

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبوبكر بلقايد – تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de
TECHNOLOGIE



Mémoire

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications (ST)

Présenté Par : BERREZOUG IMENE KHEDOUDJA

Thème

Optimisation des Antennes pour les Applications 5G: Vers une Couverture et une Capacité Accrues

Soutenu en Juin 2025, devant les jurys composés de :

BENMOSTEFA NAIMA	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
BENOSMAN HAYAT	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice
GOURARI FATIMA ZOHRA	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2024-2025

Remerciement

Ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Télécommunications (TTL), rattaché au Département de Télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr-Belkaïd de Tlemcen.

Je saisis cette occasion pour remercier :

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience, la volonté et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon Encadreur Mme **GOURARI FATIMA ZOHRA**, Maître de conférences à l'Université Abou-Bekr-Belkaïd – Tlemcen, pour son encadrement bienveillant et la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Son écoute, sa disponibilité, ainsi que ses conseils éclairés ont été d'une grande importance pour moi. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour son soutien constant, sa confiance et la richesse de ses enseignements, qui m'ont guidé avec justesse dans ce cheminement.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements aux **membres du jury**, Mme **BENOSMAN HAYAT** et Mme **BENMOSTEFA NAIMA**. Veuillez recevoir à travers ce travail l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance la plus sincère.*

Dédicace

Avec toute ma reconnaissance et une émotion sincère, je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers à mon cœur, ceux pour qui les mots resteront toujours insuffisants pour exprimer l'amour, le respect et la gratitude que je leur porte.

À mon père, ce pilier de force et de sagesse, cadeau précieux de Dieu, à qui je dois ma vie, mes valeurs et mes réussites.

À ma mère, lumière de ma vie, celle qui a tout donné sans jamais rien attendre en retour, qui a su apaiser mes peines, satisfaire mes besoins et m'envelopper de tendresse et de courage.

*À mon frère **Abdelghani**, dont le soutien discret et la bienveillance m'ont toujours portée sans un mot, mais avec une présence qui rassure.*

*À mes très chères sœurs **Meriem et Zineb**, deux âmes douces qui embellissent ma vie, sources d'affection, de complicité et d'inspiration au quotidien.*

*À ma famille **Maternelle et Paternelle**, je dédie également ce travail en témoignage de respect.*

Résumé :

L'évolution des réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, a radicalement transformé les modes de communication à l'échelle mondiale. La cinquième génération (5G) marque une avancée technologique majeure, caractérisée par des débits ultra-rapides, une latence très faible, et une capacité de connexion massive. Ces performances permettent le développement de nouveaux usages tels que l'Internet des objets (IoT), les véhicules autonomes, ou encore les villes intelligentes. Au cœur de cette transformation, les antennes jouent un rôle central en tant qu'interface entre les équipements utilisateurs et le réseau. Ce mémoire se propose d'étudier l'évolution des technologies mobiles, les paramètres fondamentaux des antennes, ainsi que les techniques d'optimisation adaptées aux exigences de la 5G. Une attention particulière est accordée aux solutions innovantes telles que le Massive MIMO, le beamforming, et l'utilisation des bandes millimétriques. L'objectif est de mieux comprendre les défis liés à la conception d'antennes performantes et intelligentes, essentielles pour garantir une qualité de service optimale dans les réseaux mobiles de nouvelle génération.

Mots-clés : Réseaux mobiles, 5G, antennes, optimisation, Massive MIMO, beamforming, IoT, télécommunications.

Abstract:

The evolution of mobile networks from 1G to 5G has drastically transformed global communication systems. The fifth generation (5G) represents a major technological breakthrough, offering ultra-high data rates, extremely low latency, and massive connectivity. These advancements enable new applications such as the Internet of Things (IoT), autonomous vehicles, and smart cities. Antennas are at the core of this transformation, acting as the physical interface between users and the network. This thesis aims to explore the progression of mobile technologies, the fundamental parameters of antennas, and the optimization techniques required to meet 5G demands. Special focus is given to innovative solutions such as Massive MIMO, beamforming, and millimeter-wave technology. The main objective is to understand the key challenges in designing efficient and adaptive antennas, which are essential for ensuring high-quality service in next-generation wireless networks.

Keywords: Mobile networks, 5G, antennas, optimization, Massive MIMO, beamforming, IoT, telecommunications.

ملخص:

شهدت شبكات الهاتف المحمول تطورًا كبيرًا من الجيل الأول (1G) إلى الجيل الخامس (5G)، مما غير جذريًا طرق الاتصال على مستوى العالم. يُعد الجيل الخامس (5G) نقلة تكنولوجية نوعية، يتميز بسرعات نقل بيانات فائقة، وزمن استجابة منخفض جدًا، وقدرة هائلة على ربط عدد كبير من الأجهزة في آن واحد. تتيح هذه المزايا ظهور استخدامات جديدة مثل إنترنت الأشياء (IoT)، والمركبات ذاتية القيادة، والمدن الذكية. وتُعد الهوائيات عنصرًا محوريًا في هذه التحولات، كونها الواجهة الأساسية بين معدات المستخدمين والشبكة. يهدف هذا العمل إلى دراسة تطور تقنيات الشبكات المتنقلة، والمعايير الأساسية للهوائيات، إضافةً إلى تقنيات التحسين المناسبة لمتطلبات شبكات الجيل الخامس. كما يُسلط الضوء على الحلول المبتكرة مثل تقنية **Massive MIMO**، وتوجيه الشعاع (**beamforming**)، واستخدام نطاقات الموجات المليمترية. والغاية من هذا البحث هي فهم التحديات المرتبطة بتصميم هوائيات ذكية وعالية الأداء، تضمن جودة خدمة مثلى في شبكات الجيل الجديد من الاتصالات.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المتنقلة، الجيل الخامس، الهوائيات، التحسين، **Massive MIMO**، **beamforming**، إنترنت الأشياء، الاتصالات.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Table des Matières.....	IV
Liste des Figures	V
Liste des tableaux.....	VI
Listes des acronymes et abréviations	VII
Les symboles.....	VIII
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : L'évolution Des Réseaux	
Mobiles.....	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Réseau Cellulaire	5
I.3 L'évolution Des Standards De Télécommunication Cellulaire.....	6
I.3.1 La 1G – Les débuts de la téléphonie mobile.....	6
I.3.2 Avantages et limites de la 1G	8
I.3.3 Technologie utilisée	9
I.3.2 La 2G- La révolution numérique.	11
I.3.2.1 GSM (Global System for Mobile Communications)	12
I.3.2.2 CDMA (Code Division Multiple Access).....	12
I.3.2.3 GPRS (General Packet Radio Service)	13
I.3.2.4 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)	13
I.3.2.5 Impact sociétal	13
I.3.3 La 3G- L'avènement d'Internet mobile	14
I.3.3.1 Technologies clés.....	14
I.3.3.2 Améliorations.....	15
I.3.3.3 Applications	15
I.3.3.4 Enjeux	15
I.4 La 4G – Le haut débit mobile	16
I.3.4.1 Technologie.....	16
I.3.4.2 Performances.....	17
I.3.4.3 Usages	17

I.3.5	La 5G- La révolution connectée	20
I.3.5.1	Technologies	20
I.3.5.2	Les objectifs de la 5G :	21
I.3.5.3	L'architecture de la 5G :	23
I.3.5.4	Avantages.....	24
I.3.5.5	Cas d'usage : villes intelligentes, véhicules autonomes, réalité augmentée.	25
I.3.5.6	Défis :	25
I.4	Conclusion.....	26
Chapitre II: Les Paramètres Fondamentaux Des Antennes.....		27
II.1	Introduction.....	28
II.2	Historiques des Antennes	28
II.3	Problème de rayonnement.....	29
II.4	Paramètres fondamentaux d'antenne	30
II.4.1	Impédance d'entrée	31
II.4.2	Le facteur de qualité	32
II.4.3	Bande Passante	32
II.4.4	Diagrammes de rayonnement	33
II.4.5	Directivité	34
II.4.6	Gain	34
II.4.7	Polarisation	35
1.	Polarisation linéaire	
2.	Polarisation circulaire	
3.	Polarisation elliptique	
II.5	Types d'antennes	36
II.5.1	Antenne dipôle.....	37
II.5.2	Antenne Yagi-Uda.....	38
II.5.3	Antenne parabolique.....	39
II.5.4	Antenne patch.....	40
II.5.5	Antenne boucle (loop antenna).....	40
II.6	Avantages et inconvénients.....	41
II.7	Technique d'alimentation	42
II.7.1	Alimentation en ligne par microruban (microruban décalé).....	42
II.7.2	Alimentation coaxiale	43
II.7.3	Alimentation par ligne microstrip.....	43
II.7.4	Alimentation par fente (ou aperture coupling)	44
II.7.2	Alimentation par sonde (probe feeding)	45

II.8 Conclusion :	45
Chapitre III: Conceptions D'antennes 5G	47
III.1 Introduction	48
III.2 Antenne Microstrip Patch :	48
III.2.1 Modélisation d'une antenne patch micro ruban :	48
III.2.2 Modèle de ligne de transmission :	49
III.2.3 Exigences en matière de conception:	49
1- Matériaux du substrat (ϵ_r):	
2- Hauteur du substrat (h) :	
3- Fréquence de résonance (fr) :	
III.2.4 Procédure de conception :	50
III.3 Description du problème :	50
III.4 Choix de l'outil de simulation :	50
III.5 Résultats de Simulations :	51
III.6 Résultat de simulation :	52
III.7 Résultat de simulation :	57
III.8 Conclusion	65
Conclusion Générale	66

Liste des Figures

Chapter I:

• Figure I.1: Réseaux Cellulaires	6
• Figure I.2: Les débuts de la téléphonie mobile avec la technologie 1G	7
• Figure I.3: Développement des communications mobiles	8
• Figure I.4: L'avènement de la 2G une avancée majeure dans les télécommunications mobiles	12
• Figure I.5: La 3G une nouvelle ère pour les services mobiles multimédias	15
• Figure I.6: L'arrivée de la 4G (une révolution numérique dans les usages mobiles)	17
• Figure I.7: La 5G vers un monde ultra-connecté	20
• Figure I.8: Architecture globale de la 5G intégration du RAN (gNodeB) au 5GC (5G Core Network)	24

Chapter II:

• Figure II. 1: Circuit équivalent d'antennes	31
• Figure II. 2: Diagramme de Rayonnement	34
• Figure II. 3: Illustration des polarisations linéaires, circulaires et elliptiques.	36
• Figure II. 4: Antenne Dipole	38
• Figure II. 5: Antenne Yagi-Uda	39
• Figure II. 6: Antenne parabolique	40
• Figure II. 7: Antenne patch	40
• Figure II. 9: Antenne boucle (loop antenna)	41
• Figure II. 10: Alimentation de ligne microruban	42
• Figure II. 11: Alimentation coaxiale	43
• Figure II. 12: Alimentation par ligne microstrip	44
• Figure II. 13: Alimentation par fente	45
• Figure II. 14: Alimentation par sonde	46

Chapter III:

- **Figure III.1:** Antenne patch rectangulaire et son modèle de ligne de transmission équivalent.
..... 50
- **Figure III.2:** la géométrie de l'antenne proposée (Antenne 1) 52
- **Figure III.3:** Courbe de la perte de retour (S11) de l'antenne patch proposée (Antenne 1)
.....54
- **Figure III.4:** Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée. (Antenne 1) 55
- **Figure III.5:** (VSWR) pour les fréquence (Antenne 1) 56
- **Figure III.6:** Configuration géométrique de l'antenne proposée (Antenne 2) 57
- **Figure III.7:** le coefficient de réflexion S11 obtenu de la simulation. (Antenne 2) 58
- **Figure III.8:** Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée. (Antenne 2) 59
- **Figure III.9:** (VSWR) pour les fréquences (Antenne 2) 60
- **Figure III.10:** Dimensions d'une antenne patch micro-ruban conventionnelle avec ligne d'alimentation
d'un quart de longueur d'onde (Antenne 3) 62
- **Figure III.11:** le coefficient de réflexion S11 obtenu de la simulation. (Antenne 3) 63
- **Figure III.12:** Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée. (Antenne 3) 64
- **Figure III.13:** (VSWR) pour les fréquences (Antenne 3) 65

Liste des tableaux

- **Tableau III.1** : Dimensions de l'antenne 53
- **Tableau III.2** : Dimensions de l'antenne 62

Listes des acronymes et abréviations

1G : Première génération (analogique)

2G : Deuxième génération (numérique, voix/SMS)

3G : Troisième génération (Internet mobile)

4G : Quatrième génération (haut débit mobile)

5G : Cinquième génération (réseaux intelligents)

GSM : Système mondial de communication mobile

CDMA : Accès multiple par répartition en code

GPRS : Service général de radiocommunication par paquets

EDGE : Débit de données amélioré pour l'évolution du GSM

UMTS : Système universel de télécommunications mobiles

HSPA : Accès par paquets à haut débit

IoT : Internet des objets

Q : Facteur de qualité

ROS : Rapport d'ondes stationnaires

RF : Radiofréquence

RHCP : Polarisation circulaire droite

LHCP : Polarisation circulaire gauche

VSAT : Terminal à très petite ouverture

mmWave : Ondes millimétriques

MIMO : Système à entrées et sorties multiples

CST : Logiciel *CST Microwave Studio* (outil de simulation électromagnétique)

Sub-6 GHz : Bandes de fréquences inférieures à 6 GHz

n257 / n78 : Noms de bandes de fréquence normalisées pour la 5G

RFID : Radio Frequency Identification, a generic term for technologies that use electromagnetic coupling and radio waves to identify objects or people

S Parameters : Scattered Parameters, one method of describing the network parameters with respect to power waves.

Wifi: Wireless Fidelity

SMS : Short Message Service

IMT : International Mobile Technologie

LTE : Long Term Evolution

LTE-A : Long Term Evolution-Advanced

Les symboles

- E** : Intensité du champ électrique (V/m)
H : Intensité du champ magnétique (A/m)
D : Densité de flux électrique (C/m²)
B : Densité du champ magnétique (T ou Wb/m²)
J : Densité de courant électrique (A/m²)
A : Potentiel vectoriel (V·s/m)
λ : Longueur d'onde (m)
f : Fréquence (Hz)
c : Vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)
ε : Permittivité électrique (F/m)
ε_r : Permittivité relative (—)
μ : Perméabilité magnétique (H/m)
Z₀ : Impédance caractéristique du vide ($\approx 377 \Omega$)
Z_{in} : Impédance d'entrée de l'antenne (Ω)
Q : Facteur de qualité (—)
η : Efficacité de rayonnement (%)
G : Gain (dBi)
D : Directivité (dBi)
S₁₁ : Coefficient de réflexion (dB)
VSWR : Rapport d'ondes stationnaires (—)
h : Hauteur du substrat (mm)
W : Largeur du patch ou du substrat (mm)
L : Longueur du patch ou du substrat (mm)
t : Épaisseur du conducteur (mm)
f_r : Fréquence de résonance (Hz)
RL : Résistance de rayonnement ou pertes par conduction
D(θ, φ) : Directivité dans une direction donnée
U(θ, φ) : Intensité de rayonnement directionnelle (W/m²)
U_o : Intensité moyenne de rayonnement

$G(\theta, \varphi)$: Gain dans une direction donnée

G : Gain maximum de l'antenne

ϵ_r : Permittivité relative

f_r : Fréquence de résonance

W, L, h : Largeur, longueur et hauteur du substrat

Introduction Générale

Introduction Générale

L'essor fulgurant des technologies mobiles a profondément bouleversé le monde des télécommunications. Depuis les premiers réseaux analogiques jusqu'aux systèmes numériques complexes actuels, chaque génération de téléphonie mobile a apporté des améliorations significatives en matière de débit, de couverture, de latence, et de capacité utilisateur. Aujourd'hui, l'introduction de la cinquième génération (5G) marque une rupture technologique majeure, en posant les bases d'un écosystème numérique hautement performant, interconnecté et intelligent.

La 5G ne se limite pas à une simple évolution de la 4G. Elle répond à des exigences ambitieuses : fournir un haut débit (jusqu'à 10 Gbps), assurer une latence ultra-faible (environ 1 ms), et permettre une connectivité massive (jusqu'à un million d'objets connectés par km²). Ces performances ouvrent la voie à de nouveaux usages tels que les véhicules autonomes, la télémédecine, les villes intelligentes ou encore l'Internet des objets (IoT).

Cependant, pour rendre ces promesses possibles, un défi technologique majeur doit être relevé : l'optimisation des antennes. Ces dernières constituent l'interface physique essentielle entre les équipements utilisateurs et le réseau. Leur conception et leur performance conditionnent directement la qualité des communications. Dans le contexte de la 5G, les antennes doivent répondre à de nouvelles contraintes : utilisation des ondes millimétriques, technologie Massive MIMO, beamforming dynamique, et intégration dans des environnements urbains denses.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail, qui vise à étudier l'évolution des réseaux mobiles jusqu'à la 5G, à comprendre les paramètres fondamentaux régissant le fonctionnement des antennes, et à explorer les techniques modernes d'optimisation dans le contexte 5G. Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le 1^{er} premier chapitre retrace l'évolution historique des générations de réseaux mobiles, de la 1G à la 5G. Il met en évidence les spécificités techniques de chaque génération, les ruptures technologiques introduites, ainsi que les nouveaux services rendus possibles à chaque étape.

Le deuxième chapitre introduit les bases théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des antennes. Il présente les principaux paramètres caractérisant une antenne : impédance d'entrée, bande passante, facteur de qualité, diagrammes de rayonnement, directivité, gain, polarisation, etc. Le chapitre aborde également les concepts électromagnétiques sous-jacents, en s'appuyant sur les équations

de Maxwell et les potentiels vecteurs pour modéliser le rayonnement. Ce cadre théorique permet d'appréhender les critères de performance à optimiser lors de la conception d'antennes destinées aux systèmes 5G.

Le dernier chapitre est consacré à l'analyse des techniques modernes d'optimisation des antennes dans un contexte 5G. Il examine les solutions technologiques avancées permettant d'améliorer les performances en termes de gain, de directivité et de bande passante.. Le chapitre inclut également une discussion sur les outils de simulation numérique .

Chapitre I

L'évolution Des Réseaux Mobiles

I.1 Introduction

Le développement fulgurant des technologies de communication sans fil a entraîné une demande sans précédent en matière de vitesse, de fiabilité et de connectivité permanente. Dans ce contexte d'évolution rapide, la 5G s'impose comme une réponse incontournable aux limites rencontrées par les générations précédentes de réseaux mobiles.

L'un des piliers essentiels de cette nouvelle génération est l'optimisation des antennes, élément central pour garantir une couverture réseau efficace et une gestion fluide d'un volume massif de données et d'utilisateurs simultanés. En effet, sans une adaptation fine des systèmes d'antennes aux exigences spécifiques de la 5G, les objectifs en matière de très haut débit, de faible latence et de connectivité massive seraient difficilement atteignables.

L'intérêt de ce sujet réside dans le rôle stratégique que jouent les antennes dans le succès du déploiement de la 5G, notamment dans des environnements complexes tels que les zones urbaines denses, les stades ou encore les sites industriels à forte concentration d'utilisateurs et d'objets connectés.

Ce chapitre vise à introduire les fondements des réseaux cellulaires, base des systèmes de communication mobile modernes. Il s'agit notamment de comprendre comment le découpage du territoire en cellules permet d'optimiser l'utilisation du spectre radioélectrique, d'assurer une couverture continue, et de renforcer la capacité globale du réseau.

I.2 Réseau Cellulaire

Un réseau cellulaire est une architecture de télécommunication sans fil qui divise une zone géographique en unités distinctes appelées cellules. Chaque cellule est desservie par une station de base — souvent appelée antenne relais — qui assure la communication entre les utilisateurs mobiles présents dans cette cellule et le réseau principal.

L'objectif fondamental de ce découpage est de permettre la réutilisation des fréquences radio, ce qui augmente considérablement la capacité du réseau à gérer un nombre élevé d'utilisateurs simultanément. Chaque cellule fonctionne sur une plage de fréquences spécifique, différente de celle des cellules adjacentes afin d'éviter les interférences. Toutefois, les mêmes fréquences peuvent être réutilisées dans des cellules suffisamment éloignées les unes des autres, optimisant ainsi l'exploitation du spectre radioélectrique.

