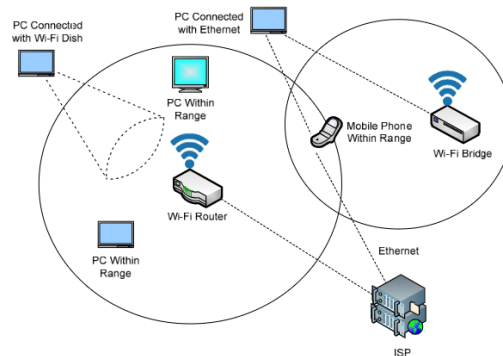


Figure I-22 : Structure générale des ponts d'accès Wi-Fi [40].

I.9.1.2 Bluetooth

Le Bluetooth est une technologie de communication sans fil permettant l'échange de données entre divers appareils électroniques sur une courte distance, comparée à d'autres méthodes de transmission sans fil. Il est constitué d'un processeur de bande de base, d'un module radio et d'une antenne. Le processeur traite et convertit les données en signaux, tandis que l'antenne d'un autre appareil compatible Bluetooth, situé à environ 30 pieds, capte ces signaux transmis dans l'air. Cette technologie repose sur une technique appelée étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum), qui est l'une des principales méthodes de modulation utilisées pour la transmission de signaux à spectre étalé. [41]

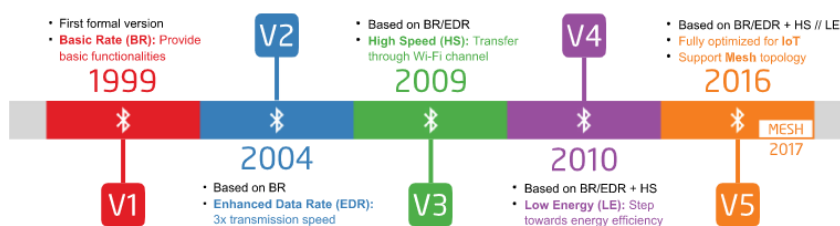


Figure I-23 : L'évolution du Bluetooth.[42]

I.9.2 Système de satellites

Les satellites peuvent être définis comme des corps en orbite autour d'une planète. Naturellement, cela inclut les lunes, qui suivent la courbure de la planète autour de laquelle elles gravitent. Cependant, le terme "satellite" désigne également des engins artificiels envoyés dans l'espace par les scientifiques. Ces satellites artificiels sont placés en orbite autour de la Terre ou d'autres corps

célestes pour diverses missions. Certains d'entre eux sont conçus pour capturer des images de la Terre, du Soleil, des trous noirs et des galaxies lointaines, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du système solaire et de l'univers. D'autres ont des fonctions essentielles dans les domaines des télécommunications et des médias.[43]

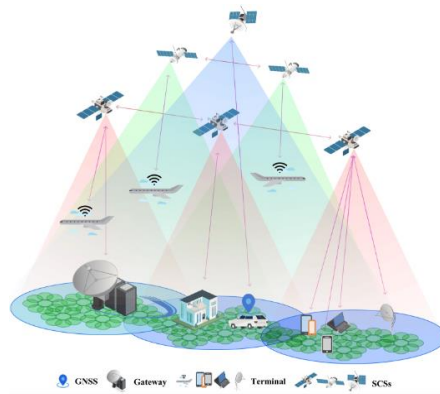


Figure I-24 : Schéma du système de communications par satellite.[44]

I.9.3 Navigation radio

Le premier dispositif de navigation radio développé était le radiogoniomètre (RDF). Il fonctionne en réglant une station radio, puis en employant une antenne directionnelle pour identifier l'orientation de l'antenne émettrice.

L'utilisation des ondes radio permet de localiser une position sur Terre.

Ce système présente l'avantage de pouvoir être utilisé quelles que soient les conditions météorologiques et à tout moment de la journée, contrairement à d'autres méthodes de navigation.

Les stations de radio AM classiques sont privilégiées pour leur large couverture, bien que des balises radio à faible puissance puissent également être exploitées.

Autrefois, des antennes en boucle nécessitant une rotation manuelle étaient utilisées. Aujourd'hui, ce processus a été automatisé grâce à des solénoïdes directionnels qui tournent rapidement à l'aide d'un moteur. [45]

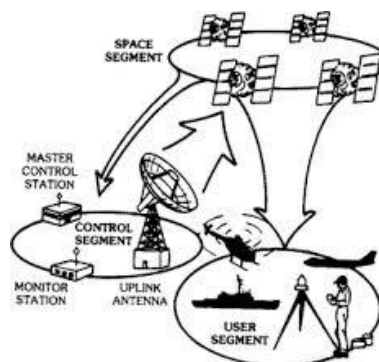


Figure I-25 : Navigation radio

I.9.4 Radar

Le terme RADAR désigne la détection et la télémétrie par ondes radio. Il sert à identifier et localiser divers objets tels que les avions, les navires, les engins spatiaux et les véhicules. Contrairement à la vision humaine, qui dépend de la lumière, le radar fonctionne indépendamment de cette condition. La distance d'un objet est calculée en mesurant le temps nécessaire au signal radar pour atteindre la cible et revenir. La position angulaire ou la direction de l'objet peut être déterminée grâce à l'orientation des ondes reçues par des faisceaux d'antennes précis. Lorsqu'un objet est en mouvement par rapport au radar, le changement de fréquence de l'onde réfléchie, connu sous le nom d'effet Doppler, permet d'estimer sa vitesse relative et de différencier une cible immobile d'une cible en déplacement. [46]



Figure I-26 : Diagramme radar pour l'analyse de la centralité [47].

I.10 Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées présentent des avantages et des inconvénients sont :

I.10.1 Les avantages des antennes patch

Taille réduite : elles s'intègrent facilement dans divers équipements grâce à leur compacité.

Adaptabilité : l'antenne patch peut être conçue sur mesure pour s'adapter à la forme et aux dimensions de l'objet [48].

Intégration en réseau possible : elles peuvent être agencées en réseau afin d'améliorer la directivité, ce qui convient à certaines applications.

Support des multi-bandes et multi-polarisations : elles peuvent fonctionner sur plusieurs bandes de fréquence et avec différentes polarisations [49].

Structure robuste : leur conception les rend résistantes aux conditions environnementales difficiles, assurant ainsi une bonne protection [50].

Coût de fabrication faible : elles sont économiques à produire [51].

I.10.2 Les inconvénients des antennes patch

Bande passante restreinte : leur plage de fréquence opérationnelle est limitée.

Sensibilité aux interférences : elles peuvent être affectées par le bruit et les signaux parasites.

Puissance admissible limitée : elles ne supportent qu'une faible puissance.

Dépendance au substrat diélectrique : leurs performances varient fortement en fonction de la qualité du matériau diélectrique utilisé [49,51].

I.11 Conclusion

Comme nous l'avons précédemment dit, les dipôles, les antennes hélicoïdales, Yagi et monopôles ont tous un impact historique et technologique sur le développement des systèmes de télécommunication. Chaque type d'antenne a des caractéristiques qui peuvent correspondre à des besoins et des usages différents. Dans les technologies modernes, il y a des besoins en miniaturisation, en intégration et en performances. Dans ce cas, les antennes patch sont devenues plus intéressantes. Même si elles sont limitées en termes de bande passante et de gain, ces antennes sont très utiles car elles sont faciles à fabriquer, fonctionnent bien aux hautes fréquences et sont particulièrement efficaces pour la 5G. L'important maintenant est d'améliorer la bande passante et le gain, car c'est la clé de la communication de nouvelle génération

Chapitre II : Généralités sur la 5G

II.1 Introduction

La 5G représente la cinquième génération des technologies de télécommunications mobiles, développée pour apporter des avancées majeures en matière de rapidité, de réactivité, de capacité et de connectivité par rapport aux générations précédentes. Elle est conçue pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs et prendre en charge des applications variées, telles que les jeux en ligne instantanés, la réalité augmentée et le streaming en ultra haute définition.

D'après l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), la 5G offrirait une vitesse jusqu'à 100 fois supérieure à celle de la 4G et réduirait la latence d'un facteur de 10. Cette performance accrue permettrait l'intégration de milliards d'appareils connectés et le développement de technologies émergentes, comme les véhicules autonomes. [52]

Le déploiement de la 5G a débuté en 2019 et s'est intensifié ces dernières années, avec une adoption progressive à l'échelle mondiale. Les premiers smartphones compatibles ont vu le jour la même année, et depuis, de nouveaux dispositifs intégrant cette technologie ne cessent d'être commercialisés. [53] Considérée comme un moteur essentiel de la transformation numérique et de la croissance économique, la 5G joue un rôle clé dans l'innovation de divers secteurs, notamment la santé, l'industrie, les transports et les services financiers. Elle contribue ainsi à améliorer la productivité, stimuler le développement technologique et générer de nouvelles opportunités d'emploi. [54]



Figure II-1 : Comparaison entre 4G et 5G [55]

II.2 Systèmes de télécommunications mobiles

Les réseaux de communication mobile sont des infrastructures qui facilitent la connexion sans fil entre divers appareils mobiles tels que les ordinateurs portables, les tablettes et les smartphones. Ces dispositifs offrent des services de voix et de données grâce à une connexion sans fil, donnant la possibilité aux utilisateurs de téléphoner, d'envoyer des messages, de surfer sur le web ainsi que d'utiliser différentes applications et services. Depuis l'apparition du réseau mobile de première génération au début des années 1980, les systèmes de communication mobile sans fil ont traversé plusieurs phases d'évolution au cours des dernières décennies.

Du fait de la demande mondiale croissante en matière de connexion, les standards de communication mobile ont évolué rapidement pour accueillir un plus grand nombre d'utilisateurs [56].

II.3 Évolution de la téléphonie mobile cellulaire

Le concept de réseau cellulaire, développé par les laboratoires Bell en 1947, a ouvert la voie aux communications sans fil à grande échelle. Comme toute technologie, la téléphonie mobile a connu une évolution constante, marquée par des avancées majeures au cours des 70 dernières années.

Les premières infrastructures de téléphonie mobile, connues sous le nom de réseaux de première génération (1G), ont été introduites dans les années 1980. La seconde génération (2G) a suivi dans les années 1990, puis la troisième génération (3G) a vu le jour au début des années 2000. Actuellement, les réseaux de quatrième génération (4G) sont largement déployés à travers le monde, tandis que l'industrie des télécommunications se prépare à l'arrivée de la cinquième génération (5G).

Les systèmes 1G, basés sur une technologie analogique, sont aujourd'hui obsolètes puisqu'ils ne permettaient que des communications vocales sans transmission de données. En revanche, les réseaux 2G, qui fonctionnent sur un mode numérique, prennent en charge les appels vocaux ainsi que des services de données basiques. L'introduction de la 3G a permis d'améliorer la transmission des données et d'ouvrir la voie à de nouveaux services numériques. Quant aux réseaux 4G, ils ont marqué une avancée significative en offrant une véritable connectivité à haut débit, avec des vitesses pouvant atteindre 100 Mbps, même en situation de mobilité.

La technologie 5G promet d'aller encore plus loin, en proposant un débit théorique pouvant atteindre 20 Gbps, en renforçant les capacités de l'Internet des objets (IoT) et en facilitant le développement d'applications nécessitant une fiabilité extrême et une latence minimale. Son architecture repose sur une approche orientée utilisateur, afin de répondre aux besoins croissants en connectivité.

En résumé, le chiffre "G" correspond à la notion de "génération". Lorsqu'un appareil mobile est connecté à un réseau, la vitesse de la connexion dépend de la norme utilisée, identifiée par les indications 2G, 3G, 4G ou 5G. Chaque génération de réseau mobile repose sur des standards technologiques spécifiques qui définissent ses capacités et ses performances.

L'objectif fondamental des communications sans fil est d'offrir une connectivité fiable et efficace, comparable à celle des réseaux filaires. Chaque nouvelle génération apporte des améliorations considérables en termes de performance et d'accessibilité. Avec l'évolution rapide de la technologie mobile, ces innovations jouent un rôle clé dans l'expansion du numérique et l'amélioration des services connectés. Pour mieux comprendre les différences entre les générations 2G, 3G, 4G et 5G, il est essentiel d'analyser leurs caractéristiques spécifiques.

II.3.1 Deuxième génération (2G)

La technologie 2G représente la seconde génération des réseaux mobiles, basée sur le GSM. Contrairement aux réseaux 1G, qui utilisaient des signaux analogiques, la 2G repose sur une transmission numérique. Elle a permis une amélioration notable en introduisant la capacité de partager

un canal unique entre plusieurs utilisateurs grâce au multiplexage. Avec la 2G, les téléphones ne servaient plus uniquement aux appels, mais aussi aux échanges de données. Ses principales caractéristiques incluent : Débit de données pouvant atteindre 64 kbps Utilisation d'un signal numérique au lieu de l'analogique Prise en charge des SMS et MMS Amélioration de la qualité des appels Bande passante comprise entre 30 et 200 kHz

II.3.2 Troisième génération (3G)

Le réseau 3G repose sur l'architecture UMTS (Universal Mobile Télécommunications System), combinant des éléments de la 2G avec des innovations technologiques pour offrir une transmission de données plus rapide. Grâce à la commutation par paquets, cette génération a permis d'atteindre des vitesses allant jusqu'à 14 Mbps. Elle fonctionne avec un réseau large bande qui améliore la qualité des communications. Le réseau 3G utilise une fréquence de 2100 MHz et un spectre compris entre 15 et 20 MHz. Ses principales spécificités sont : Débit maximal de 2 Mbps Augmentation du débit et de la capacité de transfert des données Possibilité d'envoyer et de recevoir des emails volumineux Capacité accrue pour le haut débit mobile Selon les standards IMT-2000, le débit théorique maximal du HSPA+ en 3G peut atteindre 21,6 Mbps

II.3.3 Quatrième génération (4G)

La transition entre la 3G et la 4G marque une avancée significative en termes de débit. Plusieurs technologies comme le MIMO (Multiple Input Multiple Output) et le OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ont contribué à l'évolution vers la 4G. Les normes principales de cette génération incluent WiMax et LTE. Toutefois, bien que la LTE représente une avancée majeure par rapport à la 3G, elle ne satisfait pas entièrement aux exigences techniques de la 4G. En réalité, la LTE (Long Term Evolution) désigne le processus progressif permettant d'atteindre les standards complets de la 4G. Parmi ses atouts : Prise en charge des contenus multimédias interactifs (voix, vidéo) Vitesse élevée, meilleure capacité et coût de transmission réduit (jusqu'à 20 Mbps ou plus) Compatibilité avec des réseaux mobiles évolutifs et mondiaux Mise en œuvre de réseaux ad hoc et multi-sauts

II.3.4 Cinquième génération (5G)

La 5G exploite des bandes de fréquences millimétriques, comprises entre 30 GHz et 300 GHz, rarement utilisées jusqu'ici. Lors des tests, la portée moyenne d'un signal 5G sur ces fréquences s'étend jusqu'à 500 mètres depuis l'antenne de diffusion. L'intégration des Small cells (petites cellules) et du beamforming (formation de faisceaux) optimise la couverture et réduit la latence. L'un des principaux avantages de la 5G est son temps de latence ultra-réduit, qui peut atteindre 1 milliseconde, avec une moyenne estimée entre 1 et 10 millisecondes. Cela représente une amélioration 60 à 120 fois supérieure à la latence standard de la 4G. En intégrant des antennes MIMO massives, la 5G garantit des connexions plus stables et une meilleure expérience utilisateur. Grâce à la technologie de découpage de réseau

(network slicing), les opérateurs peuvent adapter leurs services selon des accords de niveau de service (SLA) spécifiques, optimisant ainsi la vitesse, la fiabilité et la sécurité. Avec des vitesses atteignant 10 Gbps, la 5G est environ 10 fois plus rapide que la 4G, offrant des performances inédites pour les communications mobiles [57]

