

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
Recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



MEMOIRE DE MASTER

Filière : Télécommunication
Spécialité : Systèmes Des Télécommunications

Présenté par :

- AHMED SERIER Rania
- LOUZRI Yasmine

Optimisation et Conception d'une Antenne Miniature pour les Applications 5G, Intégrant les Techniques DMS et DGS

Proposé par :

- Mme BERKAT Zeyneb

Année Universitaire : 2023-2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص

هذا المشروع البحثي يهدف إلى تصميم ومحاكاة وتحسين هوائي صغير الحجم لتطبيقات الجيل الخامس في نطاق أقل من 6 غيغاهرتز من خلال دمج تقنيات مبتكرة مثل DMS (هيكل الشريط الدقيق المعيب) و DGS (هيكل الأرض المعيبة). الهدف هو تطوير هوائي يعرض تحسناً كبيراً في عرض النطاق الترددي والمقاومة وخصائص الإشعاع مع الحفاظ على حجم مقلص لسهولة الدمج في الأجهزة المدمجة. باستخدام برنامج CST Studio المتقدم، نجحنا في تكييف الهوائي بكفاءة لتردد 4.5 غيغاهرتز، مع القيام بالتحسين لزيادة الكسب إلى 5.8 ديسيبل. يستكشف هذه المذكرة في مجال الاتصالات هذه التقنيات بشكل شامل لتصغير هوائيات الباتش وتعزيز الكسب عند التردد المحدد للرنين لتقنية الجيل الخامس.

الكلمات الرئيسية: Cst microwave studio، 5G، النطاق الأقل من 6 غيغاهرتز، تقنية DMS، تقنية DGS

Résumé

Ce projet de recherche vise à concevoir, simuler et optimiser une antenne miniature pour les applications 5G dans la bande sub-6 GHz en combinant les techniques novatrices de DMS (Defected Microstrip Structure) et DGS (Defected Ground Structure). L'objectif est de développer une antenne présentant une amélioration significative en termes de bande passante, d'impédance et de rayonnement, tout en conservant une taille réduite pour une intégration aisée dans des dispositifs compacts. En utilisant le logiciel avancé CST Studio, nous avons réussi à adapter efficacement l'antenne à la fréquence de 4.5 GHz, tout en procédant à une optimisation visant à augmenter le gain jusqu'à 5.8 dB. Ce projet de fin d'études en télécommunications explore de manière approfondie ces techniques pour la miniaturisation des antennes patch et l'amélioration du gain à la fréquence de résonance spécifique de la 5G.

Mots clés: CST Microwave Studio, 5G, Bande sub-6 GHz, Technique DMS, Technique DGS

Abstract

This research project aims to design, simulate, and optimize a miniature antenna for 5G applications in the sub-6 GHz band by combining innovative techniques of DMS (Defected Microstrip Structure) and DGS (Defected Ground Structure). The objective is to develop an antenna with significantly improved bandwidth, impedance, and radiation characteristics while maintaining a reduced size for easy integration into compact devices. Using the advanced CST Studio software, we successfully tailored the antenna to the 4.5 GHz frequency, while optimizing to increase gain up to 5.8 dB this telecommunications thesis extensively explores these techniques for patch antenna miniaturization and gain enhancement at the specific resonance frequency of 5G.

Keywords: CST Microwave Studio ,5G, Sub-6 GHz Band, DMS Technique, DGS Technique

REMERCIEMENTS

Nous débutons en exprimant nos sincères remerciements au Créateur, ALLAH, de l'univers, pour nous avoir accordé l'intelligence et pour avoir préservé notre bonne santé.

Cette recherche a été menée au sein du département de l'électronique de la faculté de technologie de l'université SAAD DAHLEB BLIDA. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre promotrice, Mme BERKAT Zeyneb. Bien que les mérites de ce mémoire reviennent en grande partie à son auteur, ils sont également le fruit du travail de la Directrice qui a supervisé ce projet. Notre Directrice nous a apporté un soutien inestimable et a démontré une attention remarquable. Nous lui sommes infiniment reconnaissants pour la confiance qu'elle nous a témoignée face aux obstacles rencontrés et pour son aide précieuse dans la recherche.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur contribution est d'une grande valeur pour nous.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance envers M. Hocine AIT SAADI, Chef de Département d'Électronique, ainsi qu'envers tous les enseignants et le personnel de notre Département. Leur appui et leur contribution ont joué un rôle crucial tout au long de notre cheminement.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre gratitude sincère envers nos familles. Leur présence, leur écoute, leur confiance et leur soutien constant nous ont donné des bases solides pour persévérer et dépasser nos limites.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous ceux qui nous ont soutenus, que ce soit de près ou de loin, dans la réalisation de cette œuvre.

Dédicaces



Je présente le fruit de mes humbles efforts À ceux qui m'ont donné la vie, l'espoir et grandir avec passion connaissance, et ceux qui m'ont appris à gravir les échelons de la vie avec sagesse et patience, Droiture, gentillesse et loyauté envers mon cher père et ma chère mère.

À la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et de mon bonheur, à mon cher père, Merci pour tous les efforts que vous avez faits et continuez de faire pour nous. Merci à vous et pour vous, je suis ici. Merci pour votre soutien et votre compréhension, je t'aime papa.

À mon paradis, à la femme qui a enduré sans me laisser souffrir, à celle qui recherche sans cesse mon bonheur et mon réconfort, merci pour votre soutien et pour votre écoute et votre compréhension de mon ressenti tout au long de la préparation de ce projet que j'aime Mama

*A mes frères, **WALID** et **MAROINE** Pour son soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études. Je vous aime*

*Ma chère sœur **TOUHA**, et son marie **NADIR** merci pour votre amour et votre soutien je vous aime*

*À mon cher **Oncle Muhammad**, merci pour votre soutien, je vous aime.*

*A ma chère **Berkat Zeyneb**, merci pour votre suivi, vos conseils et le courage que vous m'avez donné tout au long de la réalisation de ce travail. Vous êtes vraiment une femme merveilleuse je t'aime*

N'oublions pas de remercier mon binôme, Yasmine, pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce travail.

Ahmed Serier Rania

Dédicaces



Avec une profonde gratitude, je dédie humblement ce travail avec un amour sincère et une fierté immense.

*À L'homme, dont le dévouement et les sacrifices ont été la fondation de mon parcours. Grâce à toi, j'ai grandi, étudié et réussi. Tu m'as donné tout ce dont j'avais besoin, et c'est grâce à toi que j'ai obtenu ce diplôme : mon cher père **ALI**.*

*À ma chère mère, qui a enduré tant de difficultés pour mon bien-être, sans jamais faillir. Tu as toujours répondu présente à mes besoins et tu as tout donné pour mon bonheur : mon adorable mère **HANIA**.*

*À mes chers frères, **MOHAMED** et **ANES** qui ont été mes conseils, mes encouragements et mon soutien constant tout au long de mes études. Que Dieu les protège et les comble de bonheur et de réussite.*

*À ma chère **Berakat Zeyneb**, merci pour votre suivi, vos conseils et le courage que vous m'avez donné tout au long de la réalisation de ce travail.*

N'oublions pas de remercier mon binôme, Rania, pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Louzri yasmine

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 15 |
| CHAPITRE I: ASPECTS GENEREAUX SUR LA 5G | |
| I.1. Introduction..... | 20 |
| I.2. La technologie du 5G | 20 |
| I.3. Les types d'antennes utilisées dans la 5G | 21 |
| I.3.1 Antennes internes FPC / PCB..... | 21 |
| I.3.2 Antennes externes dans le bâtiment | 22 |
| I.3.3 Antennes extérieures | 22 |
| I.4. Caractéristiques et avantages des antennes 5G..... | 23 |
| I.5. Les technologies utilisées dans la 5G..... | 23 |
| I.5.1 Massive MIMO | 23 |
| I.5.2 Formation de faisceau (Beamforming) | 24 |
| I.5.3 Couverture FR2 4 | 25 |
| I.6. L'architecture de réseau mobile 5G | 26 |
| I.7. Les applications de la Technologie 5G | 27 |
| I.8. Définition de la 6G | 27 |
| I.9. Comparaison entre la 5G et 6G | 28 |
| I.10. Les application du 6G | 29 |
| I.11. Conclusion | 29 |
| CHAPITRE II : LES TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES ANTENNES | |
| II.1. Introduction | 31 |
| II.2. Miniaturisation | 31 |
| II.3. Définition d'une antenne miniature | 32 |
| II.4. Les techniques de miniaturisation..... | 33 |
| II.4.1 La structure de microbandes défectueuse (DMS)..... | 33 |
| II.4.2. La structure de terre défectueuse (DGS) | 34 |
| II.4.2.1 Les différentes formes de la structure DGS | 35 |
| II.5. Avantages et inconvénients des miniaturisations..... | 35 |
| II.6. Facteur de qualité d'une antenne..... | 36 |
| II.7 Facteur de miniaturisation | 36 |
| II.8. Conclusion | 37 |

III. LES ANTENNES PATCH

| | |
|--|----|
| III.1.Introduction | 39 |
| III.2. Définition d'une Antenne | 39 |
| III.3. Caractéristiques d'une antenne | 39 |
| III.3.1 L'impédance d'entrée..... | 39 |
| III.3.2 Le coefficient de réflexion S11 | 40 |
| III.3.3 Directivité et gain | 41 |
| III.3.4 Rendement | 41 |
| III.3.5 Bande passante..... | 41 |
| III.3.6 Facteur de qualité | 42 |
| III.3.7 Le diagramme de rayonnement | 43 |
| III.3.8 Angle d'ouverture à (-3dB)..... | 44 |
| III.4. Les différents types d'antennes..... | 45 |
| III.4.1 Antennes Directives | 45 |
| III.4.2 antenne omnidirectionnelle | 45 |
| III.4.3. Antennes Sectorielles | 46 |
| III.4.4. Antennes à fentes..... | 47 |
| III.4.5 Antennes Agiles..... | 48 |
| III.5.Conclusion..... | 48 |
| CHAPITRE IV:SIMULATION D'UNE ANTENNE MINIATURISÉE (DGS & DMS) | |
| IV.1. Introduction..... | 50 |
| IV.2.Outil de simulation | 51 |
| IV.3 Conception d'une antenne rectangulaire à 4.5 GHZ | 52 |
| IV.4.Antenne initiale..... | 52 |
| IV.4.1 Le coefficient de réflexion..... | 54 |
| IV.4.2 Gain d'antenne patch | 54 |
| IV.4.3 Densité de courant | 54 |
| IV.5. Etude d'influence paramétrique de différents paramètres | 55 |
| IV.5.1 La première modification..... | 55 |
| IV.5.2 La deuxième modification | 56 |
| IV.6. Les techniques de miniaturisations..... | 58 |
| IV.6.1 Defected Microstrip Structures (DMS) | 58 |
| IV.6.2 Defected ground structure (DGS) | 58 |
| IV.7. Antenne patch avec DMS | 58 |
| IV.7.1 Prototype 1 | 58 |

| | |
|---|-----------|
| IV.7.2 Prototype 2 | 59 |
| IV.7.3 Prototype 3 | 59 |
| IV.7.4 Tableau de comparaison (DMS)..... | 61 |
| IV.8. Antenne patch avec DGS | 61 |
| IV.8.1 Prototype 1 | 61 |
| IV.8.2 Prototype 2..... | 62 |
| IV.8.3 Prototype 3 | 63 |
| IV.8.4 Tableau de comparaison (DGS) | 64 |
| IV.9. Tableau de comparaison..... | 64 |
| IV.10. Antenne finale..... | 65 |
| IV.11. Conclusion | 65 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 66 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 67 |

Liste des Figures**CHAPITRE I: ASPECTS GENEREAUX SUR LA 5G**

| | |
|---|----|
| Figure I. 1: Evolution des générations de mobiles | 20 |
| Figure I. 2: Comparaison 4G / 5G | 21 |
| Figure I. 3: a) Antenne PCB (b) Antenne FPC | 22 |
| Figure I. 4: Antennes externes dans le bâtiment | 22 |
| Figure I. 5: Antenne extérieure | 23 |
| Figure I. 6: Massive MiMo de Nokia | 24 |
| Figure I. 7: Le beamforming pour accélérer les communications sans fil | 24 |
| Figure I. 8: Liaison montante NOMA pour domaine de puissance utilisateurs..... | 25 |
| Figure I. 9: Femtocell. b. Microcell .c. Picocel..... | 26 |
| Figure I. 10: L'architecture de réseau mobile 5G | 26 |
| Figure I. 11: La 6 G | 27 |

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES ANTENNES

| | |
|---|----|
| Figure II. 1: définition de la sphère équivalente d'une antenne..... | 33 |
| Figure II. 2 : Types de charge de fente de DMS..... | 34 |
| Figure II. 3: Les différentes formes de DGS..... | 35 |

CHAPITRE III : LES ANTENNES PATCH

| | |
|---|----|
| Figure III.1: coefficient de réflexion en fonction de la fréquence | 40 |
| Figure III.2: Bande passante | 42 |
| Figure III.3: Représentation de diagramme de rayonnement d'une antenne | 43 |
| Figure III.4: Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope | 43 |
| Figure III.5: Angle d'ouverture | 44 |
| Figure III.6: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive | 45 |
| Figure III.7: Diagramme omnidirectionnel..... | 46 |
| Figure III.8: Exemple de réseaux d'antennes élémentaires | 47 |

CHAPITRE IV:SIMULATION D'UNE ANTENNE MINIATURISÉE (DGS & DMS)

| | |
|---|----|
| Figure IV. 1: logiciel CST studio Microwave..... | 51 |
| Figure IV.2: Structure d'antenne Patch | 54 |
| Figure IV. 3 : S11 d'antenne patch | 54 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.4: Le gain d'antenne patch | 54 |
| Figure IV.5: Le courant de surface d'antenne de référence | 55 |
| Figure IV. 6 : Modification de la ligne d'alimentation..... | 55 |
| Figure IV.7: Coefficient de réflexion d'antenne patch | 56 |
| Figure IV. 8: Antenne patch avec modification de l'insert | 56 |
| Figure IV.9: Coefficient de réflexion d'antenne bien adapté..... | 57 |
| Figure IV.10: Le gain du l'antenne patch bien adapté..... | 57 |
| Figure IV.11: Le courant de surface de l'antenne patch..... | 57 |
| Figure IV.12 : S11 de 1 ère prototype | 59 |
| Figure IV.13: S11 de 2ème prototype..... | 59 |
| Figure IV. 14: S11 de l'antenne finale | 60 |
| Figure IV. 15: Diagramme de rayonnement d'antenne finale | 60 |
| Figure IV. 16: Le courant de surface d'antenne finale | 61 |
| Figure IV.17 : Première modification pour DGS..... | 62 |
| Figure IV.18: Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 1 | 62 |
| Figure IV.19 : (a) patch du prototype 2 et b) S11 en fonction de la fréquence | 62 |
| Figure IV. 20: Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 2 | 63 |
| Figure IV. 21: (a) antenne finale (b) coefficient de réflexion d'antenne finale | 63 |
| Figure IV. 22: Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 3 | 64 |
| Figure IV.23: Antenne optimisée..... | 65 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE I: ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LA 5G

Tableau I.1: Les différences entre la 5G et la 6G 28

CHAPITRE IV : SIMULATION D'UNE ANTENNE MINIATURISÉE (DGS & DMS)

Tableau IV. 1 : Les caractéristiques d'antenne Patch simulée..... 52

Tableau IV. 2: Les dimensions d'antenne de référence 52

Tableau IV. 3: Formules et calculs des paramètres d'antenne 53

Tableau IV. 4: Comparaison entre les différentes simulations de la méthode DMS. 61

Tableau IV. 5: Comparaison entre les différentes simulations de la méthode DGS 64

Tableau IV. 6: Comparaison entre les caractéristiques d'antenne initiale et finale 64

Liste des abréviations

- 1G:** Première Génération
- 2G:** Deuxième Génération
- 3G:** Troisième Génération
- 4G:** Quatrième Génération
- 5G:** Cinquième Génération
- CST:** Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO
- IMT-A:** International Mobile Telecommunications Advanced
- LTE:** Long Term Evolution
- NFV:** Network Function Virtualisation
- SDN:** Software Defined Networking
- TD-LTE:** Time Division Long Term Evolution
- UHD:** Ultra Haute Définition
- UHF:** Ultra High Frequencies
- UIT:** Union International Des Telecommunications
- UIT-R:** Union international des télécommunications Secteur des radiocommunications
- VHF:** Very High Frequencies
- NG-RAN:** Next-Generation Radio Access.
- NR:** New Radio.
- PDU:** Protocol Data Unit.
- QOS :** Qualité de Service.
- ROS :** Le rapport d'ondes stationnaires.
- TCP :** Transmission Control Protocol.