Cette organisation permet de garantir une couverture continue et étendue tout en maintenant une qualité de service stable. Lorsqu'un utilisateur se déplace d'une cellule à une autre, le réseau effectue automatiquement un transfert d'appel, ou handover, afin d'assurer la continuité de la communication sans interruption.

Les réseaux cellulaires constituent la colonne vertébrale des systèmes de téléphonie mobile, depuis la 2G jusqu'à la 5G. Ils sont également utilisés pour une variété de services tels que l'accès à Internet mobile, la messagerie (SMS), et la géolocalisation. Grâce à leur structure évolutive, flexible et performante, les réseaux cellulaires sont aujourd'hui au cœur des communications mobiles modernes et représentent un pilier essentiel de la connectivité mondiale [2].

Réseau cellulaire

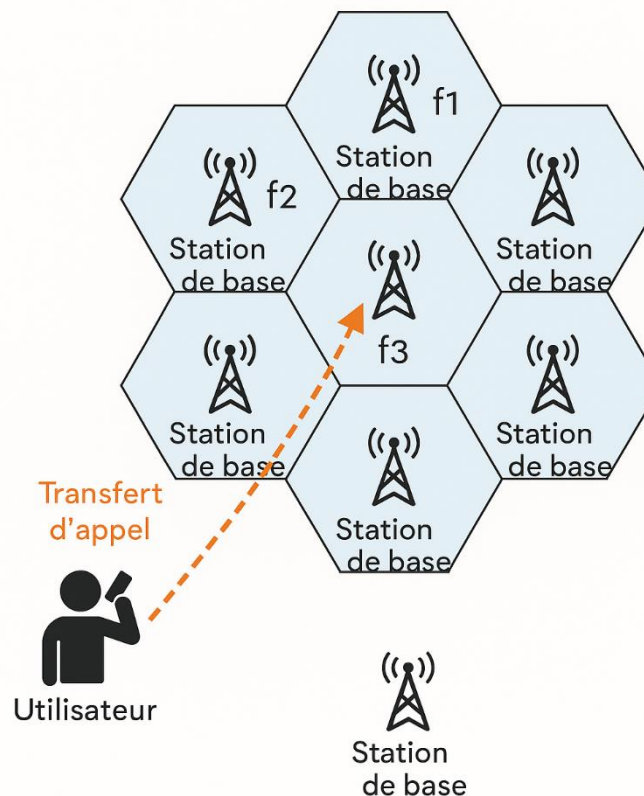


Figure I.1 : Réseaux Cellulaires

I.3 L'évolution Des Standards De Télécommunication Cellulaire

I.3.1 La 1G – Les débuts de la téléphonie mobile

La première génération de téléphonie mobile, connue sous le nom de 1G, représente un tournant historique dans le domaine des télécommunications. Apparue à la fin des années 1970 et déployée à grande échelle dans les années 1980, elle a permis pour la première fois de passer des appels vocaux sans fil sur de vastes territoires.

Basée sur une transmission analogique, la 1G a ouvert la voie à la mobilité dans les communications, bien qu'elle présente plusieurs limites, notamment une qualité sonore médiocre, une faible capacité du réseau et une sécurité quasi inexistante.

Malgré ses lacunes techniques, la 1G a posé les fondations de la téléphonie mobile moderne, en amorçant une transformation profonde des usages et des attentes en matière de connectivité personnelle.[3]



Figure I.2 : Les débuts de la téléphonie mobile avec la technologie 1G
Motorola DynaTAC 8000X (1983)

Avant l'émergence de la 1G, la communication mobile reposait sur des systèmes de radiotéléphonie analogiques, encombrants, coûteux et réservés à des usages spécifiques, notamment dans les véhicules de service tels que les taxis ou les voitures de police.

Ces dispositifs rudimentaires souffraient de graves limitations, notamment une capacité très réduite (nombre restreint d'utilisateurs simultanés) et une qualité de transmission médiocre.

Face à la montée des besoins en communication mobile individuelle et à l'évolution rapide des technologies électroniques, les ingénieurs ont été amenés à concevoir un nouveau type de réseau. L'idée d'un réseau cellulaire, capable de couvrir de larges zones géographiques tout en permettant la réutilisation des fréquences, s'est alors imposée comme une solution prometteuse pour accompagner la croissance exponentielle du nombre d'utilisateurs.

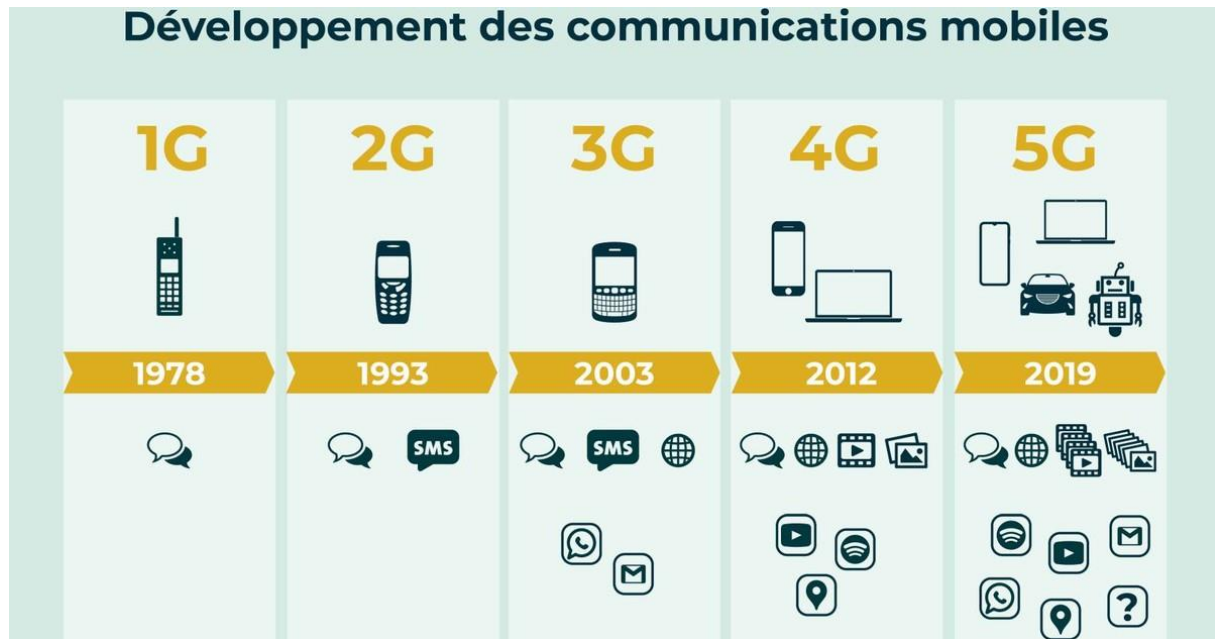


Figure I.3 : Développement des communications mobiles

Caractéristiques techniques de la 1G

❖ Technologie analogique

Contrairement aux générations suivantes, la 1G fonctionnait sur un système analogique plutôt que numérique. Utilisation de la bande de fréquences 800 MHz : Les communications étaient généralement établies dans cette bande pour les réseaux mobiles.

❖ Mode de transmission

La voix était transmise par des signaux analogiques, ce qui la rendait vulnérable aux interférences, aux écoutes non autorisées et aux pertes de qualité. [4]

❖ Débit faible

La première génération de téléphonie mobile (1G) était exclusivement conçue pour la transmission de la voix. À cette époque, il n'existait aucun service de transmission de données : ni accès à Internet, ni messagerie textuelle (SMS). Sur le plan technique, la 1G reposait sur une architecture en cellules, un principe qui permettait la réutilisation des fréquences radio dans des zones géographiques distinctes. Cette approche innovante a contribué à augmenter considérablement la capacité du réseau, tout en posant les bases de l'organisation cellulaire des générations futures.

I.3.2 Avantages et limites de la 1G

• Avantages

La 1G a marqué l'avènement de la mobilité réelle dans les communications. Pour la première fois, il devenait possible de passer et de recevoir des appels en déplacement, loin de son domicile ou de son

lieu de travail, ce qui représentait une avancée majeure par rapport aux téléphones fixes traditionnels. En introduisant cette nouvelle liberté de communication, la 1G a véritablement lancé l'ère de la téléphonie mobile et posé les fondations des évolutions technologiques qui ont suivi.

- **Limites**

La 1G présentait plusieurs limites techniques importantes. La qualité audio des appels était souvent médiocre, marquée par un niveau élevé de bruit et d'interférences, ce qui nuisait à la clarté des communications. De plus, la sécurité des échanges était très faible : les communications pouvaient facilement être interceptées en raison de l'absence de chiffrement. Enfin, la capacité du réseau était limitée, ce qui entraînait une saturation rapide, notamment dans les zones urbaines densément peuplées. Les téléphones étaient lourds, volumineux et très coûteux.[5]

Transition vers la 2G Face aux limites de la 1G, la recherche a rapidement évolué vers des systèmes numériques plus efficaces, sécurisés et offrant de nouveaux services (comme les SMS). C'est ainsi qu'à partir de 1991, la 2G (seconde génération) a commencé à être déployée, marquant le passage au numérique.

I.3.3 Technologie utilisée

La 1G reposait exclusivement sur une technologie analogique pour transmettre la voix. Cela signifie que la communication passait par des ondes radio continues, sans transformation numérique, ce qui facilitait l'émission mais exposait aussi les communications aux interférences et aux écoutes non sécurisées. [6]

- ❖ **AMPS (Advanced Mobile Phone System)**

La première génération de téléphonie mobile a vu le jour aux États-Unis, où elle a été développée par les laboratoires Bell Labs. Elle a été introduite commercialement en 1983 par Motorola, marquant ainsi le début de l'ère mobile grand public. Le système utilisé, connu sous le nom de **AMPS** (Advanced Mobile Phone System), fonctionnait dans la bande de fréquences autour de 800 MHz. Cette bande était divisée en canaux analogiques, ce qui permettait de gérer plusieurs appels simultanément au sein d'une même zone géographique.

- **Caractéristiques principales :**

Dans les systèmes 1G, chaque appel occupait une fréquence radio dédiée durant toute la durée de la communication, ce qui limitait l'efficacité de l'utilisation du spectre. Ce mode de transmission rendait les communications particulièrement sensibles aux interférences radio, affectant la qualité des appels. De plus, la première génération souffrait d'un important manque de sécurité : il existait très peu de mécanismes de protection, ce qui rendait possible

l'interception des appels à l'aide d'équipements relativement simples, exposant ainsi les utilisateurs à des risques de confidentialité. AMPS est devenu rapidement le standard en Amérique du Nord et a servi de base pour d'autres systèmes analogiques dérivés.

❖ NMT (Nordic Mobile Telephone)

Le système NMT (Nordic Mobile Telephone) a été développé par un consortium regroupant plusieurs pays nordiques, notamment la Suède, la Norvège, la Finlande et le Danemark, et a été lancé commercialement en 1981. Ce système de première génération reposait également sur une transmission analogique. Initialement, il utilisait la bande de fréquence 450 MHz (NMT-450), avant d'étendre son fonctionnement à la bande 900 MHz (NMT-900) afin d'augmenter la capacité du réseau et d'améliorer la qualité du service. [7]

• Caractéristiques principales

Le **NMT (Nordic Mobile Telephone)** fut le premier système de téléphonie mobile à offrir une couverture internationale, en s'étendant à plusieurs pays nordiques. Il introduisit une avancée majeure à travers la fonctionnalité de **roaming**, permettant aux utilisateurs de conserver leur service mobile lors de déplacements transfrontaliers, sans interruption.

Toutefois, bien que révolutionnaire pour son époque, la **1G** présentait rapidement des **limites techniques importantes**, justifiant l'évolution vers de nouvelles générations [8]. Premièrement, sa **faible capacité** se faisait sentir surtout dans les zones urbaines densément peuplées, où la saturation du réseau était fréquente. La technologie analogique nécessitait l'attribution d'une fréquence distincte pour chaque communication, limitant drastiquement le nombre d'appels simultanés. Pour y remédier, les opérateurs étaient contraints de déployer davantage de cellules, augmentant les coûts d'infrastructure.

Deuxièmement, la **qualité des communications** laissait à désirer : les appels étaient sujets à des interférences, des coupures, et à une grande sensibilité aux conditions environnementales (intempéries, topographie, mobilité). En outre, l'absence de **mécanismes de correction d'erreurs** amplifiait les pertes d'information et la dégradation audio [9]. Troisièmement, la 1G souffrait d'un **manque total de sécurité**. Les conversations, transmises en clair via des signaux analogiques non chiffrés, pouvaient être facilement interceptées à l'aide de simples scanners radio. Cela exposait les utilisateurs à des risques de fraude, notamment par **clonage de numéro**, en captant les identifiants d'un abonné [10]. En termes d'usage, la **1G se limitait aux communications vocales**, sans transmission de données ni SMS. Elle s'adressait surtout aux professionnels — hommes d'affaires, médecins, chauffeurs de taxi, services de sécurité — nécessitant une accessibilité mobile en déplacement [11].

Son adoption par le grand public restait marginale, en raison du **coût élevé des terminaux et des abonnements**, tandis que la couverture réseau, essentiellement urbaine, ne garantissait pas une mobilité continue. Les téléphones de cette génération n'intégraient aucune fonctionnalité supplémentaire (pas de messagerie, d'Internet, ni d'appareil photo), ce qui en faisait des outils exclusivement orientés vers la **voix mobile**.

I.3.2 La 2G- La révolution numérique.

La **2G** (deuxième génération de téléphonie mobile), lancée au début des années 1990, représente un changement fondamental dans l'histoire des communications : le passage de l'**analogique au numérique**. Cette évolution a permis non seulement d'améliorer la qualité des appels, mais aussi d'introduire de nouveaux services comme les **SMS** et, plus tard, l'accès basique à Internet. Avec l'explosion du nombre d'utilisateurs de la 1G, ses limitations (mauvaise qualité, faible sécurité, capacité réduite) sont devenues de plus en plus problématiques. Les opérateurs et les ingénieurs ont donc travaillé au développement d'une solution plus performante : un système de communication numérique plus sécurisé, plus efficace et plus riche en services.

La première norme 2G commerciale est apparue en 1991 en Finlande, avec le lancement du réseau GSM. [12].



Figure I.4: L'avènement de la 2G une avancée majeure dans les télécommunications mobiles

I.3.2.1 GSM (Global System for Mobile Communications)

Le système GSM (Global System for Mobile Communications) a été développé en Europe dans les années 1980 sous la coordination du CEPT, puis lancé commercialement pour la première fois en 1991 en Finlande. Il repose sur la technologie TDMA (Time Division Multiple Access), qui permet à plusieurs utilisateurs de partager la même fréquence en divisant chaque canal en créneaux temporels. Ce système marque une avancée majeure avec une transmission entièrement numérique, offrant une bien meilleure qualité d'appel que la 1G. Le GSM introduit également le chiffrement des communications afin d'assurer la confidentialité des échanges, ainsi que le service SMS, qui devient un élément essentiel de la communication mobile. Enfin, il propose le roaming international, permettant aux utilisateurs d'utiliser leur téléphone à l'étranger en se connectant à des réseaux partenaires [13].

I.3.2.2 CDMA (Code Division Multiple Access)

Développée principalement aux États-Unis par Qualcomm, cette technologie repose sur le principe du CDMA (Code Division Multiple Access). Contrairement au GSM qui divise les communications en créneaux temporels, le CDMA permet à chaque appel d'être transmis sur toute la bande de fréquences disponible en utilisant un code unique. Ainsi, plusieurs communications peuvent avoir lieu simultanément sans interférence, car chaque signal est identifié par un code distinct. Cette méthode offre une meilleure efficacité spectrale, c'est-à-dire la possibilité d'accueillir un plus grand nombre d'utilisateurs sur une même bande passante. Dans certaines conditions, la qualité d'appel est également supérieure à celle du GSM. De plus, le CDMA nécessite moins de synchronisation stricte entre les stations de base et les téléphones mobiles, ce qui simplifie certains aspects du déploiement réseau.

❖ Le passage au numérique avec la 2G a représenté une avancée majeure dans l'évolution de la téléphonie mobile, apportant plusieurs bénéfices significatifs. Tout d'abord, la qualité des communications s'est nettement améliorée grâce à la numérisation du signal vocal, qui a permis de réduire considérablement les interférences et les bruits parasites typiques des systèmes analogiques de la 1G. Cette transition a également favorisé une meilleure stabilité des appels, limitant les coupures et optimisant l'utilisation de la bande passante grâce à des techniques de compression vocale [14]. Ensuite, la 2G a introduit le chiffrement numérique des communications, renforçant la sécurité et la confidentialité des échanges, ce qui a marqué une rupture par rapport à la vulnérabilité de la 1G face aux écoutes illicites. Un autre tournant majeur fut l'apparition du SMS (Short Message Service), permettant l'envoi de messages courts entre utilisateurs, à faible coût et en toute discrétion. Ce service, limité à 160 caractères, s'est rapidement imposé comme un nouveau mode de communication universel, transformant

les habitudes sociales et professionnelles. Enfin, la 2G a marqué les débuts de la transmission de données mobiles, avec la possibilité d'accéder à Internet, bien que de manière rudimentaire. Cette évolution, connue sous le nom de 2.5G, a ouvert la voie à l'usage croissant des services de données, amorçant ainsi la convergence entre téléphonie et Internet [16].

I.3.2.3 GPRS (General Packet Radio Service)

Développé à la fin des années 1990 pour améliorer les réseaux GSM existants, le GPRS (General Packet Radio Service) utilise une transmission par paquets, ce qui signifie que les données sont envoyées par petites unités, contrairement aux appels vocaux qui nécessitent une connexion continue. Le débit théorique offert par cette technologie se situe entre 56 et 114 kbps (kilobits par seconde). Les principales applications du GPRS comprennent la navigation Internet basique via le protocole WAP, l'envoi et la réception d'e-mails, la messagerie instantanée ainsi que les premières applications mobiles légères.

I.3.2.4 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)

Lancé au début des années 2000, EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) a été conçu pour optimiser encore davantage le réseau GPRS. Cette technologie améliore le codage et la modulation des données, ce qui permet d'augmenter les débits sans nécessiter la mise en place d'un nouveau réseau. EDGE offre un débit pouvant atteindre jusqu'à 384 kbps, soit environ trois fois plus rapide que le GPRS. Parmi ses principales applications figurent un accès Internet mobile plus fluide, le téléchargement de contenus multimédias simples comme les sonneries et les petites images, ainsi que l'utilisation d'applications mobiles un peu plus évoluées.

I.3.2.5 Impact sociétal

L'impact sociétal de la **2G** a été considérable, marquant un tournant dans la **démocratisation de la téléphonie mobile**. Avant l'arrivée de la 2G, les téléphones mobiles étaient encore relativement coûteux et utilisés principalement pour les appels vocaux dans des cercles restreints. Avec la **2G**, grâce à l'introduction de la technologie numérique (GSM), la téléphonie mobile est devenue plus **accessible**, avec des coûts de communication réduits et une **meilleure qualité sonore**. De plus, la possibilité d'envoyer des **SMS** a favorisé un usage plus **large et quotidien** du téléphone mobile, ce qui a permis à une plus grande partie de la population d'avoir accès à cette technologie, de renforcer les **relations sociales** et de participer à l'émergence d'une **société mobile** où la connectivité est devenue un élément clé de l'interaction sociale et professionnelle. [17]

I.3.3 La 3G- L'avènement d'Internet mobile

La **3G**, lancée au début des années 2000, représente une avancée majeure dans le domaine de la téléphonie mobile, car elle a permis de passer de simples appels vocaux à l'accès à **Internet mobile**. Elle a marqué une étape déterminante vers l'utilisation de l'**Internet** sur les téléphones portables, offrant aux utilisateurs une nouvelle dimension d'interaction et de connectivité.