Comparison	2G	3G	4G	5G
Introduced in year	1993	2001	2009	2018
Technology	GSM	WCDMA	LTE, WiMAX	MIMO, mm Waves
Access system	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	OFDM, BDMA
Switching type	Circuit switching for voice and packet switching for data	Packet switching except for air interface	Packet switching	Packet switching
Internet service	Narrowband	Broadband	Ultra broadband	Wireless World Wide Web
Bandwidth	25 MHz	25 MHz	100 MHz	30 GHz to 300 GHz
Advantage	Multimedia features (SMS, MMS), internet access and SIM introduced	High security, international roaming	Speed, high speed handoffs, global mobility	Extremely high speeds, low latency
Applications	Voice calls, short messages	Video conferencing, mobile TV, GPS	High speed applications, mobile TV, wearable devices	High resolution video streaming, remote control of vehicles, robots, and medical procedures

Tableau II 1 : Comparaison de 2G 3G 4G 5G

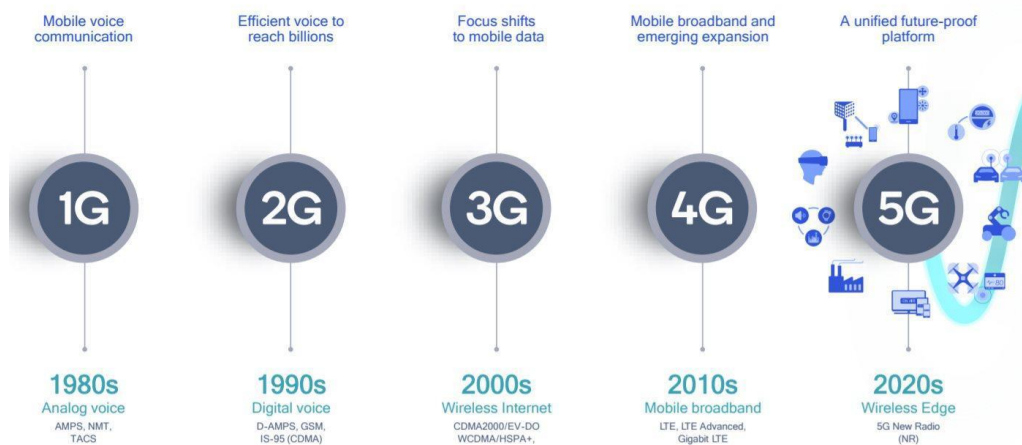


Figure II-2 : De la 1G à la 5G [58]

II.4 Caractéristiques principales

- Une nouvelle ère des réseaux mobiles est en train d'émerger, et la 5G constitue une plateforme d'innovation qui marquera la décennie à venir et au-delà. Cette technologie ne se limite pas à améliorer les services existants ; elle ouvrira également la porte à de nouvelles opportunités et
 - à des gains d'efficacité inaccessibles avec les réseaux actuels. Le développement et l'adoption de ces technologies nécessitent des fréquences adaptées.
- La 5G garantit aux utilisateurs de smartphones exigeants une excellente qualité de service et une bande passante bidirectionnelle étendue.
- Grâce à ses interfaces de facturation avancées, la 5G se distingue par une meilleure efficacité et une attractivité accrue.
- Elle propose des outils de gestion des abonnés réactifs et performants.

- Les services de la 5G, d'une qualité exceptionnelle, reposent sur des protocoles visant à réduire les erreurs.
- Avec une capacité de diffusion en gigabit, la 5G prend en charge plus de 65 000 connexions simultanées.
- Cette technologie fournit une passerelle de classe opérateur offrant une fiabilité sans précédent.
- Elle optimise la précision des statistiques de trafic.
- La gestion à distance, facilitée par la 5G, permet aux utilisateurs d'accéder à des solutions plus rapides et efficaces.
- Un avantage supplémentaire est la possibilité de réaliser des diagnostics à distance.
- La 5G assure des vitesses de connexion pouvant atteindre 25 Mbps.
- Elle prend également en charge les réseaux privés virtuels (VPN).
- L'essor de la 5G pourrait compromettre la viabilité économique des services de livraison traditionnels.
- Elle permet des vitesses maximales en téléchargement et en téléversement. [59]

II.5 Pourquoi la 5G

Les précédentes générations de réseaux mobiles avaient toujours pour ambition d'améliorer la vitesse des données afin de répondre à une demande de ressources toujours plus forte, à des services de plus en plus exigeants en termes de débits. et chaque génération a pu développer de nouvelles technologies pour anticiper les besoins des utilisateurs. la première génération (1G) est un système à fonctionnement analogique avec un multiplexage de type fréquentiel (FDMA). Elle était utilisée pour le service vocal public avec une capacité en termes d'abonnés et de trafic faible. la deuxième génération (2G) repose sur une technologie entièrement numérique avec implémentation des techniques de multiplexage fréquentiel (FDMA), et découpage temporel des canaux disponibles (TDMA), pour une vitesse améliorée autour de 64Kbps. En plus des services de la première génération, la 2G permet de prendre en charge la messagerie texte par la technologie de commutation de paquets, le système sans fil de la troisième génération (3G) fournit des débits jusqu'à 2Mbps. concernant la 4G, les technologies OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) qui est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses et CDMA (Code Division Multiple Access) qui est un système de codage des transmissions, utilisant la technique d'étalement de spectre ont été introduites pour offrir aux consommateurs des débits allant jusqu'à 100 Mbps. Mais vu la demande croissante de données pour les smartphones avec l'essor de nouvelles applications, et surtout l'arrivée de la réalité virtuelle, seul le nouveau standard 5G pourra assurer ce nouveau type de connectivité entre les personnes et les objets dans un environnement placé sous le signe de l'intelligence et des connexions. L'UIT abonde dans le même sens par la voie de son secrétaire général Houlin Zhao [60]. Une société dans laquelle les personnes aussi bien que les objets,

les données, les applications, les systèmes de transport et les villes seraient regroupés au sein d'un environnement placé sous le signe des communications intelligentes en réseau ». Ce développement sera suivi en parallèle d'une croissance exponentielle du volume des données mobiles échangées. Par exemple, des millions de voitures connectées seront en circulation et le moindre problème de réseau pourrait avoir des incidences très graves. C'est la raison pour laquelle l'objectif de la 5G n'est pas seulement de répondre aux besoins d'aujourd'hui mais à ceux de demain afin d'être un réseau qui ne craint ni la surcharge, ni l'évolution et qui s'adapte à de nouveaux usages. La 5G permettra aussi d'être plus rapide pour garantir que des données seront correctement transmises dans un intervalle de temps extrêmement faible mais également sans failles. La combinaison des deux permettra de traiter des applications jugées jusqu'alors trop sensibles pour la mobilité : voitures connectées, équipements de santé, applications industrielles.

II.6 L'objectif De la 5G

L'objectif fondamental de la 5G est d'optimiser de manière significative les performances des réseaux mobiles en comparaison avec la 4G. Ses principaux objectifs incluent :

- **Des vitesses de transmission accrues** : La 5G permet un débit de téléchargement et de téléversement bien supérieur à celui de la 4G, facilitant ainsi le transfert rapide des fichiers et le streaming de vidéos en ultra haute définition. [61]
- **Une latence réduite** : La latence, qui correspond au délai de réponse entre un appareil et le réseau, est considérablement diminuée avec la 5G. Cela est particulièrement avantageux pour les applications nécessitant une réactivité instantanée, telles que les jeux en ligne, la réalité virtuelle et augmentée, ainsi que les véhicules autonomes. [62]
- **Une connectivité optimisée** : La 5G vise à améliorer la couverture réseau aussi bien dans les zones urbaines que rurales, tout en garantissant une réception efficace à l'intérieur des bâtiments et des infrastructures souterraines. [63]
- **Une capacité réseau renforcée** : Grâce à sa technologie avancée, la 5G peut prendre en charge un nombre croissant d'appareils connectés, tels que les objets IoT, les véhicules intelligents, les dispositifs portables et les équipements industriels.
- **Une meilleure efficacité énergétique** : Conçue pour consommer moins d'énergie que les générations précédentes, la 5G contribue à limiter l'impact environnemental tout en prolongeant l'autonomie des appareils connectés.

II.7 Les opportunités et défis de la 5G

Avec son expérience immersive, ses exigences croissantes en matière d'efficacité et de performance, ainsi que son ambition d'interconnecter tous les dispositifs, la 5G continue de se déployer et de s'étendre à grande échelle. Son potentiel s'annonce particulièrement prometteur. En offrant des

débits de données plus rapides, une latence minimale, une densité de connexion optimisée et diverses autres avancées, la 5G garantit des performances améliorées. La figure 3 ci-dessous présente un exemple d'applications de la 5G, illustrant un environnement entièrement connecté [64].

II.8 La 5G dans le monde

Le déploiement rapide de la 5G est devenu un enjeu majeur pour l'Europe, qui cherche à dynamiser son économie, améliorer sa compétitivité industrielle et générer de nouvelles opportunités d'emploi. Cette technologie de pointe est déterminante pour préserver la position de l'Europe dans l'industrie mondiale des télécommunications. Toutefois, le continent accuse un retard par rapport à ses concurrents et tente de combler l'écart en matière de 5G [65].

En Amérique du Nord, la recherche se distingue par une approche davantage axée sur les universités et les entreprises, contrairement à l'Europe où les efforts sont souvent coordonnés grâce à des financements publics. De son côté, l'Asie suit une démarche similaire à celle de l'Europe en élaborant une feuille de route dédiée à la 5G. Des pays comme la Chine, le Japon et la Corée du Sud se positionnent en leaders de la recherche dans ce domaine.

En avril 2021, 436 opérateurs étaient engagés dans le déploiement de la 5G, dont 163 avaient déjà lancé des offres commerciales dans 64 pays. Cependant, cela signifie qu'une grande partie du monde reste encore à l'écart de cette avancée technologique. Des régions comme l'Afrique, l'Asie du Sud, la Russie et l'Amérique centrale rencontrent des difficultés dans l'implémentation de la 5G. [66].

II.9 Architecture de la technologie 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau cœur 5G. Le réseau d'accès lui-même est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NGRAN), qui utilise la nouvelle interface radio 5G(NR), et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G. Les différentes entités de réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacents, qui prend en charge les fichiers QOS [67].

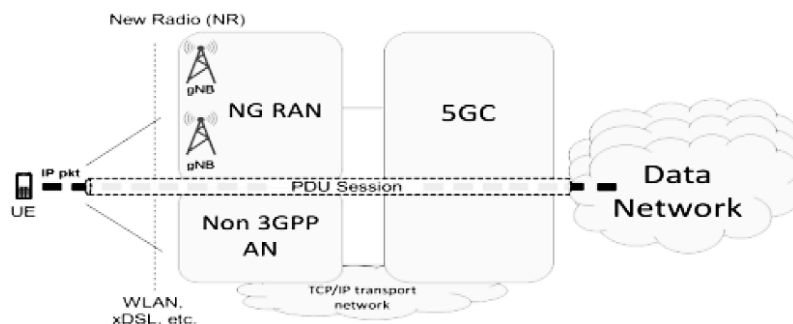


Figure II-3 : Un réseau cellulaire de base.

Comme le montre la figure [II-3] le réseau 5G connecte l'équipement d'utilisateur (UE) à des réseaux de données externes. La session PDU représente le service de connectivité 5G, elle constitue par une séquence de tunnels NG dans le 5GC plus un ou plusieurs porteurs radios sur l'interface radio. Cet ensemble de "tubes" relie finement le UE à ses fonctions de contrôle ainsi que le réseau de données externe pour l'échange de trafic d'utilisateur figure [II-3] [67].

Une session PDU est très similaire à un porteurs EPS à LTE, sauf pour le modèle QoS et les unités de données des utilisateurs supportées. En effet, une session PDU peut transporter non seulement les paquets IP de l'utilisateur mais aussi l'ETHERNET où les cadres non survenus, permettant ainsi une communication de la couche-2 entre les groupes d'UE. Le modèle 5G est basée sur le nouveau concept de flux de QoS, où un flux est la plus grande granularité de la différenciation QoS [67].

Les différents flux de QoS peuvent appartenir à une seule session PDU.

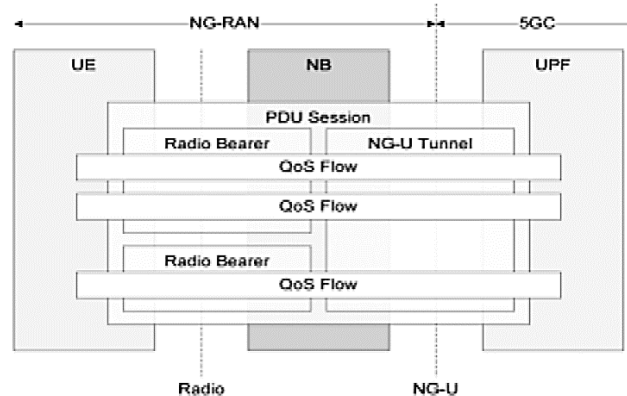


Figure II-4: Session PDU et flux QoS : plan utilisateur (UP).

La figure [II-4] montre les divisions entre les fonctions 5G exécutées dans le NG-RAN et le 5G coeur, en bordure, le NG-RAN est le responsable de l'établissement, la maintenance et la libération des parties des sessions PDU qui traversent l'interface radio. Il face le problème de l'insuffisance physique (ex : interférences, réduction énergétique etc.), les handover inter-gNB, et le multiplexage de la session (planification). Les fonctions de 5GC gèrent les parties restantes des parties PDU ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio (gestion de la mobilité, sécurité adresses IP, allocation etc.) [67].

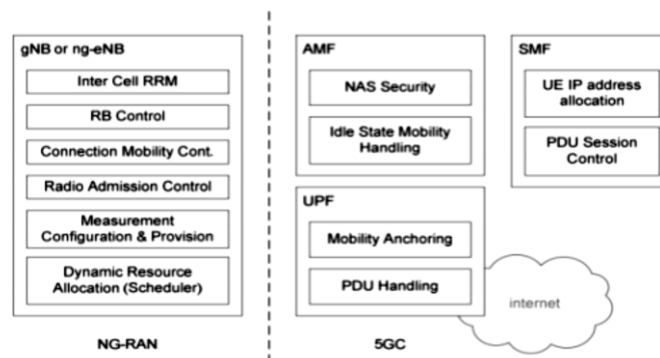


Figure II-5 : La séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC.

II.9.1 Nouvel génération réseaux d'accès (NG-RAN)

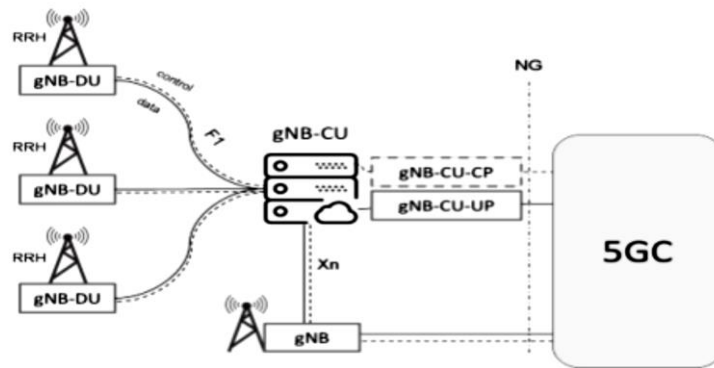


Figure II-6 : Architecture de NG-RAN.

Comme représenté dans la figure [II-6], le NG-RAN s'agit d'un ensemble de stations de bases 5G, appelées gNBs, qu'elles sont connectées au 5GC à travers un ensemble d'interfaces logiques. Les gNBs peuvent être interconnectés à travers l'interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (handover) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires) [67].