Liste Des Symboles

| | |
|-------------------------|--|
| BP: | Bande passante |
| C: | Vitesse de la lumière |
| D: | Directivité |
| dB: | Décibel, unité logarithmique sans dimension |
| dB_i : | Décibel par rapport à une antenne isotrope, unité de gain sans dimension |
| E: | Champ électrique coupure |
| fr: | Fréquence de résonance |
| G: | Gain |
| GHz: | Gigahertz, unité de fréquence |
| H: | Hauteur |
| L: | Longueur |
| L_{eff}: | Longueur effective du patch |
| L_p: | Largeur du patch |
| L_s: | Largeur du substrat |
| n: | Nombre entier |
| P_a : | Puissance absorbée |
| P_R: | Puissance totale rayonnée |
| P: | Puissance rayonnée par l'antenne dans la direction |
| S₁₁: | Coefficient de réflexion |
| W: | Largeur |
| W_s: | Longueur du substrat |
| W_p: | Longueur du patch |
| Z: | Impédance |
| Z_e : | Impédance d'entrée |
| Z_c: | Impédance caractéristique |
| Z₀: | Impédance de référence |
| Γ: | gamma (s ₁₁) |
| π: | Constante mathématique |
| γ: | Déphasage |
| ΔL: | Variation de longueur due à l'effet de débordement |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La technologie sans fil a transformé notre façon de communiquer et d'interagir avec notre environnement. Les avancées constantes dans les télécommunications ont abouti à des réseaux mobiles plus rapides, fiables et polyvalents, comme la 5G et la future 6G. Cependant, pour tirer pleinement parti des capacités de ces réseaux de nouvelle génération, il est essentiel de concevoir des antennes miniaturisées et performantes, capables d'être intégrées dans des appareils compacts.

Ce mémoire examine un aspect essentiel de l'évolution technologique : la réduction de la taille des antennes patch imprimées, dans le contexte des avancées des technologies 5G et 6G. En diminuant les dimensions de ces antennes tout en maintenant leurs performances, nous ouvrons de nouvelles perspectives d'applications et améliorons l'expérience des utilisateurs de dispositifs sans fil. Les antennes patch imprimées présentent de nombreux avantages, notamment leur coût abordable, leur processus de fabrication simplifié et leur compatibilité avec les circuits imprimés. Cependant, leur encombrement constitue un défi pour leur intégration dans des appareils électroniques de plus en plus petits et portables.

En outre, cette recherche examinera les défis particuliers associés à l'adaptation des antennes miniaturisées aux fréquences Sub 6GHz utilisées dans les réseaux 5G. Contrairement aux fréquences millimétriques, ces bandes ne posent pas de problèmes significatifs de propagation et de perte de signal. Par conséquent, il est crucial que la conception des antennes miniaturisées prenne en compte ces limitations pour garantir une communication efficace et fiable.

Le premier chapitre traite des bases de la 5G, en se concentrant sur ses objectifs, son architecture physique et logique, ainsi que sur les concepts technologiques novateurs qui en font une avancée majeure dans le domaine des communications mobiles. Nous proposons une introduction approfondie à la 5G, en explorant ses fondements de manière détaillée.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une vue d'ensemble des antennes, en décrivant les diverses formes qu'elles peuvent prendre, avec une attention particulière portée à l'antenne patch. Nous explorons les avantages et les inconvénients de ces antennes, ainsi que leurs caractéristiques et les différentes méthodes d'alimentation. Ce chapitre se termine par une analyse des applications possibles de ces types d'antennes.

Le troisième chapitre est consacré à une description générale des antennes imprimés, en mettant en évidence leur principe de fonctionnement, avec une présentation des formes d'une antenne planaire et les différentes méthodes d'alimentation

Dans la dernière partie du chapitre, nous concentrons sur la conception d'antennes imprimées qui combinent les méthodes de structure de sol défectueuse (DGS) et de structure microstrip défectueuse (DMS) afin de satisfaire les exigences de la 5G, la nouvelle génération de téléphonie mobile. Nous effectuons nos analyses en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio, et nous présentons et échangeons les résultats de ces simulations.

En conclusion, cette recherche se conclut par une synthèse globale et une liste de références, incluant des ouvrages de référence et des sources en ligne pertinentes liées à notre étude.

CHAPITRE I: ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LA 5G

I.1. Introduction

L'avènement des premiers téléphones mobiles sans fil remonte aux années 1980. Depuis lors, l'industrie des télécommunications a connu un cycle d'environ une décennie pour l'introduction de chaque nouvelle génération de téléphonie mobile. Comme l'illustre la Figure I.1, ces avancées technologiques ont suivi un rythme régulier. La 5G, génération la plus récente, a franchi une étape majeure avec son lancement commercial en 2020, ouvrant de nouvelles possibilités en matière de connexion mobile [1].

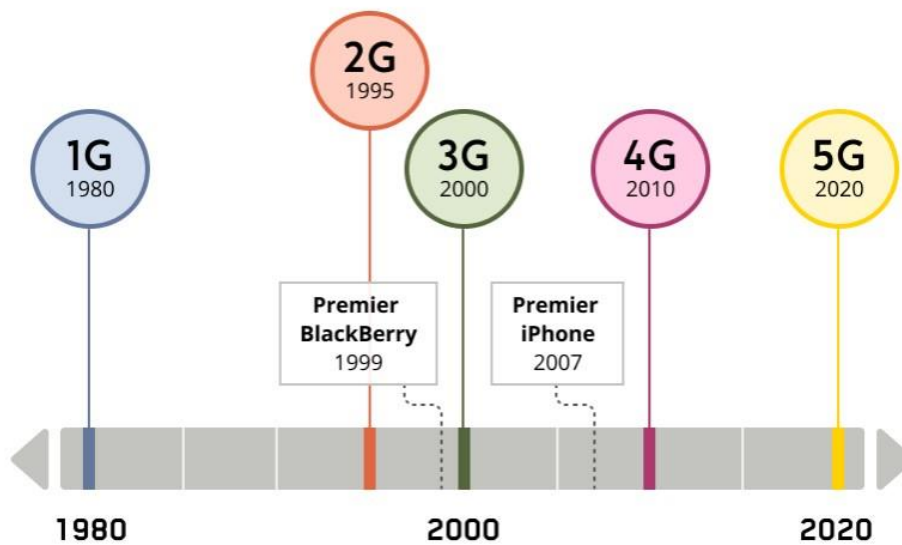


Figure I. 1: Evolution des générations de mobiles [1]

La Figure I.1 met en évidence un cycle d'environ une décennie entre les principales évolutions générationnelles des technologies de communication sans fil [1].

I.2. La technologie du 5G

La technologie 5G est une nouvelle révolution sur le marché mobile. Les opérateurs seront en mesure de répondre aux demandes du marché et de servir des milliards d'appareils connectés grâce à cette technologie, ce qui se traduira par un volume de données élevé, une faible latence et probablement une baisse des coûts. Dans ce premier chapitre, nous décrivons une présentation théorique sur la 5^{ème} génération, dont le nom officiel est IMT-2020, en commençant par un bref aperçu historique et une description des objectifs de la 5G par rapport à la génération précédente de réseaux mobiles (4G). En démontrant son architecture, ainsi que les technologies émergentes comme les ondes millimétriques, les petites cellules, le MIMO

massif, la formation de faisceaux et le full duplex, ainsi que les nombreuses catégories d'applications de cette génération, ainsi que l'allocation de fréquences [2].

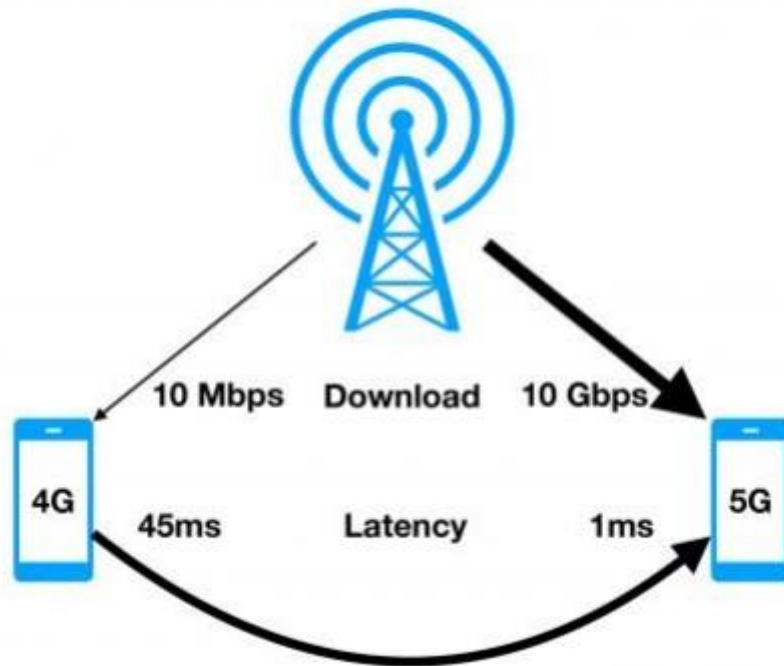


Figure I. 2: Comparaison entre la 4G et 5G [2]

Malgré son nom, la 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications. Il s'agit plutôt d'une innovation de rupture qui va les révolutionner et qui est susceptible d'apporter des changements radicaux dans les modèles commerciaux ayant cours chez les opérateurs [2].

I.3. Les types d'antennes utilisées dans la 5G

I.3.1 Antennes internes FPC / PCB

les antennes internes EPC/PCB sont des antennes intégrées aux circuits imprimés (PCB) des Equipement électroniques. Elles sont conçues pour être compactes et efficaces, et sont souvent utilisées dans les appareils électroniques modernes [3].

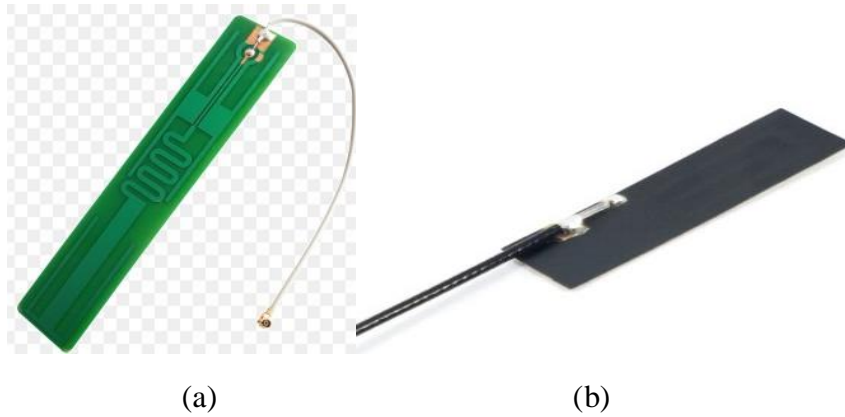


Figure I. 3: a) Antenne PCB (b) Antenne FPC [3]

La Figure I.3.a: illustre un exemple d'antenne PCB qui opère à haute fréquence et permet aux dispositifs de communiquer sur de longues distances en transformant les signaux électriques en ondes électromagnétiques. L'avantage principal des antennes PCB est leur capacité à réduire l'encombrement physique et les coûts d'entretien des appareils [3].

La Figure I.3.b : présente un type d'antenne FPC

I.3.2 Antennes externes dans le bâtiment

Les antennes externes, telles qu'illustré dans la Figure I. 4, revêtent généralement la forme d'antennes en lame ou en bâton, et trouvent une large application dans les routeurs, les dispositifs de connectivité sans fil ainsi que dans les systèmes de sécurité publique. Leur présence est fréquente dans les environnements urbains et à proximité des structures bâties [4].



Figure I. 4: Antennes externes dans le bâtiment [3]

I.3.3 Antennes extérieures

Les antennes extérieures représentent des solutions polyvalentes adaptées à une utilisation tant mobile que fixe, caractérisées par leur capacité à résister aux conditions climatiques adverses. Elles jouent un rôle essentiel dans les radios portables ainsi que dans

diverses applications de collecte de données. La Figure I.5 illustre une antenne extérieure spécifiquement conçue pour la réception des ondes radio utilisées dans la diffusion télévisuelle [4].



Figure I. 5: Antenne extérieure [4]

I.4. Caractéristiques et avantages des antennes 5G

Les antennes 5G présentent une série de caractéristiques et d'avantages, notamment [5] :

- Une diversité d'options d'antennes pour les applications 5G, comprenant les cartes de circuits imprimés flexibles (FPC), les PCB, les montages directs et les montages magnétiques.
- Prise en charge des bandes de fréquences étendues, s'étendant de 617 MHz à 7125 MHz.
- Fourniture d'excellents gains sur toute la bande passante disponible.
- Adaptabilité aux diverses applications IoT, smartgrid, compteurs, surveillance à distance et réseaux de capteurs.
- Convivialité pour les applications de sécurité, de vidéo et de graphisme.

I.5. Les technologies utilisées dans la 5G

I.5.1 Massive MIMO

Les antennes MIMO massives, présentées dans la figure I.6, adoptent des méthodes d'entrées et de sorties multiples afin d'accroître à la fois le débit et la densité de capacité dans un domaine spécifique. Elles se distinguent par l'emploi d'un grand nombre d'antennes, ce qui entraîne une amélioration significative des performances du système [5].



Figure I. 6: Massive MIMO de Nokia [5]

En outre, les grandes antennes MIMO ont la capacité de gérer de manière efficace les interférences, ce qui renforce la fiabilité et la solidité du système. Elles offrent aussi la possibilité d'améliorer l'exploitation du spectre radio en tirant parti des caractéristiques directionnelles des antennes [5].

I.5.2 Formation de faisceau (Beamforming)

Le Beamforming analogique, également désigné sous le terme de formation de faisceau analogique, représente une stratégie exploitant la capacité des éléments constitutifs d'un réseau d'antennes afin de diriger les signaux dans des directions précises.

En orchestrant des interférences constructives, cette méthode permet de focaliser l'énergie des signaux issus de directions spécifiques, tout en déviant les autres signaux vers des angles distincts. Par conséquent, le Beamforming analogique améliore la qualité et l'étendue des communications en réduisant les interférences et en amplifiant la puissance des signaux pertinents [6].



Figure I. 7 : Le beamforming pour accélérer les communications sans fil [6]

I.5.3 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

L'objectif de cette méthode d'accès multiple est d'optimiser l'efficacité spectrale et la capacité des systèmes cellulaires. À la différence des méthodes classiques d'accès multiple,

NOMA offre la possibilité à plusieurs utilisateurs de partager simultanément la même ressource en termes de fréquence et de temps.

La base de cette approche est de distribuer une puissance différentielle aux utilisateurs, ce qui implique que chaque utilisateur reçoit une puissance personnalisée en fonction de ses besoins et de ses conditions de canal [6].

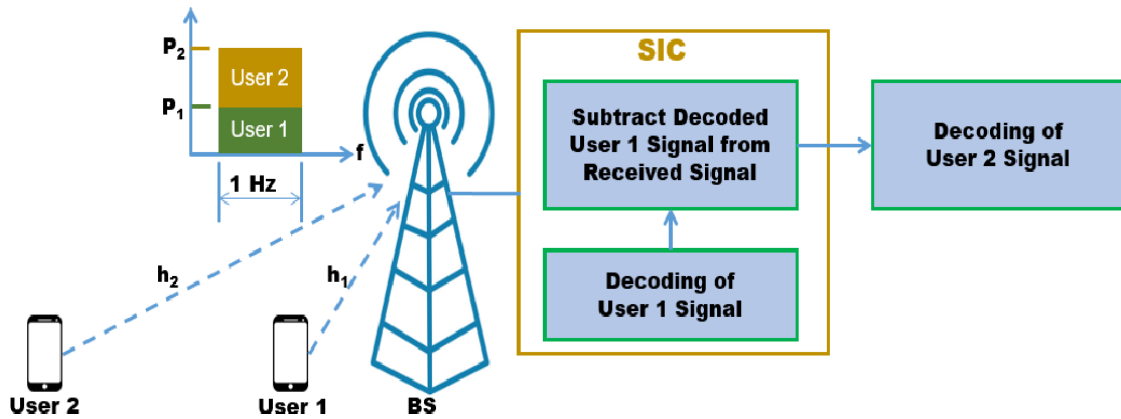


Figure I. 8: Liaison montante NOMA pour domaine de puissance utilisateurs [6]

I.5.3 Couverture FR2 4

Certaines fréquences utilisées par la technologie 5G limitent la portée de certains signaux par rapport à la 4G. Afin de satisfaire cette demande, diverses catégories de cellules sont employées dans les réseaux 5G [6].