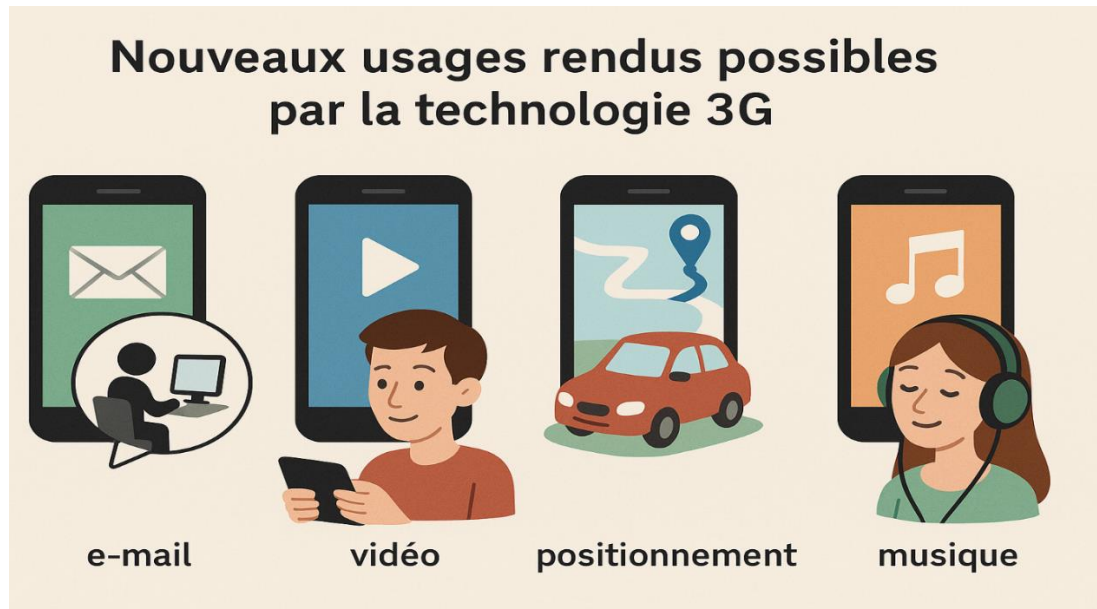


Figure I.5 : La 3G une nouvelle ère pour les services mobiles multimédias

I.3.3.1 Technologies clés

Les **technologies clés** qui sous-tendent le réseau **3G** sont :

Le **UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)** constitue le standard de base de la 3G, offrant des débits nettement supérieurs à ceux de la 2G. Ce système repose sur une architecture CDMA (Code Division Multiple Access) qui permet l'intégration simultanée de la voix et des données sur un même réseau [18]. L'évolution du UMTS, appelée **HSPA (High Speed Packet Access)**, améliore encore les performances en proposant des débits descendants allant jusqu'à 14 Mbps ainsi qu'un débit montant accru. Ces avancées optimisent l'expérience utilisateur, notamment pour les applications nécessitant une large bande passante telles que le streaming vidéo ou la navigation web. Ces technologies ont ainsi permis à la 3G de dépasser les limites des réseaux 2G, qui se limitaient principalement aux appels vocaux et à l'envoi de SMS.

I.3.3.2 Améliorations

La **3G** a introduit des améliorations notables par rapport à la 2G :

Les réseaux 3G ont permis des débits nettement supérieurs à ceux de la 2G, pouvant atteindre jusqu'à 2 Mbps en téléchargement, ce qui représentait une amélioration significative par rapport aux débits limités à environ 100 Kbps des réseaux précédents. L'introduction de la technologie HSPA a encore renforcé ces performances, offrant des débits descendants pouvant atteindre 14 Mbps dans certaines conditions. Grâce à ces avancées, les utilisateurs ont pu accéder à Internet sur leurs téléphones mobiles de manière plus fluide et pratique, avec la possibilité de consulter des sites web, envoyer des emails, télécharger des fichiers, et utiliser divers services en ligne, sans nécessiter d'ordinateur. Cette évolution a marqué un tournant en rendant l'accès à Internet véritablement mobile, permettant une navigation continue et un accès permanent à l'information et aux services en ligne [19].

I.3.3.3 Applications

Les applications disponibles grâce à la **3G** ont largement évolué par rapport à celles de la 2G. Voici quelques exemples de **nouveaux usages** rendus possibles par cette technologie :

La 3G a permis un accès plus fluide à Internet, facilitant la navigation sur les sites web et l'utilisation des moteurs de recherche grâce à des débits améliorés. Les utilisateurs ont également pu consulter et répondre à leurs emails en temps réel, sans contrainte géographique, favorisant ainsi le développement de l'email mobile.

Par ailleurs, la 3G a rendu possible le streaming vidéo, permettant aux utilisateurs de regarder des vidéos en qualité standard, d'utiliser des applications de vidéoconférence, et de télécharger des contenus vidéo relativement rapidement. Ces avancées ont ouvert la voie à une nouvelle génération de services enrichis, désormais essentiels dans la vie quotidienne, tels que les réseaux sociaux et les applications de messagerie instantanée.

I.3.3.4 Enjeux

Cependant, l'introduction de la 3G s'est accompagnée de plusieurs défis majeurs pour les opérateurs. Tout d'abord, la mise en place d'une couverture réseau étendue a nécessité le déploiement de nombreuses antennes relais, un processus long, particulièrement dans les zones rurales où la couverture initiale était souvent limitée. Il a aussi fallu garantir une couverture homogène afin d'assurer aux utilisateurs un accès constant et fiable à Internet. Par ailleurs, le coût des infrastructures a constitué un enjeu important : l'installation de nouvelles antennes et équipements a généré des dépenses considérables, freinant parfois certains opérateurs, surtout dans les pays en développement. Ces derniers ont dû investir massivement pour assurer la rentabilité du réseau tout en maintenant un service de qualité.

I.4 La 4G – Le haut débit mobile

L'arrivée de la **4G** (quatrième génération de téléphonie mobile) au début des années 2010 marque une nouvelle révolution technologique : offrir aux utilisateurs une **connexion Internet mobile rapide**, fluide et adaptée aux nouveaux usages numériques (vidéo, applications, objets connectés). La 4G transforme ainsi profondément la manière dont les gens utilisent leurs smartphones et tablettes.



Figure I.6 : L'arrivée de la 4G (une révolution numérique dans les usages mobiles)

I.3.4.1 Technologie

Le LTE (Long Term Evolution) est le standard principal de la 4G, introduit pour offrir des vitesses nettement supérieures à celles de la 3G. Il utilise des technologies avancées telles que l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) pour transmettre les données de manière efficace, avec un débit théorique de base pouvant atteindre jusqu'à 150 Mbps en téléchargement.

Le LTE-Advanced constitue une amélioration de cette technologie, intégrant des techniques comme l'agrégation de porteuses, qui consiste à regrouper plusieurs bandes de fréquences afin d'augmenter le débit. Grâce à ces avancées, les débits théoriques peuvent atteindre jusqu'à 1 Gbps en téléchargement, tout en offrant une plus grande stabilité et une meilleure gestion des connexions lors de déplacements rapides.[20]

I.3.4.2 Performances

La **4G** a profondément amélioré les performances des réseaux mobiles par rapport aux générations précédentes, rendant l'expérience utilisateur beaucoup plus rapide, fluide et réactive. :

La 4G se distingue par des débits très élevés, avec des vitesses de téléchargement pouvant théoriquement atteindre jusqu'à 150 Mbps en LTE, et dépasser 300 Mbps, voire approcher 1 Gbps avec la technologie LTE-Advanced. Les vitesses d'envoi, quant à elles, se situent généralement entre 50 et 100 Mbps, permettant le partage rapide de fichiers volumineux comme des photos, vidéos ou documents. Ces performances ont révolutionné les usages : streaming vidéo en haute définition (HD) voire 4K sans interruption, téléchargement quasi instantané d'applications ou de contenus multimédias, et une expérience optimisée pour les visioconférences et les appels vidéo en haute définition.

En parallèle, la 4G a considérablement réduit la latence du réseau, atteignant en moyenne 30 à 50 millisecondes contre environ 100 ms en 3G. Cette faible latence est cruciale pour garantir une navigation fluide, une réactivité en temps réel dans les jeux en ligne, les applications interactives, ainsi que dans le contrôle d'objets connectés à distance.[21]

I.3.4.3 Usages

L'arrivée de la 4G a non seulement amélioré la vitesse de connexion, mais a aussi permis l'émergence de nouveaux usages qui sont devenus essentiels dans la vie quotidienne des utilisateurs. Voici un aperçu des principaux usages rendus possibles par la 4G

❖ Streaming HD

La 4G a transformé radicalement la manière dont les contenus multimédias sont consommés. Grâce à ses débits élevés et à sa faible latence, elle a permis de visionner des vidéos en haute définition (1080p) et même en 4K, sans interruption liée au buffering. Cela a favorisé l'explosion de la popularité de plateformes comme Netflix, YouTube, Amazon Prime Video et Disney+. En parallèle, la diffusion en direct (live streaming) est devenue fluide et accessible, avec des retransmissions en temps réel de qualité professionnelle via des services tels que Facebook Live, Twitch ou Instagram Live. En matière de musique, des applications comme Spotify et Apple Music ont permis un accès instantané à des catalogues entiers, avec une qualité sonore améliorée, sans nécessiter de téléchargement préalable. [22]

❖ Applications mobiles

Grâce à la faible latence et aux débits élevés offerts par la 4G, les appels vidéo ont gagné en qualité et en stabilité. Des applications telles que WhatsApp, Skype, Zoom ou FaceTime permettent désormais des communications visuelles claires, fluides et sans interruption. Par ailleurs, la 4G a révolutionné le domaine des jeux mobiles en rendant possibles les jeux en ligne nécessitant une connexion stable et rapide. Elle a également permis l'essor du cloud gaming, via des plateformes comme Google Stadia ou NVIDIA GeForce Now, offrant aux utilisateurs la possibilité de jouer à des jeux de qualité console directement depuis leurs smartphones ou tablettes. En outre, les applications de navigation en temps réel, telles que Google Maps et Waze, profitent de la connectivité 4G pour fournir des mises à jour instantanées sur le trafic et les itinéraires, garantissant une expérience de navigation plus précise et réactive.

❖ Internet des Objets (IoT)

La 4G a joué un rôle clé dans le développement de la connectivité des objets intelligents (IoT), en fournissant des débits élevés et une faible latence adaptée aux besoins d'interactivité de nombreux dispositifs. Grâce à elle, des appareils tels que les montres connectées, les voitures intelligentes, les capteurs domestiques et les électroménagers connectés peuvent fonctionner de manière fluide et réactive. Cette avancée a également facilité l'essor des villes intelligentes (Smart Cities), où les objets connectés sont intégrés aux infrastructures urbaines pour améliorer la gestion des services publics tels que l'éclairage, la circulation ou encore la collecte des déchets. Par ailleurs, la télémédecine a bénéficié de la 4G grâce à la possibilité d'effectuer des consultations vidéo à distance en haute qualité, d'échanger des données médicales en temps réel et de surveiller à distance l'état de santé des patients à l'aide de dispositifs connectés. [23]

❖ Economie

L'introduction de la **4G** a eu un impact majeur sur l'économie, tant au niveau de l'utilisation des données mobiles que des nouveaux modèles économiques qui ont émergé grâce à cette technologie.

❖ Explosion des données mobiles

L'arrivée de la 4G a provoqué une augmentation massive du trafic de données mobiles. Grâce à des débits bien plus élevés et une latence nettement réduite, les utilisateurs ont pu consommer beaucoup

plus de contenu en ligne qu'avec les générations précédentes. Le streaming vidéo, les applications mobiles avancées et l'utilisation intensive des services en ligne sont devenus monnaie courante. Certaines études montrent que le volume de données mobiles a été multiplié par dix durant les premières années suivant le déploiement de la 4G. Cette évolution a profondément modifié le marché des forfaits mobiles. En réponse à cette demande croissante, les opérateurs ont lancé de nouvelles offres intégrant des quotas de données plus importants, voire illimités, afin de répondre aux besoins des utilisateurs. Des forfaits de 5 Go, 10 Go, ou même en data illimitée sont devenus standards, facilitant une connexion quasi permanente à Internet. Par ailleurs, cette explosion de la consommation a favorisé la diversification des services, avec l'émergence d'applications exigeant une connexion continue comme le cloud computing, le téléchargement de fichiers lourds en temps réel, et la diffusion de contenus multimédias. [24]

❖ Nouveaux modèles économiques

L'introduction de la 4G a profondément transformé le paysage économique numérique, notamment avec l'essor du m-commerce (commerce mobile). Grâce à la fluidité de la navigation et à la rapidité des connexions mobiles, les utilisateurs ont pu effectuer des achats en ligne depuis leurs smartphones ou tablettes, à tout moment et en tout lieu. Des géants du commerce électronique tels qu'Amazon, Alibaba et eBay ont bénéficié de cette évolution, enregistrant une hausse significative de leurs ventes via les plateformes mobiles. Cette mobilité accrue a fait de la réactivité un facteur clé du commerce en ligne. Parallèlement, la 4G a favorisé l'émergence de nouveaux modèles économiques, notamment les services d'abonnement numériques. Les plateformes de streaming (Netflix, Spotify), de cloud gaming (Google Stadia, Xbox Cloud Gaming), ou encore de stockage en ligne ont connu une croissance remarquable, permise par les performances réseau accrues. Le modèle d'abonnement, permettant un accès illimité à des services en ligne à la demande, a redéfini l'accès aux médias et aux loisirs. De plus, la 4G a révolutionné la publicité mobile : les données issues des usages mobiles permettent aux entreprises de cibler leurs campagnes de manière personnalisée, augmentant leur efficacité par rapport aux méthodes traditionnelles. Enfin, cette nouvelle infrastructure a stimulé l'innovation entrepreneuriale, notamment avec l'émergence de start-ups dans les domaines des applications mobiles, de l'Internet des objets, et des services financiers numériques (fintechs). Ces innovations ont pu se développer grâce à la stabilité et à la rapidité offertes par les réseaux 4G.[25]

I.3.5 La 5G- La révolution connectée

La **5G**, cinquième génération de téléphonie mobile, représente une avancée technologique majeure, surpassant largement la 4G en termes de débits, de latence et de connectivité. Avec son potentiel de transformer profondément notre manière de vivre, de travailler et d'interagir, la 5G est souvent qualifiée de "révolution connectée". Elle pose les bases d'un futur ultra-connecté, où une multitude d'appareils interagiront de manière instantanée et intelligente. [26]

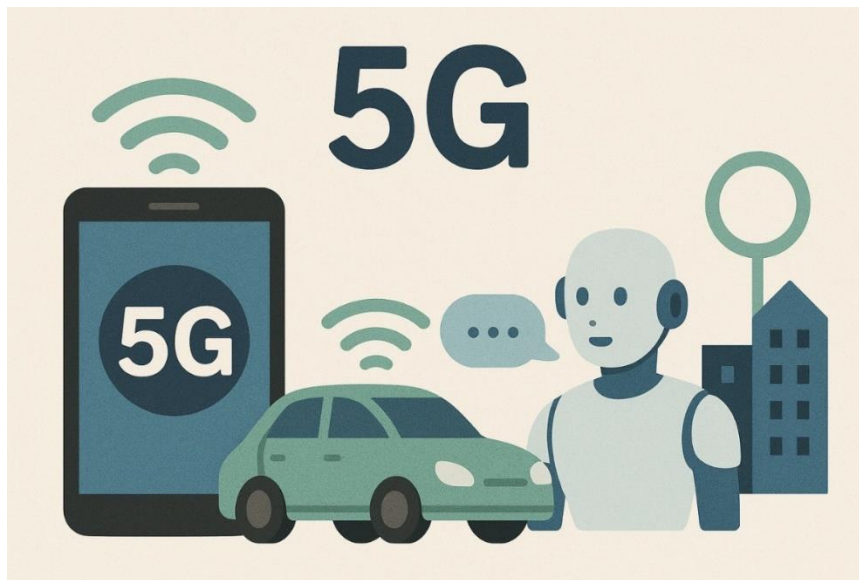


Figure I.7 : La 5G vers un monde ultra-connecté

I.3.5.1 Technologies

La **5G** repose sur plusieurs technologies de pointe, qui permettent des performances supérieures à celles des générations précédentes.

➤ Ondes millimétriques

- **Définition** : Les **ondes millimétriques** font référence aux fréquences situées dans la gamme de **30 GHz à 300 GHz**, soit des ondes avec des longueurs d'onde très courtes, généralement entre 1 mm et 10 mm.
- **Avantages** : Ces ondes permettent de transporter une très grande quantité de données en raison de leur **large bande passante**. Elles offrent ainsi des débits extrêmement élevés. Cependant, elles ont une portée plus courte que les fréquences utilisées par les générations précédentes.

- **Challenges** : Le principal défi des ondes millimétriques réside dans leur **sensibilité aux obstacles**, comme les bâtiments, et leur **faible portée**, ce qui nécessite une densification des antennes pour maintenir une couverture optimale.

❖ Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)

- **Définition** : **Massive MIMO** est une technologie permettant d'utiliser un grand nombre d'antennes (jusqu'à plusieurs centaines) sur une même station de base pour envoyer et recevoir des signaux de manière simultanée. Cela permet d'augmenter la capacité du réseau et de réduire la congestion.[27]
- **Avantages**
 - **Amélioration de l'efficacité spectrale** : En utilisant plusieurs antennes, Massive MIMO augmente la capacité du réseau tout en optimisant l'utilisation du spectre radio.
 - **Réduction de l'interférence** : Cette technologie permet une meilleure gestion de la propagation du signal et de la qualité de la connexion, en réduisant les interférences entre les utilisateurs.
 - **Challenges** : L'implémentation de Massive MIMO nécessite une infrastructure de réseau avancée, avec des antennes spécifiques et un matériel plus complexe, ce qui entraîne des coûts élevés.

I.3.5.2 Les objectifs de la 5G :

La 5G est conçue pour être le socle de l'Internet du futur. Elle repose sur une architecture unifiée combinant un réseau d'accès radio (RAN) de nouvelle génération et un cœur de réseau convergent (5GC), capable de gérer simultanément l'accès fixe et mobile. Son développement répond à une croissance exponentielle des usages numériques et à l'essor de l'Internet des objets (IoT). Les principaux objectifs de la 5G sont les suivants :

- **Amélioration considérable des débits**

L'un des objectifs centraux de la 5G est d'atteindre des vitesses de téléchargement et de téléversement significativement supérieures à celles des générations précédentes. Les débits devraient être multipliés par un facteur allant jusqu'à 10, voire 100, dans certaines configurations, afin de permettre un accès ultra-rapide aux données pour chaque utilisateur, que ce soit via smartphone, tablette ou objet connecté. Le volume global de données mobiles échangées pourrait ainsi être multiplié par **1000** dans les zones à forte densité .

- **Optimisation de l'infrastructure réseau**

La 5G vise également une rationalisation des infrastructures en augmentant la **densité de**

connexions par cellule, sans nécessairement multiplier le nombre d'antennes. Chaque station de base (gNodeB) devra être capable de gérer **jusqu'à 100 fois plus de terminaux** qu'en 4G, en exploitant notamment le **MIMO massif**, le **beamforming** et les fréquences millimétriques .

- **Réduction drastique de la latence**

La 5G ambitionne de réduire la latence à moins de **1 milliseconde**, rendant possible l'émergence d'applications critiques en temps réel telles que la chirurgie à distance, les véhicules autonomes ou l'industrie 4.0 .

- **Prise en charge massive de l'IoT**

Un autre objectif stratégique de la 5G est de prendre en charge des milliards de capteurs et d'objets connectés dans le cadre de l'**Internet des objets massif (mMTC)**. Le réseau devra être capable de gérer une connectivité étendue, avec des besoins très variables en bande passante et en énergie .

- **Efficacité énergétique et spectrale accrue**

Enfin, la 5G introduit des mécanismes d'**allocation dynamique des ressources** et des techniques avancées comme le **network slicing**, permettant une meilleure efficacité énergétique et une gestion optimisée de la bande passante, pour s'adapter aux différents cas d'usage .