Le fonctionnement de la gNB est parfois réparti. Dans ce cas, l'architecture résultante est formée par une unité centrale (gNB-CU) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) et connecter à une carte radio distante (RRH). L'unité centrale est encore divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions de plan d'utilisateur (gNB-CU-UP) [69].

II.9.2 5G Réseau central (5G)

La décomposition des fonctions exécutées par les nœuds de réseau des générations précédentes a conduit à une architecture 5G complètement définie en termes de fonctions de réseau exposées sous formes de services.

Comme se produit dans le NG-RAN, il y a une séparation entre le plan contrôle et utilisateur. Dans le plan utilisateur, il se trouve une ou plusieurs fonctions UP (UPFs), qui effectuent principalement le transfert de paquets entre les différents tunnels de NG-U figure [II-5] qui forment la session PDU. Toutes les autres fonctions du réseau appartiennent au plan contrôle [67].

Un autre changement radical par rapport aux générations précédentes est la modélisation d'interface, qui a été passée de " l'orientation-bit point-à-point " (bit-oriented point-to-point) vers " l'orientation-web basé-service " (web-oriented service-based). En effet, 5GC a une architecture basée sur le service applicable par tout, les procédures sont définies comme des services de sorte qu'il est possible de les réutiliser [67].

Il existe une interface point-à-point normalisée, soit réelle ou logique, entre toute paire d'entités de réseau 2G, 3G et 4G en interaction. Cette interface utilise un protocole spécial orienté-bit. Dans le

core 5G, les interactions entre les entités du plan contrôle utilisent des interfaces basées sur les services prises en charge par des outils web tels que HTTP/2, REST et JSON [67].

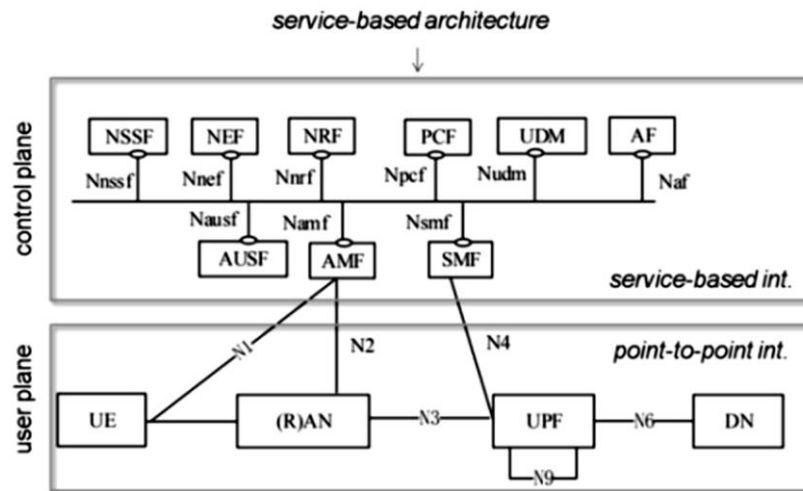


Figure II-7 : Architecture du système 5G, no-roaming

II.10 Fondements techniques de la 5G

La 5G utilise différentes technologies essentielles comme les ondes millimétriques, le Full Duplex, le Beamforming, les petites cellules, le MIMO Massif, etc., qui offrent la possibilité d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité. Comme illustré dans la figure II-8 [68].



Figure II-8 : Les principales technologies mises en œuvre pour 5G [68]

II.11 Spectre radio : utilisation des bandes de fréquences basses, moyennes et hautes

Emploi des gammes de fréquences basses, intermédiaires et élevées. Pour assurer une large couverture et répondre à l'ensemble des exigences, la 5G requiert des fréquences sur trois bandes principales, comme le montre l'illustration.

Trois gammes de fréquences sont les suivantes : sous 1 GHz, entre 1 et 6 GHz, et au-dessus de 6GHz

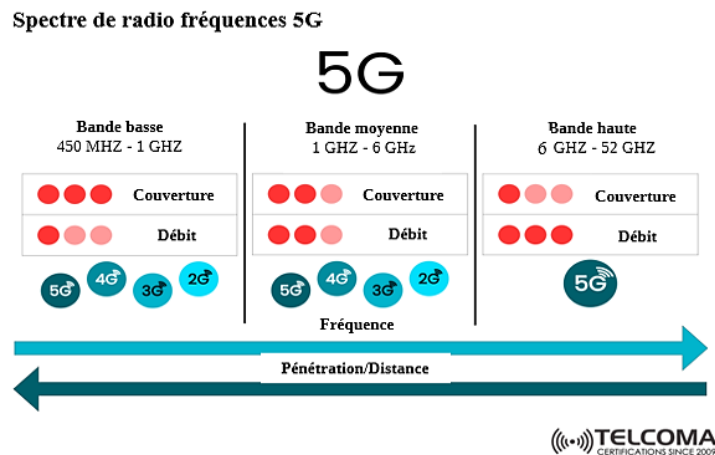


Figure II-9 : Le spectre radio [69]

II.11.1 Fréquences à basse bande 5G : Les fréquences en-dessous de 1GHz

Les fréquences inférieures à 1GHz Les fréquences 5G à basse bande englobent celles qui sont en dessous de 1GHz. Pour élargir la portée de la 5G à très haut débit dans les zones urbaines, périphériques et rurales, ainsi que pour stimuler l'évolution des services IoT, l'utilisation de fréquences inférieures à 1 GHz est indispensable. Sans ces fréquences, il sera difficile pour les services 5G de s'étendre au-delà des zones urbaines et d'infiltrer les édifices. Dans ce contexte, une portion des fréquences TV UHF devrait être libérée grâce au second dividende numérique [70]

II.11.2 Fréquences en bande moyenne 5G : Les fréquences de 1 à 6 GHz

Les fréquences de 1 à 6 GHz permettent des vitesses plus élevées et une latence plus réduite comparativement à la bande basse. Toutefois, il n'arrive pas à pénétrer les édifices avec la même efficacité que le spectre de basse fréquence [71]. Le spectre moyen est fréquemment privilégié pour la connectivité 5G, en raison de sa capacité à couvrir de larges régions dans les zones suburbaines et urbaines. Le spectre moyen peut être exploité dans divers contextes grâce à son compromis entre rapidité et portée [72]

II.11.3 Fréquences à haute bande 5G : au-dessus de 6 GHz

Pour atteindre les vitesses très élevées prévues pour la 5G, des fréquences supérieures à 6 GHz sont indispensables. À l'heure actuelle, les bandes 26 GHz et/ou 28 GHz bénéficient de l'appui international le plus fort dans cette gamme de fréquences. Un aspect essentiel de la Conférence Mondiale des Radiocommunications de l'UIT en 2019 (CMR-2019) était l'établissement d'un accord international concernant les bandes 5G au-delà de 24 GHz. Pour leur utilisation, des puces mobiles de haute performance étaient nécessaires, car elles avaient la capacité de gérer des fréquences et des vitesses de transfert de données élevées.

Les fréquences hautes fréquences, qui sont essentiellement récentes dans le secteur des télécommunications sans fil, ont été rebaptisées « mmWave », car elles présentent une longueur d'onde variant de 4 à 12 millimètres. La 5G à haut débit, aussi appelée 5G millimétrique, propose des performances de transmission de données sans fil jamais vues auparavant. Cette vitesse offre de nombreux avantages pour les transmissions sans fil. Ces fréquences 5G offrent une capacité accrue du réseau, une meilleure couverture, des vitesses de transmission de données plus élevées pour les utilisateurs et la faculté de connecter un nombre plus important d'appareils [73].

II.12 Les technologies fondamentales de la 5G

La 5G représente une avancée majeure par rapport à ses prédécesseurs, intégrant plusieurs technologies essentielles qui permettent ses performances supérieures :

Ondes millimétriques : La 5G utilise des bandes de fréquences plus élevées, appelées ondes millimétriques, allant de 30 GHz à 300 GHz. Ces fréquences peuvent transporter de grandes quantités de données à des vitesses élevées, mais leur portée est plus courte et elles sont plus sensibles aux obstacles physiques. Cela nécessite le déploiement de nombreuses petites cellules pour garantir une couverture cohérente.

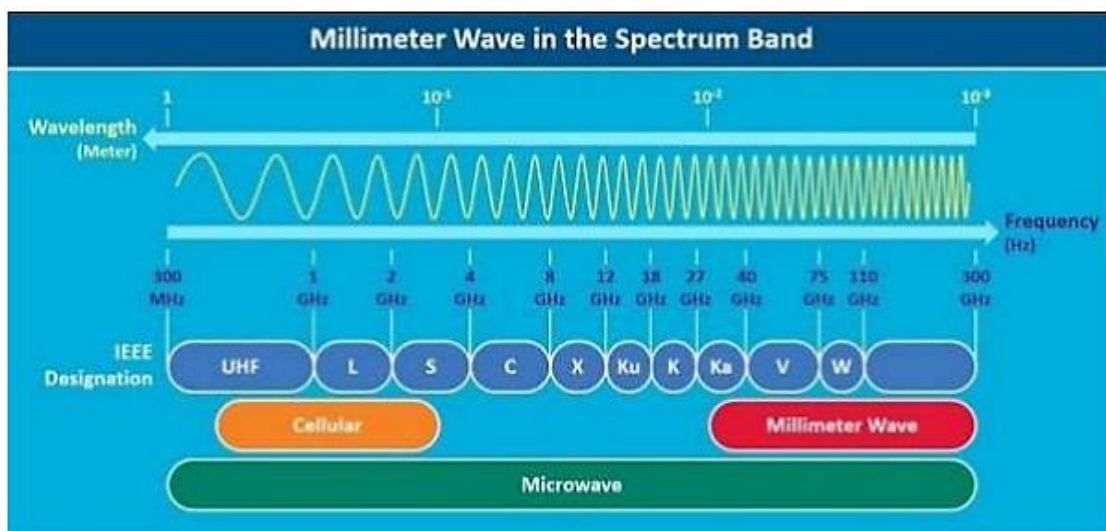


Figure II-10 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques) [74]

- **Petites cellules** : Pour pallier les limitations de portée des ondes millimétriques, la 5G repose sur les petites cellules, qui sont des stations de base à faible puissance déployées de manière dense dans les zones urbaines. Les petites cellules améliorent la capacité du réseau et assurent une meilleure couverture dans les régions densément peuplées. Elles fonctionnent en synergie avec les macro cellules, formant un réseau hétérogène qui optimise les performances.

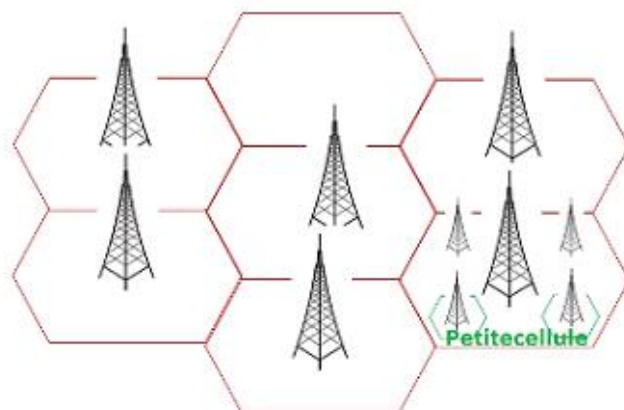


Figure II-11 : La petite cellule [75]

- **Massive MIMO** : La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) a été considérablement améliorée avec la 5G, donnant naissance au Massive MIMO. Cette technologie repose sur l'utilisation d'un grand nombre d'antennes à la station de base pour desservir plusieurs utilisateurs simultanément. Le Massive MIMO améliore l'efficacité spectrale, augmente la capacité du réseau et améliore les débits de données, garantissant ainsi une connexion plus fiable.

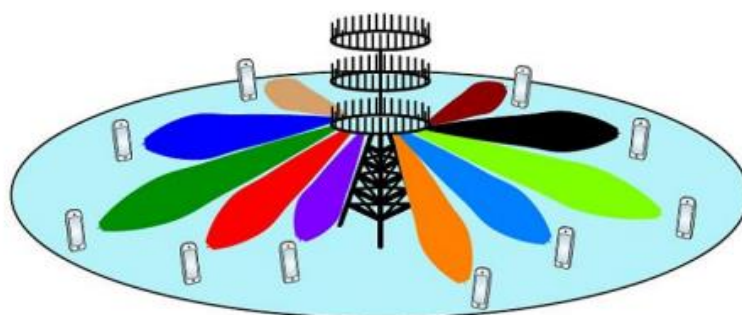


Figure II-12 : MIMO Massive [76]

- **Formation de faisceaux (Beamforming)** : Le Beamforming est une technique de traitement du signal utilisée en combinaison avec le Massive MIMO. Elle permet de diriger les signaux de données vers des utilisateurs spécifiques au lieu de les diffuser dans toutes les directions. Cette approche ciblée réduit les interférences, améliore la qualité du signal et optimise l'efficacité globale du réseau. Ces technologies essentielles permettent à la 5G d'offrir une vitesse, une capacité et une fiabilité sans précédent, facilitant ainsi une large gamme d'applications, allant de la réalité augmentée (AR) et de la réalité virtuelle (VR) aux véhicules autonomes et aux villes intelligentes.

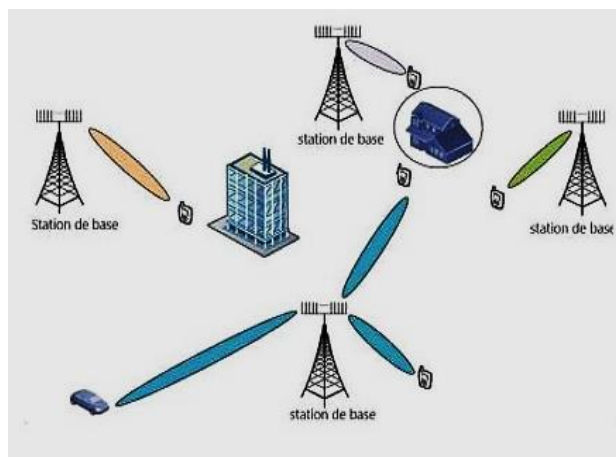


Figure II-13 :Technologie Beamforming [77]

II.13 Les fréquences utilisées par la 5G

La 5G est conçue pour fonctionner sur des fréquences radio allant de moins de 1 GHz à des fréquences extrêmement élevées, appelées "ondes millimétriques" (ou mmWave). Plus la fréquence est basse, plus le signal peut voyager loin. Plus la fréquence est élevée, plus le signal peut transporter de données.

Trois bandes de fréquences sont au cœur des réseaux 5G comme représente La figure suivante :

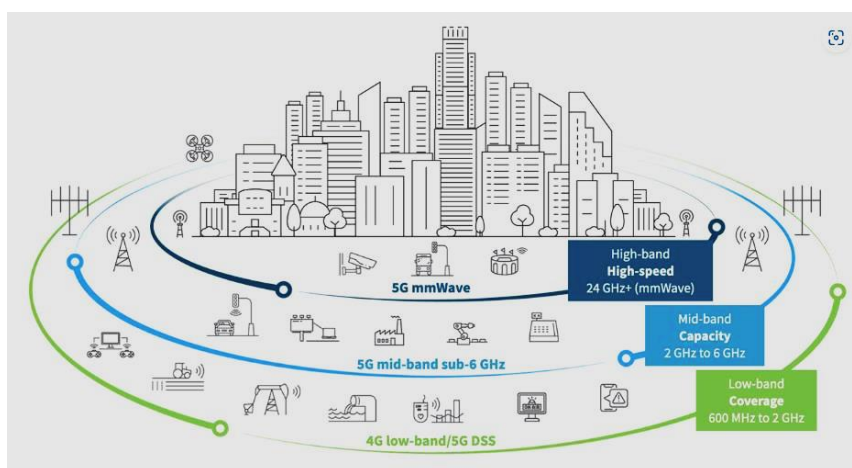


Figure II-14 : Les bandes de fréquences 5G [78]

II.14 Types de modulation dans la 5G

La transmission des données repose sur la modulation du signal entre la station de base (BTS) et le terminal, ce qui implique un encodage préalable de l'information avant son envoi sur le canal de communication. Le multiplexage, quant à lui, permet de faire transiter plusieurs flux de données sur un même support de transmission. Depuis l'émergence de la téléphonie mobile, diverses techniques de

modulation multiplexée ont été adoptées : la 1G s'appuyait sur le FDMA (Frequency Division Multiple Access), la 2G sur le TDMA (Time Division Multiple Access), la 3G sur le CDMA (Code Division Multiple Access), tandis que la 4G a introduit l'OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). La 5G conserve également l'OFDMA, comme la 4G, mais en y intégrant une plus grande flexibilité en termes de gestion du temps et de la fréquence, ce qui permet de répondre aux exigences variées des utilisateurs [79]. Cette technique repose sur la transmission simultanée de signaux via plusieurs porteuses, ce qui engendre une variation importante des niveaux instantanés en raison des interférences constructives et destructives.