Une de ces cellules est la femtotesla à 10^{-15} représentée par la figure I.9.a, qui est utilisée lorsque les distances de transmission sont courtes.

La figure I.9.b illustre la cellule micro, représentant 10^{-6} qui est utilisée pour positionner les stations de base afin d'assurer une bonne couverture des abonnés dans des scénarios de mobilité.

La figure I.9.c représente la cellule pico, avec une Valeur de 10^{-12} , qui est utilisée pour fournir une connectivité à domicile. Il est important de noter que ces différentes cellules sont utilisées dans le cadre de déploiements spécifiques pour optimiser la couverture et les performances du réseau G.

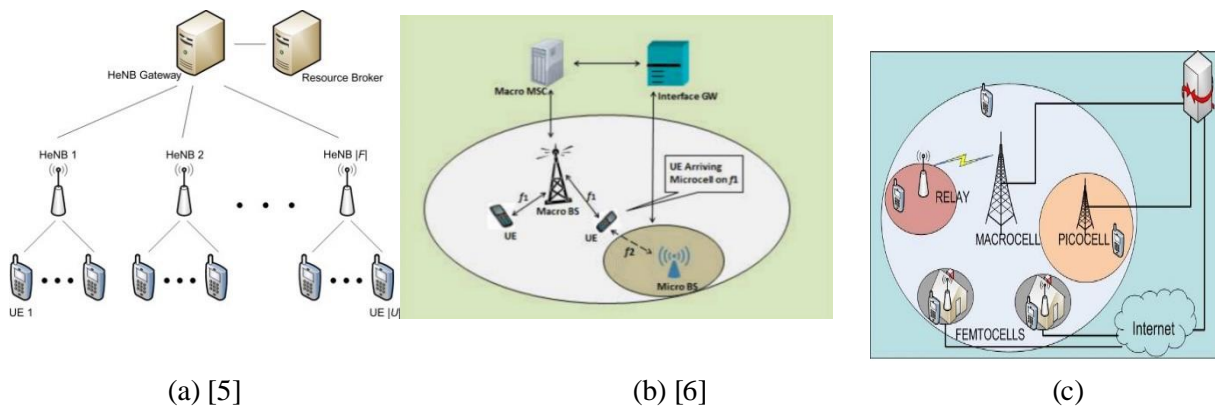


Figure I. 9 : femtotesla. b. Microcell .c. Picocecel [6]

I.6. L’architecture de réseau mobile 5G

La nouvelle spécification 5G met l'accent sur l'architecture du cœur 5G, ce qui permet de satisfaire les exigences de débit plus élevées que la 5G doit pouvoir supporter. L'architecture des services (SBA) du nouveau cœur 5G, conformément à la norme 3GPP, englobe toutes les fonctions et interactions de la 5G, telles que l'authentification, la sécurité, la gestion des sessions et l'agrégation du trafic provenant des appareils terminaux. La principale caractéristique de la 5G est la NFV, qui offre la possibilité de déployer des fonctions logicielles virtualités en utilisant l'infrastructure MEC, qui est essentielle aux principes architecturaux de la 5G [7].

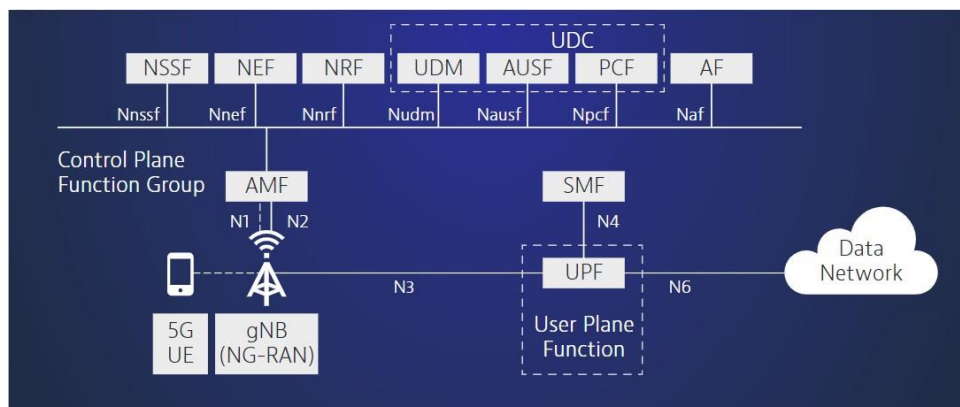


Figure I. 10: L’architecture de réseau mobile 5G [7]

La figure I.10 illustre le modèle de système qui représente la conception de l'architecture de réseau pour les systèmes mobiles 5G. L'architecture utilise un modèle entièrement basé sur le protocole IP (Internet Protocol) afin de garantir la compatibilité entre les réseaux sans fil et mobiles.

I.7. Les applications de la Technologie 5G

Voici quelques exemples d'utilisations de la technologie 5G [8] :

1. Une connexion sans fil totalement libre, sans contraintes d'accès ou de zones. Des smartphones équipés de fonctionnalités d'intelligence artificielle.
2. L'utilisation du protocole Internet version 6 (IPv6) consiste à assigner une adresse IP de visite en fonction de la localisation et du réseau auquel on est connecté.
3. Une norme mondiale harmonisée qui encourage la compatibilité. La présence de réseaux omniprésents permet aux utilisateurs de se connecter simultanément à plusieurs technologies d'accès sans fil et de passer facilement de l'une à l'autre, que ce soit le Wi-Fi, les WPAN ou d'autres technologies d'accès à venir.
4. En 5G, il est possible de développer ce concept en utilisant plusieurs voies de transfert de données en même temps.
5. La technologie de radio cognitive, aussi appelée radio intelligente, offre la possibilité à diverses technologies radio de communiquer.

I.8. Définition de la 6G

La **6G** est la sixième génération de technologie sans fil, succédant à la **5G**. Elle offrira des fréquences plus élevées, une capacité accrue et une latence réduite. L'objectif est d'atteindre une communication avec une latence d'une microseconde, soit **1 000 fois plus rapide** que la milliseconde [9].



Figure I. 11: La 6 G [9]

La 6G permettra d'améliorer les technologies d'imagerie, de localisation et de présence. Son utilisation permettra des débits de données de 1 téraoctet par seconde et encouragera des applications novatrices dans les domaines de la connectivité sans fil, de la détection et de l'imagerie. Il est prévu que la technologie 6G soit disponible sur le marché d'ici 2030 [9].

I.9. Comparaison entre la 5G et 6G

1. La 6G fera appel à des fréquences encore plus élevées que la 5G, ce qui permettra d'obtenir une capacité de transmission de données bien supérieure. Cela favorisera une augmentation des taux d'échantillonnage et une amélioration de la qualité de transmission.
2. La 6G mettra en place une infrastructure informatique plus sophistiquée qui déterminera l'emplacement optimal pour l'informatique. Cela favorisera une meilleure exploitation des ressources et une gestion plus efficace des charges de travail.
3. La 6G établira une infrastructure informatique plus avancée qui décidera de l'emplacement idéal pour l'infrastructure informatique. Cela permettra d'optimiser l'utilisation des ressources et d'assurer une gestion plus efficace des tâches.

| Les majeurs facteurs | 6G | 5G |
|--|-----------------------------|--------------------------|
| Débit de données de pointe | >100Gb/s | 10-20 Gb/s |
| Taux de données d'expérience utilisateur | >10Gb/s | 1Gb/s |
| Densité de trafic | >100Tb/s/Km ² | 10Tb/s/Km ² |
| Densité de connexion | >10million /Km ² | 1million/Km ² |
| Retard | <1ms | Ms niveau |
| Mobilité | >1000Km/h | 350Km/h |
| Efficacité énergétique | >10 fois relative à 5G | >1000 fois relative à 4G |
| Pourcentage de cabrage | >99% | Environ 70% |
| Fiabilité | >99.999% | Environ 99.9% |
| Précision de positionnement | Au niveau de Centimètres | Au niveau de mètre |
| Sensibilité du récepteur | <-130dBm | Environ -120dBm |

Tableau I.1: Les différences entre la 5G et la 6G [10]

Le tableau I.1 présente les différences techniques entre la 5G et la 6G en termes de caractéristiques de communication radio [10].

I.10. Les applications du 6G

- **Communication à latence ultra-faible** : La 6G vise à offrir une communication avec une latence d'une microseconde, soit 1 000 fois plus rapide que le débit d'une milliseconde. Cela permettra des avancées significatives dans des domaines tels que la réalité étendue (XR), les hologrammes mobiles haute-fidélité et les jumeaux numériques [11].
- **Débits de données massifs** : La 6G devrait permettre des débits de données allant jusqu'à 1 téraoctet par seconde. Elle sera utile pour des applications innovantes en matière de connectivité sans fil, de cognition, de détection et d'imagerie
- **Fréquences plus élevées** : Les fréquences plus élevées de la 6G permettront des taux d'échantillonnage beaucoup plus rapides et des taux de données plus élevés. Cela pourrait conduire à des avancées significatives dans la technologie de détection sans fil [11].

I.11. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons analysé comment l'adoption des réseaux 5G offre des perspectives prometteuses pour un avenir plus intelligent, plus sain et plus confortable. Cela est possible grâce à l'application de technologies de pointe et à des mises à jour complètes des données à tous les niveaux.

La transition de la 5G à la 6G marquera une nouvelle phase dans le développement des communications sans fil, permettant des avancées encore plus remarquables dans des domaines comme la localisation, l'imagerie, la détection et la perception

En conclusion, l'évolution des réseaux sans fil de la 5G à la 6G marque une avancée significative dans les communications. La 5G satisfait les besoins actuels de vitesse et de transfert de données, permettant des innovations comme l'Internet des objets et les applications de réalité augmentée. Cependant, la 6G va encore plus loin en offrant des vitesses supérieures, une latence quasi nulle, et en intégrant l'intelligence artificielle de manière fondamentale.

**CHAPITRE II : LES TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES
ANTENNES**

II.1. Introduction

Au cours des années, les progrès technologiques dans le domaine de la téléphonie mobile ont engendré une demande grandiose pour la réduction de taille des antennes. Cette réduction implique de diminuer leurs dimensions et leur poids tout en préservant leurs capacités de communication.

Cette évolution a été poussée par plusieurs avantages majeurs. En effet, des antennes de taille réduite offrent une flexibilité accrue dans la conception des appareils mobiles, favorisant la création de téléphones portables plus compacts et légers. De plus, la miniaturisation des antennes facilite leur intégration dans diverses applications telles que les objets connectés, les vêtements intelligents et les dispositifs médicaux.

Cela élargit les horizons de l'Internet des objets (IoT) et des communications sans fil dans une multitude de secteurs d'activité.

Ce chapitre, se concentrera sur une exploration détaillée des principes de la miniaturisation des antennes. Nous mettrons en avant les avantages qu'elle offre tout en soulignant ses inconvénients potentiels et les limites théoriques auxquelles elle fait face. De plus, nous examinons les différentes méthodes utilisées pour concevoir et mettre en œuvre des antennes miniatures afin de répondre aux besoins de la téléphonie mobile et des applications sans fil modernes.

II.2. Miniaturisation

La miniaturisation est un processus fondé sur la réduction des dimensions des objets. En électronique, elle vise à diminuer la taille des composants tout en préservant leur fonctionnalité et leur forme d'origine. Dans le domaine des antennes, la miniaturisation répond aux exigences de taille imposées par les normes de communication. Cette tendance, présente depuis longtemps, a progressé à travers différentes dimensions spatiales, notamment les axes X, Y et Z, entraînant la création d'antennes de plus en plus petites.

Cependant, Il est important de souligner que la miniaturisation des antennes peut occasionner une diminution de leurs performances. En effet, une antenne plus petite peut présenter des performances moins optimales par rapport à une antenne de taille plus importante. Toutefois, la plupart des antennes actuelles sont bien adaptées aux exigences des systèmes de télécommunications, présentant seulement quelques décibels de pertes et des gains positifs [11].

Les techniques de miniaturisation se sont améliorées pour permettre l'intégration de grands écrans, offrant une meilleure visibilité et une manipulation plus aisée des menus et options. Les fabricants ont ainsi adopté de nouvelles règles autorisant une plus grande flexibilité dans les dimensions X et Y des composants. Par conséquent, les antennes doivent désormais être de taille réduite afin d'éviter les conflits d'espace avec d'autres éléments sur les cartes électroniques [11].

Les progrès des techniques de miniaturisation permettent désormais d'intégrer harmonieusement les antennes miniatures au sein des appareils électroniques, sans compromettre leur compatibilité ni leur performance au sein des systèmes de communication modernes. Cette approche offre ainsi une flexibilité accrue pour incorporer efficacement ces antennes de taille réduite dans les dispositifs électroniques contemporains [11].

II.3. Définition d'une antenne miniature

Une antenne miniature ou antenne électriquement petite (AEP) est une antenne dont la taille est inférieure à la demi-longueur d'onde de travail. Une définition plus précise a été donnée par Wheeler qui définit une antenne miniature comme une antenne dont le diamètre de la sphère qui l'englobe ne dépasse pas $\lambda_0 / 2\pi$ (où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide). Cette longueur est connue sous le nom de « radian length » [12], et la relation peut être écrite sous la forme suivante :

$$ka < 0.5 \quad (\text{II.1})$$

Où a est le rayon de la sphère minimale qui englobe complètement l'antenne, k est le nombre d'onde. Cette sphère, souvent appelée « Sphère de Chu », est défini comme étant la limite entre les champs proches où l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne et les champs lointains d'une antenne où cette énergie est propagée. Cette définition est représentée par la Figure (II-1).

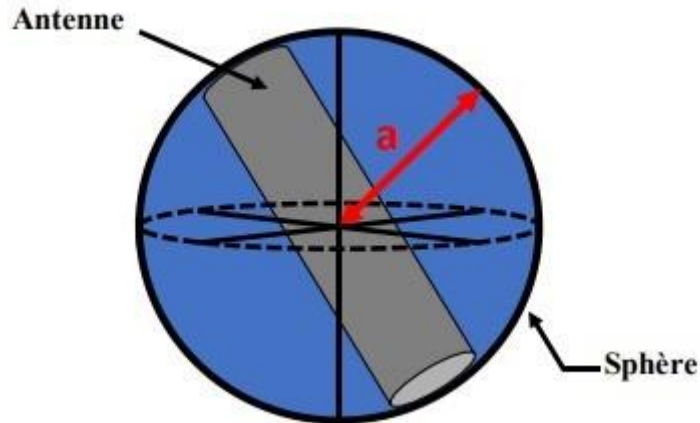


Figure II.1: définition de la sphère équivalente d'une antenne [12]

La réduction des dimensions d'une antenne par rapport à la longueur d'onde électrique entraîne une diminution de ses performances radioélectriques. Ces performances (facteur de qualité Q , sa bande passante et son efficacité de rayonnement) varient en fonction du facteur (ka) et il est possible de lier ces différents paramètres en fonction de la taille de l'antenne par des équations qui seront présentées par la suite [12].

II.4. Les techniques de miniaturisation

Lorsque nous cherchons à réduire la taille d'une antenne, nous sommes toujours confrontés à des contraintes physiques qui doivent être respectées afin de préserver ses performances. Voici quelques techniques disponibles pour relever ce défi de miniaturisation tout en maintenant les performances de l'antenne [14] :

II.4.1 La structure de microbandes défectueuse (DMS)

La correction du défaut se fait en appliquant un motif uniforme ou non uniforme, périodique ou non périodique, sur la structure de la microbande. En ce qui concerne les antennes micro rubans, le patch (élément rayonnant) est gravé. Deux méthodes peuvent être utilisées pour réparer le défaut : soit en remplissant la fente sur la surface de la pièce imprimée, soit en découpant la fente aux limites de la pièce [16]. Les défauts sont enregistrés sur la surface du patch lors du chargement par fente et peuvent prendre diverses formes, telles que des fentes pliées [15]. Ou des fentes carrées.