I.3.5.3 L'architecture de la 5G :

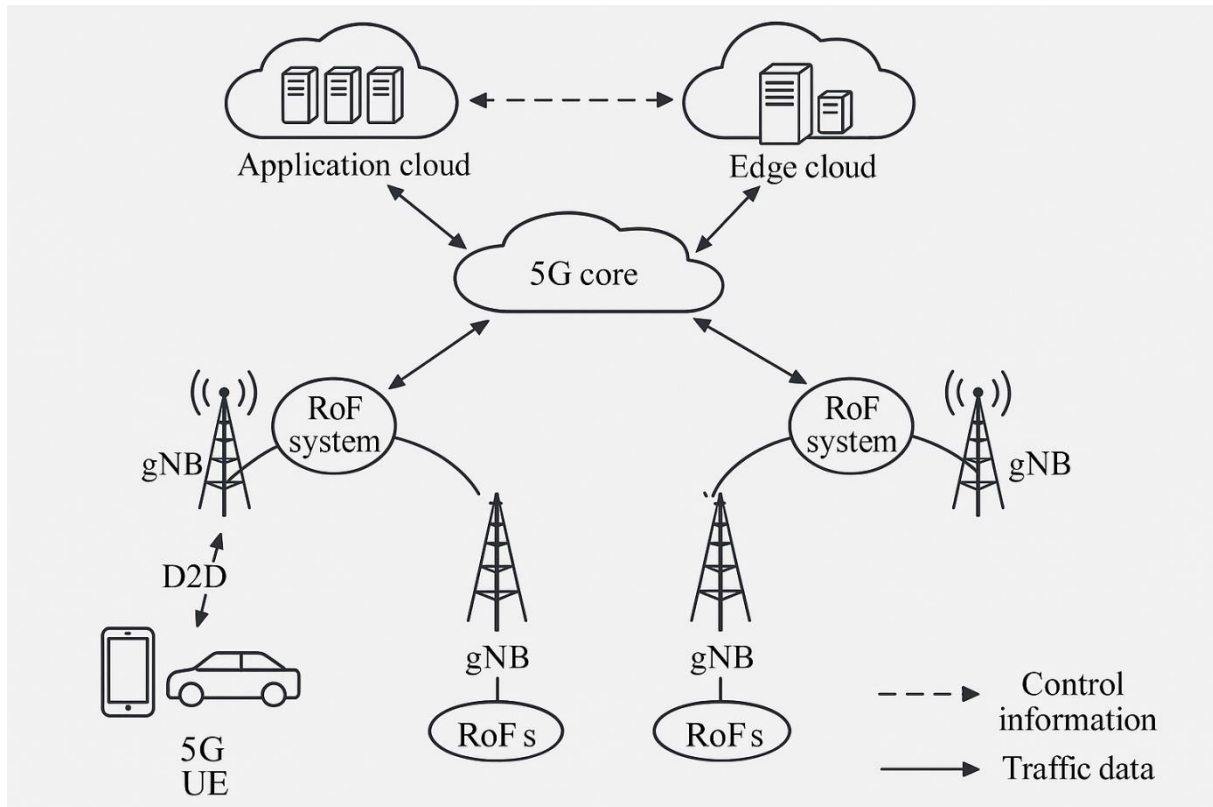


Figure I.8 : Architecture globale de la 5G intégration du RAN (gNodeB) au 5GC (5G Core Network)

- **5G UE (User Equipment)**

C'est l'utilisateur final (par exemple : un smartphone ou une voiture connectée) qui échange des données avec le réseau 5G.

- **D2D (Device to Device)**

Permet aux appareils 5G de **communiquer directement entre eux**, sans passer par l'infrastructure centrale, ce qui **réduit la latence** et **désengorge le réseau**.

- **gNB (next-generation Node B)**

Ce sont les stations de base 5G qui assurent la liaison entre les équipements utilisateurs (UE) et le réseau. Elles transmettent les **données radio** et gèrent la **couverture cellulaire**.

- **RoF system (Radio over Fiber)**

Système de transmission **Radio sur Fibre optique**, utilisé pour **relier les gNB** entre eux ou avec le cœur de réseau. Cette technologie offre **un débit très élevé** et une **faible latence**, essentielle pour la 5G.

- **5G Core**

Le **cœur du réseau 5G**, responsable du **traitement, de la gestion des connexions**, du routage des données et de la **mobilité**. Il est **virtuel**, souvent hébergé dans des **clouds**.

- **Application cloud**

C'est le **cloud distant** où résident les **applications grand public**, les services OTT, les serveurs Internet, etc.

- **Edge cloud (cloud en périphérie)**

Situé **au plus proche des utilisateurs**, il permet de **traiter les données localement** (à la périphérie du réseau) pour **réduire la latence**, utile pour la réalité augmentée, la conduite autonome, etc.

I.3.5.4 Avantages

La 5G est caractérisée par trois avantages clés qui la distinguent nettement des générations précédentes.

- ❖ **Débits ultra-rapides**

- La 5G offre des **débits de l'ordre de 10 Gbps**, soit 100 fois plus rapides que la 4G. Cela permet des transferts de données quasi instantanés, rendant possible la diffusion de **vidéos 4K/8K**, le téléchargement de films et de jeux en quelques secondes, et l'utilisation de services hautement gourmands en données.
- Ces débits permettent une **expérience utilisateur** beaucoup plus fluide, notamment pour les applications de **cloud gaming** ou de **streaming vidéo**.

- ❖ **Latence ultra-faible**

- ❖ La latence, c'est-à-dire le **délai entre l'envoi et la réception des données**, est réduite à environ **1 milliseconde** en 5G contre 30 à 50 millisecondes pour la 4G.
- ❖ Cette faible latence est cruciale pour des applications nécessitant des échanges en temps réel, comme les **véhicules autonomes**, les **drones**, et les **applications de télé médecine** où chaque milliseconde compte pour garantir la sécurité et la fiabilité des échanges.
- ❖ **Connectivité massive :**

- La 5G permet de connecter **des millions de dispositifs par kilomètre carré**, contre des centaines de milliers pour la 4G. Cela est particulièrement utile pour l'**Internet des objets (IoT)**, où une multitude d'appareils (comme les capteurs, les appareils connectés, etc.) doivent être interconnectés et échanger des données en temps réel.
- Cette connectivité massive ouvre la voie à des **villes intelligentes** (smart cities) où l'ensemble des infrastructures, des services publics et des appareils sont interconnectés pour améliorer la gestion des ressources, le transport et la sécurité.

I.3.5.5 Cas d'usage : villes intelligentes, véhicules autonomes, réalité augmentée.

La 5G permet l'implémentation de nouvelles applications révolutionnaires qui transformeront divers secteurs de la société.

❖ Villes intelligentes (Smart Cities) :

- La 5G joue un rôle clé dans l'évolution des **villes intelligentes**, en permettant une gestion optimisée des infrastructures urbaines grâce à des capteurs connectés. Cela inclut l'**éclairage intelligent**, la **gestion des déchets**, et le **suivi en temps réel de la qualité de l'air** et de l'eau.
- **L'internet des objets (IoT)** connecté à la 5G permet une gestion plus efficace des ressources et une amélioration des services publics.

❖ Véhicules autonomes :

- Les **véhicules autonomes** nécessitent une communication en temps réel avec leur environnement pour naviguer en toute sécurité. La 5G permet une **latence ultra-faible** et une connectivité massive, garantissant une communication instantanée entre les véhicules, les infrastructures routières et les autres appareils connectés.[29]
- Les **véhicules autonomes** pourront ainsi réagir en temps réel aux obstacles, optimiser les trajets, et améliorer la sécurité routière en évitant les collisions.

❖ Réalité augmentée (AR) et réalité virtuelle (VR)

- Les applications de **réalité augmentée** et **réalité virtuelle** nécessitent des débits très élevés et une latence extrêmement faible. La 5G permet de diffuser des expériences immersives en **temps réel**, par exemple, dans le domaine de la formation, du divertissement, de l'architecture, et même du commerce de détail avec des **applications de shopping virtuel**.

I.3.5.6 Défis :

Malgré ses nombreux avantages, la mise en place de la 5G soulève plusieurs défis importants. [30]

❖ Coût des infrastructures

- Le déploiement de la 5G nécessite un investissement massif dans les **infrastructures réseau**, avec l'installation de **nouvelles antennes** et de **stations de base** pour couvrir une plus grande

zone géographique et garantir une haute qualité de service. Les **ondes millimétriques** nécessitent une densité d'antennes beaucoup plus élevée que la 4G.

- Ces coûts sont particulièrement élevés dans les zones rurales et moins densément peuplées, où le retour sur investissement pour les opérateurs est moins immédiat.

❖ Sécurité

- La **sécurisation des réseaux 5G** est un enjeu majeur. Avec l'augmentation du nombre d'appareils connectés et l'interconnexion des systèmes critiques, les **attaques informatiques** pourraient avoir des conséquences graves, comme la perturbation des **véhicules autonomes**, des **systèmes de santé** ou des **infrastructures énergétiques**.
- Les autorités et les entreprises devront donc mettre en place des protocoles de sécurité robustes pour protéger les utilisateurs et garantir la fiabilité des services.

I.4 Conclusion

Les évolutions majeures des générations de téléphonie mobile, de la **1G** à la **5G**, ont transformé nos sociétés, passant des simples appels vocaux à une **connectivité ultra-rapide**, ouvrant la voie à des applications telles que les **véhicules autonomes** et les **villes intelligentes**, et préparant le terrain pour la future **6G**, qui pourrait repousser encore plus loin les limites des technologies mobiles, tout en soulevant des enjeux actuels et futurs liés à la **sécurité**, à la **durabilité** des infrastructures et à l'**acceptation sociale** des nouvelles technologies.[31]

Chapitre II

Les Paramètres

Fondamentaux Des

Antennes

II.1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications, les antennes jouent un rôle crucial en tant qu'éléments de liaison entre les dispositifs électroniques et l'espace libre. Elles assurent la conversion entre les signaux électriques et les ondes électromagnétiques, permettant ainsi la transmission et la réception des données dans les réseaux sans fil. Qu'il s'agisse de téléphonie mobile, de télévision, de Wi-Fi, de radar, ou encore de communications satellitaires, les antennes sont omniprésentes et indispensables à la connectivité moderne.

L'évolution technologique des antennes a accompagné et parfois même conditionné le développement des différentes générations de réseaux mobiles. Des antennes dipôles rudimentaires aux antennes patch miniaturisées utilisées aujourd'hui dans les systèmes 5G, chaque progrès en matière d'architecture, de matériaux ou de méthodes d'alimentation a contribué à améliorer les performances des réseaux sans fil, en termes de débit, de portée, de directivité et d'efficacité spectrale.

Ce chapitre s'attache à présenter les fondements des antennes, en abordant à la fois leur historique, leurs principes théoriques, leurs paramètres caractéristiques, ainsi que les différents types d'antennes utilisés en télécommunications. Il traite également des techniques d'alimentation essentielles à leur bon fonctionnement. Cette compréhension est indispensable pour appréhender les enjeux de conception, d'optimisation et de déploiement des antennes, en particulier dans le contexte exigeant des réseaux mobiles de cinquième génération (5G).

II.2 Historiques des Antennes

L'histoire des antennes remonte à la fin du XIXe siècle. En 1886, le physicien allemand Heinrich Hertz réussit à produire et à détecter des ondes électromagnétiques, confirmant ainsi de manière expérimentale les prédictions théoriques de James Clerk Maxwell. Cette avancée a posé les bases des futures technologies de communication sans fil. Quelques années plus tard, en 1895, Guglielmo Marconi réalise la première transmission radio sur une distance significative à l'aide d'une antenne filaire rudimentaire, avant de réussir, en 1901, à transmettre un signal radio à travers l'Atlantique – un exploit majeur dans l'histoire des télécommunications.

Au début du XXe siècle, les antennes adoptent des formes variées selon les besoins, en particulier dans les domaines maritime et radiophonique. Les années 1920 et 1930 voient l'essor de la radiodiffusion AM puis FM, entraînant une large diffusion des antennes fixes. La Seconde

Guerre mondiale marque un tournant décisif avec l'invention du radar, qui stimule la recherche sur les antennes directionnelles, notamment les antennes paraboliques.

Pendant la guerre froide, les exigences croissantes des systèmes de télécommunications militaires conduisent au développement d'antennes de plus en plus performantes. Le lancement du satellite Spoutnik en 1957 introduit l'ère des antennes spatiales, adaptées aux communications en orbite. Dans les années 1970, apparaissent les antennes à microbandes (microstrip antennas), qui se distinguent par leur légèreté, compacité et facilité d'intégration dans les circuits imprimés. [32]

L'arrivée de la téléphonie mobile dans les années 1980 et 1990 transforme profondément le rôle des antennes, désormais intégrées dans les téléphones, les véhicules, les ordinateurs et une multitude d'objets connectés. Avec l'expansion de l'Internet sans fil, du Wi-Fi, du Bluetooth et de la domotique, les antennes deviennent omniprésentes, de plus en plus miniaturisées et spécialisées. [32]

Aujourd'hui, les antennes sont un élément central des technologies 4G, 5G et des futures 6G. Grâce aux progrès en traitement du signal et à l'introduction des antennes intelligentes, elles peuvent désormais s'adapter en temps réel aux conditions du canal de propagation. Elles occupent une place stratégique dans des domaines variés comme la défense, l'aérospatial, les réseaux mobiles et l'Internet des objets (IoT). L'évolution se poursuit vers des antennes reconfigurables, parfois invisibles ou flexibles, intégrées dans des surfaces intelligentes, ouvrant la voie à une connectivité ubiquitaire et ultra-performante.[32]

II.3 Problème de rayonnement

Le **problème de rayonnement d'antenne** consiste à déterminer les champs électrique (**E**) et magnétique (**H**) produits par un courant imposé (**J**), servant de source [33]. Différentes techniques permettent de générer ce courant imposé, notamment dans le cadre des **antennes à microruban**, mais dans cette section, l'accent est mis sur la résolution du problème une fois **J** connu. Pour ce faire, il suffit d'appliquer les équations de Maxwell sous leur forme intégrale, notamment les **équations de boucle**. Par exemple, la **loi de Gauss** nous informe que :

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (\text{II.1})$$

En utilisant l'identité vectorielle $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$, nous avons un potentiel vectoriel **A**, tel que

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{II.2})$$

En remplaçant l'équation II.2 dans l'équation II.3, nous obtenons

$$\nabla \times (\mathbf{E} + j\omega\mathbf{A}) = \mathbf{0} \quad (\text{II.3})$$

À présent, il est possible de déterminer les champs électrique $\mathbf{E}$ et magnétique $\mathbf{H}$ à partir du potentiel vecteur $\mathbf{A}$. Ainsi, la résolution du problème se réduit à trouver une solution pour ces fonctions potentielles. En remplaçant les termes des équations de Maxwell par $\mathbf{A}$ et en appliquant des identités vectorielles appropriées, on obtient [34 ;33]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \omega^2 \epsilon \mu \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (\text{II.4})$$

Le potentiel vectoriel total $\mathbf{A}$, est alors calculé comme, [34 ;33]:

$$\mathbf{A} = \iiint_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{-j\beta r} / 4\pi r dV' \quad (\text{II.5})$$

L'équation (1.5) peut être adaptée en fonction de la distribution de courant et de la géométrie spécifique afin de résoudre le problème de l'antenne. Par exemple, pour un dipôle idéal orienté selon l'axe z , l'intégrale volumique se simplifie en une intégrale linéaire sur une longueur infinitésimale ΔZ . Une fois que le champ magnétique $\mathbf{H}$ est déterminé, le champ électrique $\mathbf{E}$ peut être calculé à partir de la loi d'Ampère. Dans la zone de champ lointain, la contribution du courant $\mathbf{J}$ peut être négligée, ce qui simplifie encore le calcul. Il est important de souligner que le choix judicieux du plan de coordonnées facilite grandement la résolution du problème.

La puissance et la densité de puissance rayonnées par un volume entourant l'antenne peuvent être calculées à l'aide de la relation présentée dans cette section. Une densité de puissance imaginaire correspond à la présence d'ondes stationnaires, contrairement aux ondes progressives associées au rayonnement. Cette puissance imaginaire représente donc l'énergie stockée, semblable à ce qui se produit dans un composant réactif. Selon la distance à l'antenne, les valeurs des champs $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ et de la densité de puissance $\mathbf{S}$ sont classifiées en champs proches ou champs lointains. [35; 33]

II.4 Paramètres fondamentaux d'antenne

Une antenne se définit par plusieurs paramètres essentiels. Sa conception consiste à optimiser ces

caractéristiques en fonction de l'application visée. Parmi ces paramètres figurent le diagramme de rayonnement, l'impédance d'entrée, le facteur de qualité, la largeur de bande, l'efficacité de rayonnement, la puissance moyenne rayonnée, la directivité, le gain et la polarisation. Cette section présente une description détaillée de chacun de ces éléments.

II.4.1 Impédance d'entrée

Une antenne peut être modélisée comme une source de courant avec une impédance d'entrée en série. [36]

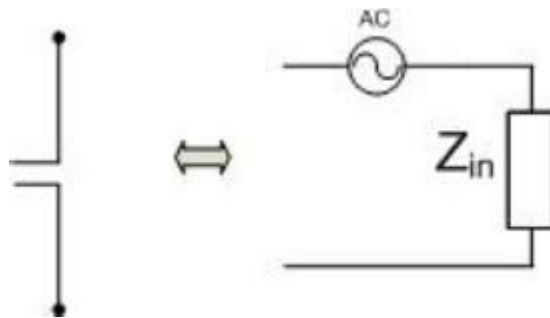


Figure II. 1: Circuit équivalent d'antennes

L'impédance d'entrée de l'antenne, notée Z_{in} , est généralement une grandeur complexe composée d'une partie réelle et d'une partie imaginaire, toutes deux dépendant de la fréquence. Théoriquement, la résistance (partie réelle) et la réactance (partie imaginaire) présentent une symétrie autour de la fréquence de résonance. La partie réelle correspond à la puissance effectivement rayonnée ainsi qu'aux pertes par conduction, tandis que la partie imaginaire représente la puissance réactive qui circule entre l'antenne et la source. L'adaptation d'impédance est un aspect crucial dans la conception des antennes afin d'assurer un transfert maximal de puissance. Pour cela, l'impédance d'entrée de l'antenne doit être égale au conjugué complexe de l'impédance de la source ou de l'alimentation. [35 ;36 ;37]

$$Z_{in} = Z_{feed}^* \quad (\text{II.6})$$

L'utilisation de terminaisons de 50 ohms dans les différents modules de communication est devenue une norme. En conséquence, la plupart des conceptions d'antennes cherchent à obtenir une impédance de 50 ohms sur la plage de fréquences souhaitée. [36]

II.4.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité (noté Q) est un paramètre fondamental en électromagnétisme et en conception d'antennes. Il est défini comme étant 2π fois le rapport entre l'énergie stockée dans les champs électromagnétiques excités par l'antenne et l'énergie totale rayonnée ou dissipée par cycle.

Ce facteur constitue un indicateur de performance global, car il reflète l'ensemble des pertes énergétiques liées au fonctionnement de l'antenne. Ces pertes peuvent être dues :

- au rayonnement (perte souhaitée, liée à l'émission de signal),
- aux pertes ohmiques (résistance des conducteurs),
- aux pertes diélectriques (dans les matériaux isolants),
- et aux ondes de surface (guidées mais non rayonnées).

Le facteur de qualité total (Q_{total}) est ainsi la combinaison des différents sous-facteurs associés à chaque type de perte, et permet d'évaluer la capacité d'une antenne à stocker l'énergie par rapport à sa dissipation. Un Q élevé indique une antenne plus sélective, mais souvent moins large bande, tandis qu'un Q plus faible est généralement recherché pour les antennes à large bande passante.

II.4.3 Bande Passante

La bande passante est généralement définie comme /

$$BP = F2 - F1 \quad (\text{II.12})$$

La valeur peut ensuite être exprimée en pourcentage. Cependant, cette définition est légèrement ajustée dans le cas des antennes à microbandes (MSAs), car elle ne prend pas en compte l'adaptation d'impédance à l'entrée de l'antenne. Une définition plus appropriée sera présentée dans le chapitre suivant.