II.15 Domaines d'utilisation

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a identifié trois principaux axes d'utilisation pour la 5G, classés en différentes catégories : le haut débit mobile optimisé (eMBB), la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC) et la communication massive entre machines (mMTC) (voir figure II.15). Un résumé des principales spécificités de ces domaines d'application est présenté dans le tableau II.15

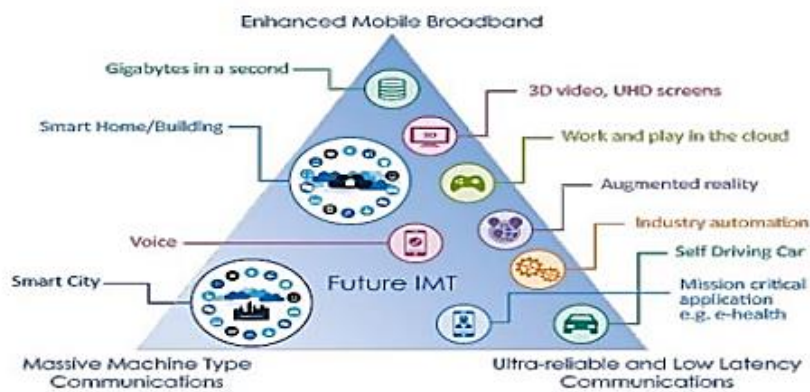


Figure II-15 : Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [80]

le haut débit mobile amélioré (eMBB)	la communication massive de type machine (mMTC)	la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC)
Les principales caractéristiques de ce domaine d'utilisation incluent un débit de données élevé et variable (pouvant atteindre 20 Gbit/s), ainsi qu'une grande mobilité. L'accès mobile à haut débit amélioré permet une transition fluide entre les réseaux fixes et mobiles.	Ce domaine d'utilisation se distingue par un très grand nombre d'appareils connectés, qui transmettent généralement de faibles volumes de données et ne sont pas sensibles au temps. Ces appareils doivent être économiques et avoir une très longue autonomie.	Ce domaine se caractérise par des connexions fiables et sensibles au temps, avec des vitesses de transmission garanties, des temps de latence assurés de quelques millisecondes et une probabilité de défaillance définie.

Tableau II-2 : Principales caractéristiques des domaines d'utilisation de la 5G

II.16L'application industrielle

L'application de la 5G dans divers secteurs industriels démontre un potentiel significatif pour la transformation numérique et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle. Dans le domaine de la santé, la 5G permet une meilleure télémédecine, offrant un accès à des services de santé de haute qualité sans limitations géographiques. Elle permet l'utilisation de dispositifs médicaux connectés pour la surveillance en temps réel des patients et une intervention médicale rapide.

Dans l'industrie automobile, la 5G soutient le développement des véhicules autonomes et de la connectivité véhicule-à-tout (V2X). Les véhicules autonomes nécessitent une communication rapide et fiable pour fonctionner en toute sécurité, tandis que le V2X permet aux véhicules de communiquer avec l'infrastructure routière, les piétons et les autres véhicules afin d'améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic.

Dans le secteur manufacturier, la 5G permet la création d'usines intelligentes en connectant les machines, les robots et les systèmes de contrôle dans un réseau hautement réactif et fiable. Elle favorise l'automatisation, la maintenance prédictive et une gestion efficace des ressources, augmentant ainsi la productivité et réduisant les coûts opérationnels [81].



Figure II-16 : Les diverses applications de la 5G [82]

II.17 Conclusion

Comme nous l'avons constaté, la technologie de cinquième génération (5G) révolutionne le paysage technologique en augmentant la rapidité, diminuant la latence et rendant possible la connexion simultanée de multiples appareils. La 5G ne se contente pas d'optimiser les réseaux de télécommunication, elle constitue aussi le socle pour des progrès dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, les voitures autonomes et les villes intelligentes. Bien que la technologie soit encore en phase de déploiement, son potentiel est prévu pour transformer tous les aspects de notre interaction avec le monde numérique.

Chapitre III : Simulation, résultats et interprétations

III.1 Introduction

Avec l'évolution constante des technologies informatiques, les logiciels de simulation occupent aujourd'hui une place essentielle dans de nombreux domaines d'application.

Dans le domaine de l'électromagnétisme, plusieurs outils numériques sont disponibles, chacun reposant sur des méthodes de calcul spécifiques, tels que CST, HFSS ou encore ADS. Le choix du logiciel dépend principalement des exigences de la conception, notamment la taille, le matériau, le type de la structure ou encore la complexité géométrique.

Dans le cadre de notre étude, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel CST Microwave Studio.

Ce dernier est particulièrement adapté à l'analyse et à la modélisation des phénomènes électromagnétiques à haute fréquence. Il facilite la conception des structures complexes en permettant la création de modèles 3D détaillés pour chaque composant.

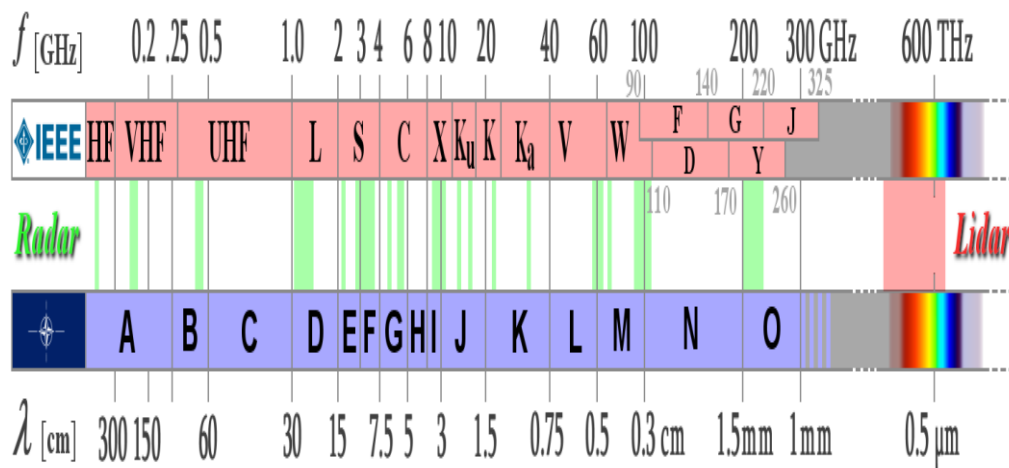


Figure III-1 : Bande de fréquences et leurs applications

III.2 Définition du logiciel CST Micro avec studio

L'entreprise allemande CST (Computer Simulation Technology) a été créée en 1992. CST Microwave Studio est sorti pour la première fois en 1998. Notre logiciel utilise la méthode des intégrales finies (FIT, Finite intégration technique) créée par Tomas Weiland. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques 3D. Les équations intégrales de Maxwell sont reformulées sous une forme discrète pour être compatibles avec l'informatique et résoudre des problèmes à géométrie complexe. La FIT consiste à représenter des équations de Maxwell sur un espace de grille, tout en maintenant les caractéristiques de conservation de l'énergie, et en créant des équations différentielles spécifiques comme celle de Poisson ou l'équation d'onde [39]

III.3 Fonctionnalités du logiciel CST Microwave Studio

Le logiciel CST Microwave Studio présente plusieurs fonctionnalités notables, parmi lesquelles on peut citer :

Une base de données riche et bien fournie en matériaux.

La possibilité de visualiser la structure sous forme de modèle tridimensionnel ou de schéma.

D'excellentes performances grâce à l'utilisation de conditions aux limites parfaitement adaptées.

Une grande rapidité d'exécution ainsi qu'une gestion efficace de la mémoire.

III.4 Objectif

L'objectif de ce chapitre est de concevoir une antenne patch et réseau d'antenne du 2^{élément} et 4^{éléments} et 8^{éléments} qui doit fonctionner à la fréquence de résonance 25 GHz, avec un coefficient

De réflexion au-dessous de -10dB. Alors on doit calculer les paramètres de l'antenne avant la simulation

Les caractéristiques internes (les paramètres S, la fréquence de résonance, la bande passante), et les Caractéristiques Radio électrique (le gain, la directivité, le diagramme de rayonnement dans le plan E et H)

Une méthodologie a été mise en place pour la conception de l'antenne patch rectangulaire celle-ci consiste à :

- Calculer les dimensions théoriques du patch réaliser à la fréquence désirée.
- Optimiser l'adaptation de l'antenne par des encoches.
- Faire une simulation sous logiciel CST Microwave Studio.
- Vérifier les performances de l'antenne tel que l'adaptation, le gain, la directivité.
- Amélioration du gain par un réseau d'antenne.

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch microstrip à la fréquence de 25 GHz. Le cahier des charges nous impose les paramètres suivants :

- Permittivité diélectrique du substrat (Rogers RT5880 ; $r = 2.2$).

- Hauteur du substrat diélectrique : $hs = 0.508mm$.
- Fréquence de résonance que l'on désire : $r = 25GHz$.
- Adaptation à 50 Ohm.
- Alimentation par ligne microstrip.
- Epaisseur de la métallisation : $h = 0. mm$.

III.5 Conception d'une antenne patch pour la 5G à une fréquence de résonance de 25 GHz

Matériau	Utiliser pour
Rogers RT5880	Substrat
Cuivre	Patch et plan de masse

Tableau III-1 : Matériaux constitutifs de l'antenne.

Paramètre	Symbole	Valeur (mm)
Largeur du substrat	WS	20
Longueur du substrat	LS	17
Largeur du plan de masse	WG	20
Longueur du plan de masse	LG	16.5
Epaisseur du substrat	HS	0.508
Epaisseur du plan de masse	HG	0.035
Largeur du patch	WP	9.9
Longueur du patch	LP	10.8
Epaisseur du patch	HP	0.035
Largeur de l'espace (gap)	WG	0.5
Longueur de l'espace (gap)	LG	2.4
Largeur de la ligne d'alimentation	WF	1.578
Longueur de la ligne d'alimentation	LF	4.75
Largeur de la fente 2	W2	1.5
Longueur de la fente 2	L2	1
Epaisseur de la fente	HT	1

Largeur de la fente 1	W1	0.5
Longueur de la fente 1	L1	5.3
Largeur de la fente 0	W0	4.25
Longueur de la fente 0	L0	3.95

Tableau III-2 : dimensions de conception de l'antenne.

III.6 Résultats de la simulation d'antenne

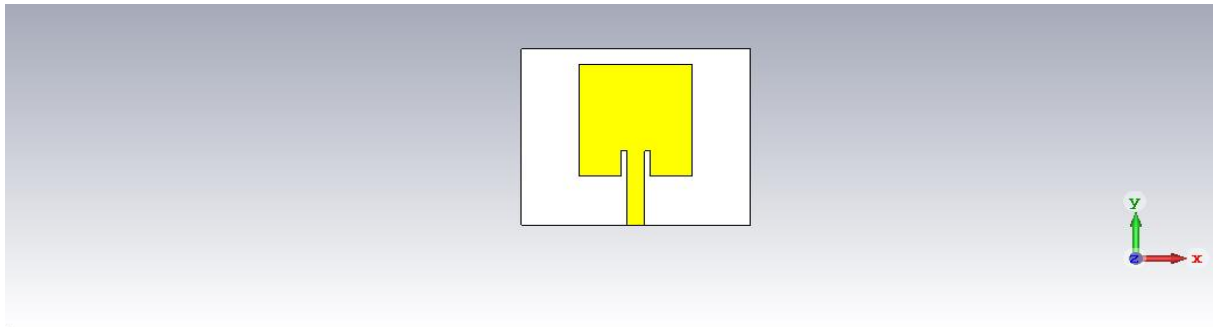


Figure III-2 : Structure de l'antenne conçue.

À partir des résultats de la **Figure III-3** actuelle pour l'antenne Patch, la fréquence de résonance principale se situe autour de 25.904 GHz et le coefficient de réflexion est de -13.944 dB, ce qui signifie une bonne adaptation d'impédance à cette fréquence. Comme la fréquence cible est 25 GHz, inférieure à la fréquence actuelle, l'utilisation de fentes est une étape appropriée dans ce processus d'ajustement des fentes abaisse la fréquence vers la valeur cible. Elles le font en augmentant le chemin du courant effectif, ce qui réduit la fréquence de résonance.

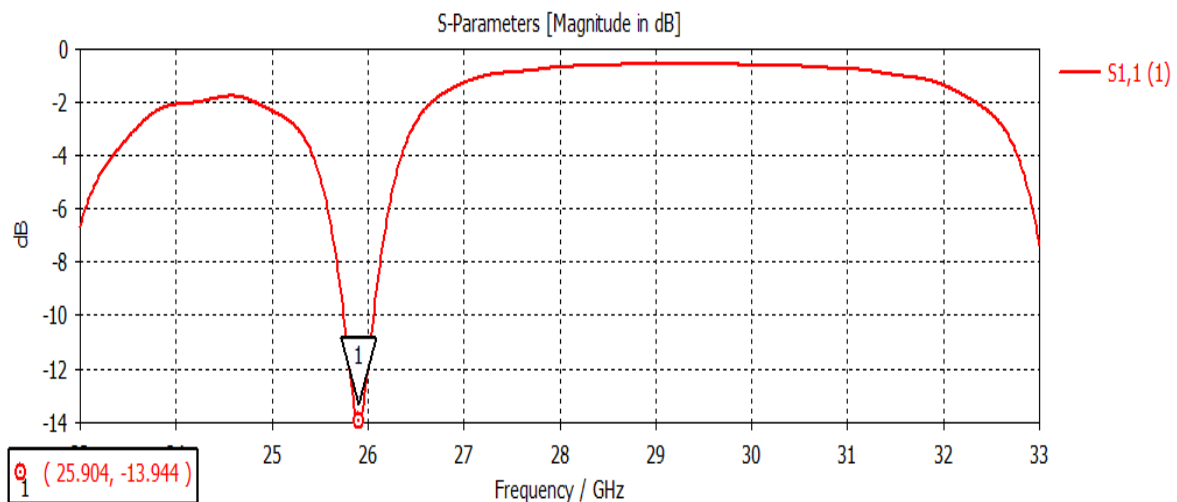


Figure III-3 : Représentation du coefficient de réflexion.