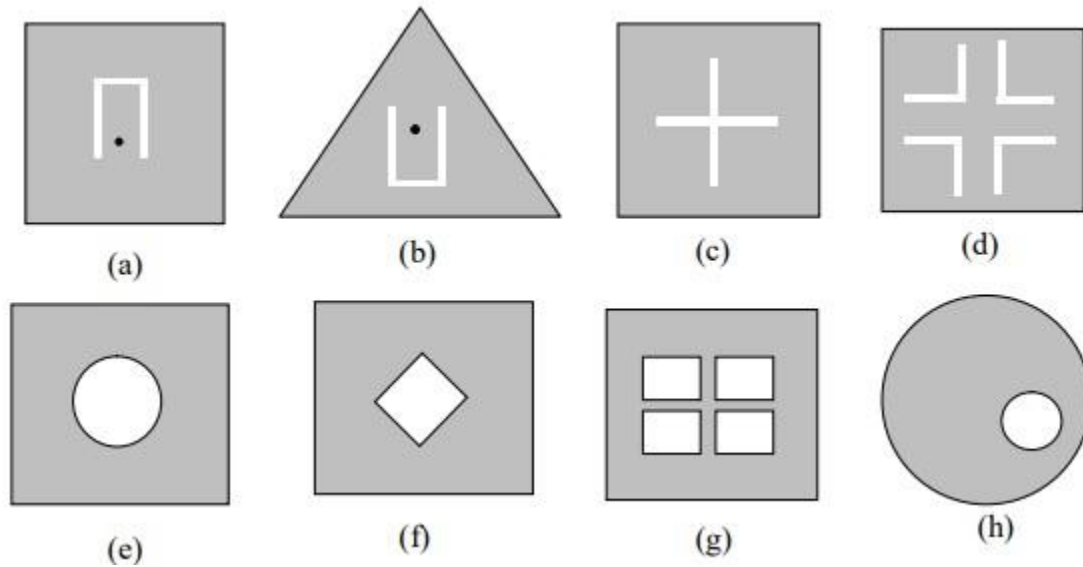


Figure II. 2 : Types de charge de fente de DMS [15]

Dans la technique de chargement de fente, les imperfections sont éliminées aux limites de l'élément rayonnant, comme illustré dans la figure II.2, où le flux de courant est déterminé par la longueur de la pièce et les profondeurs de la fente [15].

II.4.2. La structure de terre défectueuse (DGS)

La structure à sol défectueux (DGS), est une méthode employée dans la conception d'antennes et de circuits micro-ondes. Cette technique implique la création de motifs ou de structures particulières sur la couche de masse adjacente à l'antenne ou au circuit, dans le but de modifier ou d'interférer avec les propriétés électromagnétiques de la structure [16].

La structure de sol défectueuse (DGS) est principalement utilisée pour améliorer les performances des antennes et des circuits en atténuant les effets indésirables tels que les résonances parasites, les couplages non désirés, les pertes et les interférences électromagnétiques. En modifiant la structure du sol adjacent, la DGS peut altérer les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques, permettant ainsi d'optimiser les performances de l'antenne ou du circuit en termes de bande passante, de directivité, de gain et de rejet des fréquences indésirables [16].

II.4.2.1 Les différentes formes de la structure DGS

Une étude approfondie a été menée sur des antennes micro-rubans rectangulaires, en analysant deux structures DGS distinctes avec des fentes variées, telles qu'une fente carrée et une fente triangulaire (référence à la figure II.3), sur le plan de masse [15].

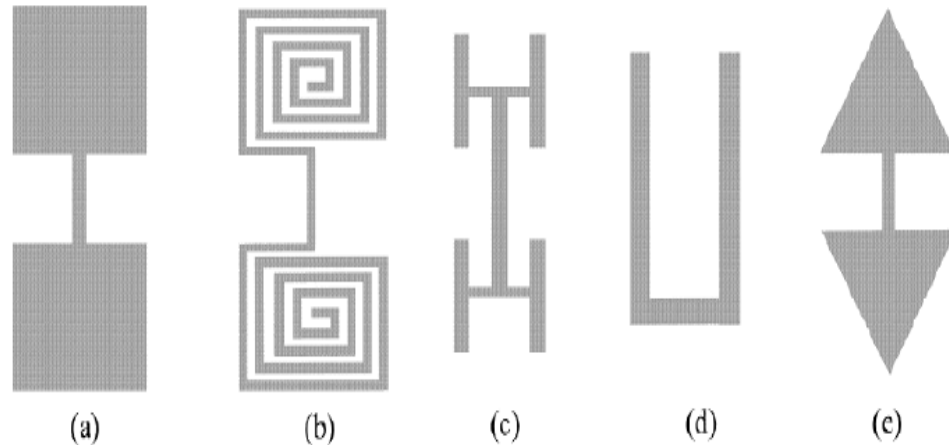


Figure II. 3: Les différentes formes de DGS [16]

II.5. Avantages et inconvénients des miniaturisations

La miniaturisation présente de multiples bénéfices. Elle permet tout d'abord une réduction de l'encombrement des composants, les rendant ainsi plus facilement transportables, stockables et intégrables dans des réseaux compacts. De plus, elle contribue à une moindre consommation de matériaux et d'énergie. Enfin, la miniaturisation favorise une production en plus grandes séries, offrant une diversité accrue d'applications et stimulant l'innovation dans ce domaine [17].

Cependant, le processus de miniaturisation n'est pas exempt d'inconvénients. L'opération de séparation des différents métaux peut notamment se révéler complexe, limitant les bénéfices escomptés en termes d'économies de matériaux et d'énergie. De plus, le recyclage des nanomatériaux utilisés dans les nanotechnologies reste quasiment impossible à l'heure actuelle, soulevant ainsi des défis en matière de durabilité.

Un autre inconvénient réside dans la réduction de la surface d'échange qui peut résulter de la miniaturisation. Cela peut engendrer un échauffement excessif des circuits électroniques, affectant ainsi leurs performances. Concernant les antennes spécifiquement, leur miniaturisation peut également entraîner une dégradation de leur fonctionnement optimal [17].

II.6. Facteur de qualité d'une antenne

L'objectif de la miniaturisation est de réduire la taille d'une antenne tout en préservant des caractéristiques électromagnétiques acceptables. Cependant, une dégradation des performances, notamment en termes de bande passante et de gain, est inévitable lors de ce processus. D'après les travaux menés par Wheeler et Chu visant à exprimer les limites théoriques de la miniaturisation des petites antennes, le facteur limitant est un paramètre fondamental appelé facteur de qualité Q [18].

Ce dernier est défini par le rapport entre l'énergie réactive maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée il est donné par :

$$Q = \frac{2 \cdot W_0 \cdot \max(W_e, W_m)}{P_a} \quad (\text{II.2})$$

- W_e : est la quantité moyenne d'énergie non rayonnée électrique.
- W_m : est la quantité moyenne d'énergie non rayonnée magnétique.
- W_0 : est la pulsation à la fréquence f_0 .
- P_a : la puissance reçue ou rayonnée par l'antenne.

Bien que beaucoup de nouvelles expressions de la limite du facteur de qualité existent, celle établie par Chu et Wheeler reste très utilisée (équation III.2). Ce minimum du facteur de qualité est en théorie inatteignable. Il permet d'évaluer les solutions d'antenne miniature par rapport à cette limite théorique [30].

$$Q_{min} = \frac{1}{(k \cdot a)^3} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- K : c'est le nombre d'onde, $K = 2\pi / \lambda$.
- a : le rayon de la petite sphère contenant l'antenne.

II.7 Facteur de miniaturisation

En pratique, ce facteur de miniaturisation s'évalue avec deux manières. La première consiste à réaliser une antenne compacte de telle sorte que ses performances électromagnétiques se rapprochent le plus de l'antenne de référence en faisant un rapport des dimensions de ces

deux antennes. La deuxième admet une réalisation d'antenne compacte avec les mêmes dimensions maximales et comparer le rapport des fréquences, soit à un niveau d'adaptation donné, soit à un niveau de gain dans l'axe donné [30].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre Nous mettons en évidence l'importance capitale de la miniaturisation des antennes patch dans le cadre des applications 5G .Il est primordial de diminuer la taille des antennes tout en maintenant leurs performances afin de répondre aux demandes grandissantes des appareils compacts et des applications mobiles avancées de la 5G. Les méthodes de miniaturisation comme l'emploi de structures défactueuses au sol (DGS) et de structures microstrip défactueuses (DMS) présentent des perspectives prometteuses pour cet objectif. Grâce à ces méthodes, il est possible de créer des antennes plus petites et plus performantes, ce qui ouvre la voie à une nouvelle génération d'applications sans fil novatrices et performantes.

CHAPITRE III : LES ANTENNES PATCH

III.1.Introduction

Dans le secteur des télécommunications, en particulier avec l'arrivée de la technologie 5G, il est devenu crucial de répondre aux exigences de taille, de légèreté, de coût réduit, de performances élevées et de facilité de déploiement. À l'origine liées aux domaines de l'aéronautique, de l'aérospatiale et de la défense, ces exigences sont maintenant présentes dans les applications commerciales sans fil. Pour satisfaire ces demandes croissantes dans le secteur des télécommunications.

III.2. Définition d'une Antenne

Les antennes sont des appareils qui ont pour fonction d'émission ou de captation d'ondes électromagnétiques [19]. Autrement dit, elles jouent le rôle de structures de passage entre l'espace libre et les ondes guidées .Le courant modulé d'excitation est converti par l'antenne d'émission en ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air. De son côté, l'antenne de réception convertit les ondes électromagnétiques recueillies en un courant capable d'être utilisé par le récepteur [19].

III.3. Caractéristiques d'une antenne

Un système de communication sans fil est composé d'un bloc de transmission et d'un bloc de réception, reliés par un canal de propagation. L'antenne est un dispositif passif assurant la conversion des signaux électriques en signaux électromagnétiques et vice-versa. Que ce soit pour les antennes de petite taille ou de taille normale, on retrouve des caractéristiques communes telles que l'impédance d'entrée, la bande passante et le gain. Nous approfondirons en détail chacune de ces caractéristiques dans les sous-sections suivantes [20].

III.3.1 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance perçue par la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Elle représente la résistance et la réactance combinées à cette interface. L'impédance d'entrée peut être calculée à l'aide de la formule suivante [21] :

$$Z_e = Z_o \left(\frac{1-S_{11}}{1+S_{11}} \right) \quad (\text{III.1})$$

III.3.2 Le coefficient de réflexion S11

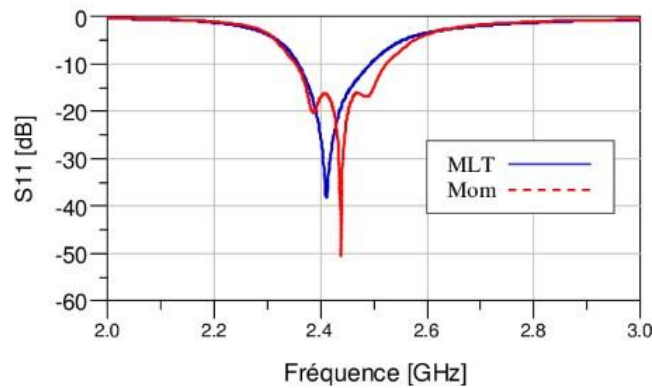


Figure III.1: coefficient de réflexion en fonction de la fréquence [21]

Généralement, lorsqu'une onde incidente traverse une interface ou change de milieu de propagation, une partie de l'onde est réfléchié tandis qu'une autre partie se propage à travers le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne est défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde incidente et l'amplitude de l'onde réfléchié. Pour une antenne d'impédance Z , connectée à une source via une ligne d'impédance caractéristique Z_0 égale à 50Ω , le coefficient de réflexion peut être défini de la manière suivante [22] :

$$S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (\text{III.2})$$

- Z_e : est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- Z_0 : est l'impédance caractéristique

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibels (dB) et est noté $|S_{11}|$. Il est défini de la manière suivante [22]:

$$|S_{11}|_{\text{db}} = 20 \log |S_{11}| \quad (\text{III.3})$$

La fréquence de résonance de l'antenne est généralement la fréquence à laquelle le coefficient de réflexion atteint sa valeur minimale.

III.3.3 Directivité et gain

La directivité d'une antenne est une grandeur définie comme le rapport entre l'intensité de rayonnement U dans une direction particulière et la puissance totale rayonnée $Prad$, divisée par 4π . Elle se calcule selon l'expression suivante [23] :

$$D = \left(\frac{U}{U_0} \right) = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (\text{III.4})$$

Où D représente la directivité de l'antenne, U l'intensité de rayonnement dans la direction considérée et $Prad$ la puissance totale rayonnée.

Le gain d'une antenne est en effet déterminé par sa directivité, qui mesure l'efficacité de rayonnement de l'antenne. La formule pour le calcul du gain est :

$$G = e \cdot D = D \cdot \frac{4\pi U}{Prad} \quad (\text{III.5})$$

Dans le cas d'une antenne isotrope, le gain est déterminé en comparant l'intensité du rayonnement de l'antenne à celle d'une antenne isotrope de référence.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (\text{III.6})$$

III.3.4 Rendement

Le rendement d'une antenne, aussi appelé efficacité, représente le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne et la puissance qui lui est fournie en entrée. Il est déterminé par l'équation suivante [25]:

$$\eta = \frac{P}{Pa} = \frac{\text{gain}}{\text{directivité}} \quad (\text{III.7})$$

III.3.5 Bande passante

La bande passante d'une antenne, illustrée à la figure III.2, représente la plage de fréquences sur laquelle le transfert d'énergie entre le système d'alimentation et l'antenne, ou vice-versa pour la réception, s'effectue de manière efficace.

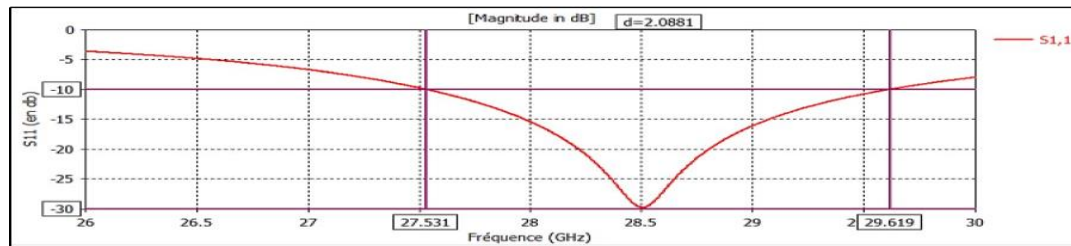


Figure III. 2: Bande passante [25]

À l'intérieur de cette bande passante, le coefficient de réflexion reste généralement faible. Pour optimiser la bande passante, il est possible d'ajuster directement les caractéristiques de l'antenne afin de modifier son impédance, ou encore d'ajouter des éléments d'adaptation d'impédance. Cette notion est exprimée par l'équation suivante [II.18] :

$$BP = \frac{f_{max} - f_{minx}}{f_{coupure}} \quad (\text{III.8})$$

III.3.6 Facteur de qualité

D'un point de vue électrique, l'antenne peut être assimilée à un circuit résonant RLC. La bande passante (BW) de l'antenne est alors liée au facteur de qualité (Q) de ce circuit RLC à la fréquence de résonance (f_{res}). Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors du phénomène de résonance. Une faible valeur de Q implique une large bande passante, et inversement [26].

La relation entre le facteur de qualité, la fréquence de résonance et la bande passante est donnée par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{f_{res}}{BW} \quad (\text{III.9})$$

Une antenne avec un facteur de qualité élevé rayonne de manière très efficace à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquences très étroite, ce qui peut limiter les interférences hors de cette bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des limites de la bande de fréquences de fonctionnement sera atténué [26].

III.3.7 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la variation de la puissance rayonnée dans différentes directions de l'espace. Il permet de visualiser les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [26]. Ce diagramme peut être représenté en 3D, ce qui offre une meilleure visualisation des lobes principaux et des lobes secondaires, ou en 2D, sous forme de représentation polaire ou cartésienne (figure III.3).

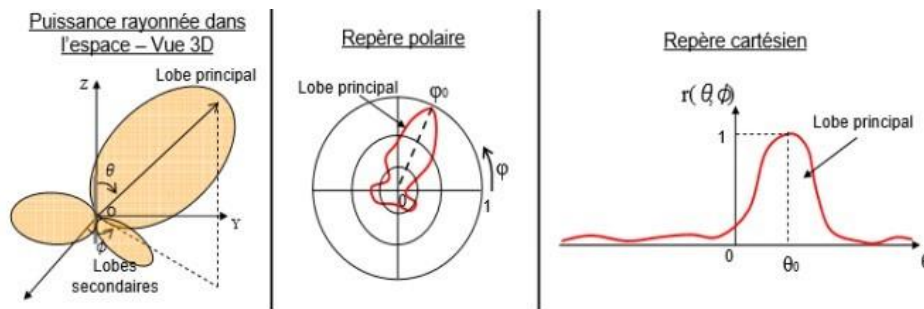


Figure III. 3: Représentation de diagramme de rayonnement d'une antenne [26]

Une antenne isotrope (Figure III.4) est un modèle théorique qui rayonne de manière uniforme son énergie dans toutes les directions de l'espace. Bien que diverses recherches tentent de se rapprocher de cette caractéristique [26], une telle antenne demeure purement théorique et sert de référence pour évaluer la directivité ou le gain d'une antenne réelle.