La bande passante d'une antenne désigne l'intervalle de fréquences dans lequel elle fonctionne efficacement, c'est-à-dire où ses performances, notamment en termes d'adaptation d'impédance et de rayonnement, restent satisfaisantes. Plus précisément, elle correspond à la plage de fréquences autour de la fréquence centrale pour laquelle le coefficient de réflexion (ou le ROS – rapport d'ondes stationnaires)

reste en dessous d'un seuil défini, généralement un $ROS \leq 2$. Cela signifie que dans cette plage, l'antenne rayonne une grande partie de la puissance reçue et que les pertes par réflexion sont minimales.

La bande passante peut être exprimée en **hertz (Hz)** ou en **pourcentage par rapport à la fréquence centrale**. Une antenne à **bande passante étroite** est très sélective mais sensible aux variations de fréquence, ce qui peut limiter son usage dans des systèmes à large spectre.

II.4.4 Diagrammes de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement illustrent plusieurs grandeurs physiques telles que la densité de flux de puissance, l'intensité de rayonnement, la directivité, la phase, la polarisation, ainsi que l'intensité du champ électrique ou magnétique. Bien que ces grandeurs puissent être exprimées sous forme mathématique, la représentation graphique est largement utilisée pour visualiser leur comportement spatial.

Ces représentations peuvent être effectuées en une, deux ou trois dimensions, les formes 1D et 3D étant les plus répandues. En 1D, une grandeur donnée est représentée en fonction d'une autre maintenue constante. Généralement, les plans utilisés pour ces tracés sont appelés plans principaux E et H.

Le plan principal E d'une antenne à polarisation linéaire est défini comme le plan contenant à la fois le vecteur de champ électrique et la direction du rayonnement maximal. De manière analogue, le plan principal H est celui qui comprend le vecteur de champ magnétique.[37]

$$F(\theta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right| \quad (\text{II.13})$$

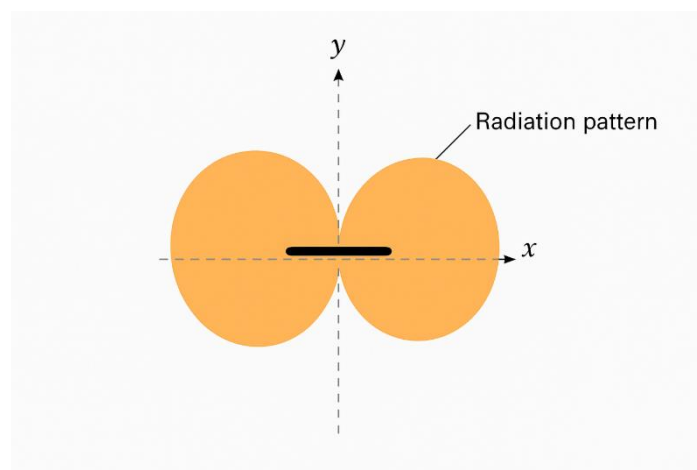


Figure II. 2 : Diagramme de Rayonnement Bidirectionnel

II.4.5 Directivité

$$D(\theta, \Phi) = \frac{U(\theta, \Phi)}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{rad}} \quad (\text{II.14})$$

La **directivité** d'une antenne est un paramètre clé qui mesure la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope (qui rayonne de manière égale dans toutes les directions). En d'autres termes, la directivité évalue le pouvoir de concentration de l'énergie électromagnétique dans une direction particulière, et donc la capacité de l'antenne à focaliser le rayonnement. Elle est généralement exprimée en **décibels (dB)**.

Matériellement, la directivité est définie par le rapport de l'intensité maximale du rayonnement dans une direction donnée à l'intensité moyenne rayonnée dans toutes les directions.

La directivité est directement liée à la **forme du diagramme de rayonnement** de l'antenne. Une antenne avec une directivité élevée présente un diagramme de rayonnement étroit et dirigé vers une zone particulière (comme une antenne parabole ou Yagi). En revanche, une antenne avec une directivité faible a un diagramme de rayonnement plus large et uniformément réparti (comme une antenne dipôle classique).

Il est important de noter que la **directivité** d'une antenne est différente du **gain**, bien que les deux soient souvent associés. Le gain d'une antenne prend en compte non seulement la directivité, mais aussi l'efficacité de l'antenne à convertir la puissance électrique reçue en énergie rayonnée, tandis que la directivité ne considère que la distribution spatiale du rayonnement, indépendamment des pertes.

II.4.6 Gain

Le gain d'une antenne correspond à sa directivité intégrant les pertes éventuelles. Si l'antenne est dépourvue de pertes dissipatives, alors son gain, dans une direction donnée, est équivalent à sa directivité. Mathématiquement, il s'exprime par :

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} \times D(\theta, \varphi) \quad (\text{II.15})$$

Le gain est généralement exprimé en décibels (dB) par rapport à une antenne isotrope idéale . Pour optimiser le gain, on introduit la notion de **PIRE** (*Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente* ou *EIRP – Effective Isotropic Radiated Power*). Il s'agit de la puissance qu'une antenne isotrope devrait émettre pour générer un rayonnement équivalent à celui d'une antenne directionnelle donnée [38] .Elle est définie par la relation suivante :

$$\text{EIRP} = \text{P_TX(dB)} + \text{G_TX(dB)} \quad (\text{II.16})$$

La spécification de l'EIRP est essentielle car elle est prise comme référence dans les réglementations. Par exemple, aux États-Unis, une antenne avec une puissance de crête de 1 W (30 dBm) et un gain de 6 dBi est autorisée. Toutefois, pour chaque augmentation de 1 dB du gain de l'antenne, la puissance de crête autorisée doit être réduite de 1 dB, afin de maintenir la PIRE constante.

II.4.7 Polarisation

La polarisation est un aspect essentiel à considérer dans les systèmes de communication sans fil, car pour qu'un signal soit reçu efficacement, l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doivent avoir la même polarisation. Une mauvaise correspondance entre la polarisation de l'antenne émettrice et réceptrice peut entraîner des pertes de signal importantes, affectant la qualité de la communication..

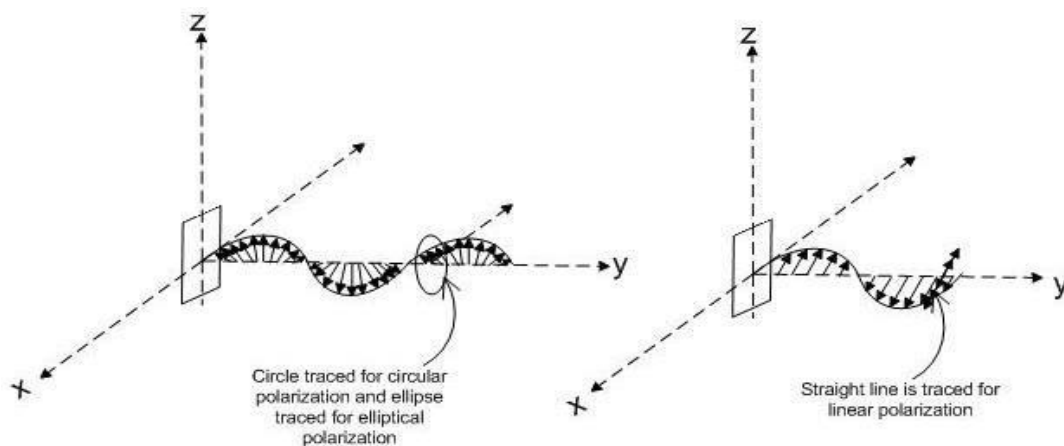


Figure II. 3: Illustration des polarisations linéaires, circulaires et elliptiques.

Il existe plusieurs types de polarisation :

1. Polarisation linéaire :

La polarisation linéaire se produit lorsque le champ électrique d'une onde électromagnétique oscille dans une direction linéaire, c'est-à-dire le champ électrique reste dans un seul plan, perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Les antennes à polarisation linéaire peuvent être orientées selon deux directions principales :

- **Polarisation horizontale** : Le champ électrique oscille horizontalement.
- **Polarisation verticale** : Le champ électrique oscille verticalement.

Les antennes à polarisation linéaire, comme les antennes dipôles, sont courantes dans les systèmes de communication classiques, comme la radio FM ou la télévision terrestre.

2. Polarisation circulaire :

Dans une onde à polarisation circulaire, le champ électrique tourne autour de la direction de propagation de l'onde à mesure que l'onde se déplace. La direction de rotation peut être soit **horaire**, soit **anti-horaire**, et cette caractéristique détermine si l'onde est dite **droite circulaire** (RHCP) ou **gauche circulaire** (LHCP). La polarisation circulaire est particulièrement utile dans les systèmes où l'orientation de l'antenne réceptrice peut varier, comme dans les communications par satellite, où l'antenne réceptrice peut tourner sans perdre le signal).

3. Polarisation elliptique :

La polarisation elliptique est une forme intermédiaire entre la linéaire et la circulaire, dans laquelle le champ électrique trace une ellipse en se déplaçant à travers l'espace. Cela peut se produire lorsque l'onde électromagnétique présente deux composantes de champ électrique de fréquences différentes ou des amplitudes différentes.

Le choix de la polarisation affecte la qualité et la portée du signal. En général :

- **Correspondance de polarisation** : Une antenne émettrice et réceptrice avec la même polarisation garantira la meilleure réception du signal, ce qui est crucial dans les systèmes où la perte de signal doit être minimisée.
- **Incompatibilité de polarisation** : Lorsque les antennes émettrice et réceptrice présentent des polarisations différentes, cela provoque une perte de puissance du signal reçu, pouvant entraîner une détérioration de la qualité de la communication. [39]

En résumé, la polarisation est un facteur déterminant dans les performances des antennes, et elle est soigneusement choisie en fonction de l'application spécifique (par exemple, polarisation linéaire pour des communications terrestres, polarisation circulaire pour des communications par satellite).

II.5 Types d'antennes

Les antennes sont des dispositifs indispensables dans le domaine des télécommunications, car elles assurent la transmission et la réception des ondes électromagnétiques dans l'espace libre. En d'autres termes, elles permettent de convertir l'énergie électrique issue d'un circuit électronique en ondes radio, et vice versa. Cette capacité à rayonner ou capter l'énergie électromagnétique fait des antennes un maillon fondamental dans tout système de communication sans fil.

Elles interviennent dans une multitude d'applications quotidiennes et industrielles : la radiodiffusion (radio FM, ondes courtes), la télévision, la téléphonie mobile, les réseaux Wi-Fi, le positionnement par satellite (GPS), les radars civils et militaires, ainsi que dans les communications spatiales. Chaque application nécessite des caractéristiques spécifiques en termes de fréquence, de gain, de directivité ou de polarisation, ce qui a conduit au développement d'une grande variété de types d'antennes. Le choix d'une antenne dépend de nombreux critères, notamment la bande de fréquence utilisée, la portée souhaitée, le type de rayonnement, et les contraintes physiques du système (taille, coût, intégration).

II.5.1 Antenne dipôle

L'antenne dipôle constitue l'un des types d'antennes les plus anciens, les plus simples et les plus répandus dans les systèmes de télécommunications. Elle est formée de deux éléments conducteurs de même longueur, alignés et alimentés en leur centre. Lorsque le courant alternatif issu d'un émetteur traverse ses bras, un champ électromagnétique est généré et rayonne principalement de manière perpendiculaire à l'axe de l'antenne. Elle est ainsi **omnidirectionnelle dans le plan horizontal**, ce qui en fait une solution adaptée aux communications générales.

Appréciée pour sa **facilité de modélisation**, son **impédance bien connue** ($\approx 73 \Omega$ pour un dipôle demi-onde) et sa **simplicité de fabrication**, elle sert souvent de **référence** pour comparer les performances d'autres antennes. On la retrouve dans de nombreuses applications telles que la **radio FM**, la **télévision terrestre**, ou encore les **réseaux radioamateurs**.

Malgré ses avantages, le dipôle présente certaines **limites** : faible directivité, sensibilité à son environnement d'installation (hauteur, obstacles), et performances moindres lorsque l'émission doit être focalisée dans une direction précise. Toutefois, sa robustesse, son coût réduit et sa fiabilité en font un composant fondamental et toujours d'actualité dans les systèmes RF de base.

.[40]

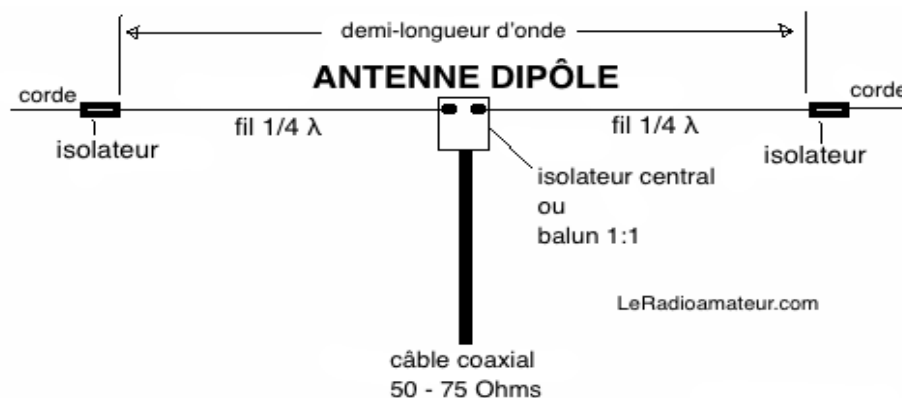


Figure II.4 : Antenne Dipole

II.5.2 Antenne Yagi-Uda

L'antenne Yagi-Uda, couramment appelée antenne Yagi, est une antenne directionnelle largement utilisée dans les applications nécessitant une concentration du signal dans une direction précise. Elle se compose d'un ensemble d'éléments alignés : un dipôle actif (élément alimenté), un réflecteur placé derrière ce dipôle pour réfléchir le rayonnement, et un ou plusieurs directeurs situés à l'avant pour canaliser l'énergie électromagnétique vers une direction spécifique.

Cette configuration confère à l'antenne une directivité élevée et un gain important, généralement compris entre 7 et 13 dBi. Grâce à cette performance directionnelle, elle permet de réduire les interférences en provenance d'autres directions et de focaliser le signal, ce qui en fait une solution idéale pour la réception de la télévision terrestre dans les zones rurales, ainsi que pour les communications radioamateurs, où une couverture ciblée est cruciale [40] .

Par ailleurs, l'antenne Yagi reste relativement compacte, ce qui facilite son installation sur les toits ou mâts, et son réglage en fréquence reste accessible, permettant une adaptation à divers usages. Toutefois, son principal inconvénient réside dans sa bande passante étroite, nécessitant parfois des versions optimisées pour des fréquences spécifiques. Malgré cela, sa simplicité de conception, sa robustesse, et sa performance en font l'une des antennes directionnelles les plus populaires dans le domaine des télécommunications..



Figure II.5 : Antenne Yagi-Uda

II.5.3 Antenne parabolique

L'antenne parabolique est un dispositif à très haut gain, reposant sur l'utilisation d'un réflecteur en forme de parabole pour concentrer ou diriger les ondes électromagnétiques. Son principe de fonctionnement repose sur la géométrie de la parabole : tout rayon incident parallèle à l'axe principal du réflecteur est réfléchi vers un point focal unique, appelé le foyer. C'est à cet emplacement stratégique qu'est placé le dispositif d'émission ou de réception — typiquement un dipôle ou un cornet d'alimentation — chargé de capter ou de rayonner les ondes focalisées.

Grâce à cette configuration, l'antenne parabolique présente une directivité extrêmement élevée, permettant de concentrer l'énergie rayonnée dans un faisceau étroit, et donc d'atteindre des distances considérables tout en minimisant les interférences. Le gain élevé qui en résulte en fait un outil privilégié pour les communications longue portée **【40】** .

Elle est couramment utilisée dans des domaines tels que :

- Les communications par satellite (TV directe, VSAT, Internet satellitaire),
- Les systèmes radar (surveillance météorologique, militaire ou aérienne),
- La radioastronomie, pour capter des signaux faibles émis par des objets célestes très lointains.

En raison de leur précision de pointage, les antennes paraboliques sont particulièrement adaptées aux environnements où la stabilité de la liaison et la portée sont des critères critiques. Cependant, leur efficacité dépend fortement de l'alignement, ce qui peut constituer une contrainte dans certaines applications mobiles ou en extérieur.



Figure II.6 : Antenne parabolique

II.5.4 Antenne patch

L'antenne patch, également appelée **antenne microstrip**, est une antenne plate conçue à partir d'un **conducteur métallique gravé sur une surface diélectrique** (un matériau isolant), lui-même posé sur un plan de masse. Elle prend généralement la forme d'un rectangle ou d'un cercle, bien que d'autres géométries puissent être utilisées pour optimiser certaines performances. Son fonctionnement repose sur la résonance des courants de surface induits dans le patch, ce qui génère un rayonnement électromagnétique principalement perpendiculaire à la surface de l'antenne. Elle est utilisée dans les téléphones portables, les réseaux Wi-Fi ainsi que dans les systèmes embarqués, caractérisée par un format compact, une intégration facile et un gain allant de faible à moyen.[40]

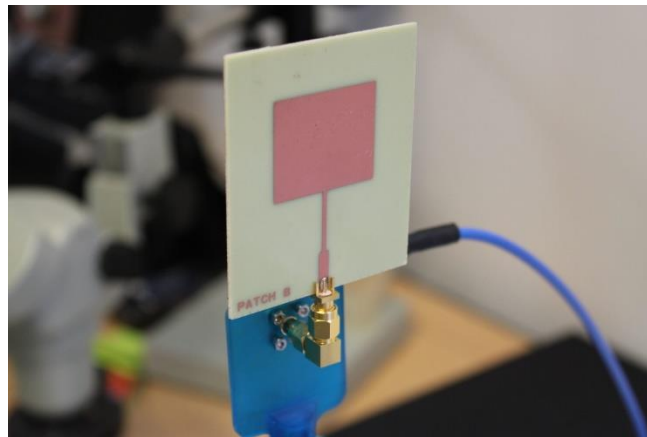


Figure II.7 : Antenne patch

II.5.5 Antenne boucle (loop antenna)

L'antenne boucle (*loop antenna*) est un conducteur fermé, généralement de forme circulaire ou carrée. Elle est principalement utilisée dans la réception des signaux AM, les systèmes RFID et les dispositifs portables. Grâce à sa forme compacte, elle convient bien aux appareils de petite taille. Elle possède une directivité omnidirectionnelle, ce qui lui permet de capter des signaux provenant de toutes les directions. Toutefois, son gain est relativement faible, ce qui limite ses performances en émission. Elle est simple à concevoir et économique. Ce type d'antenne est très répandu dans les technologies de communication à courte portée.



Figure II.9 : Antenne boucle (loop antenna)

II.6 Avantages et inconvénients

Les antennes microruban sont utilisées comme antennes intégrées dans les appareils sans fil portables comme les téléphones cellulaires, ainsi que dans les communications par satellite.

Voici quelques-uns de leurs avantages les plus importants :

- Profil faible.
- Facile à fabriquer (méthodes standards de circuits intégrés hyperfréquences).
- Facile à alimenter (coax, microruban).
- Facile à utiliser en matrice.
- Rayonnement presque hémisphérique, directivité moyenne (6 à 8 dB).

Les antennes micro ruban présentent aussi des inconvénients, Voici quelques-uns de leurs principaux :

- Faible largeur de bande (peut être amélioré). Largeur de bande de quelques pourcents.
- Rendement un peu plus faible que d'autres types d'antennes.
- Rendement limité par perte de conducteur et diélectrique, et ondes de surface.
- Pertes conducteurs et diélectriques plus élevées pour un substrat mince.
- Pertes d'onde de surface plus élevées pour un substrat épais.

II.7 Technique d'alimentation

Les antennes patch à microbandes peuvent être alimentées par plusieurs techniques, regroupées en deux grandes catégories : les méthodes par contact et les méthodes sans contact. Dans les configurations par contact, la puissance RF est directement injectée dans le patch rayonnant à l'aide d'un élément conducteur, comme une ligne microruban. À l'inverse, les méthodes sans contact reposent sur un couplage électromagnétique pour transférer l'énergie entre la ligne d'alimentation et le patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus couramment utilisées sont : la ligne microruban et la sonde coaxiale (alimentation par contact), ainsi que le couplage par ouverture et le couplage de proximité (alimentation sans contact).