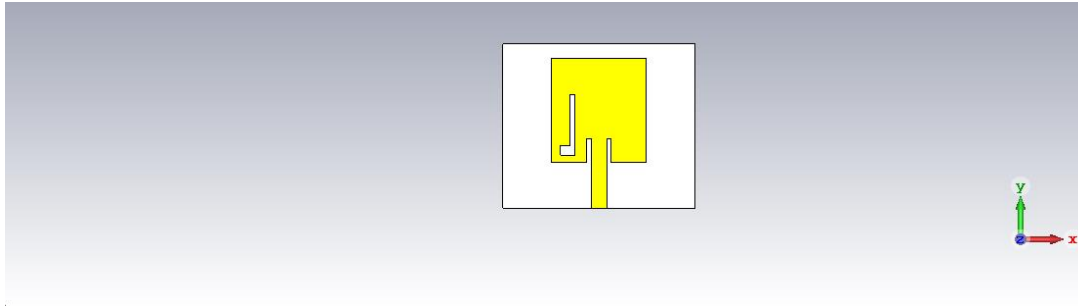


Figure III-4 : Structure de l'antenne conçue.

La **Figure III-5** révèle que l'antenne est bien adaptée à la fréquence de 25,64 GHz, où son coefficient de réflexion est de -20,57 dB.

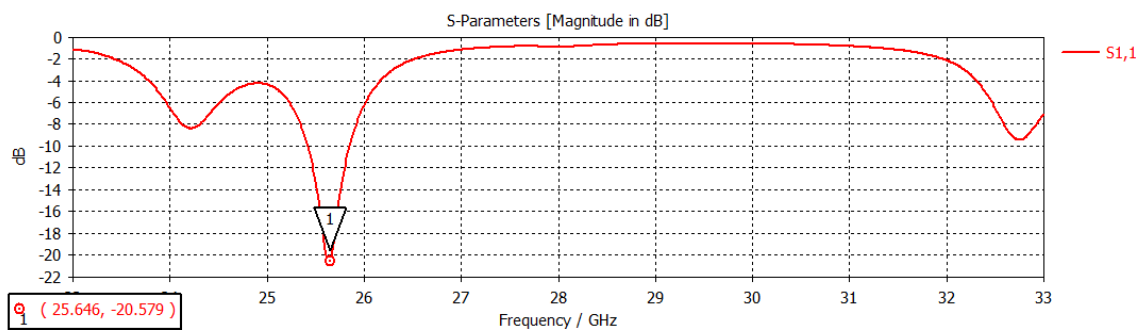


Figure III-5 : Représentation du coefficient de réflexion.

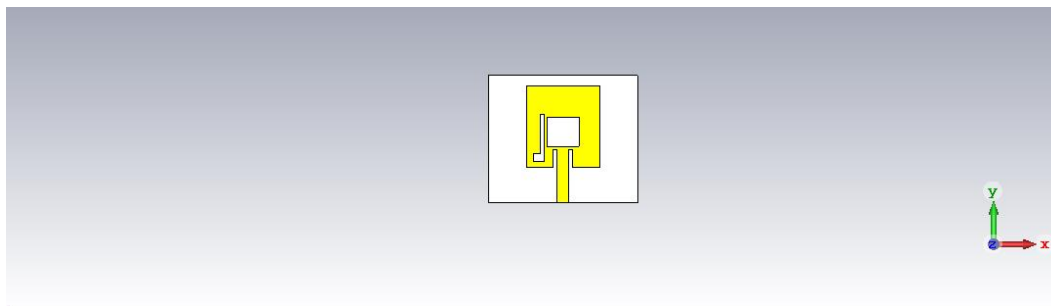


Figure III-6: Structure de l'antenne conçue.

La **Figure III-7** révèle que l'antenne est bien adaptée à la fréquence de 24,27 GHz, où son coefficient de réflexion est de -24,90 dB.

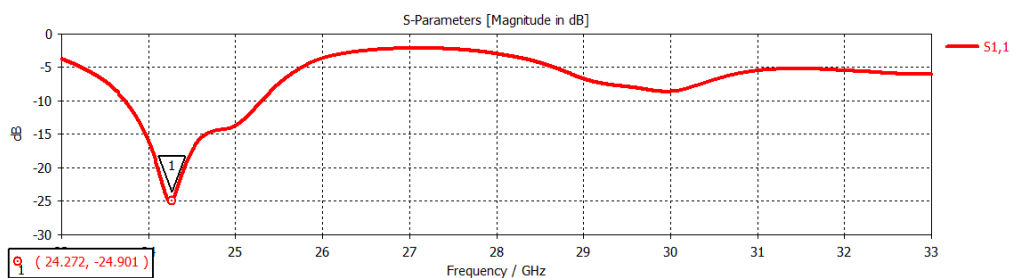


Figure III-7 : Représentation du coefficient de réflexion.

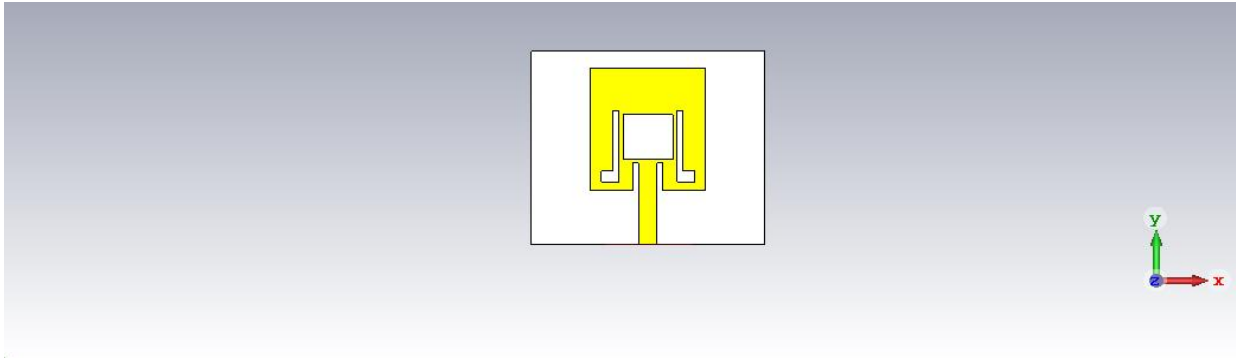


Figure III-8 : Structure de l'antenne conçue avec des fentes.

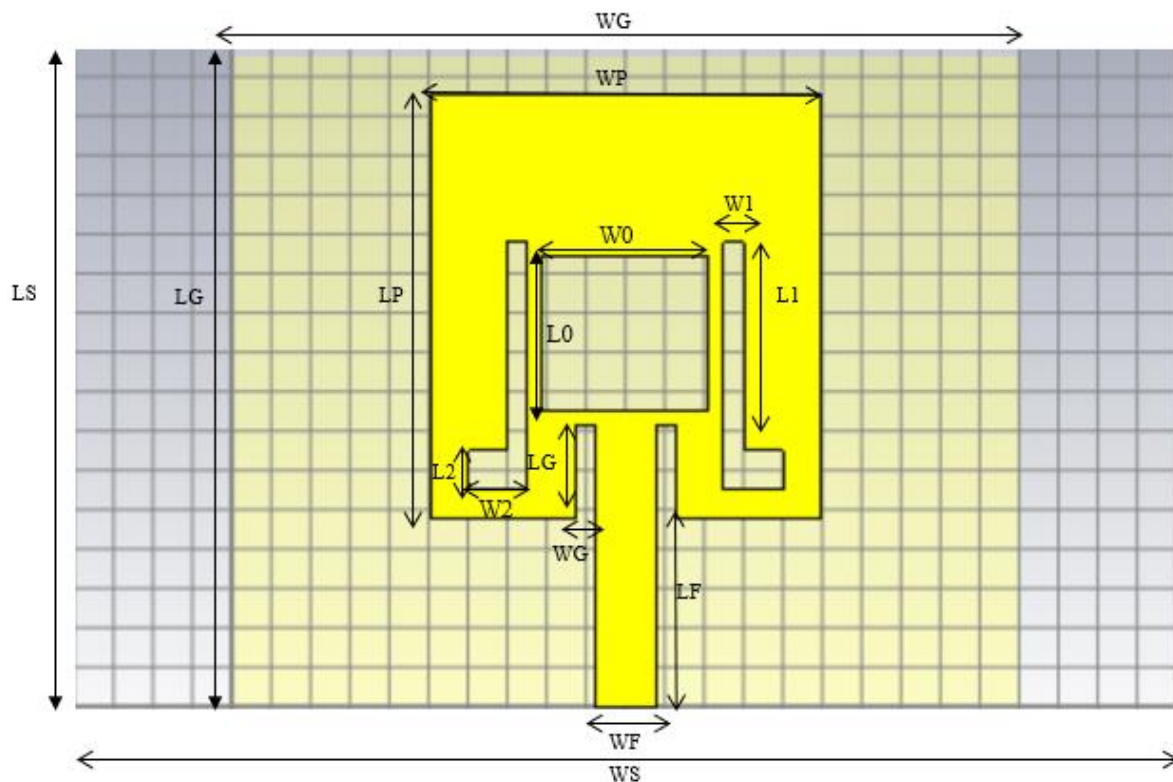


Figure III-9 : Paramètres de l'antenne conçue

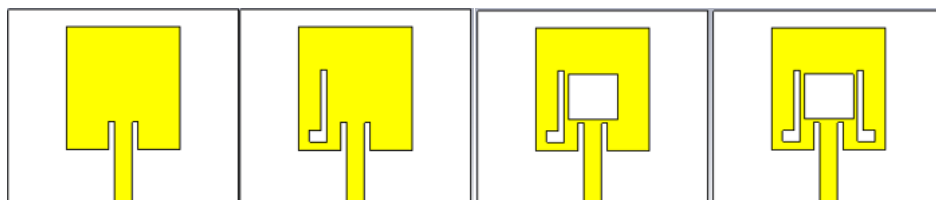


Figure III-10 : étapes de conception de l'antenne conçue avec des fentes.

Les résultats obtenus pour l'antenne Patch simulée sous CST, illustrés à la **Figure III-11** ci-dessous, montrent que l'antenne est fortement en résonance et est bien adaptée à une fréquence de 24.92 GHz où le coefficient de réflexion atteint sa valeur la plus basse de -21.902 dB. Cela signifie que l'antenne fonctionne de manière très efficace à cette bande de fréquence.

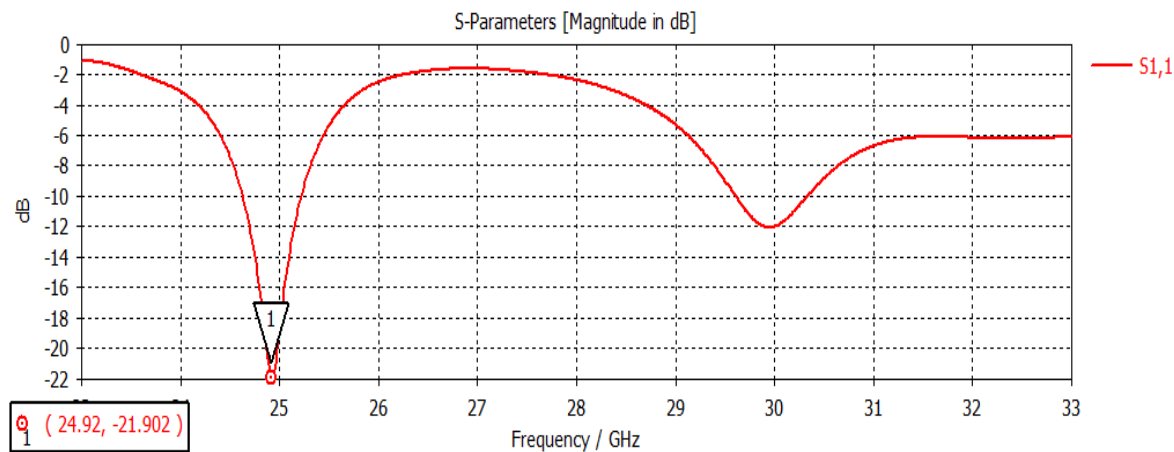
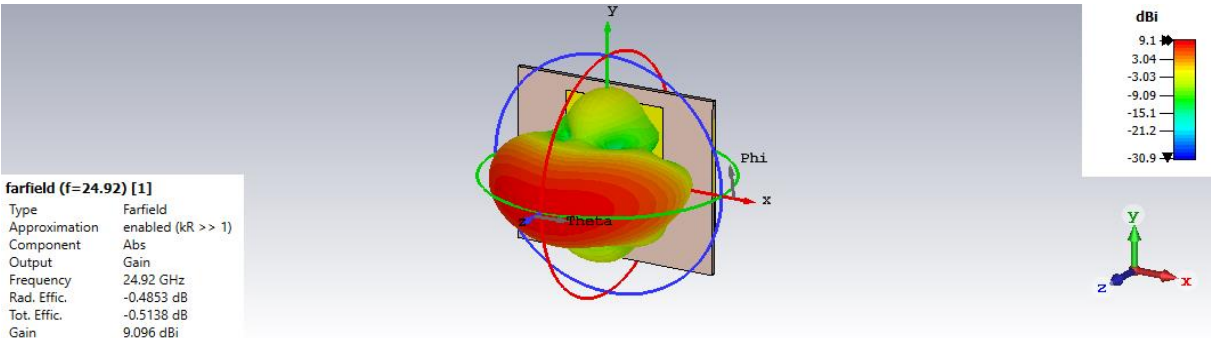


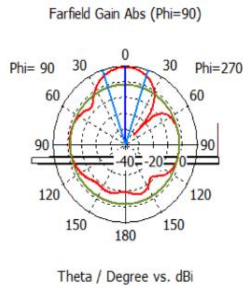
Figure III-11 : Représentation du coefficient de réflexion.

Nous présentons maintenant les caractéristiques de rayonnement de l’antenne conçue .Nous montrons dans la **Figure III-12** le diagramme de rayonnement simulé pour la fréquence de résonance 24.92 GHZ.

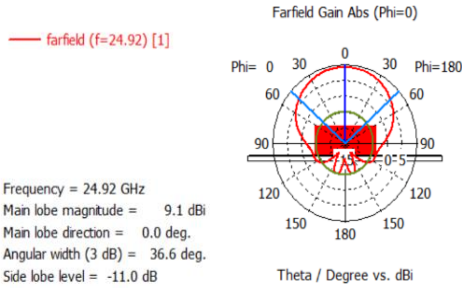
Le plan	Plan 3D	Plan polaire phi=90	Plan polaire phi=0
Résultat de Gain	9 dBi	9.1 dBi	9.1dBi



(a)



(b)



(c)

Figure III-12 : Diagramme de rayonnement à 24.92 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)

Pour **Figure III-13**, la fréquence de 24.92 GHz, le gain de l'antenne individuelle est d'environ 9.04 dB, ce qui est une bonne performance et indique une capacité directionnelle de l'antenne.