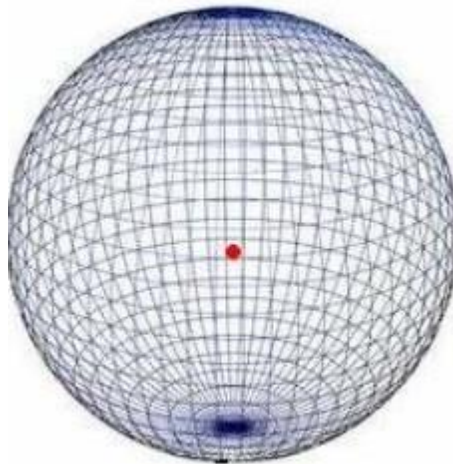


Figure III. 4: Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope [26]

Certaines antennes, telles que les antennes à réflecteur parabolique, concentrent la puissance dans une plage angulaire spécifique, plus ou moins large. On les appelle des antennes directives (figure III.5). On les trouve à la fois sur les satellites et au sol. Elles nécessitent d'être pointées vers le destinataire de la liaison [27].

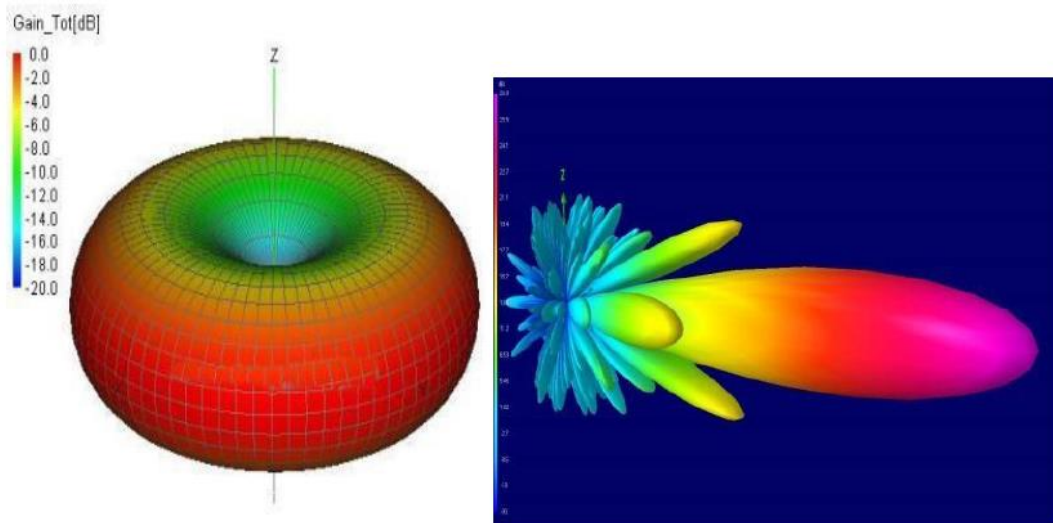


Figure III. 5:(a) diagramme de rayonnement et (b) diagramme directive [27]

À l'inverse, les antennes omnidirectionnelles (figure III.5 (a)) présentent un rayonnement uniforme dans un plan de l'espace. Ne requérant aucun pointage spécifique, elles trouvent des applications comme sur les terminaux de téléphonie mobile par satellites (ou encore sur les smartphones).

III.3.8 Angle d'ouverture à (-3dB)

Soit G le gain maximum d'une antenne dans un plan donné. L'ouverture angulaire de cette antenne dans ce même plan correspond alors à l'angle formé par les deux directions, situées dans ce plan, pour lesquelles le gain est réduit de moitié (gain a -3 dB), c'est-à-dire égal à $G/2$ [28].

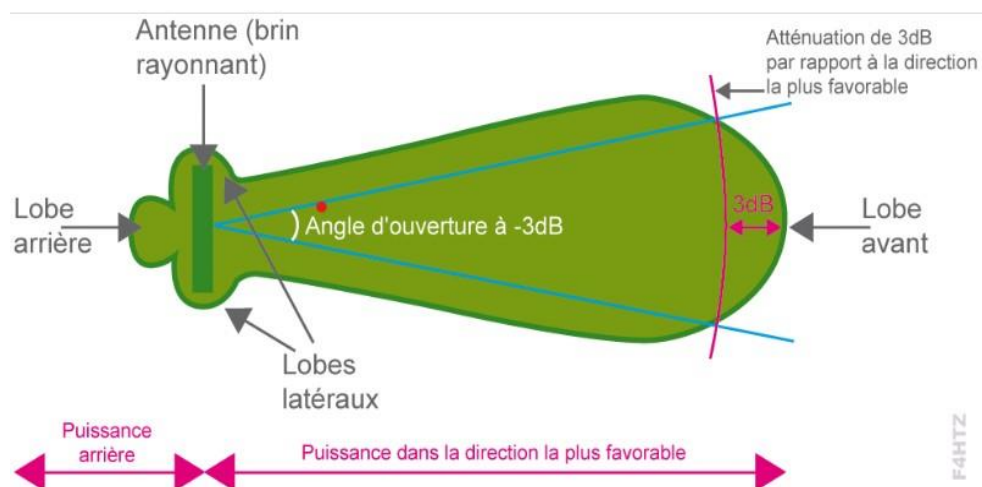


Figure III. 6: Angle d'ouverture [27]

III.4. Les différents types d'antennes

Les antennes peuvent être classées en quatre groupes distincts en fonction de leur utilisation et de leur ouverture à -3 dB en azimut [28].

Ces types d'antennes sont généralement utilisés dans les réseaux sans fil extérieurs, parfois appelés réseaux métropolitains, et peuvent également être présents à l'intérieur des bâtiments dans certains cas particuliers.

III.4.1 Antennes Directives

Ces antennes sont employées pour couvrir des zones spécifiques et éloignées, car elles offrent des gains importants. Elles sont également utilisées pour établir des liaisons point à point entre deux sous-réseaux, comme dans le cas des faisceaux hertziens.

Leur diagramme de rayonnement concentre l'énergie dans une direction, ce qui se traduit par un gain élevé (voir Figure III.7).

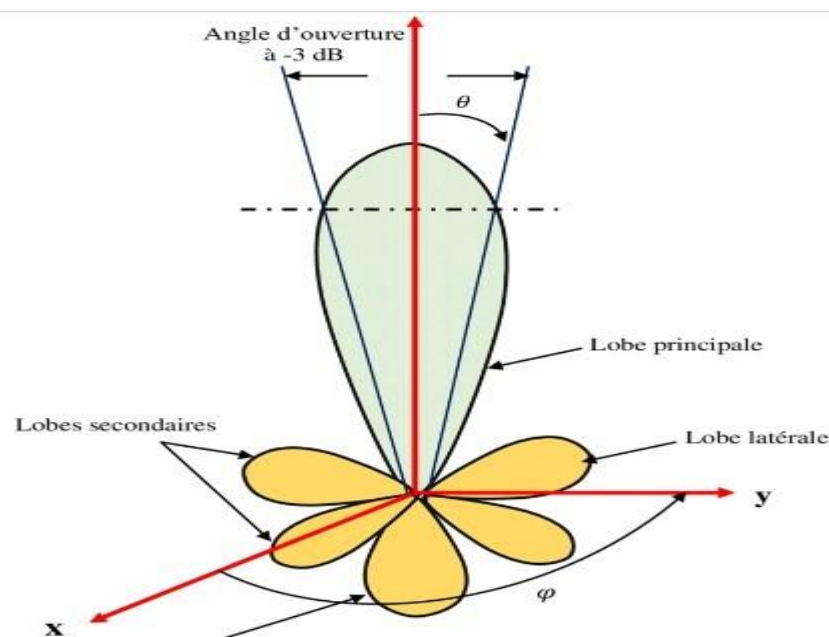


Figure III.7: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [28]

III.4.2 antenne omnidirectionnelle

Une antenne omnidirectionnelle est une antenne de transmission ou de réception sans fil qui rayonne ou intercepte des champs électromagnétiques de radiofréquence (RF) de manière

Égale dans toutes les directions horizontales d'un plan géométrique plat et bidimensionnel (2D). Les antennes omnidirectionnelles sont utilisées dans la plupart des dispositifs sans fil RF, notamment les dispositifs cellulaires et les routeurs sans fil [29].

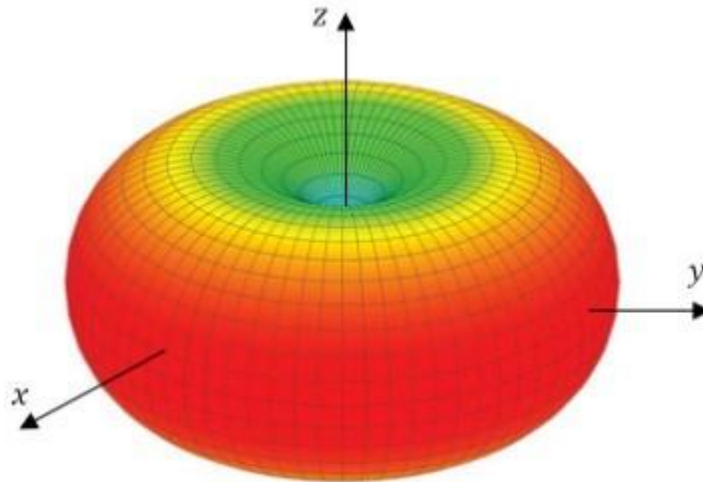


Figure III.8: diagramme omnidirectionnel [29]

III.4.3. Antennes Sectorielles

Les antennes sectorielles appelées « Sector » sont un type spécial d'antenne semi-directionnelle à haut gain qui fournissent une couverture en forme de part de tarte. Elles sont généralement placées au centre de la zone à couvrir dos à dos avec une autre antenne sectorielle. Chaque antenne s'occupe de sa propre zone à couvrir et lorsqu'on combine plusieurs antennes sectorielles pour couvrir 360° , on parle de « Sectorized Array ». Contrairement aux autres antennes semi-directionnelles, une antenne sectorielle ne génère que peu de signal RF derrière l'antenne (« Back Lobe »), et n'interfère donc pas avec les autres antennes sectorielles. Elles ont typiquement un gain d'au moins 10 dBi [30].



Figure III.9 : exemples d'une antenne sectorielle [30]

III.4.3.3.1. Les réseaux d'antennes patches

. Généralement, ce type d'antenne sectorielle est réalisé à partir d'un réseau d'antennes élémentaires disposées selon un agencement mono ou bidimensionnel, comme illustré à la Figure III.10 :

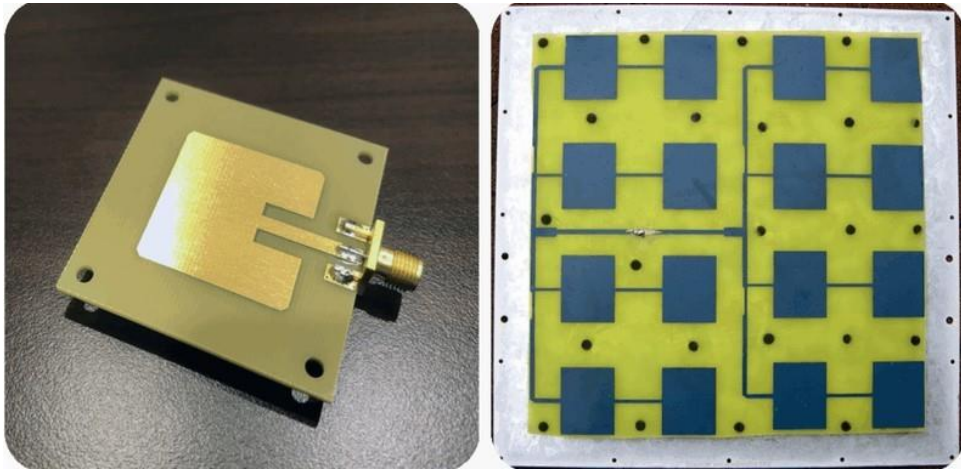


Figure III.9:Exemple de réseaux d'antennes élémentaires [31]

De la même manière que pour créer des antennes directives, il est possible d'utiliser un réseau d'antennes pour concevoir des antennes sectorielles

III.4.4. Antennes à fentes

L'antenne à fentes se distingue par sa structure en forme de cornière ou de guide d'ondes, avec des fentes spécifiquement dimensionnées et positionnées en fonction de la fréquence utilisée, comme illustré dans la Figure III.11 :



Figure III.10:Exemples d'antennes à fente [32]

III.4.5 Antennes Agiles

Les antennes agiles sont des antennes dotées d'un système de contrôle actif leur permettant de modifier leurs caractéristiques de fonctionnement. Elles confèrent ainsi une plus grande flexibilité aux systèmes de télécommunications sans fil. On distingue deux catégories d'antennes agiles [33].

Les antennes agiles en fréquence, capables d'ajuster leur fréquence de fonctionnement.

Les antennes agiles en rayonnement multifaisceaux, permettant de faire varier les caractéristiques de rayonnement telles que la direction de pointage, la directivité, l'angle d'ouverture du lobe principal, etc.

III.5.Conclusion

Ce chapitre a étudié la structure globale d'une antenne patch, ainsi que les diverses formes et catégories d'antennes. Les principales caractéristiques d'une antenne ont été abordées, comme son gain, sa directivité, son coefficient de réflexion et son impédance d'entrée. Les différentes techniques d'alimentation des antennes patch ont également été examinées, en soulignant leurs bénéfices et leurs désavantages respectifs. Finalement, nous avons brièvement mentionné l'importance de la bande millimétrique et les différentes utilisations des réseaux d'antennes dans divers secteurs.

**CHAPITRE IV: SIMULATION D'UNE ANTENNE
MINIATURISÉE (DGS & DMS)**

IV.1. Introduction

Dans le cadre de notre projet de fin de cycle, nous avons pour but de concevoir et simuler une antenne patch rectangulaire adaptée aux applications 5G sub-6GHz. Ce chapitre vise à appliquer les connaissances acquises dans les chapitres précédents pour concevoir une antenne imprimée fonctionnant dans la plage de fréquences spécifique de [4.5] GHz, en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio.

Pour réaliser cet objectif, nous organiserons notre travail en quatre parties distinctes. Dans la première partie, nous concentrerons sur la conception initiale de l'antenne patch rectangulaire. Nous déterminerons ses dimensions, réaliserons des simulations pour ajuster ses paramètres afin qu'elle résonne à la fréquence cible de 4.5 GHz. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus, notamment en termes de performance tels que le coefficient de réflexion, la bande passante et le diagramme de rayonnement en gain.

Dans la deuxième partie, nous explorerons l'application d'une méthode de miniaturisation connue sous le nom de DMS (Defected Microstrip Structure). Nous utiliserons des fentes pour modifier le courant de surface de l'antenne et évaluerons l'impact de cette technique sur son adaptabilité fréquentielle tout en maintenant sa conformité avec la plage de fréquences cible.

La troisième partie sera consacrée à une autre méthode de miniaturisation appelée DGS (Defected Ground Structure), visant à augmenter le gain de l'antenne. Nous étudierons comment cette technique peut améliorer les performances de l'antenne dans la plage de fréquences définie.

Enfin, dans la quatrième partie, nous combinerons les deux méthodes de miniaturisation, DGS et DMS, tout en maintenant la fréquence de résonance de l'antenne dans la plage de fréquences spécifiée. Ce faisant, nous espérons obtenir une antenne patch rectangulaire optimisée pour les applications 5G sub-6GHz.

IV.2.Outil de simulation

Pour la conception et la simulation de composants micro-ondes, tels que les antennes imprimées ou les filtres HF, il existe un éventail de logiciels spécialisés parmi lesquels choisir, chacun avec ses propres avantages et fonctionnalités. Ces logiciels, tels que HFSS, ADS, IE3D, FEKO et CST MICROWAVE STUDIO, permettent aux ingénieurs et aux chercheurs de modéliser et d'analyser le comportement des dispositifs à haute fréquence avec une grande précision.