II.7.1 Alimentation en ligne par microruban (microruban décalé)

Dans cette méthode d'alimentation, une bande conductrice est directement reliée au bord du patch micro-ruban, comme le montre la **Figure II.10**. Cette bande, généralement plus étroite que le patch lui-même, permet une intégration facile de l'alimentation sur le même substrat. Cette configuration offre l'avantage de maintenir une structure plane et compacte, idéale pour les circuits imprimés.

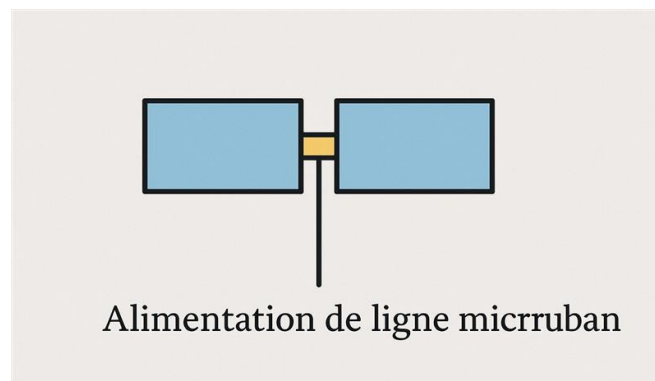


Figure II. 10: Alimentation de ligne microruban

Une encoche en forme de médaillon peut être intégrée dans le patch afin d'obtenir une bonne adaptation d'impédance, sans recourir à un élément d'adaptation supplémentaire. Cela est rendu possible en ajustant précisément la position de l'encart. Cette technique d'alimentation est appréciée pour sa simplicité de fabrication, sa facilité de modélisation et sa capacité à assurer une adaptation efficace. Toutefois, lorsque l'épaisseur du substrat diélectrique augmente, elle favorise l'apparition d'ondes de surface et de rayonnements parasites liés à l'alimentation, ce qui limite la bande passante de l'antenne. De plus, cette méthode peut engendrer des effets indésirables de polarisation croisée.

II.7.2 Alimentation coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est l'une des méthodes les plus répandues pour alimenter les antennes patch à microbandes. Comme illustré à la Figure II.11, le conducteur central du connecteur coaxial traverse le substrat diélectrique pour être soudé directement au patch rayonnant, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse.

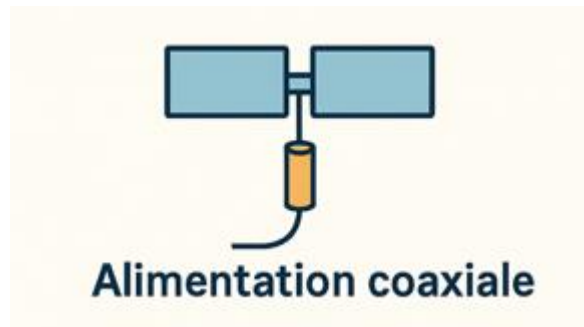


Figure II. 11: Alimentation coaxiale

L'un des principaux avantages de l'alimentation par sonde coaxiale réside dans la liberté de positionnement du point d'alimentation sur le patch, permettant ainsi une adaptation d'impédance optimale. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et génère peu de rayonnement parasite. Toutefois, elle présente certains inconvénients, notamment une bande passante étroite et une complexité de modélisation due à la nécessité de percer le substrat. De plus, lorsque des substrats épais sont utilisés, la longueur accrue de la sonde introduit une composante inductive dans l'impédance d'entrée, compliquant davantage l'adaptation.

Ainsi, bien que l'utilisation de substrats diélectriques épais puisse améliorer la bande passante, les alimentations par ligne microruban ou par sonde coaxiale s'accompagnent de limitations telles que le rayonnement parasite et les difficultés d'adaptation. Ces contraintes peuvent être surmontées grâce aux techniques d'alimentation sans contact, présentées dans les sections suivantes.

II.7.3 Alimentation par ligne microstrip

Ici, une **fine ligne de cuivre** (appelée ligne microstrip), gravée sur le même substrat que l'antenne, alimente l'élément rayonnant. Cette ligne agit comme une ligne de transmission et permet un **couplage direct** avec l'antenne patch située au-dessus.

- **Avantages** : entièrement planar, facile à intégrer dans des circuits imprimés (PCB), fabrication économique.
- **Inconvénients** : rayonnement partiel de la ligne d'alimentation, pertes accrues à haute fréquence, bande passante parfois étroite.

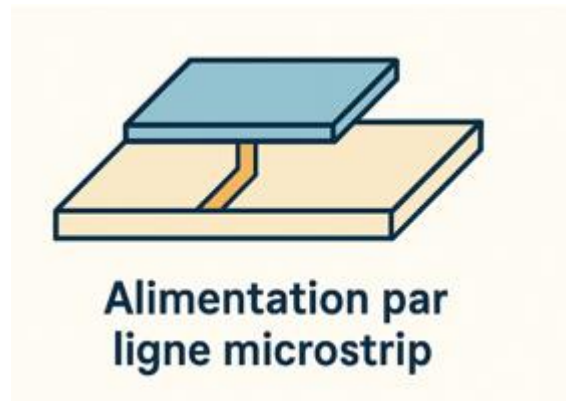


Figure II. 12: Alimentation par ligne microstrip

II.7.4 Alimentation par fente (ou aperture coupling)

Ce type utilise une **fente découpée dans le plan de masse**, située entre deux couches de substrat. Le signal électromagnétique est transmis à l'antenne par cette fente, sans contact direct avec l'élément rayonnant. Ce couplage par ouverture est souvent utilisé pour les antennes patch multicouches.

- **Avantages** : bonne isolation entre le circuit d'alimentation et l'élément rayonnant, réduction des interférences.
- **Inconvénients** : structure plus complexe, nécessite un alignement précis des couches, plus difficile à fabriquer.

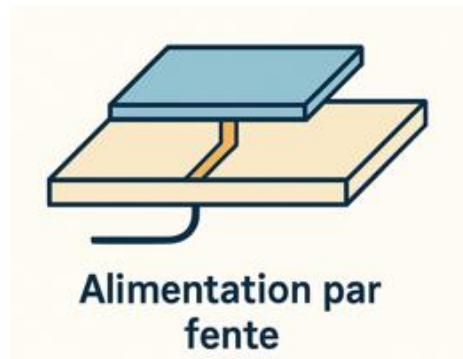


Figure II. 13: Alimentation par fente

II.7.2 Alimentation par sonde (probe feeding)

Dans ce cas, une **sonde métallique verticale** traverse le substrat et connecte le patch à la ligne d'alimentation en dessous. C'est une méthode couramment utilisée pour les antennes patch tridimensionnelles ou dans les configurations où un plan de masse est requis.

- **Avantages** : bonne adaptation d'impédance possible, faible perte.
- **Inconvénients** : nécessite de percer le substrat, ce qui peut affecter la robustesse mécanique et introduire des désaccords si mal réalisé.



Figure II. 14: Alimentation par sonde

II.8 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer le rôle fondamental des antennes dans les systèmes de communication sans fil, en retraçant d'abord leur évolution historique, depuis les expériences de Hertz et Marconi jusqu'aux antennes intelligentes utilisées dans les réseaux modernes comme la 5G. La diversité des antennes – dipôle, Yagi-Uda, parabolique ou encore patch à microbandes – témoigne de la nécessité d'adapter les structures aux exigences spécifiques de chaque application, qu'il s'agisse de couverture, de directivité ou de bande passante.

L'étude des paramètres caractéristiques, tels que le gain, la directivité, l'impédance ou le facteur de qualité, a mis en lumière les compromis techniques à prendre en compte lors de la conception et du choix d'une antenne. Enfin, les différentes méthodes d'alimentation, qu'elles soient par contact ou par couplage sans contact, jouent un rôle crucial dans les performances globales des antennes, influençant directement la bande passante, l'adaptation d'impédance et le rayonnement parasite.

L'ensemble de ces éléments souligne que la maîtrise des antennes est un enjeu stratégique pour le développement de systèmes de communication toujours plus performants, fiables et adaptés aux nouveaux défis technologiques de la connectivité mobile.[41]

Chapitre III

Conceptions

D'antennes 5G

III.1 Introduction

La technologie 5G exige des antennes qui offrent des fonctionnalités innovantes pour améliorer la connectivité des appareils utilisateurs [42 ;43]. Ces antennes doivent être capables de fournir des débits de données plus élevés, une latence réduite et une meilleure fiabilité de connexion pour répondre aux exigences croissantes des utilisateurs en matière de communication sans fil. La conception d'un tel produit pose de nombreux défis, car il est nécessaire de trouver un juste équilibre entre les contraintes techniques et les exigences commerciales. Il faut notamment tenir compte de critères tels que la réduction des coûts, la compacité, l'efficacité du rayonnement, le gain de l'antenne et les performances sur une large bande de fréquences. Ces défis sont spécifiquement liés aux bandes d'ondes millimétriques, qui sont des fréquences situées entre les ondes radio et les ondes infrarouges, et qui sont utilisées dans divers domaines tels que les télécommunications, la télédétection ou encore l'imagerie médicale [42 ;44].

Lorsqu'on examine les diverses possibilités, il apparaît que les antennes micro-ruban se démarquent grâce à leur configuration coplanaire qui regroupe les éléments de rayonnement et le réseau d'alimentation. Cette caractéristique en fait un choix avisé pour ceux qui recherchent un composant efficace offrant un équilibre optimal entre performances de qualité et facilité de fabrication, notamment dans le contexte des applications liées à la technologie 5G. Les antennes micro-ruban imprimées sur un substrat Duroid, un matériau diélectrique à base de téflon, ont démontré des performances supérieures par rapport aux conceptions traditionnelles utilisant la technologie LTCC (Céramiques Cofrittées à Basse Température). Cette supériorité a été observée et confirmée dans des études comparatives (références 40 et 43), mettant en avant les avantages de cette approche innovante en termes de performance d'efficacité [42 ;45].

Dans ce chapitre, notre objectif est de développer et de mettre en œuvre une antenne intégrée qui a la capacité de rayonner sur plusieurs bandes de fréquences. Cette antenne sera conçue pour être polyvalente et adaptable, afin de pouvoir répondre aux besoins variés des services de télécommunication de la 5e génération.

III.2 Antenne Microstrip Patch

III.2.1 Modélisation d'une antenne patch micro ruban

Une antenne micro-ruban, qui est un type d'antenne largement utilisé dans les communications sans fil en raison de sa compacité et de ses performances, peut être étudiée et analysée à l'aide de différentes méthodes et techniques. Parmi celles-ci, la méthode la plus fréquemment employée est l'utilisation de lignes de transmission pour modéliser ou analyser le comportement de l'antenne.

Dans le cadre de ce projet, nous utilisons le modèle de ligne de transmission afin de guider les différentes étapes de conception d'une antenne patch rectangulaire. Le recours à ce modèle nous permet de mieux appréhender les caractéristiques et les paramètres nécessaires pour concevoir efficacement cette antenne.

III.2.2 Modèle de ligne de transmission :

Ce modèle considère l'antenne comme une ligne de transmission microruban, puis la modélise comme deux fentes étroites rayonnant parallèlement, avec une largeur de W , une hauteur de h et séparées par une distance L

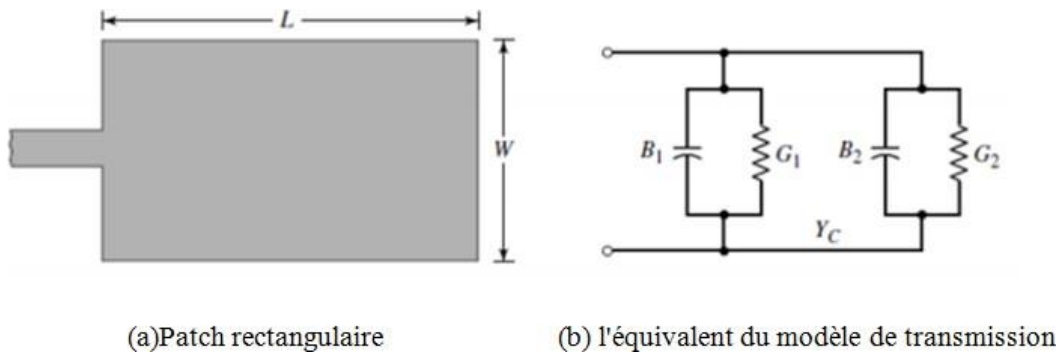


Figure III.1: Antenne patch rectangulaire et son modèle de ligne de transmission équivalent.

III.2.3 Exigences en matière de conception

Pour concevoir l'antenne, il est nécessaire de définir plusieurs variables d'entrée, sélectionnées en fonction des critères de conception. Ces variables sont :

1-Matériaux du substrat (ϵ_r)

Il existe une grande variété de matériaux de substrat pouvant être utilisés dans la conception d'une antenne patch à micro-ruban. Leurs constantes diélectriques varient généralement entre 2,2 et 12. Pour optimiser les performances de l'antenne, il est préférable d'opter pour des matériaux ayant une constante diélectrique faible, car ils offrent une meilleure efficacité, une bande passante plus large et des champs rayonnés plus étendus. Toute fois , cela se fait au détriment d'une augmentation de la taille des éléments du patch.

2-Hauteur du substrat (h)

La hauteur du substrat est généralement bien inférieure à la longueur d'onde en espace libre (λ_0), et se situe dans l'intervalle $0,003\lambda_0 < h < 0,05\lambda_0$. Une plus grande épaisseur du substrat favorise un couplage

La hauteur du substrat est généralement bien inférieure à la longueur d'onde en espace libre (λ_0), et se situe dans l'intervalle $0,003\lambda_0 < h < 0,05\lambda_0$. Une plus grande épaisseur du substrat favorise un couplage

plus lâche des champs rayonnés dans l'espace. En revanche, lorsque le substrat est plus mince, l'efficacité de l'antenne tend à diminuer.

3-Fréquence de résonance (fr)

C'est la fréquence à laquelle l'antenne est conçue pour fonctionner, déterminée en fonction des normes et exigences propres au système dans lequel elle est intégrée.

III.2.4 Procédure de conception

À partir des paramètres d'entrée fournis (h, ϵ_r et fr), les étapes suivantes sont appliquées afin de déterminer la largeur (W) et la longueur (L) de l'antenne patch recherchée :

- La largeur de l'antenne

$$W = \frac{c}{2.f.r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{III.1})$$

Où (C), est la vitesse de la lumière dans l'espace libre .

- La longueur de l'antenne patch :

$$L = \frac{c}{2.f.g\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta \quad (\text{III.2})$$

III.3 Description du problème

Les antennes patch sont des antennes résonnantes à bande passante étroite, prisées pour leur légèreté, leur faible coût et leur simplicité d'intégration, notamment dans les domaines aéronautique, spatial et militaire. Leur rayonnement provient des champs frangeants entre le patch et le plan de masse. [46] L'utilisation d'un substrat épais à faible constante diélectrique améliore leurs performances mais augmente leur taille, tandis qu'un substrat à constante élevée permet de miniaturiser l'antenne au détriment de l'efficacité et de la bande passante. Un compromis entre compacité et performance est donc nécessaire, comme cela a été le cas dans notre conception optimisée.

III.4 Choix de l'outil de simulation :

CST MICROWAVE STUDIO est un logiciel avancé dédié à la conception et à l'analyse électromagnétique dans le domaine des hautes fréquences. Il permet une modélisation précise des

structures grâce à des représentations tridimensionnelles détaillées de chaque composant. Ce niveau de précision facilite grandement l'étude du comportement électromagnétique de dispositifs complexes. [47]

Intégré à la suite **CST Design Studio**, ce logiciel met à disposition plusieurs solveurs adaptés à différents types d'applications, reconnaissant qu'aucune méthode unique ne peut convenir à tous les cas. Quatre techniques de simulation principales sont proposées :

- le **solveur temporel** (*transient solver*),
 - le **solveur fréquentiel** (*frequency domain solver*),
 - le **solveur par équations intégrales** (*integral equation solver*),
 - et le **solveur de modes propres** (*eigenmode solver*),
- chacun étant optimisé pour des contextes spécifiques.

Parmi ces outils, le **solveur transitoire** se distingue par sa flexibilité remarquable. Contrairement à d'autres simulateurs fonctionnant de manière séquentielle sur les fréquences, il permet de couvrir une large bande de fréquences en une seule simulation, offrant ainsi un gain de temps considérable et une vue globale du comportement du système.

III.5 Résultats de Simulations

❖ Conception d'antenne 1

L'antenne patch compacte proposée, alimentée par une ligne micro-ruban, est illustrée à la figure III.2. L'antenne se compose d'un patch rectangulaire de $10,2 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, comportant une fente verticale. Plusieurs paramètres ont été pris en compte lors de la conception de cette antenne, tels que la constante diélectrique ($\epsilon_r = 4,4$ et l'épaisseur du substrat ($h = 1,6 \text{ mm}$).

Le matériau FR4 est utilisé comme substrat pour la conception de cette antenne. Dans cette structure, un port localisé est utilisé pour exciter l'antenne. Les dimensions globales sont de $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1,6 \text{ mm}$. Les dimensions détaillées de l'antenne patch proposée sont présentées dans le Tableau I.

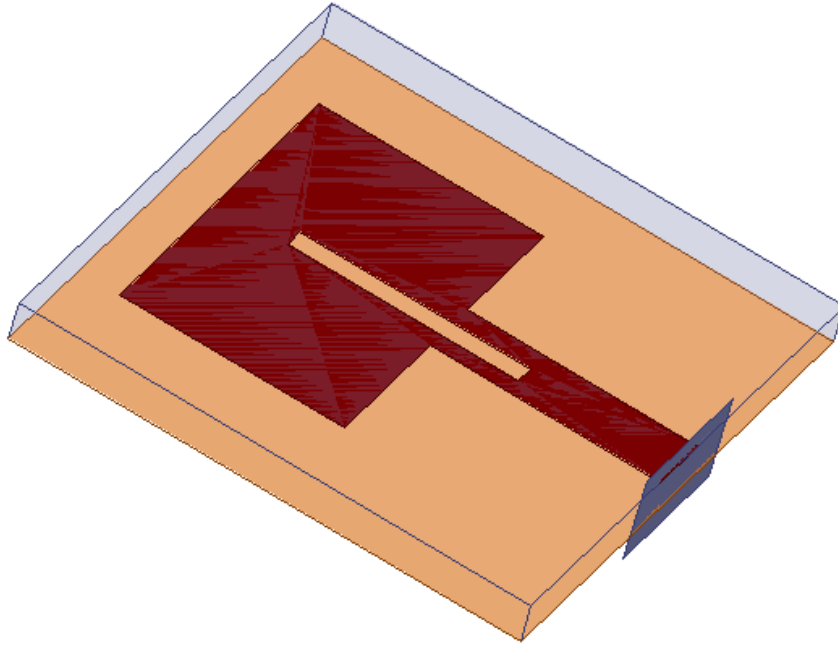


Figure III.2 : la géométrie de l'antenne proposée

Les différentes valeurs des paramètres géométriques de l'antenne sont mentionnées dans le Tableau III 1 ci-dessous :

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne

<i>Paramètres</i>	Ls	Ws	Lp	Wp	t	Wf	Wq	Lq	l
Dimension(mm)	20	30	10.2	7	0.8	7.2	1.9	1.6	9

La conception et la simulation de l'antenne patch proposée ont été réalisées à l'aide d'un outil de simulation disponible commercialement CST . Cette antenne est spécifiquement conçue pour plusieurs bandes de fréquences susceptible d'être utilisée dans les futures communications sans fil 5G. La section suivante présente et analyse les différents résultats de simulation obtenus pour cette conception.

III.6 Résultat de simulation :

Les performances de l'antenne ont été analysées à l'aide du logiciel CST. La figure III.3 présente le coefficient de réflexion obtenu lors de la simulation.