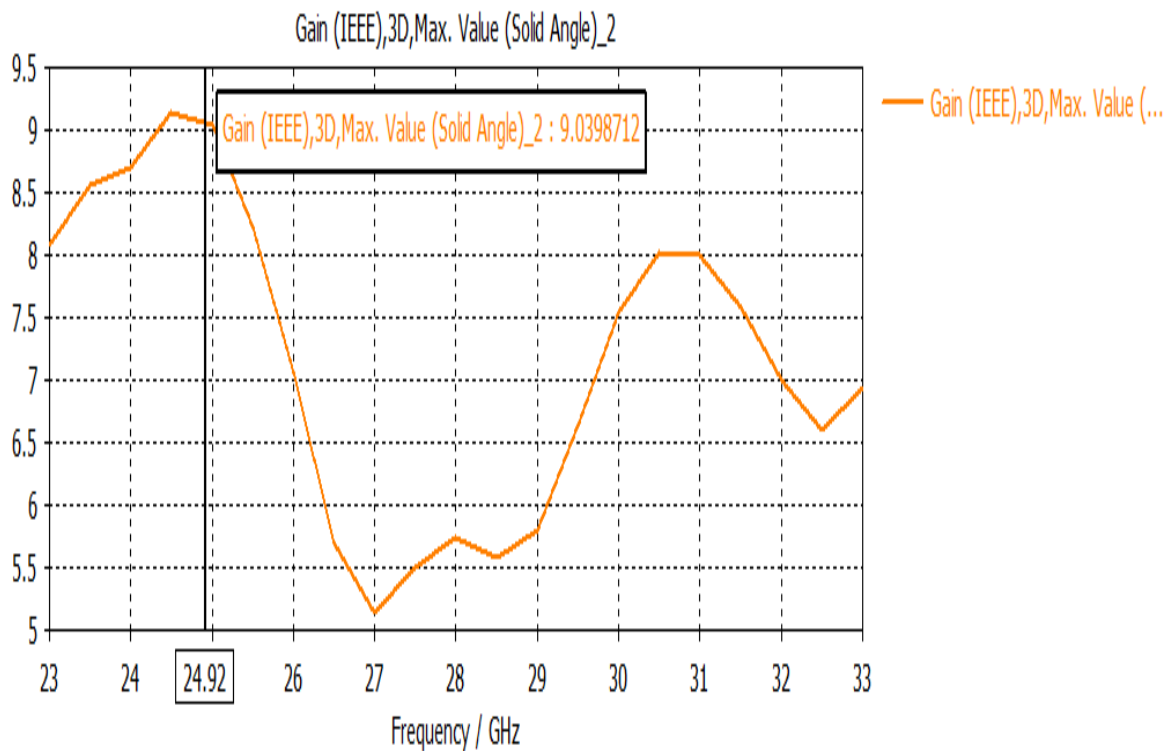


Figure III-13 : Le gain en fonction de la fréquence.

III.7 Conception de réseau d'antennes pour la 5G à une fréquence de résonance de 25 GHz

Nous présentons maintenant le diviseur de réseau aérien à deux éléments. Illustré dans la **Figure III-14**, la fréquence de résonance est parfaitement adaptée à 24,81 GHz. illustré dans la **Figure III-15**

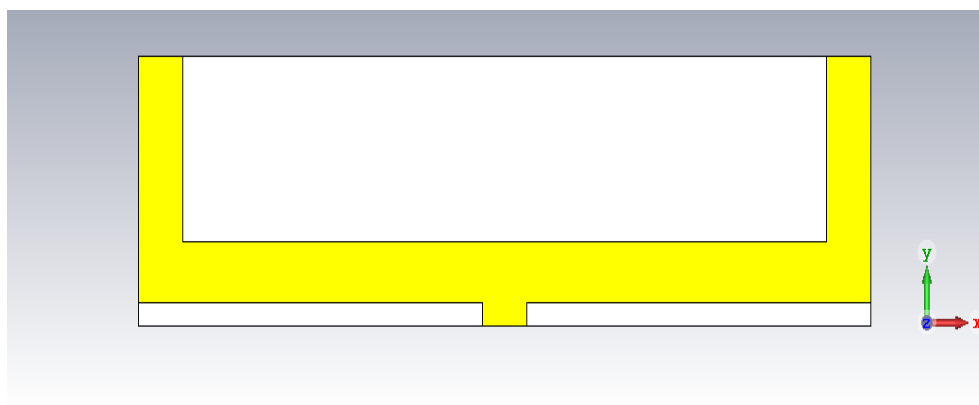


Figure III-14 : Diviseur pour réseau d'antennes à deux éléments

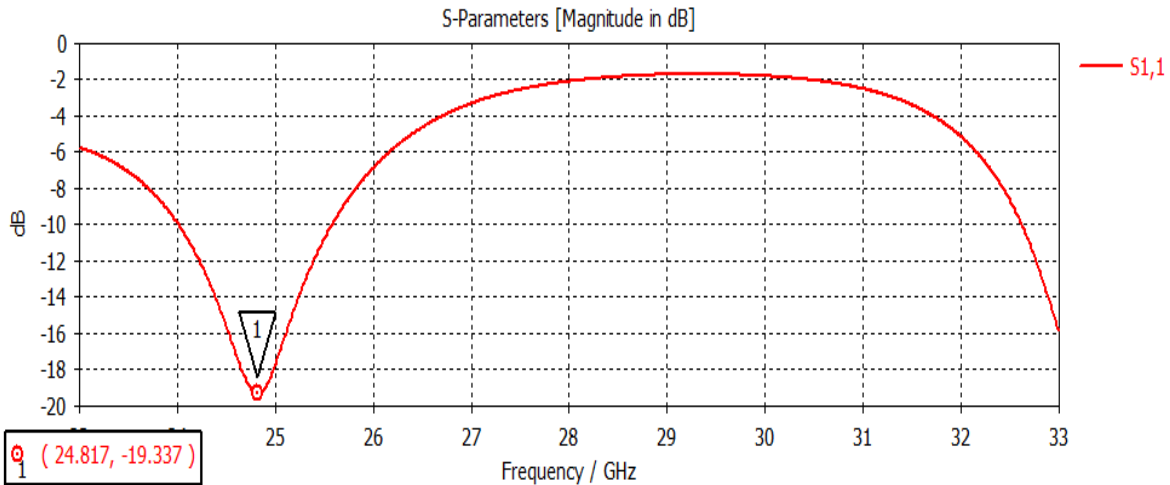


Figure III-15 : Représentation du coefficient de réflexion

III.8 Les résultats de la simulation du réseau d'antennes

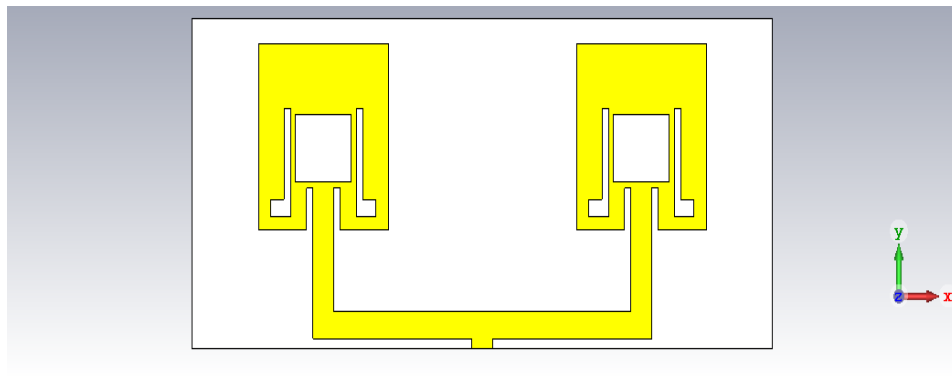


Figure III-16 : Structure d'un réseau d'antennes à deux éléments.

Sur la **Figure III-17** du graphique du réseau d'antennes à deux éléments, une autre adaptation excellente est que $S_{11} = -42,379$ dB à 25,06 GHz, qui tombe sous les bandes d'ondes millimétriques, est très efficace lors de l'application de la cinquième génération.

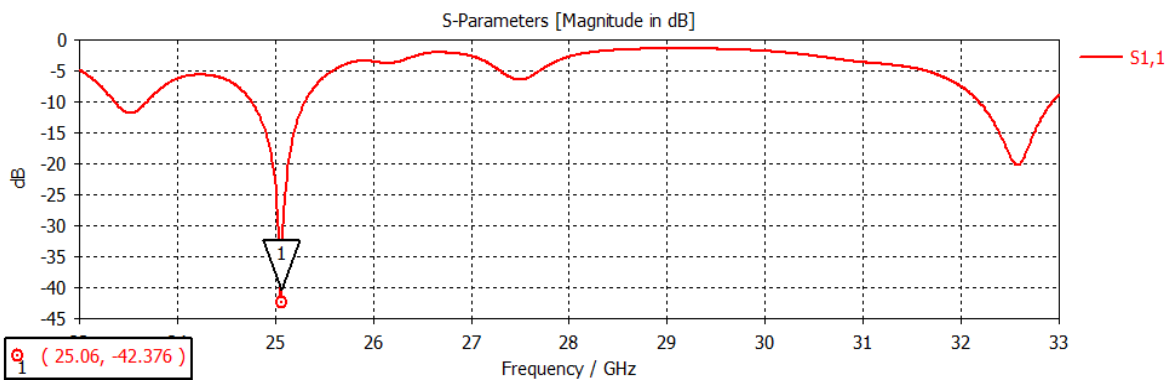
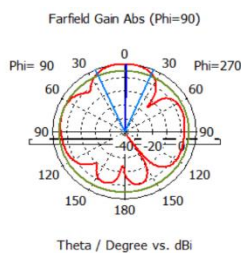
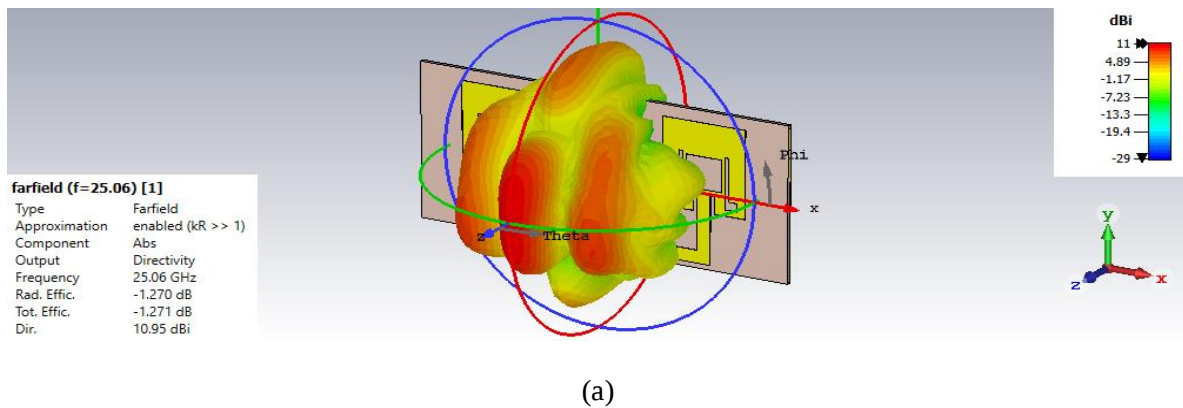


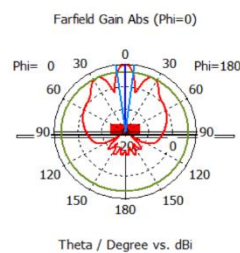
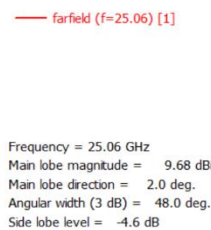
Figure III-17 : Coefficient de réflexion d'un réseau d'antenne à deux éléments.

Nous présentons maintenant les caractéristiques de rayonnement de l'antenne à deux éléments. Nous montrons dans la **Figure III-18** le diagramme de rayonnement simulé pour la fréquence de résonance 25.06 GHz.

Le plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultat de Gain	10.95 dBi	9.68 dBi	9.68 dBi



(b)



(c)

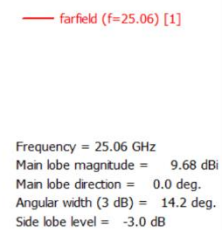


Figure III-18 : Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes à deux éléments à 25.06 GHz
(a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)

Pour la **Figure III-19**, à la fréquence de 25.06 GHz, le gain de réseau d'antennes à deux éléments est d'environ 9.72 dB.

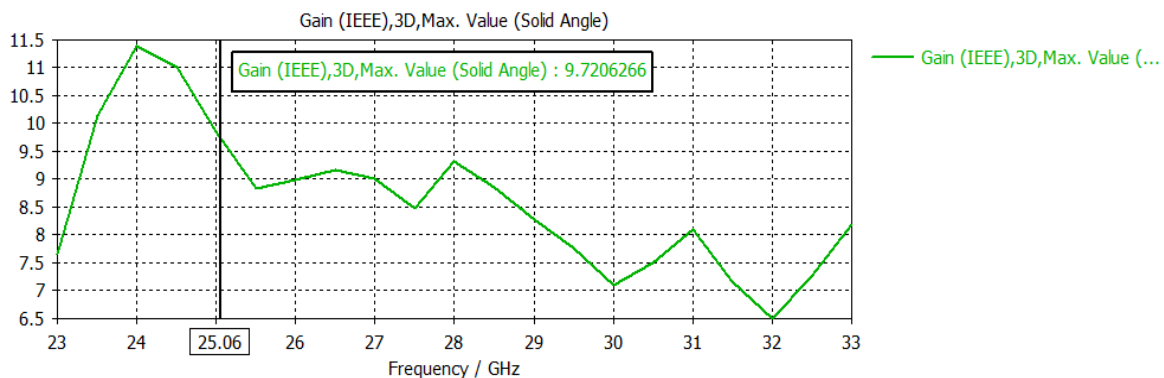


Figure III-19 : Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau d'antennes à deux éléments.

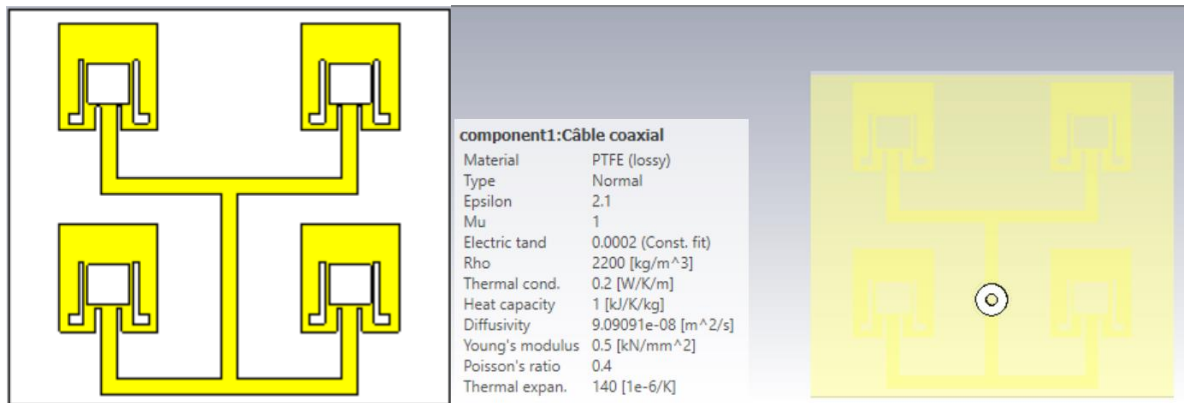


Figure III-20 : Structure d'un réseau d'antennes à quatre éléments avec alimentation par câble coaxial.