Dans notre étude, nous avons sélectionné le CST MICROWAVE STUDIO pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il offre une interface conviviale et des fonctionnalités avancées pour la simulation en 3D des composants haute fréquence. Ensuite, il est basé sur la méthode des intégrales finies (FIT), une approche numérique efficace pour résoudre les équations de Maxwell dans des environnements complexes. De plus, il dispose d'une large gamme de fonctionnalités pour l'analyse des performances des antennes, des filtres et d'autres composants micro-ondes, ce qui en fait un choix idéal pour notre étude. En utilisant CST MICROWAVE STUDIO, nous sommes en mesure de modéliser avec précision nos composants, d'analyser leur comportement dans différentes conditions de fonctionnement et d'optimiser leur conception pour répondre aux spécifications requises pour les applications 5G sub-6GHz.

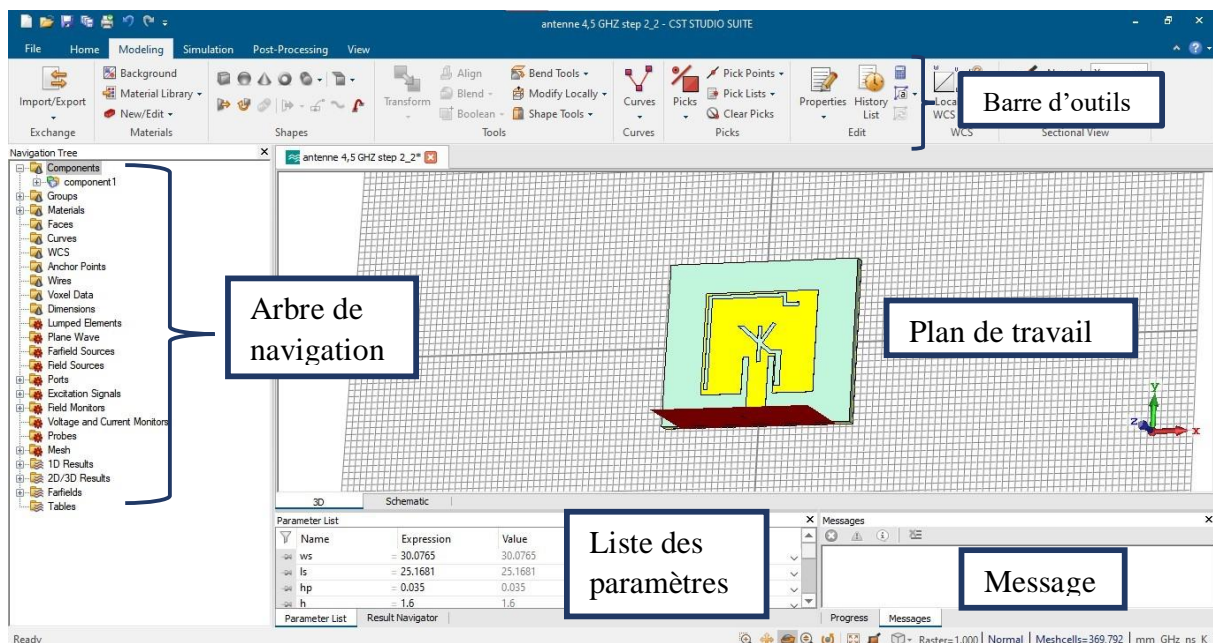


Figure IV. 1:logiciel CST studio Microwave

IV.3 Conception d'une antenne rectangulaire à 4.5 GHZ

L'antenne que nous avons développée est une configuration de type patch rectangulaire, spécialement conçue pour répondre aux exigences d'adaptation d'impédance à une valeur de 50Ω . Le patch rectangulaire, de dimension $W_p * L_p$, est minutieusement ajusté pour garantir une correspondance adéquate avec l'impédance d'entrée requise.

En ce qui concerne le substrat, nous avons opté pour l'utilisation du matériau FR-4 (LOSSY), caractérisé par une permittivité relative de $\epsilon_r=4.3$ et une épaisseur de $h=1.6\text{mm}$. Ce choix est motivé par les propriétés électriques et mécaniques de ce matériau, qui conviennent parfaitement à notre application.

Le plan de masse, de dimension $W_s \times L_s$, est fabriqué en cuivre avec une épaisseur de $t=0.035\text{mm}$. Cette configuration assure une bonne conductivité et permet une répartition efficace du courant sur la surface du plan de masse.

Le tableau IV.1 présente les caractéristiques d'antenne Patch simulée :

| Les composants d'antenne | Le type de matériaux | Hauteur (mm) | Permittivité Diélectrique |
|--------------------------|----------------------|--------------|---------------------------|
| Plan de masse | Copper (annealed) | 0.035 | --- |
| Le patch | Copper (annealed) | 0.035 | --- |
| Substrat | FR-4(Lossy) | 1.6 | 4.3 |
| Ligne d'alimentation | Copper (annealed) | 0.035 | --- |

Tableau IV. 1 : les caractéristiques d'antenne Patch simulée

IV.4. Antenne initiale

| Paramètres | Description | Valeur (mm) |
|------------|--|-------------|
| W_s | Largeur de substrat et le plan de masse | 25.16 |
| L_s | Longueur de substrat et le plan de masse | 30.07 |
| W_p | Largeur du patch | 15.73 |
| L_p | Longueur du patch | 17.97 |
| W_f | Largeur de la ligne Microstrip | 1.03 |
| L_f | Longueur de la ligne Microstrip | 3.13 |
| h | Hauteur de substrat | 1.6 |
| h_p | Hauteur de patch et le plan de masse | 0.035 |

Tableau IV. 2: Les dimensions d'antenne de référence

| Paramètre d'antenne | Equations |
|--|---|
| Largeur du patch (W_p) | $W_p = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}}$ |
| Longueur effective (L_{eff}) | $L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$ |
| L'extension de la longueur (ΔL) | $\Delta L = 0.412 \times sh\left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)\left(\frac{PL}{sh} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)\left(\frac{PL}{sh} + 0.8\right)}\right)$ |
| Constante diélectrique (ϵ_{eff}) | $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} - \sqrt{1 + 12 \frac{sh}{PL}}$ |
| Longueur du patch (L_p) | $L_p = L_{eff} - 2\Delta L$ |
| Longueur du substrat (S_w) | $S_w = 6 \times h + W_p$ |
| Largeur du substrat (L_s) | $L_s = 6 \times h + L_p$ |
| L'impédance caractéristique de la ligne microruban (Z_c) | $Z_c = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r+1)}} \left[\ln\left(4 \frac{sh}{wf} \sqrt{16\left(\frac{sh}{wf}\right)^2 + 2}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}\right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{sh}\right) \right]$ |

Tableau IV. 3: Formules et calculs des paramètres d'antenne [39]

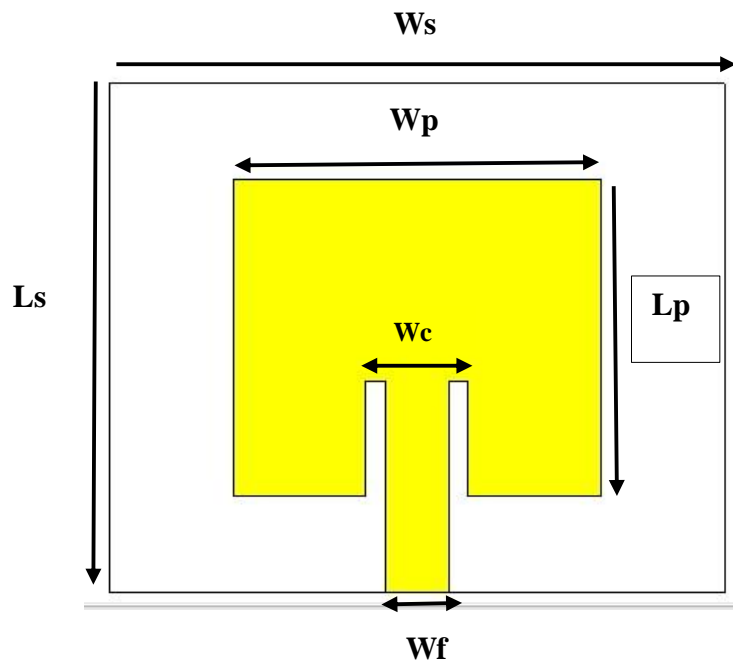


Figure IV.2: structure d'antenne Patch

IV.4.1 Le coefficient de réflexion

La figure IV.3 présente le coefficient de réflexion S11, Nous avons une mauvaise adaptation à la fréquence de 4.5 GHz avec un coefficient de réflexion s11 égale à -7.73dB.

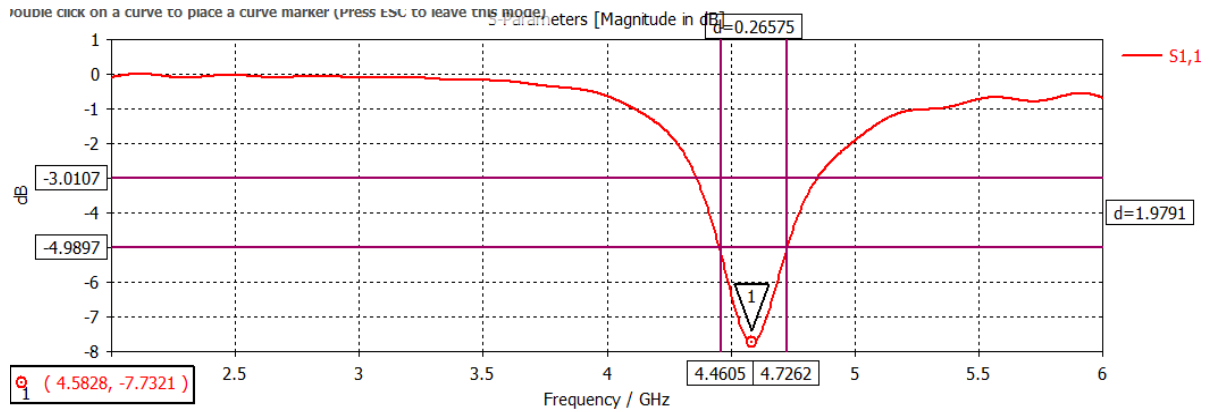


Figure IV. 3 :S11 d'antenne patch

IV.4.2 Gain d'antenne patch

La figure IV.4 présente le diagramme de rayonnement simulé de l'antenne, Avec une représentation en 3D. Il est observé que l'antenne présente une directivité, Avec un gain mesuré à 4.09 dB

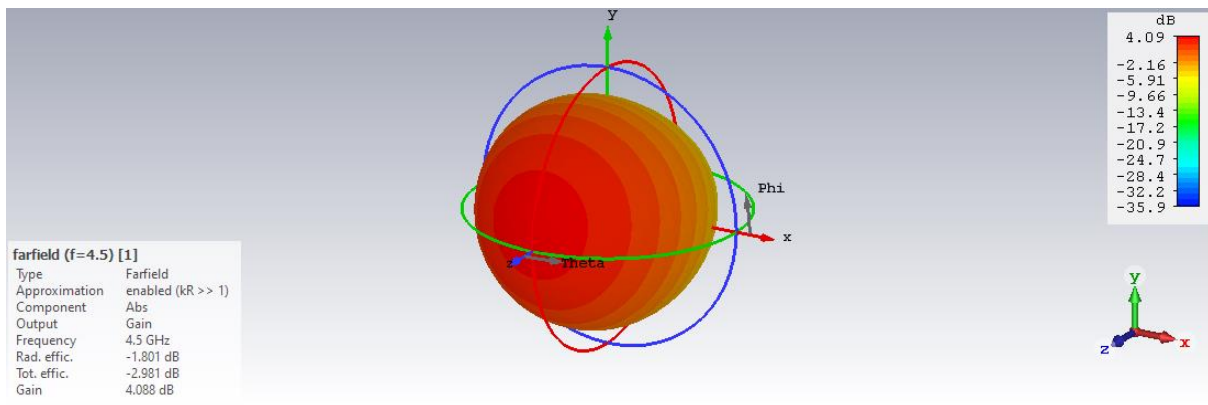


Figure IV.4: Le gain d'antenne patch

IV.4.3 Densité de courant

L'étude de la distribution du courant sur l'antenne examinée offre une meilleure compréhension de la répartition des courants sur sa structure. La Figure.IV.5 met en avant la distribution du courant sur toute la surface du patch ainsi qu'aux extrémités du plan de masse et sur la ligne d'alimentation du patch.

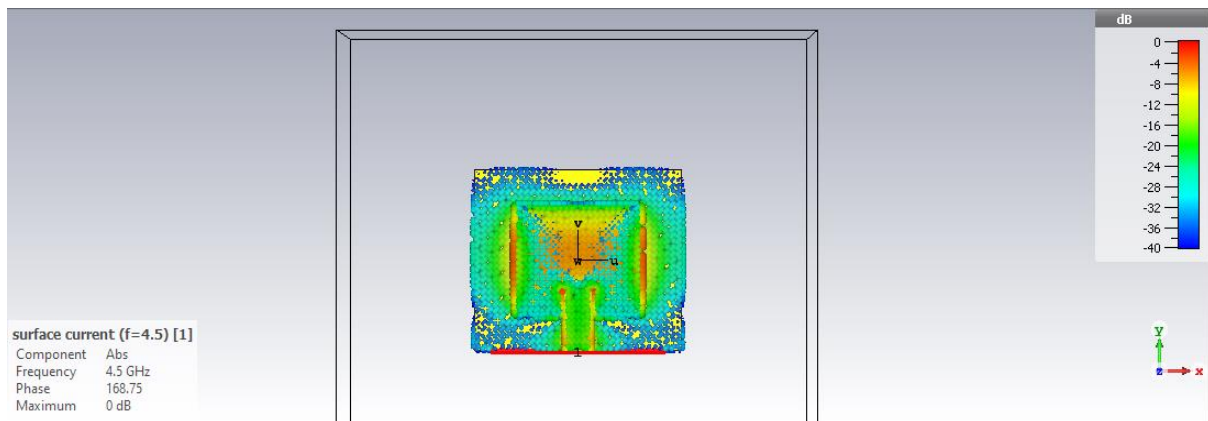


Figure IV.5: le courant de surface d'antenne de référence

IV.5. Etude d'influence paramétrique de différents paramètres

L'étude de l'influence de différents paramètres sur le coefficient de réflexion S_{11} est abordée dans diverses études paramétriques afin d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de l'antenne.

- Une étude paramétrique a été réalisée pour comprendre les effets des différents paramètres et obtenir une structure finale efficace et optimisée.
- Pour améliorer l'adaptation de notre antenne patch on a choisi de modifier les paramètres de la ligne d'alimentation. La figure IV.6 illustre la modification que on a fait au niveau de l'insert sachant que $W_c=5\text{mm}$.

IV.5.1 La première modification

Dans la première étape pour l'étude paramétrique nous avons changé la longueur de la ligne d'alimentations au niveau de l'insert.

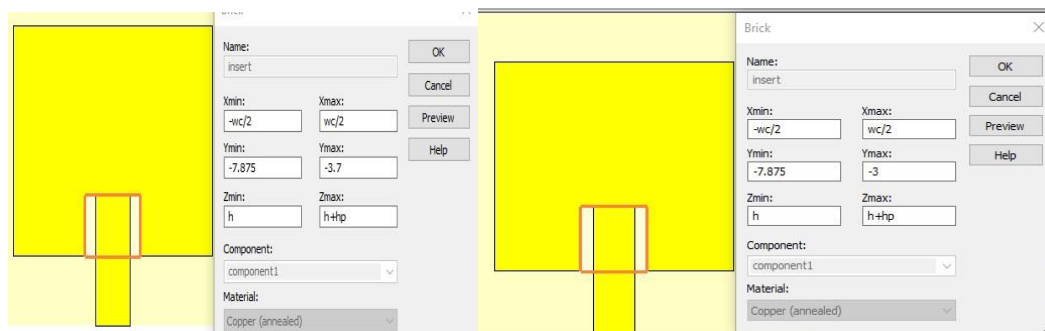


Figure IV. 6 : modification de la ligne d'alimentation

- Coefficient de réflexion

Dans la figure nous avons observé le changement de l'adaptation d'antenne après la modification de la ligne d'alimentation.