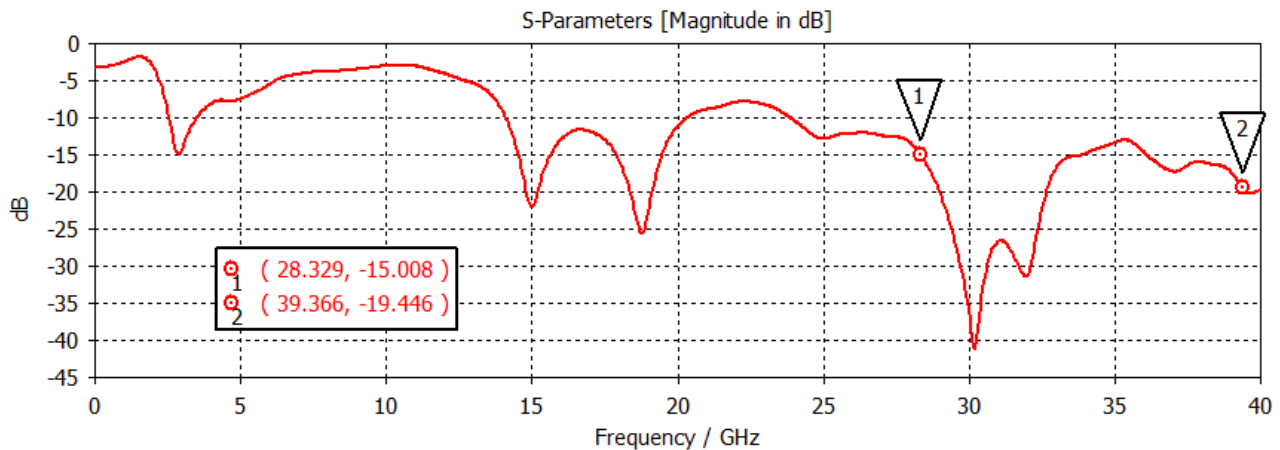


Figure III.3 : Courbe de la perte de retour (S11) de l'antenne patch proposée

La courbe de réflexion S11 obtenue montre plusieurs résonances significatives sur la bande de fréquence allant de 0 à 40 GHz. Une antenne est considérée comme bien adaptée lorsqu'elle présente un S11 inférieur à -10 dB, indiquant qu'au moins 90 % de la puissance est rayonnée.

L'analyse du graphe révèle une forte résonance centrée autour de 29.5 GHz, atteignant une valeur minimale de -42 dB, ce qui correspond à une excellente adaptation d'impédance et une efficacité maximale en émission ou réception. Cette fréquence se situe dans la bande n257 (26.5 – 29.5 GHz) définie pour les applications 5G millimétriques (mmWave), offrant des débits très élevés et une faible latence, principalement destinés aux environnements urbains denses.

Une autre résonance notable apparaît autour de 39 GHz ($S_{11} \approx -20$ dB), située dans les bandes 5G actuellement standardisées, pouvant aussi être exploitée dans le cadre d'applications futures ou expérimentales dans le domaine des ondes millimétriques.

En revanche, aucune résonance n'a été observée dans la gamme sub-6 GHz, en particulier autour de 3.5 GHz, correspondant à la bande n78, très utilisée pour la 5G à large couverture. Cela indique que l'antenne simulée est optimisée pour les bandes millimétriques, mais non adaptée pour les bandes basses et moyennes typiquement utilisées dans les déploiements 5G classiques.

Ainsi, l'antenne proposée est particulièrement bien conçue pour les applications 5G mmWave, avec une excellente adaptation dans la bande n257, tout en présentant un potentiel d'amélioration pour la prise en charge des bandes Sub-6 GHz dans des conceptions futures

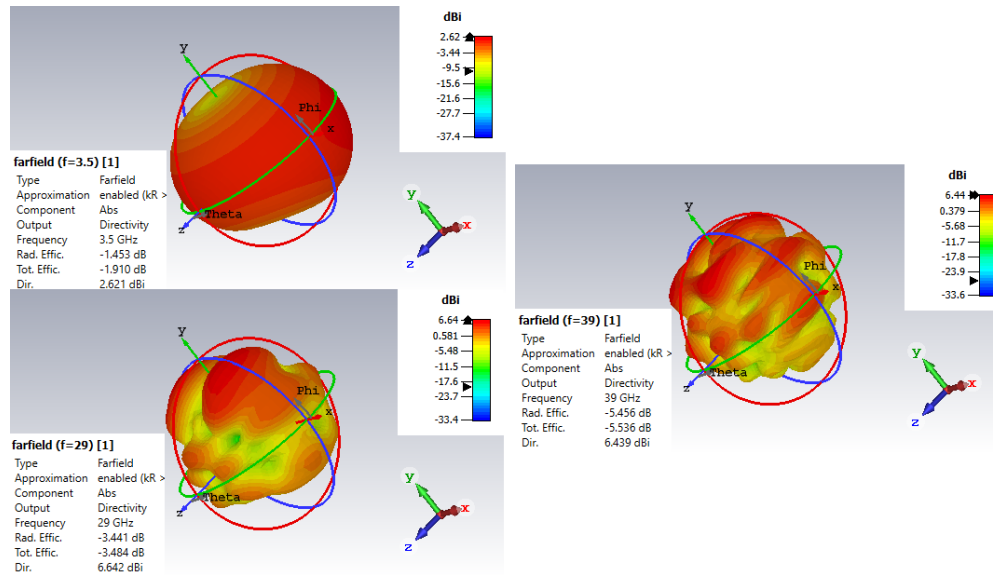


Figure III.4 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée.

A 3.5 GHz l'antenne présente une directivité modéré 2.26 dBi ce qui est idéale pour les applications 5G à large couverture dans les bandes sub-6GHz, à des fréquences plus élevées ma directivité augmente considérablement jusqu'à 6.44 Db traduisant une meilleure capacité à contourner le rayonnement dans une direction donnée, ce qui est essentiel pour les liens 5G haut débit. Donc l'antenne 1 présente une directivité accrue pour les bandes mmWaves

Le rapport d'onde stationnaire de tension (VSWR – Voltage Standing Wave Ratio) est illustré dans la figure III.5. On constate que, pour les trois fréquences de résonance, la valeur du VSWR reste inférieure à 2, ce qui indique une bonne adaptation de l'antenne.

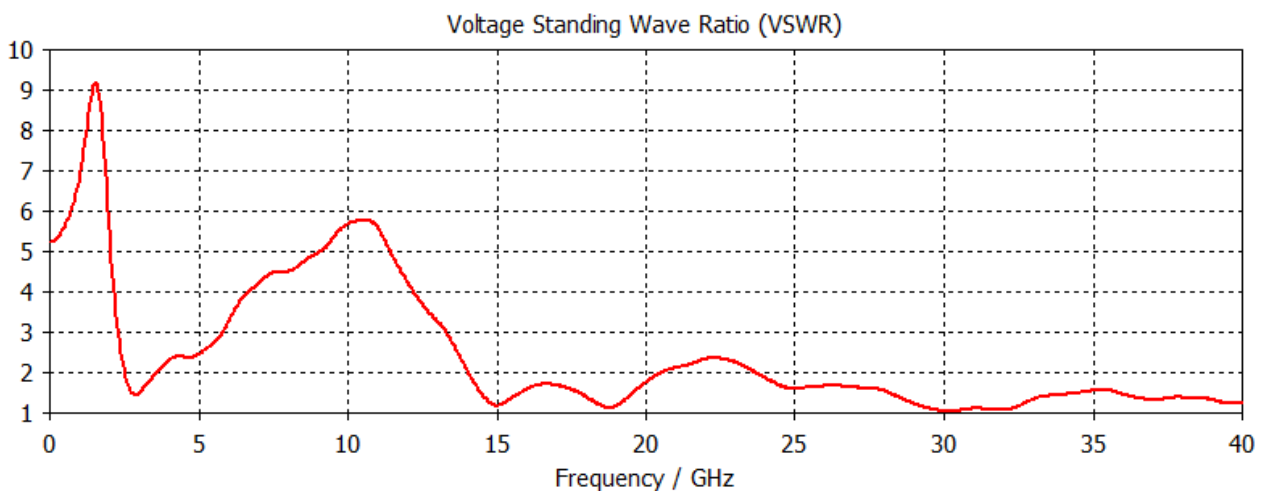


Figure III.5 : (VSWR) pour les fréquence

Le graphe VSWR confirme les performances observées dans l'analyse du paramètre S11. On note plusieurs valeur du VSWR en dessous du seuil de 2, notamment autour de 3.5 GHz, 29 GHz, et surtout à 39 GHz, où le rapport chute à environ 1.1, indiquant une très bonne adaptation d'impédance. Cette fréquence appartient à la bande 5G millimétrique, ce qui confirme que l'antenne est optimisée pour ce type d'application.

Globalement, le comportement en VSWR soutient que l'antenne est bien adaptée aux communications 5G mmWave, avec un excellent rendement dans la bande haute

❖ Antenne 2

Une antenne patch compacte alimentée par micro-ruban, conçue pour les futures applications 5G est présentée. Sa structure comprend un patch rayonnant un plan de masse partiel en face inférieure. L'antenne se distingue par ses dimensions réduites de $30 \times 34 \text{ mm}^2$,

La figure III.6 présente la configuration finale de l'antenne proposée, une antenne patch de forme carrée, dotée d'une fente rectangulaire

Pour améliorer cette adaptation, un plan de masse partiel a ensuite été introduit. Les résultats indiquent alors une adaptation d'impédance satisfaisant dans une large bande de fréquences, Toutefois.

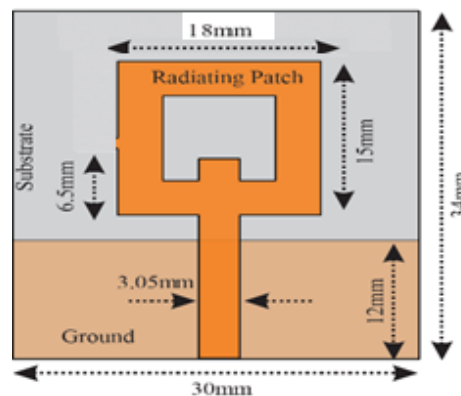


Figure III.6 : Configuration géométrique de l'antenne proposée

III. 7 Résultat de simulation :

Les performances de l'antenne ont été analysées à l'aide du logiciel CST. La figure III. présente le coefficient de réflexion obtenu lors de la simulation

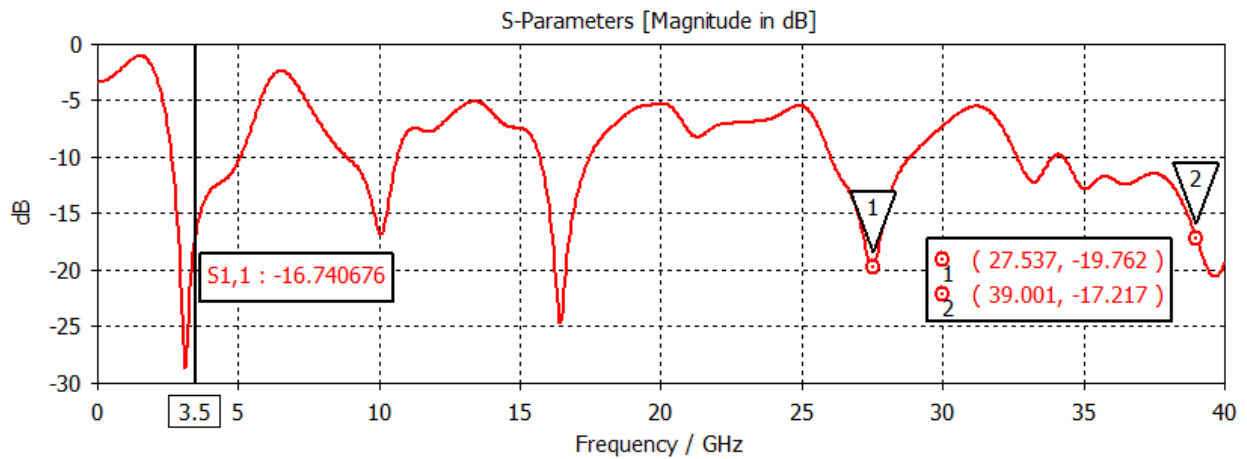


Figure III.7: le coefficient de réflexion S11 obtenu de la simulation.

La courbe du paramètre S11, extraite de la simulation de l'antenne modifiée, met en évidence un comportement multibande sur une large plage de fréquences allant de 0 à 40 GHz. Le coefficient de réflexion S11 indique la qualité de l'adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation.

Les résultats montrent plusieurs résonances notables avec $S_{11} \leq -10$ dB autour des fréquences suivantes : 3.5 GHz, , 27 GHz et 39 **GHz**.

Les pics les plus profonds sont observés à 3.3 GHz (~ -28 dB) et 39 GHz (~ -18 dB)

Ces bandes de résonance coïncident avec plusieurs plages de fréquences utilisées dans les communications 5G :

- La bande Sub-6 GHz, notamment la bande n78 (3.5–4.5 GHz), largement utilisée dans les déploiements 5G initiaux.
- Les bandes millimétriques (mmWave), notamment n257 (26.5–29.5 GHz) et n260 (37–40 GHz), utilisées pour les applications à très haut débit et faible latence.

Ainsi, l'antenne conçue offre une caractéristique multibande étendue, la rendant adaptée aussi bien aux bandes Sub-6 GHz qu'aux bandes 5G mmWave, ce qui en fait une bonne candidate pour des applications 5G hybrides.

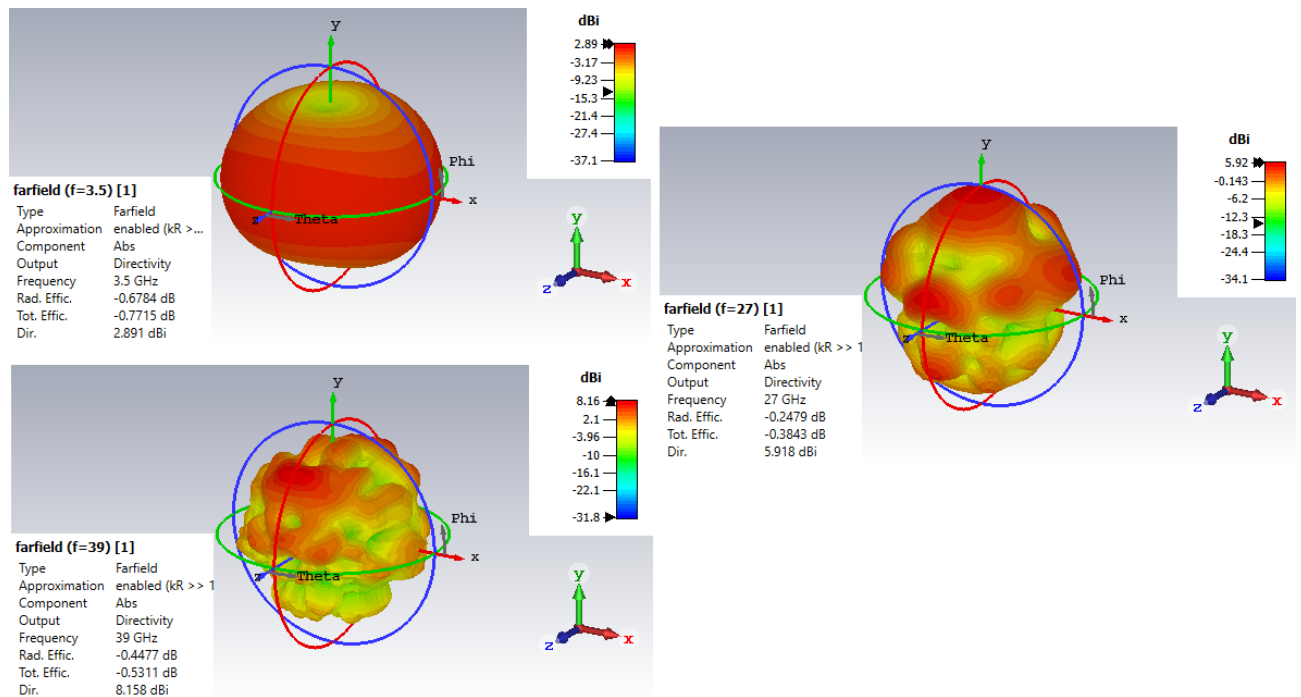


Figure III.8 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée.

La figure ci-dessus illustre le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne simulée

- **À 3.5 GHz (Sub-6 GHz) :**

L'antenne affiche un diagramme arrondi, indiquant une **couverture omnidirectionnelle**, idéale pour les **cellules larges et la continuité de service 5G**. L'efficacité est très bonne avec **moins de -1 dB de pertes**, ce qui montre un bon appariement et peu de pertes diélectriques.

- **À 27 GHz (mmWave) :**

Le rayonnement devient **plus directionnel**, ce qui est attendu pour les **communications à faisceau étroit** dans les bandes millimétriques. La directivité augmente fortement (≈ 6 dBi) et l'efficacité reste **excellente**, ce qui est remarquable pour une antenne à haute fréquence.

- **À 39 GHz (mmWave avancée) :**

La directivité atteint **8.516 dBi**, traduisant une **focalisation très prononcée du faisceau**. Malgré cela, l'efficacité reste **très bonne** (≈ -0.5 dB), ce qui est un excellent indicateur de performance pour les communications 5G à haut débit.

La figure III.5 illustre le rapport d'ondes stationnaires en tension (VSWR) de l'antenne. Il est à noter que pour les trois fréquences de résonance, la valeur du VSWR reste inférieure à 2, ce qui traduit une bonne adaptation d'impédance.

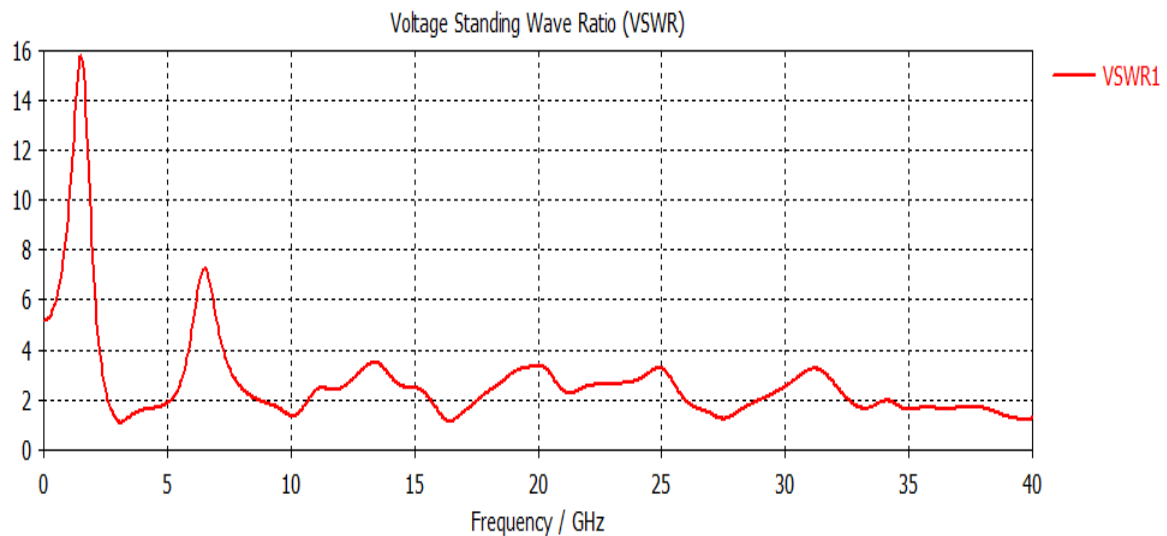


Figure III.9: (VSWR) pour les fréquences

Ces résultats confirment que l'antenne est bien adaptée à une large gamme de fréquences, couvrant à la fois les applications 5G Sub-6 GHz et mmWave, ce qui en fait une solution efficace pour les systèmes de communication multibande et à large bande passante.

❖ Antenne 3

La conception de l'antenne patch microstrip destinée aux applications 5G repose sur un substrat en Rogers RT Duroid 5880, caractérisé par une épaisseur de 0,787 mm et une constante diélectrique relative de 2,2. Ce matériau est reconnu pour ses faibles pertes diélectriques et sa stabilité aux hautes fréquences, ce qui le rend idéal pour les applications millimétriques. Le plan de masse, généralement réalisé en cuivre d'une épaisseur d'environ 0,035 mm, est placé sur la face inférieure du substrat afin d'assurer une bonne conduction et une efficacité optimale de l'antenne.