La **Figure III-21** ci-dessous du réseau de quatre antennes révèle un bon ajustement à 25,19 GHz, où le coefficient de réflexion (S11) était enregistré à -48,46 dB, avec l'alimentation par câble coaxial suggérant une forte résonance importance dans la bande de fréquence commune pour 5G application

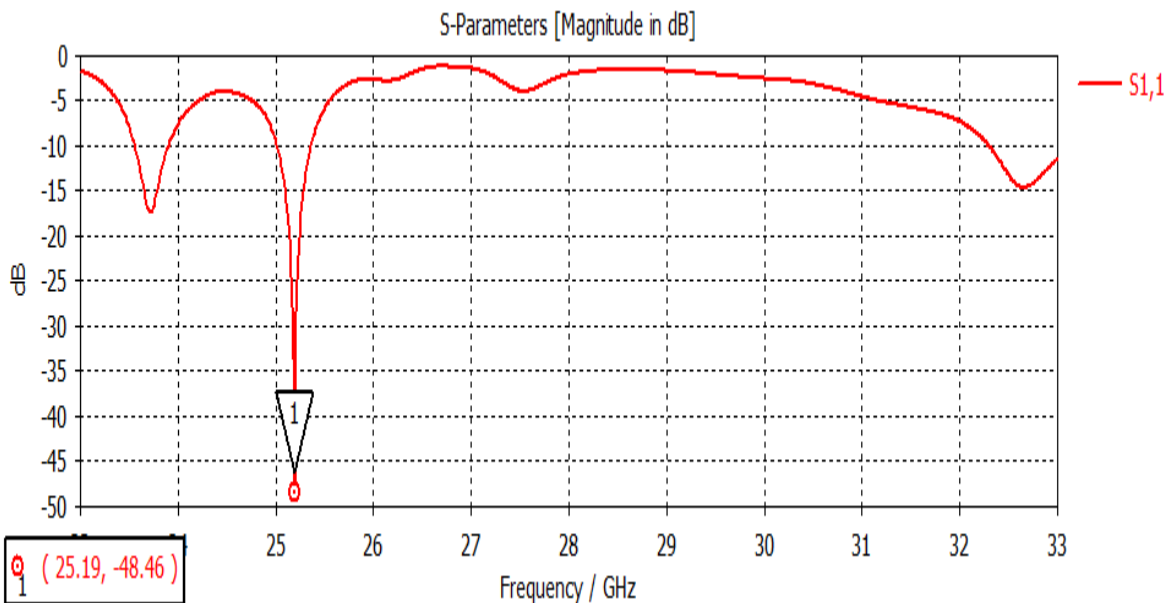
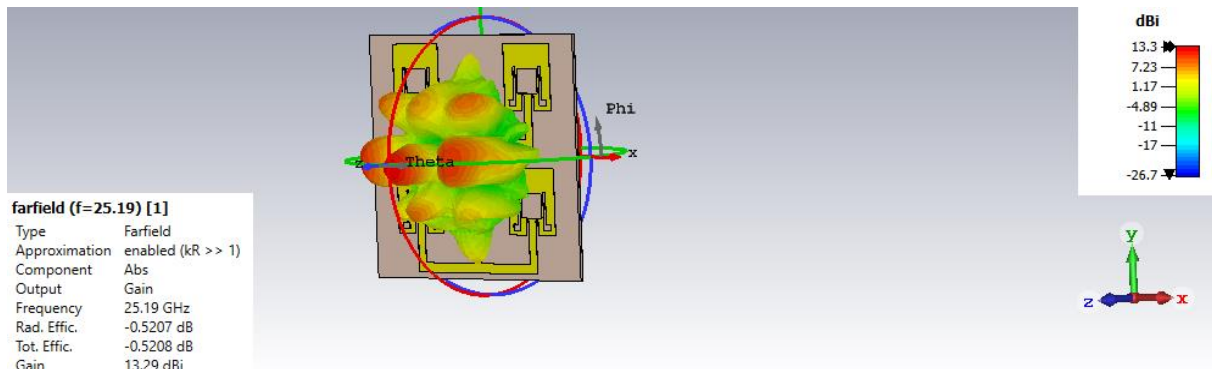


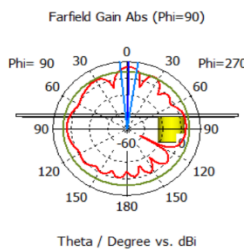
Figure III-21 : Coefficient de réflexion d'un réseau d'antennes à quatre éléments.

Nous présentons maintenant les caractéristiques de rayonnement d'un réseau d'antennes à quatre éléments. Nous montrons dans la **Figure III-22** le diagramme de rayonnement simulé pour la fréquence de résonance 25.19 GHz.

Le plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultats de Gain	13.29 dBi	13.6 dBi	13.3 dBi



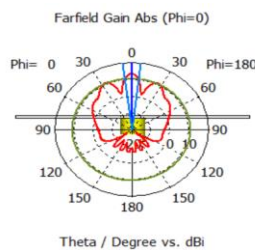
(a)



(b)

— farfield (f=25.19) [1]

Frequency = 25.19 GHz
Main lobe magnitude = 13.6 dBi
Main lobe direction = 2.0 deg.
Angular width (3 dB) = 14.2 deg.
Side lobe level = -5.1 dB



(c)

— farfield (f=25.19) [1]

Frequency = 25.19 GHz
Main lobe magnitude = 13.3 dBi
Main lobe direction = 0.0 deg.
Angular width (3 dB) = 14.1 deg.
Side lobe level = -2.4 dB

Figure III-22 : Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes à quatre éléments à 25.19 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)

Pour la **Figure III-23**, à la fréquence de 25.19 GHz, le gain de réseau d'antennes à quatre éléments est d'environ 13.28 dB, ce qui est une excellente performance et indique une capacité élevée de l'antenne.

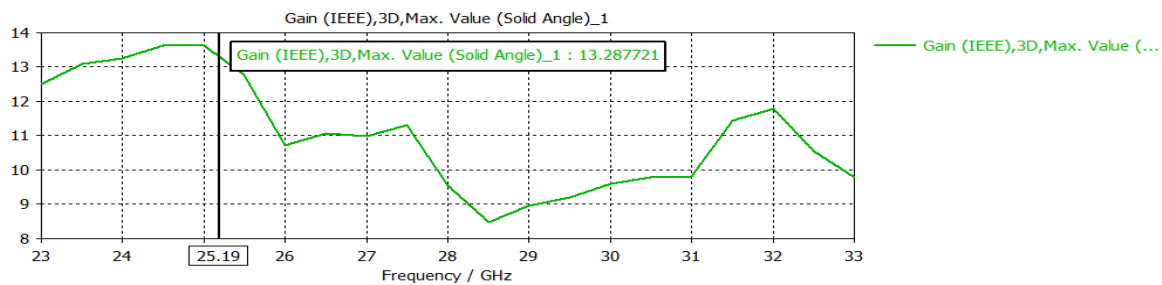


Figure III-23 : Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau d'antennes à quatre éléments.

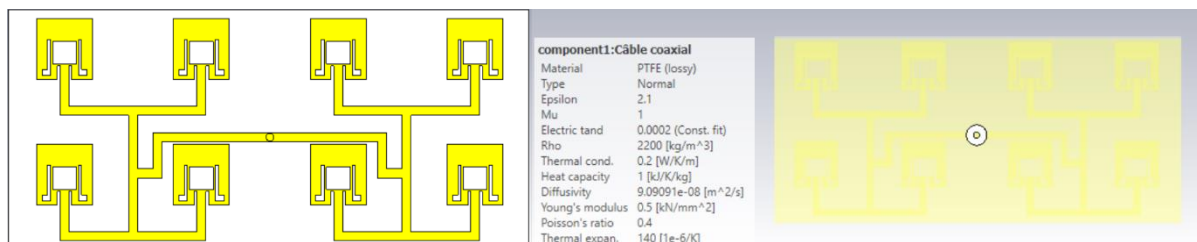


Figure III-24 : Structure d'un réseau d'antennes à huit éléments avec alimentation par câble coaxial

Les données dans la **Figure III-25** montrent la valeur du paramètre S11, c'est-à-dire le coefficient de réflexion pour le réseau d'antennes à huit éléments. Comme on peut le voir, la déchéance à $-42,837$ dB à $24,95$ GHz montre une forte résonance et une très bonne adaptation d'impédance à cette fréquence. Cela prouve que l'antenne dans cette bande de fréquence précise fonctionne très efficacement.

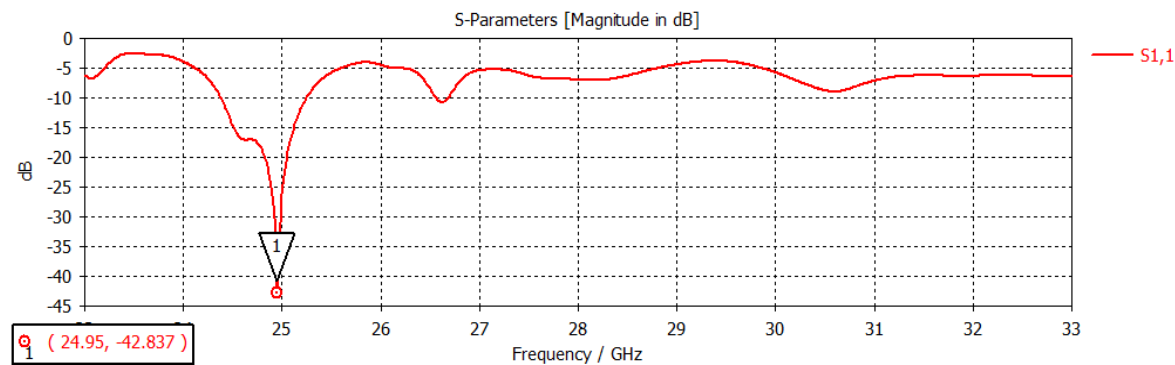


Figure III-25 : Coefficient de réflexion d'un réseau d'antennes à huit éléments.

Nous présentons maintenant les caractéristiques de rayonnement d'un réseau d'antennes à huit éléments. Nous montrons dans la **Figure III-26** le diagramme de rayonnement simulé pour la fréquence de résonance 24.95 GHz.

Le Plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultat de Gain	9.83 dBi	9.88 dBi	9.11dBi

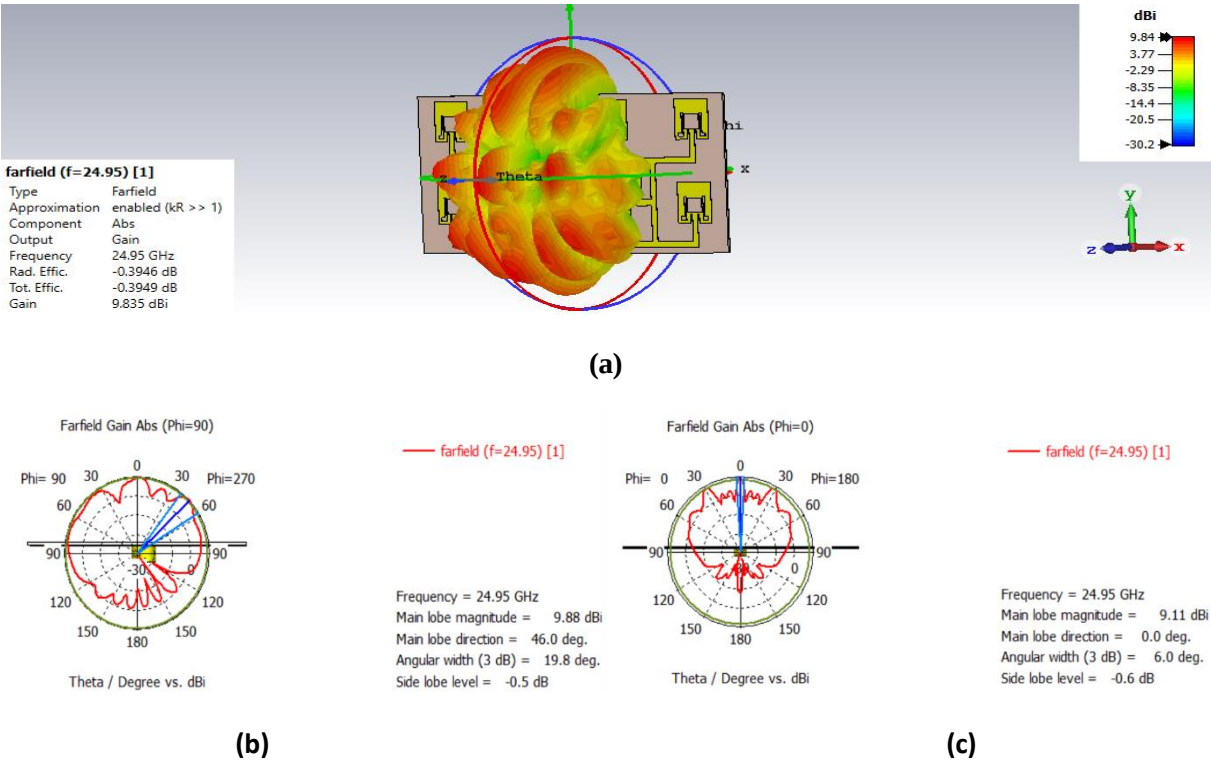


Figure III-26 : Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes à huit éléments à 24.95 GHz
(a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0).

En ce qui concerne la **Figure III-27**, à la fréquence de 24.95 GHz, le gain pour les huit éléments est d'environ 10,29 dB. Étant donné, on peut noter que l'antenne possède une bonne efficacité à cette fréquence.

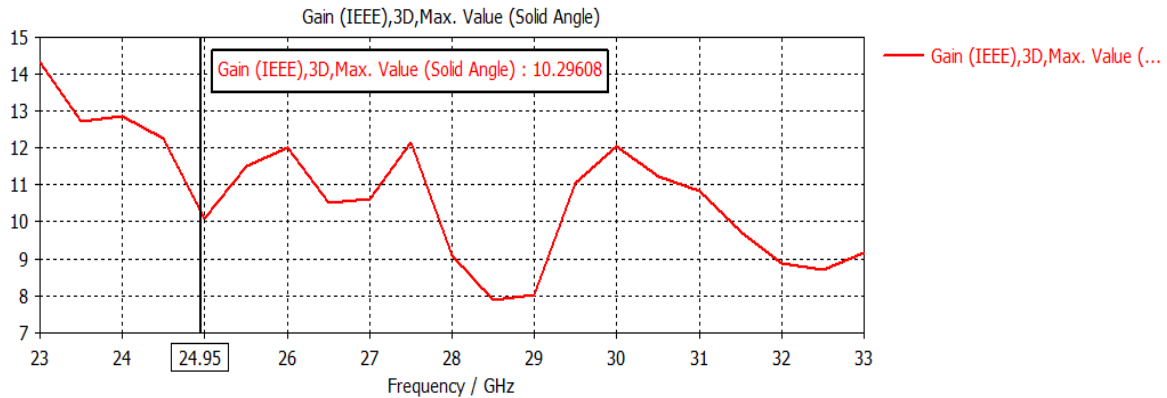


Figure III-27 : Le gain en fonction de la fréquence d'un réseau à huit éléments.

III.9 Conclusion

Dans ce Simulation, nous avons conçu et étudié un réseau d'antennes constitué de plusieurs éléments (en premier lieu deux, puis quatre, puis huit) en associant au logiciel de simulation CST, dans le but d'améliorer les performances de l'antenne pour les applications 5^e génération (5G). Les résultats ont précisé que la hausse de la concentration d'éléments dans le réseau a stimulé à une optimisation de paramètres techniques comme le coefficient de réflexion (S11) et le gain de l'antenne, ce qui prouve la pertinence du design proposé pour répondre aux critères d'excellence des réseaux de communication actuellement en place. Cette analyse évoque l'importance d'une démarche graduelle en conception et simulation pour parvenir à des solutions d'ingénierie performantes face aux enjeux de la communication sans fil avancée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les objectifs de cette recherche sont la conception et la simulation d'un système d'antenne multi-éléments de haute performance qui corresponde aux exigences des réseaux 5G en matière d'efficacité de rayonnement, de la directivité et du gain, de bande passante. Ce logiciel a été utilisé pour compiler une typologie spécifique d'un système d'antenne qui doit correspondre aux conditions de travail du système de télécommunication 5G.

Le premier chapitre a introduit les notions théoriques qui tiraient sur le fonctionnement des antennes, tandis que le deuxième chapitre traitait de la particularité du réseau 5G et les défis auxquels il est confronté en tant que technologie de prochaine génération avec une énorme densité de clients à haute fréquence et le besoin d'une faible latence et débit. Finalement, le troisième chapitre correspond à la partie finale de notre travail, la partie pratique, laquelle consiste à construire un réseau de huit éléments rayonnants à l'aide de l'outil de simulation et les paramètres de l'antenne directrice.

Les performances de l'antenne proposée ont été évaluées à l'aide des indicateurs suivants : le coefficient de réflexion, qui a été discuté pour examiner l'accordabilité de l'impédance ; l'affaiblissement complet dans des directions spatiales 2D et 3D, qui ont donné la possibilité de visualiser la directivité et la distribution de l'EM ; le gain en fonction de la fréquence, qui quantifie la puissance transmise dans les directions spatiales définies.