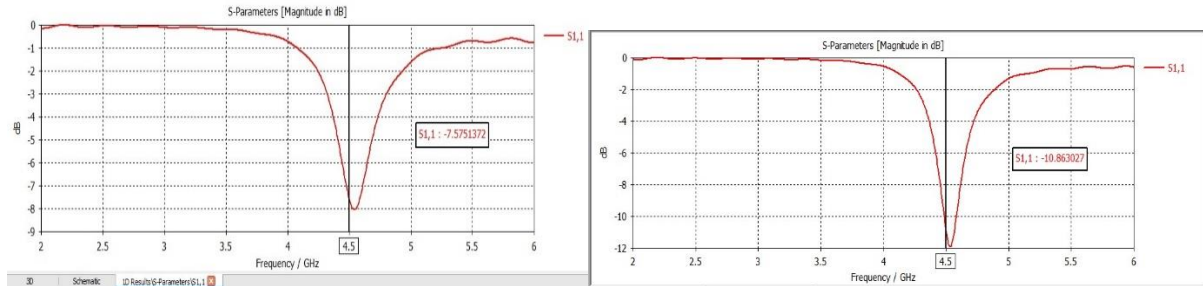


Figure IV.7: coefficient de réflexion d'antenne patch

IV.5.2 La deuxième modification

La figure IV.8 montre les changements qu'on fait au niveau de l'insert

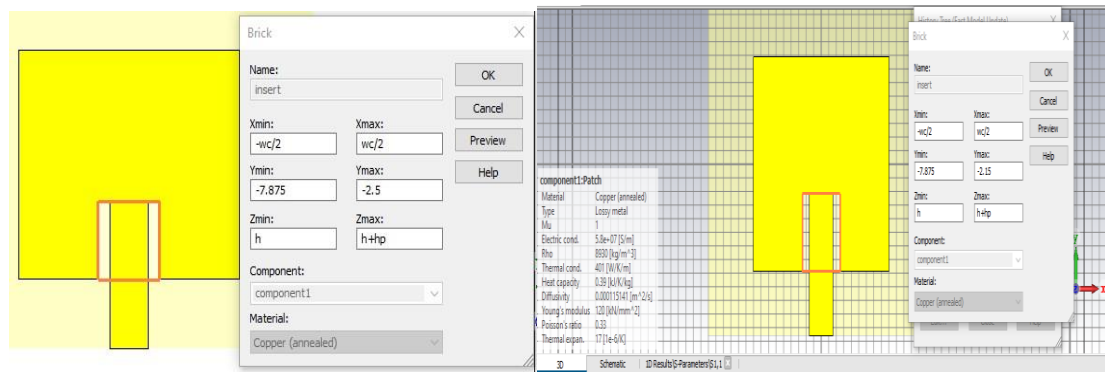


Figure IV. 8: Antenne patch avec modification de l'insert

- Coefficient de réflexion

Après la modification de l'insert, nous avons une bonne adaptation à la fréquence de 4.5 GHz avec un coefficient de réflexion S11 égale à -53.92 dB, et une bande passante BP = 0.22%.

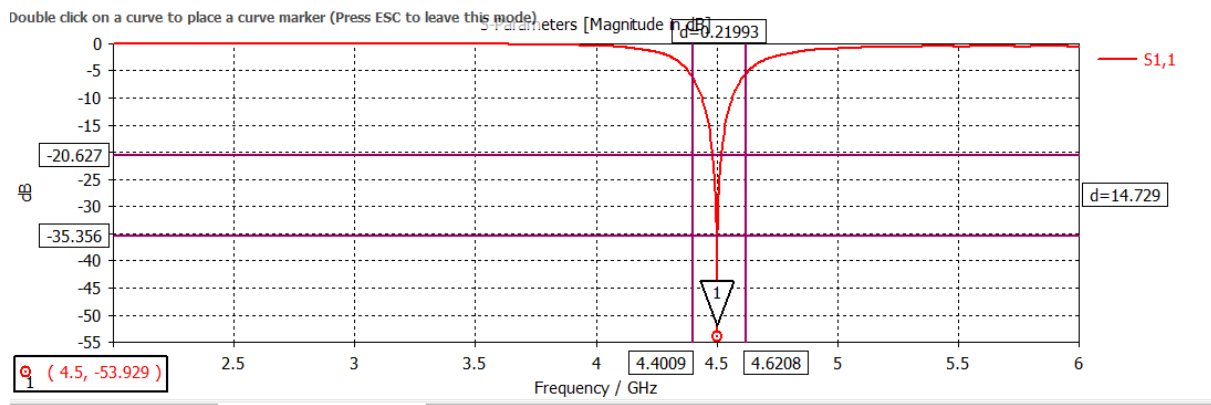


Figure IV.9: coefficient de réflexion d'antenne bien adapté

- **Gain d'antenne patch**

La Figure IV.10 illustre le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne. On peut observer que l'antenne possède un gain de 3.78 dB.

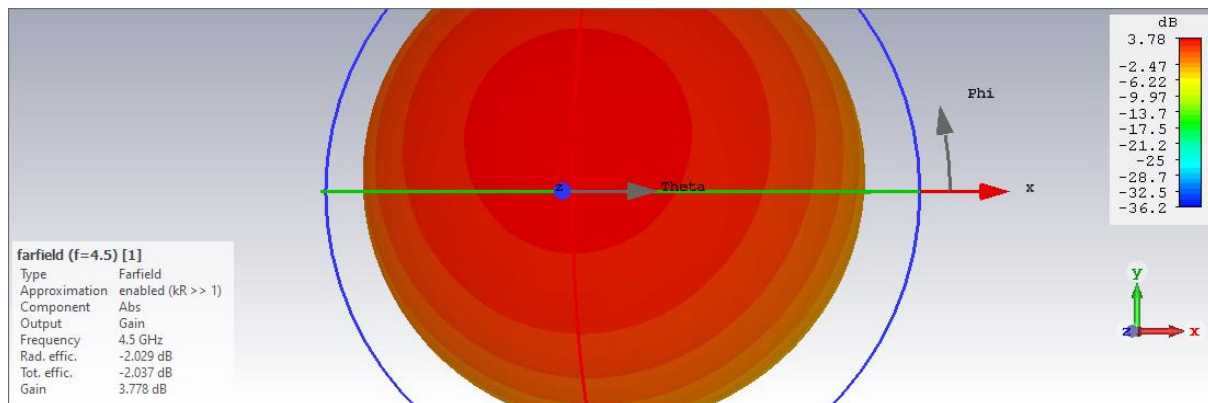


Figure IV.10: Le gain de l'antenne patch bien adapté

- **Courant de surface d'antenne patch**

La figure. IV.11 illustre le courant du surface du patch et sur la ligne d'alimentation

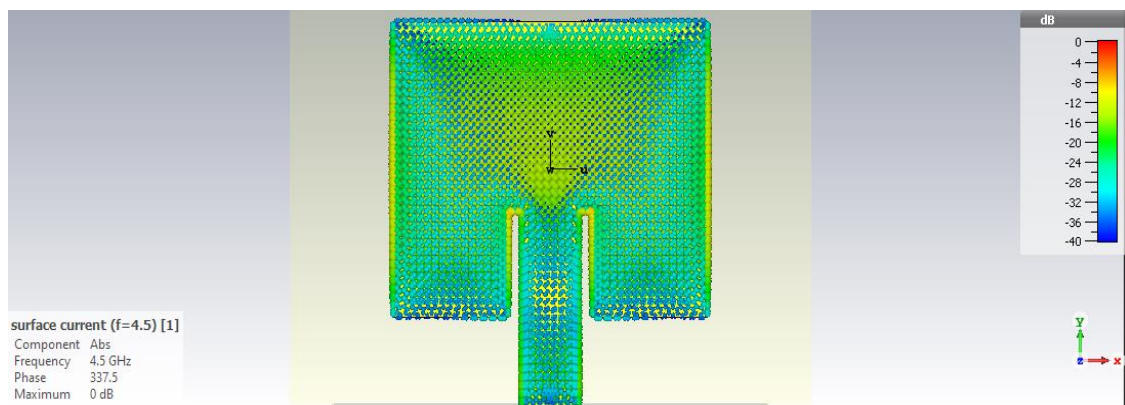


Figure IV.11: Le courant de surface de l'antenne patch

IV.6. Les techniques de miniaturisations

Pour réduire la taille d'une antenne, il est toujours nécessaire de respecter des contraintes physiques afin de préserver ses performances. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de faire face à ce défi de miniaturisation tout en préservant l'efficacité de l'antenne :

IV.6.1 Defected Microstrip Structures (DMS)

Les microstructures défectueuses (DMS) sont des modifications intentionnelles de la géométrie ou de la composition d'une antenne ou d'une ligne de transmission à des emplacements précis. Elles sont employées pour réduire la taille de l'antenne tout en conservant ses performances électromagnétiques. Les DMS peuvent également augmenter l'incidence de l'effet de vague lente, ce qui améliore les performances de l'antenne. De plus, l'utilisation de jauges de déformation peut contribuer à accroître le facteur d'onde lente (SWF) de la ligne de transmission en mesurant les contraintes mécaniques appliquées à la structure [38].

IV.6.2 Defected ground structure (DGS)

La structure de terre défectueuse (DGS), désigne un motif ou une configuration particulière gravée ou intégrée dans le plan de masse d'un circuit micro-ondes ou d'une antenne. Cette structure est intentionnellement conçue pour altérer les propriétés électromagnétiques du plan de masse et des ondes qui s'y propagent. En ajustant la forme, la taille et l'agencement des défauts présents dans la structure de terre, il est possible de modifier et de contrôler les performances électromagnétiques du circuit ou de l'antenne dans la plage de fréquences souhaitée [38].

IV.7. Antenne patch avec DMS

Les structures DMS sont typiquement des découpes, des fentes ou des perturbations introduites dans la ligne de transmission microstrip. Ces structures sont élaborées pour altérer les propriétés électromagnétiques de la ligne microstrip, offrant ainsi des avantages comme une isolation améliorée, une diminution des pertes, une suppression des interférences et une augmentation du facteur de qualité.

IV.7.1 Prototype 1

Comme une première méthode de l'application de la technique DMS nous avons faire une premier étape on ajoute deux fente au niveau de patch.

La Figure IV.12 illustre le coefficient de réflexion S11 obtenu nous constatons que cette antenne peut couvrir la plage de fréquence [4.433-4.575 GHz]. Nous observons une amélioration de l'adaptation avec une valeur de s11 réduite à -17.69 dB.

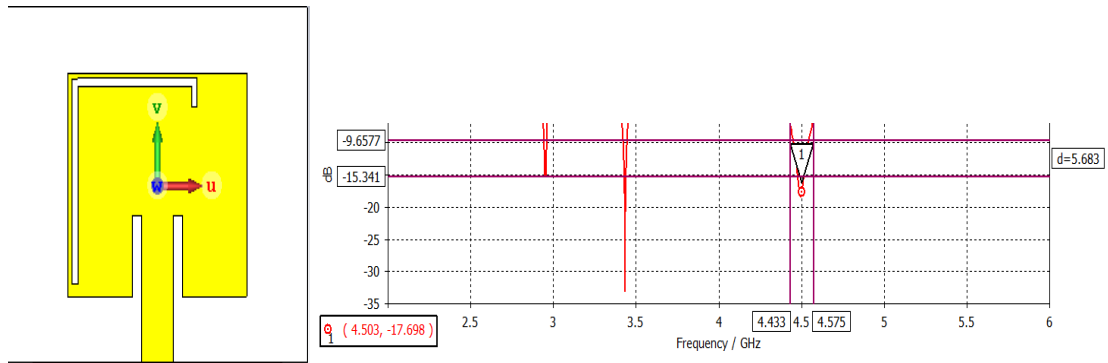


Figure IV.12 : S11 de 1 ère prototype

IV.7.2 Prototype 2

Pour la deuxième étape de la miniaturisation d'antenne par la technique DMS. Nous avons ajouté aussi deux fentes au niveau de patch comme vous voyez dans la figure.

La Figure IV.13 présente le coefficient de réflexion S11, on observe une amélioration continue de l'adaptation à la plage de fréquence [4.181-4.341 GHz] avec une légère augmentation de valeur de S11 a -13 dB.

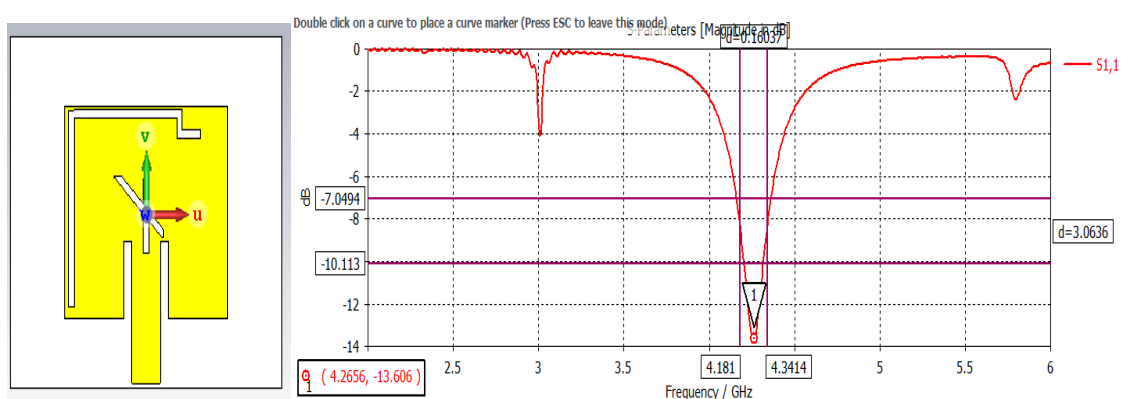


Figure IV.13: S11 de 2ème prototype

IV.7.3 Prototype 3

Pour la dernière étape nous avons ajouté autre fente sur le patch .La Figure IV.14 illustre le coefficient de réflexion S11 de l'antenne finale après la DMS nous avons réussi à réaliser

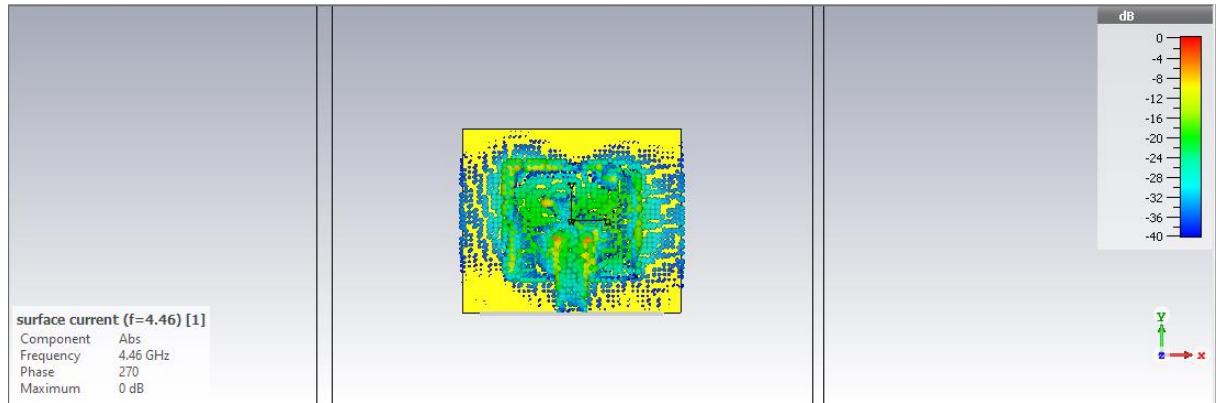


Figure IV. 16:le courant de surface d’antenne finale

IV.7.4 Tableau de comparaison (DMS)

Les résultats de trois cas différents (prototype1, 2,3) en utilisant les métriques (fréquence, Directivité, Gain) obtenues grâce au simulateur CST :

| Patch avec DMS | Frequency (GHz) | S11 (dB) | Directivité(dBi) | Gain (dBi) |
|----------------|-----------------|---------------|------------------|-------------|
| Prototype 1 | 4.5 | -17.97 | 5.75 | 3.70 |
| Prototype 2 | 4.26 | -13.60 | 5.02 | 3.71 |
| Prototype 3 | 4.46 | -23.08 | 5.00 | 3.69 |

Tableau IV. 4: Comparaison entre les différentes simulations de la méthode DMS.

IV.8. Antenne patch avec DGS

Pour continuer notre projet nous allons utiliser la deuxième technique de miniaturisation. DGS (Defected Ground Structure) est utilisée pour optimiser les performances et les propriétés électromagnétiques des circuits micro-ondes. Cette méthode consiste à insérer intentionnellement des motifs spécifiques dans le plan de masse.