Pour assurer une adaptation d'impédance efficace entre la ligne d'alimentation et l'antenne, un transformateur quart d'onde est intégré. Les caractéristiques détaillées de cette antenne sont présentées dans le tableau I. Les équations fondamentales utilisées pour la conception des antennes patch microstrip sont les suivantes:

- **Longueur du patch**

$$L_p = L_{eff} - \Delta L \quad (III.3)$$

- Constante diélectrique effective

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W_p}}} \quad (\text{III.4})$$

- Extension de longueur

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (\text{III.5})$$

- Longueur effective

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{III.6})$$

- Longueur du substrat

$$L_s = 6h + L_p \quad (\text{III.7})$$

- Largeur du substrat

$$W_s = 6h + W_p \quad (\text{III.8})$$

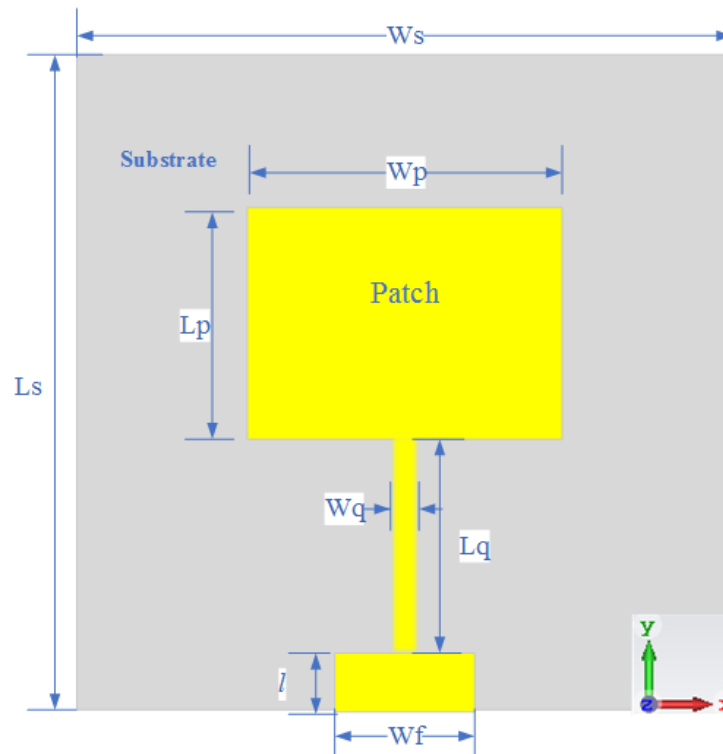


Figure III.10: Dimensions d'une antenne patch micro-ruban conventionnelle avec ligne d'alimentation d'un quart de longueur d'onde

Les différentes valeurs des paramètres géométriques de l'antenne sont mentionnées dans le **Tableau III. 3** ci-dessous :

Tableau III. 3 : Dimensions de l'antenne

Paramètres	Ls	Ws	Lp	Wp	t	Wf	Wq	Lq	l
Dimension(mm)	10	10	3.4	4	0.0175	2.2	0.4	2.8626	0.9374

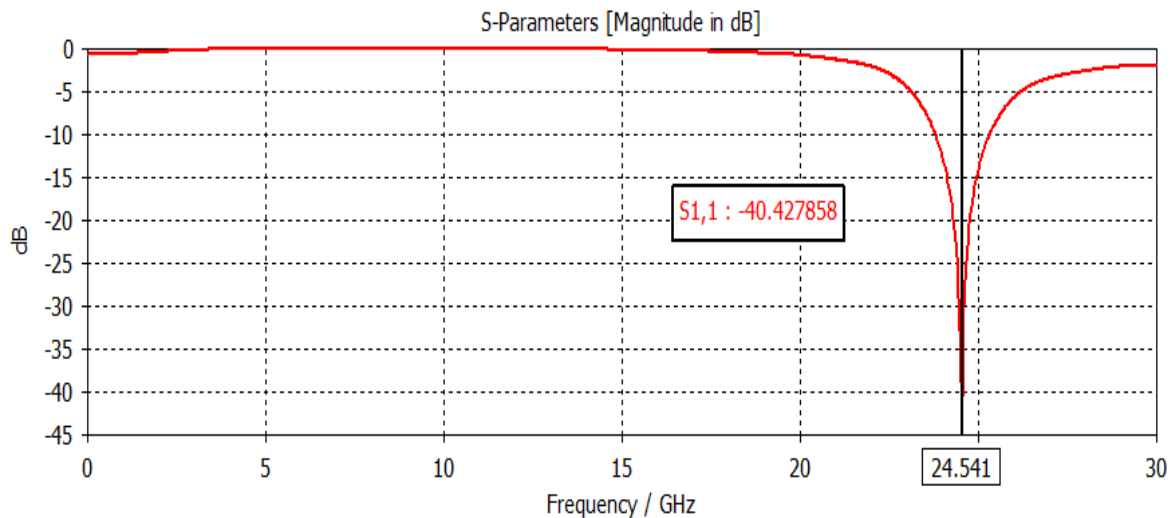


Figure III.11 : le coefficient de réflexion S11 obtenu de la simulation.

La courbe du paramètre S11 présentée ci-dessus met en évidence une résonance marquée à la fréquence de 24.541 GHz, où le coefficient de réflexion atteint une valeur extrêmement faible de – 40.42 dB. Ce minimum prononcé indique une excellente adaptation d'impédance, avec une perte par réflexion négligeable, ce qui garantit un transfert de puissance optimal entre la ligne d'alimentation et l'antenne.

Cette fréquence de résonance s'inscrit dans la bande des ondes millimétriques (mmWave), spécifiquement dans la plage de 24.25–27.5 GHz définie par le standard 5G NR pour la bande n258. Cette bande est utilisée pour les communications 5G à très haut débit,

La conception ciblée de cette antenne autour de 24.5 GHz, avec un S11 très en dessous du seuil de – 10 dB, confirme qu'elle est spécifiquement optimisée pour les applications 5G millimétriques. Ce type de réponse est particulièrement recherché dans les architectures MIMO, les réseaux cellulaires de nouvelle génération, et les dispositifs embarqués nécessitant une bande passante élevée.

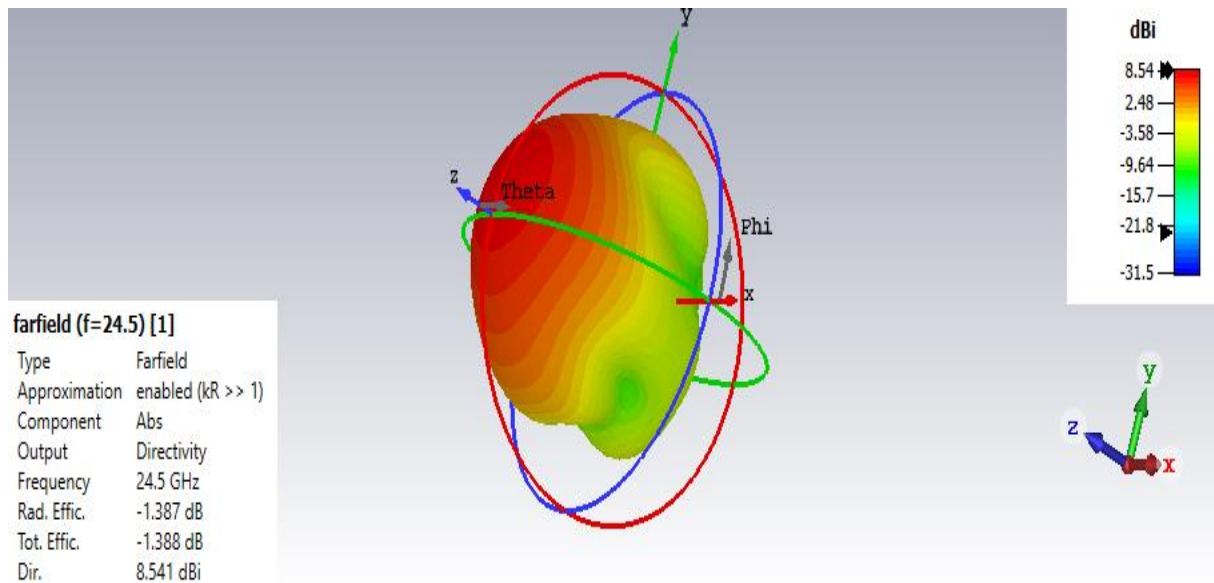


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée.

L'antenne présente à 24.5 GHz une forte directivité et une bonne efficacité, ce qui la rend idéale pour les applications 5G millimétriques, en particulier dans la bande n258. Couplée à l'excellente adaptation d'impédance observée ($S_{11} \approx -40$ dB), cette antenne répond aux exigences de performances élevées et de fiabilité dans les systèmes 5G à haut débit.

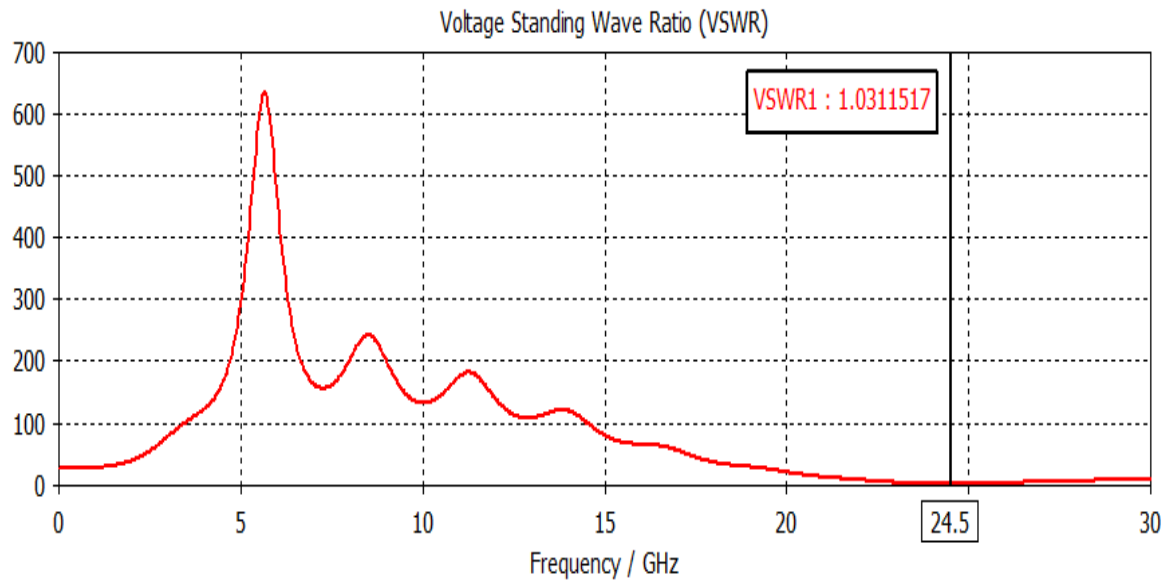


Figure III.13: (VSWR) pour les fréquences

Le graphe présenté montre le comportement du taux d'ondes stationnaires en tension (VSWR) de l'antenne dans la plage de 0 à 30 GHz. Le VSWR mesure l'adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation : une valeur idéale est 1, indiquant qu'aucune onde n'est réfléchie.

À la fréquence de résonance de 24.541 GHz, le VSWR atteint une valeur de 1.019, ce qui est extrêmement proche de l'idéal théorique. Cela confirme une quasi-parfaite adaptation à cette fréquence, déjà corroborée par le S11 de -40.42 dB et l'impédance de 52.9Ω .

Les très faibles pertes par réflexion à cette fréquence assurent que la quasi-totalité de la puissance est transmise à l'antenne, optimisant ainsi le rayonnement électromagnétique. Ce niveau d'adaptation est particulièrement recherché dans les applications millimétriques 5G, notamment dans la bande n258 (24.25–27.5 GHz), pour garantir un haut débit, une faible latence et une efficacité maximale.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, trois topologies d'antennes ont été étudiées, simulées et analysées en vue d'une intégration dans des systèmes de communication 5G. L'évaluation a porté sur plusieurs paramètres essentiels : le coefficient de réflexion (S_{11}), le taux d'ondes stationnaires (VSWR), l'impédance d'entrée, la directivité, le gain, ainsi que l'efficacité de rayonnement. Chaque antenne a été conçue pour répondre aux exigences spécifiques des bandes 5G Sub-6 GHz et 5G millimétriques (mmWave). L'analyse comparative met en évidence que chacune des antennes répond à des besoins spécifiques dans le déploiement de la 5G. La première offre une polyvalence multibande, la deuxième une structure simplifiée et équilibrée, tandis que la troisième fournit une performance ciblée exceptionnelle pour la bande 24.5 GHz. Cette diversité de conceptions permet de répondre aux différents cas d'usage de la 5G, allant des réseaux étendus en Sub-6 GHz aux liaisons à très haut débit dans les bandes millimétriques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

À l'issue de ce mémoire, il apparaît clairement que l'évolution des réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, constitue une véritable révolution technologique ayant profondément transformé notre société, nos modes de communication, et les infrastructures numériques modernes. La cinquième génération, en particulier, ne se contente pas d'offrir de meilleures performances ; elle redéfinit les usages, en intégrant des domaines aussi variés que la télémédecine, les villes intelligentes, l'Internet des objets (IoT) ou encore les véhicules autonomes.

Dans ce contexte, l'optimisation des antennes s'impose comme un levier technologique stratégique. Ce travail a permis de mettre en lumière l'importance cruciale de ces composants dans l'atteinte des objectifs ambitieux de la 5G, notamment en matière de débit élevé, de faible latence et de connectivité massive. L'étude des paramètres fondamentaux des antennes, des différentes architectures, des techniques d'alimentation, ainsi que des nouvelles approches telles que le Massive MIMO et le beamforming, a montré que l'innovation dans la conception et l'implantation des antennes est indispensable pour garantir une qualité de service optimale.

Par ailleurs, cette recherche a souligné que l'optimisation des antennes ne peut se faire de manière isolée : elle s'inscrit dans une approche systémique et pluridisciplinaire, qui prend en compte à la fois les caractéristiques électromagnétiques, les contraintes physiques des environnements de déploiement, les modèles de propagation, et les exigences économiques des opérateurs.

Ainsi, face à la complexité croissante des réseaux mobiles, il devient essentiel de concevoir des antennes non seulement performantes, mais aussi adaptatives, intelligentes, et capables de s'intégrer harmonieusement dans les futurs écosystèmes numériques. Ce mémoire ouvre donc la voie à des perspectives prometteuses, notamment dans le cadre du développement de la 6G, où les défis seront encore plus nombreux et exigeants, mais où les opportunités d'innovation seront également considérables.

Bibliographie

- [1] ANDREWS, J. G., BUZZI, S., CHOI, W., HANLY, S. V., LOZANO, A., SOONG, A. C., et ZHANG, J. C. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* . 2014
- [2] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed., Prentice Hall, 2002.
- [3] LEE, W. C. Y. *Mobile Cellular Telecommunications: Analog and Digital Systems*. 2nd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [4] REDL, S. M., WEBER, M. K., & OLCZAK, M. W. *An Introduction to GSM*. Artech House, 1995.
- [5] RIKHY, S., & RODDY, D. *Satellite Communications and Mobile Telephony*. McGraw-Hill, 2001.
- [6] LEE, W. C. Y. *Mobile Cellular Telecommunications: Analog and Digital Systems*. 2nd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [7] GILBERT, A. C., & ELDER, A. R. *Cellular Radio and Personal Communications Systems*. Artech House, 1995.
- [8] SESIA, S., TOULOUSE, G., & BAKER, M. *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2011
- [9] FEHER, K. *Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Prentice Hall, 1995.
- [10] MOULY, M., & PAUTET, M. B. *The GSM System for Mobile Communications*. Cell & Sys, 1992.
- [11] Agrawal, D. P., & Zeng, Q. A. *Introduction to Wireless and Mobile Systems*. 3rd ed., Cengage Learning, 2010
- [12] Rappaport, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed., Prentice Hall, 2002.
- [13] Garg, V. K. *Wireless Communications and Networking*. Morgan Kaufmann, 2007.
- [14] FISCHER, L. E., et GILBERT, D. *GSM System Engineering*. Artech House, 1999.
- [15] SAUTER, M. *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. Wiley, 2017.
- [16] CASTELLS, M., FERNÁNDEZ-ARDÈVOL, M., QIU, J. L., & SEY, A. *Mobile Communication and Society: A Global Perspective*, 2007.
- [17] Ling, R., & Donner, J. *Mobile Communication*. Polity Press, 2009.
- [18] Goldsmith, A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005..
- [19] Molisch, A. F. *Wireless Communications*. 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2011.

- [20] **Mekimah, B.** *Les réseaux de téléphonie mobile de la 1G à la 5G : principes, évolutions et enjeux*. Université de Bejaia, 2018.
- [21] **Yoon, N.** *4G LTE and Beyond: A Comparative Study of Network Performance and User Experience*. Seoul National University, 2017.
- [22] **El Mashade, M. B., & Hegazy, E. A.** *Enhancement of Mobile Video Streaming over LTE Networks*. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), vol. 10, no. 2, 2018
- [23] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). *Internet of Things for Smart Cities*. IEEE Internet of Things Journal
- [24] Belgacem, N. *L'évolution des usages mobiles à l'ère de la 4G : vers une société hyperconnectée.*, 2022
- [25] ANDREWS, J. G., BUZZI, S., CHOI, W., HANLY, S. V., LOZANO, A., SOONG, A. C., & ZHANG, J. C. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014
- [26] Mamunur, R., & Saddam, H. (2014). *The impact of 4G LTE on mobile commerce and mobile marketing*.
- [27] **Marzetta, T. L.** *Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010
- [28] Checko, A., Christensen, B. S., Kardaras, G., Berger, M. S., & Dittmann, L. (2015). *Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview*
- [29] BASU, S., GHOSH, S., & MUKHERJEE, S. *5G-Enabled Connected Autonomous Vehicles: Communication and Networking Challenges*. IEEE Communications Magazine, 2020
- [30] CHEN, S., ZHANG, J., & LIU, Y. *Challenges and Solutions for 5G Deployment: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials , 2020
- [31] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Wiley, 2016.
- [32] IEEE. *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas.*, 2013.
- [33] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4e éd., Wiley, 2016.
- [34] STUTZMAN, W. L., & THIELE, G. A. *Antenna Theory and Design*. 3e éd., Wiley, 2012.
- [35] KRAUS, J. D., & MARHEFKA, R. J. *Antennas for All Applications*. 3e éd., McGraw-Hill, 2002.
- [36] Warren L. Stutzman, *Antenna Theory and Design.*: John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [37] LEE, K. F., & CHEN, W. *Advances in Microstrip and Printed Antennas*. Wiley, 1997.
- [38] David K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics.*: ADDISON-WISLEY PUBLISHING COMPANY, 1992.9
- [39] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed., New York, NY, USA: Wiley, 1997.
- [40] Balanis, Constantine A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1997.
- [41] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016

- [42] W. Roh *et al.*, “Millimeter-Wave Beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results”, *IEEE Comm. Magazine*, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [43] X.-P. Chen, K. Wu, L. Han, F. He, “Low-cost high gain planar antenna array for 60-GHz band applications”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 6, pp. 2126–2129, June 2010.
- [44] Mi. Li, K.-M. Luk, “Low-Cost Wideband Microstrip Antenna Array for 60-GHz Applications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 3012- 3018, June 2014.
- [45] E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman, D. Treves,”A study of microstrip array antennas with the feed network”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, pp. 426- 434, 1989.
- [46] L.Wang, Y.-X. Guo, W.-X. Sheng, “Wideband high-gain 60-GHz LTCC L-probe patch antenna array with a soft surface”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 4, pp. 1802– 1809, April 2013.
- [47] N. Belgacem « Conception Des Antennes Pifa Mono-Bande Et Multi-Bandes Gsm, Dcs, Pcs, Umts Et Wifi Pour Téléphones Mobiles » Mémoire de Master, Université