Les résultats obtenus par le biais des expériences démontrent que le système fournit ses performances optimales à la position de la fréquence de résonance de 25 GHz. Ces indicateurs correspondent à une plage de bande millimétrique appropriée pour les applications 5G à grande vitesse. Plus précisément, la courbe du S.11 montre que la valeur de réflexion de l'ensemble descend en dessous de -10 dB à cette fréquence, ce qui confirme l'ajustement supérieur et le coefficient de réflexion faibles de la perte.

Tous ces résultats prouvent que le réseau conçu est cohérent avec les exigences techniques de la 5G et peut être la base pour le développement d'un système de communication moderne, efficace et à haute capacité. Ainsi, ce travail comble un vide technique lié à la conception de ces antennes compactes, efficaces et compatibles avec la structure des réseaux destinés aux nouvelles générations.

Dans le cadre de ce travail, il semblerait envisageable d'ajouter des techniques de formation de faisceau afin de renforcer davantage la directivité, ainsi que des topologies 3D plus complexes accompagnées de signaux réels de canaux de propagation ; De plus, une optimisation de la structure pourrait de ce fait être envisagée grâce à des algorithmes intelligents.

Conclusion Générale

Finalement, cette étude montre que, par une approche rigoureuse fondée sur une combinaison intrinsèque du modèle théorique et de la simulation numérique, il est possible de concevoir des antennes conformes aux normes de la 5G. Il ajoute à l'exploration du domaine de l'électromagnétisme en tant que discipline utilisée pour de futures recherches communiquent et accompagne en fait la création de systèmes future très rapide et intelligent.

Références

- [1] Belmessaoud, D. (2020). Étude de nouvelles antennes planaires en tenant compte des surfaces sélectives en fréquence [Mémoire de fin d'étude, Université de M'sila].
- [2] Kadri, S. (2021). Cours et exercices d'électromagnétisme et ondes pour les Master (Chap. 9, p. 125). Université of Bechar.
- [3] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory : Analysis and design (4e éd.). John Wiley & Sons.
- [4] Benomar, A. (2015). Étude des antennes à résonateurs diélectriques : Application aux réseaux de télécommunications (Thèse de doctorat, Université de Limoges).
- [5] Belkhiri, H. E., & Seghiri, O. (2020). Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments (Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M'Sila)
- [6] B. Kadri, F.T. Bendimerad, E. Cambiaggio, "Modelisation of the feed network application to synthesis unequally spaced microstrip antennas arrays", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA 99, pp. 371-374, Torino 13-17 September 1999 .
- [7] V.R. Cadambe, S.A. Jafar, "Interference alignment and spatial degrees of freedom for the K-user interference channel", in: 2008 IEEE Trans. Inf. Theory, volume 54, 8, IEEE, 2008, pp. 3425–3441.
- [8] Huang, Y., & Boyle, K. (2008). Antennas: From theory to practice. John Wiley & Sons.
- [9] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008 .
- [10] E. Dreina « Conception, Optimisation et Intégration Rf d'un Système d'antennes Miniatures Multi Capteurs utilisant La diversité en Vue d'augmenter les performances Radio d'un Terminal Mobile 4g » Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 01 juillet 2010.
- [11] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Replieement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.
- [12] Kebbab, R. (2010). Conception d'antennes ultra large bande en technologie imprimée (Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen).
- [13] Pozar, D. M. (1992). Microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 80(1), 79–91.
- [14] Chouti, L. (2009). Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage (Mémoire de magister, Université Mentouri-Constantine).

- [15] Santoso, A. D., Cahyono, F. B., Bagus, H. B., & Saleh, M. H. (2023). Parametric study of rectangular microstrip array antenna at 2.2 GHz. In B. Bagus Harianto et al. (Eds.), Proceedings of ICATEAS 2022 (AER 217, pp. 154–167, p. 158). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-092-3_14
- [16] Miller, E. (1978). The history and development of antenna arrays (Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology).
- [17] Banerjee, S., & Dwivedi, V. J. (2015, septembre). Linear antenna array synthesis to reduce the interference in the side lobe using continuous genetic algorithm. In Proceedings of the International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC), (p.292). <https://doi.org/10.1109/ICACC.2015.23>
- [18] Allen, J. L. (1961). A theoretical limitation on the formation of lossless multiple beams in linear arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 9(4), 350–352. <https://doi.org/10.1109/TAP.1961.1144999>
- [19] Hashim, I. S. M., Al-Hourani, A., Rowe, W. S. T., & Scott, J. R. (2019). Adaptive X-band satellite antenna for Internet-of-Things (IoT) over satellite applications. In Proceedings of the 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS 2019) (pp. 110–116). Gold Coast, Australia. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS47537.2019.9008664>
- [20] Miringkar, U. V., & Kerkar, P. (2019). Array of circular microstrip patch antenna. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(4), 3922–3925.
- [21] Balanis, C. A. (2005). Antenna theory: Analysis and design (3e éd.). John Wiley & Sons.
- [22] Ortusi, J. (1967). Étude mathématique des circuits de l'électronique (Tome II : Synthèse des circuits). Masson.
- [23] Odile, P., & collaborateurs. (2009). Les antennes : Théorie, conception et applications (Préface de M. Bellanger). Éditions Techniques de l'Ingénieur
- [24] Béchevet, D. (2005). Contribution au développement de tag RFID UHF et microondes sur matériaux plastiques (Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG)
- [25] Zabbouh, M. D., Zaim, Y., & Azine, H. (2022). Conception d'une nouvelle antenne monopole ultra-large bande [Mémoire de master, Université Saad Dahlab – Blida].
- [26] Oukil, M. D., Boussaâ, A., & Hamzaoui, D. (2021). Conception d'antennes monopolaire large bande 2D et 3D [Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa].
- [27] Zitouni, A. (2018). Cours d'antennes [Polycopié de cours, Université Hassiba Benbouali de Chlef].

[28] Najeeb, R., Hassan, D., Najeeb, D., & Ademgil, H. (2016, octobre). Design and simulation of microstrip patch antenna array for X-band applications [Communication présentée à une conférence]. Département de génie électrique et électronique, European University of Lefke, Gemikonagi, TRNC.

[29] Abdullah-Al-Mamun, M., Rahman, M. S., & Datto, S. (2017, décembre). Performance analysis of rectangular, circular and elliptical shape microstrip patch antenna using coaxial probe feed [Paper presentation]. 2017 2nd International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), Cox's Bazar, Bangladesh

[30] Saadi, M. A. (2021). Review on size reduction techniques of the microstrip patch antenna. Journal of Millimeterwave Communication, Optimization and Modelling, 1(2), 34–36.

[31] Chaouche, Y. B. (2019). Conception d'antennes planaires reconfigurables pour opération large bande et multi-bande (Thèse de doctorat, Université Mohamed El-Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, Algérie).

[32] Khiat, I., & Kaddour, M. E. M. (2022). Conception d'une antenne spirale en technologie micro-ruban pour la détection des tumeurs (Thèse de doctorat, [Nom de l'université à compléter])

[33] Lalmi, H. (2015). Conception et simulation d'un réseau d'antennes microrubans circulaires pour les applications radar (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).

[34] Abdelouaha, K. E. (2015). Étude et conception d'une antenne micro-ruban rectangulaire adaptée par ligne quart d'onde (Mémoire de master, École Nationale Polytechnique d'Alger).

[35] Ziani, K. D. (2011). Étude et conception d'antennes ultra large bande (Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen).

[36] Harouni, Z. (2011). Conception et caractérisation d'une rectenna à double polarisation circulaire à 2,45 GHz (Thèse de doctorat, Université Paris-Est).

[37] Doumi, K., & Refas, L. (2018). Optimisation des systèmes radio cognitifs à base d'une antenne ULB utilisant des métamatériaux sub-longueur d'onde (Mémoire de master, Université Mustapha Stambouli de Mascara).

- [38] El Pro Cus. (2020, 6 septembre). Different types of wireless communication with applications. <https://elprocus.com/different-types-of-wireless-communication-with-applications/>
- [39] Mühlethaler, P. (2002). 802.11 et les réseaux sans fil. Eyrolles.
- [40] Dong, W., Lv, J., Chen, G., Wang, Y., Li, H., Gao, Y., & Bharadia, D. (2022). TinyNet : une architecture réseau légère, modulaire et unifiée pour l'Internet des objets. Dans les actes de la 20e conférence annuelle internationale sur les systèmes mobiles, applications et services (pp. 248–260). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3498361.3538919>
- [41] Bluetooth Special Interest Group. (n.d.). The official Bluetooth membership. Retrieved June 8, 2025, from <https://www.bluetooth.org>
- [42] Yin, J., Yang, Z., Cao, H., Liu, T., Zhou, Z., & Wu, C. (2019). A survey on Bluetooth 5.0 and mesh: New milestones of IoT. ACM Transactions on Sensor Networks, 15(3), Article 28, 29 pages. <https://doi.org/10.1145/3317687>
- [43] [Microwave and satellite technologies] كتاب تقنيات الميكروويف والأقمار الصناعية . (2022, août 9). لمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني (إدارة المناهج وتطوير التصميم). المملكة العربية السعودية. <https://www.alfred-library.com/2019/08/Microwave-and-satellite-technologies-theoretical.html>
- [44] Gorman, S., Dreazen, Y. J., & Cole, A. (2009, December 17). Insurgents hack U.S. drones. The Wall Street Journal. <https://www.wsj.com/articles/SB126102247889095011>
- [45] Sen, A. K., & Bhattacharya, A. B. (1987). Radar systems & radio aids to navigation. Khanna Publishers
- [46] Skolnik, Merrill I. (2001). Introduction to Radar Systems (3e éd.). New York : McGraw-Hill
- [47] Young, C., Luo, W., Gustin, P., Lai, J., & Dwyer, D. (2019). Understanding effective tactics in Australian football using network analysis. International Journal of Performance Analysis in Sport, 19(3), 331–341. <https://doi.org/10.1080/24748668.2019.1605562>
- [48] Behèoul, A., & Benghalia, A. (2010). Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire (Mémoire de master, Université Frères Mentouri Constantine 1).
- [49] Attaouat, F., & Lechehab, S. (2020). Étude et conception d'une antenne patch monopole à faisceau reconfigurable à base de surfaces sélectives en fréquence (Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla).

- [50] [Electricity-Magnetism.org](https://www.electricity-magnetism.org/fr/antennes-patch/). (2024, février 6). Antennes patch. <https://www.electricity-magnetism.org/fr/antennes-patch/>
- [51] Chouhbane, M. (2021). *Étude et conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement* (Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma).
- [52] Union Internationale des Télécommunications. (2021). Rapport sur la technologie 5G. UIT
- [53] Le déploiement mondial de la 5G : état des lieux et perspectives. (2022). Revue des Technologies de Communication, (numéro de volume ou d'édition si disponible), 45-59.
- [54] Organisation de coopération et de développement économiques. (2020). L'impact économique potentiel de la 5G en 2035. OCDE. <https://www.oecd.org/5g-impact2035>
- [55] Studer, X. (2019, avril). Réseaux mobiles: Pionnier de la 5G, Sunrise dépasse Swisscom. Le blog high-tech & telecom de Xavier Studer. <https://www.xavierstuder.com/2019/04/reseaux-mobiles-pionnier-de-la-5g-sunrise-depasse-swisscom/4g-5g/>
- [56] Soliman, M. M., & Hakim, M. L. (2019, octobre). Design and simulation of microstrip patch antennas for 5G wireless communication.
- [57] Asif, S. Z. (2019). 5G Mobile Communications: Concepts and Technologies* (1^{re} éd.). CRC Press.
- [58] Chin, W. H., Fan, Z., & Haines, R. (2014). Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. *IEEE Wireless Communications, 21(2), 106-112. <https://doi.org>
- [59] Free Wimax Info. (n.d.). 5G technology. Retrieved June 10, 2025, from <http://freewimaxinfo.com/5gtechnology.html>](<http://freewimaxinfo.com/5gtechnology.html>)
- [60] N'Gom, A., Diallo, A., Ribero, J.-M., & Beye, A. C. (2018, septembre 3). Design of an adaptive subarray antenna for multi-beams wireless small cell backhaul in mmWave. Conference on Antenna Measurement and Applications (CAMA2018), Västerås, Sweden
- [61] Heath, R. W., Jr., & Gao, X. (2016). Millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks. IEEE Communications Magazine, 54(7), 114-120. <https://doi.org/>
- [62] Dupont, M., & Martin, P. (2022). L'impact de la 5G sur la latence et les applications en temps réel. *Journal des Communications sans Fil, 2022*(3), 45-52. <https://doi.org/>

- [63]Smith, J. (2020). La 5G et ses avantages. Revue des Télécommunications, 25(3), 45-57.
<https://doi.org/>
- [64]Sara, L. (2019, February). 5G technology: Opportunities, challenges, and risks. Library of Parliament. Retrieved December 25, 2020, from <https://hillnotes.ca/2020/02/13/5g-technology-opportunitieschallenges-and-risks>
- [65]Jonathan, R. (2015). Fundamentals of 5G Mobile Networks.
- [66]Guinamard, J. (2021, May 12). 64 pays ont déjà accès à la 5G. Siècle Digital.
<https://siecledigital.fr/2021/05/12/64-pays-5g/>
- [67]Detti, A. (2018). Functional architecture. CNIT - Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata.
- [68]Rajiv. (2022). What are the difference between 4G and 5G technology. RF Page. Retrieved from <https://www.rfpage.com/what-are-the-difference-between-4g-and-5gtechnology/>
- [69]TELCOMA Training & Certifications. (n.d.). 5G NR CA (Carrier Aggregation). TELCOMA Training & Certifications. Retrieved from <https://telcomatraining.com/5g-nr-ca-carrier-aggregation/>
- [70]GSMA. (2018). Spectre 5G Position de Politique Publique de la GSMA. Récupéré de <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2019/03/5G-SpectrumPositions-FRA.pdf>
- [71]Castro, R. (2020). Los diferentes tipos de 5G y cómo funcionan. WikiVersus. Récupéré de <https://www.wikiversus.com/moviles/bandas-frecuencias-5g/>
- [72]Celona. (n.d.). 5G bands explained: How they work & why they matter. Retrieved from <https://www.celona.io/5g-lan/5g-bands>
- [73][Arrow.com](https://www.arrow.com). (2023). Bandes de fréquences 5G : 3 bandes primaires de la 5G et quand les utiliser. Retrieved from <https://www.arrow.com/fr-fr/research-and-events/articles/5gfrequency-bands>
- [74]Large bande mobile à ondes millimétriques : Unleashing 3-300 GHz Spectrum. (2011).
- [75]Launay, F. (2023). Les réseaux de mobiles 4G et 5G. Cours, Université de Poitiers, France. Retrieved from <https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/reseaux-heterogenes/>
- [76]Idowu-Bismark, O., Idachaba, F., & Atayero, A. A. A. (2017). A survey on traffic evacuation techniques in Internet of Things network environment. Indian Journal of Science and Technology.

- [77]Khammari, H., et al. (2019). Spatio-radio resource management and hybrid beamforming for limited feedback massive MIMO systems. *Electronics*, 8(10), 1061.
- [78]Heath Jr, R. W., & Gao, X. (2016). Millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(7), 114-120.
- [79]Hajri, S.-E. (2018). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs.Thèse de doctorat, Université de Paris Saclay.
- [80], S. (2017, août 30). Les dessous de la 5G.Économie numérique.
- [81]Syafira, T., Jackson, S., & Tambunan, A. (2024). Fintech integration with crowdfunding and blockchain in Industry 4.0 era. *Startupreneur Business Digital (SABDA Journal)*, 3(1), 10–18.
- [82]Nagdive, T. (n.d.). 5G Wireless Networks. LinkedIn. Retrieved from <https://www.linkedin.com/pulse/5g-wireless-networks-tushar-nagdive>