IV.8.1 Prototype 1

Dans le premier prototype nous avons fait une fente carrée comme vous voyez dans la figure IV.17. Après la simulation nous avons observé que l’antenne a été adaptée dans la fréquence 4.5 GHz avec un coefficient de réflexion -12.29dB

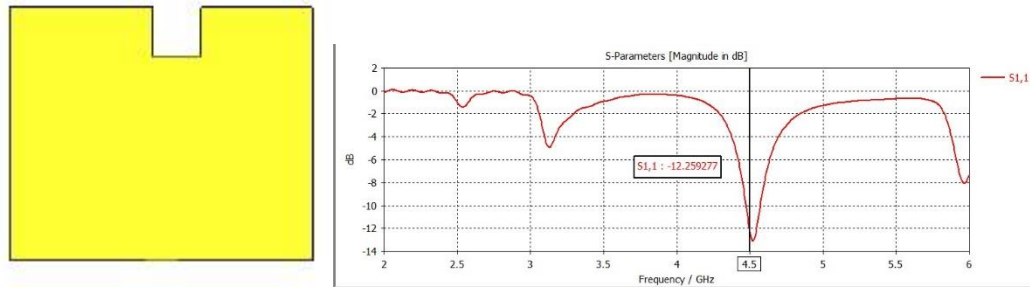


Figure IV.17 : première modification pour DGS

• Diagramme de rayonnement

Dans la figure IV.18 nous allons observer que le gain a été amélioré vers 3.80dB.

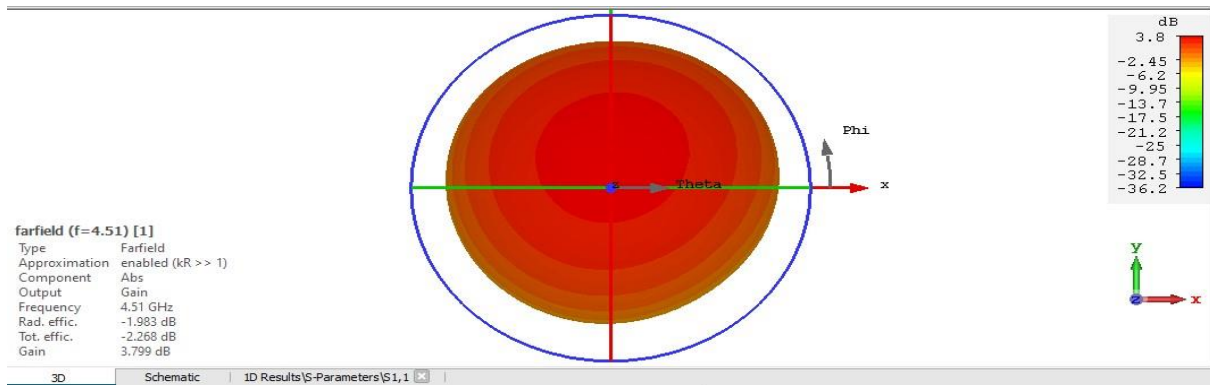


Figure IV.18: Diagramme de rayonnement en 3D de prototype 1

IV.8.2 Prototype 2

Dans La deuxième prototype nous avons fait des fentes carrée comme vous voyez dans la photo IV.19 après la simulation nous avons observé que l'antenne a été adapté dans la fréquence 4.5 GHz avec un coefficient de réflexion -12.29dB.

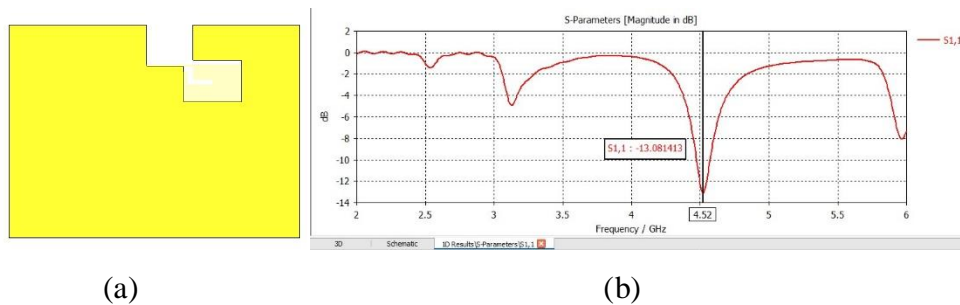


Figure IV.19 : (a) patch du prototype 2 et b) S11 en fonction de la fréquence

- **Diagramme de rayonnement**

La figure IV.20 illustre le diagramme de rayonnement après la première modification de plan de masse nous avons observé que le gain aussi a été amélioré par rapport l'antenne initiale .

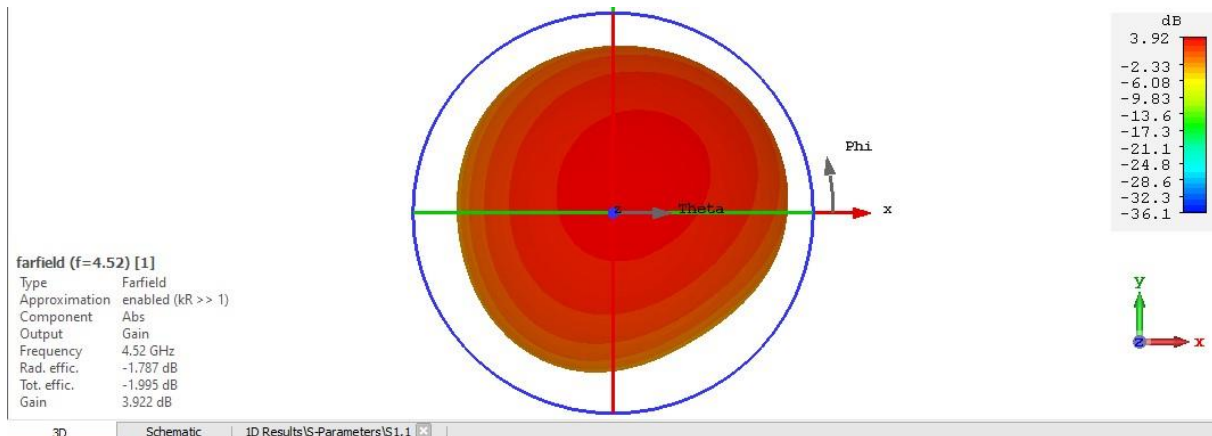


Figure IV. 20: diagramme de rayonnement en 3D de prototype 2

IV.8.3 Prototype 3

Dans cette figure IV.21 nous allons fait la dernier modification sur plans de masse et nous observons que on a une antenne avec une meilleure adaptation avec $s_{11} = -32.48\text{dB}$.

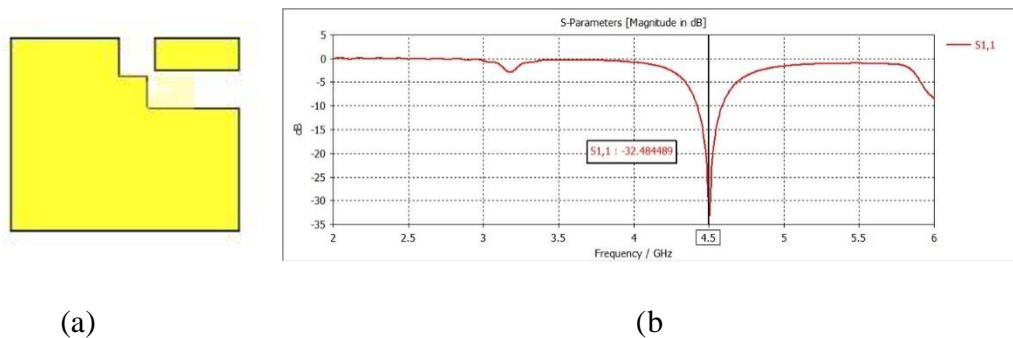


Figure IV. 21: (a) antenne finale (b) coefficient de réflexion d'antenne finale

- **Diagramme de rayonnement**

Nous avons observé dans la figure IV.22 une amélioration du gain à 4.15 dB après la modification de plan de mass.

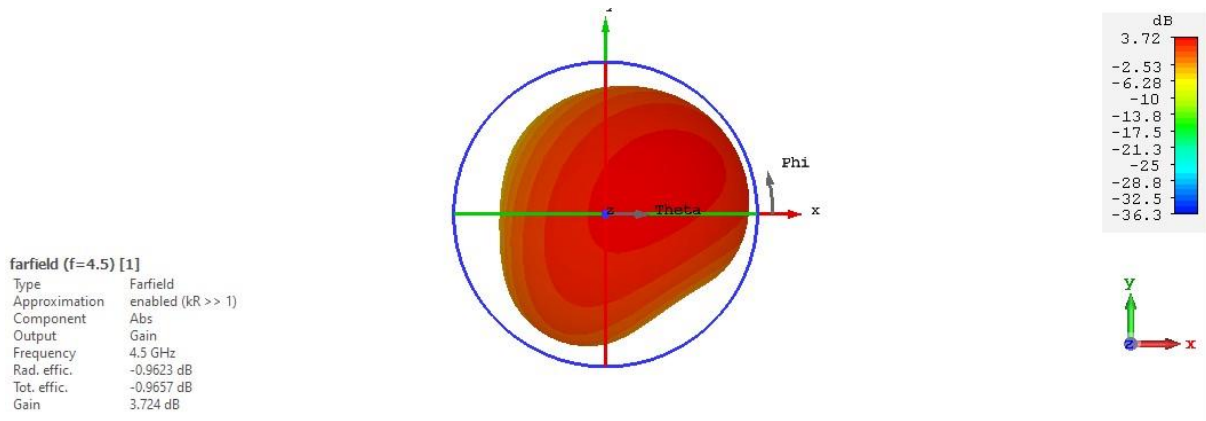


Figure IV. 22: diagramme de rayonnement en 3D de prototype 3

IV.8.4 Tableau de comparaison (DGS)

Voici un tableau comparatif des résultats par la technique DGS, nous avons comparé les résultats de trois cas différents (prototype 1, 2,3) en utilisant les métriques (fréquence, Directivité, Gain) obtenues grâce au simulateur CST :

| Patch avec DGS | Frequency (GHz) | S11 (dB) | Directivité | Gain (dBi) |
|----------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|
| Prototype 1 | 4.51 | -11.80 | 5.5 | 3.79 |
| Prototype 2 | 4.52 | -13.08 | 5.71 | 3.92 |
| Prototype 3 | 4.5 | -32.48 | 4.68 | 3.72 |

Tableau IV. 5: Comparaison entre les différentes simulations de la méthode DGS

IV.9. Tableau de comparaison

La comparaison des résultats démontre que nous avons réussi à maintenir la fréquence souhaitée à 4.5 GHz, avec une bonne adaptation du paramètre S11 et une augmentation notable du gain jusqu'à 4.68 dBi..

| Antenne | frequence (GHz) | S11(dB) | Directivité | Gain (dB) |
|----------------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|
| Antenne de référence | 4.5 | -53.92 | 4.02 | 3.69 |
| Antenne miniaturisée | 4.5 | -32.48 | 4.68 | 3.72 |

Tableau IV. 6: Comparaison entre les caractéristiques d'antenne initiale et finale

IV.10. Antenne finale

Afin de répondre à notre objectif de concevoir une antenne miniaturisée par les deux techniques DMS et DGS, notre prototype final optimisé a été soumis à une série d'ajustements géométriques. La conception de la structure de l'antenne implique un processus comprenant plusieurs étapes, telles qu'illustrées dans la figure IV.23.

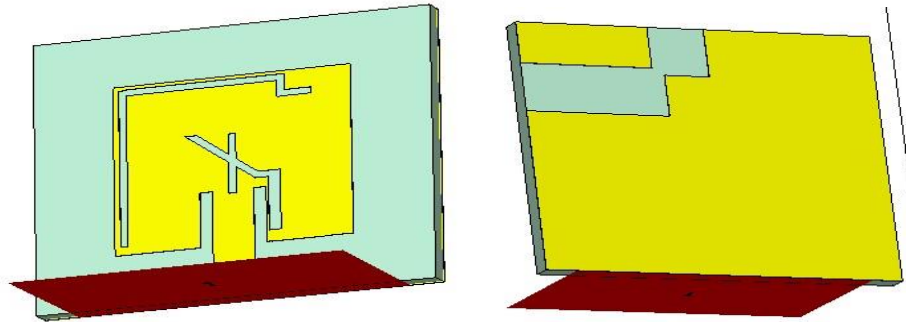


Figure IV.23: Antenne optimisée

IV.11. Conclusion

Ce chapitre nous a donné une perspective globale sur la miniaturisation. Nous avons débuté en élaborant une antenne patch rectangulaire facile et performante, spécifiquement conçue pour la fréquence 5G (4,5 GHz). Grâce à l'outil CST Microwave Studio, nous avons pu analyser et simuler l'antenne. Les dimensions de l'antenne et ses performances ont été ajustées afin d'obtenir les meilleurs résultats en ce qui concerne le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement et le gain. Par la suite, nous avons étudié deux méthodes de miniaturisation, à savoir la DGS (Structure de Terre Défectueuse) et la DMS (Structure de Microstrip Défectueuse). Nous avons examiné plusieurs prototypes pour chacune de ces techniques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but principal de ce mémoire d'étudier, et créer des antennes pour les applications 5G. Les antennes patch fonctionnant à une fréquence de 4.5 GHz présentent des performances exceptionnelles en ce qui concerne la directivité et le gain. La polyvalence et l'efficacité de leur conception en font une option privilégiée pour différentes applications. Néanmoins, il est essentiel de faire des efforts constants afin d'améliorer leur conception et de relever les défis liés à leur utilisation dans des environnements réels.

Au cours du premier chapitre, nous avons examiné la technologie 6G. Par suite d'une analyse des objectifs de la norme 5G, de ses technologies essentielles et de son architecture, nous avons examiné le sujet des antennes en général, en mettant l'accent sur les antennes imprimées principalement. Les antennes à micro-ruban présentent principalement des avantages tels que leur facilité de fabrication et leur faible coût de production.

Au chapitre troisième, nous avons étudié en profondeur les méthodes de miniaturisation DGS (Structure de Terre Défectueuse) et DMS (Structure de Microstrip Défectueuse), qui ont considérablement amélioré les performances, la compacité et la flexibilité des antennes imprimées. De nouvelles opportunités ont été offertes par ces techniques dans le domaine des communications sans fil, en rendant l'intégration des antennes plus facile dans différentes applications. Cependant, il est essentiel de mener des études supplémentaires afin de relever les défis liés à l'efficacité et à la bande passante des antennes miniaturisées, afin de garantir une connectivité fiable et performante dans les systèmes de communication à venir.

Pour conclure, notre recherche souligne les bénéfices de la technologie 5G et des méthodes de miniaturisation DGS et DMS pour les antennes imprimées. Ces progrès permettent de nouveaux horizons dans le domaine des communications sans fil, favorisant l'élaboration d'antennes plus compactes et performantes. Néanmoins, il est essentiel de mener des études supplémentaires afin d'améliorer l'efficacité et la capacité de ces antennes miniaturisées, afin de satisfaire les demandes croissantes des systèmes de communication contemporaine.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Guangxi Liu, Dacie Jiang «5G Vision and Rééquipements for Mobile Communication System » tolards Year 2016 Article in Chines Journal of Engineering, Publisher April 2016.
- [2] <https://journals.openedition.org/netcom/2869> Consulté le 18 mars 2024.
- [3] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology of Mobile Communication: A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents ET Le Traitement Du Signal 2013.
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G> Consulté le 15 mai 2024
- [5] Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems 2015; page 861-898.
- [6] M. DAHMANE, A. BOUHAFER : «Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G », Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019
- [7] Architecture de réseau 5G. Architecture de cœur, RAN et de sécurité pour la 5G (viavisolutions.com)
- B. SADOU, D. ALQUIDAMI : « Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobile 5G et 6G de nouvelle génération », Université Mohamed Elsedik ibn Yahia, Jijel, 2020.
- [9] 5G IoT | IoT Journey (orange.com) Consulté le 15 mai 2024
- [10] M. AZZEDINE, M .Yahiaoyu : « Architecture et transmission de l’information dans les réseaux radio-mobile 5G », Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [11] Avantages, dangers : voici les réponses aux 5 questions les plus posées à propos de la 5G sur Google (radiofrance.fr).
- [12]6G : guide complet sur la sixième génération de réseau sans fil (objetconnecte.com)
- [13] Boris MORET. « Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée », Université de Bordeaux, 5 octobre 2017.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [14] ww.objetconnecte.com/6g-guide-complet/ Consulté le 15 mai 2024
- [15] Odile Picon et Coll. : « Les Antennes Théorie, conception et application », Paris, 2009.
- [16] IEEE Stander Definition of Terms for Antennas. IEEE STD 145-1993. IEEE Press 1993.
- [17] A.Hafiane, « Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences Finies et extraction du modèle électrique », Université de Marne la vallée, Thèse de doctorat, 2003.
- [18] F.T Ulaby, « Fundamentals of Applied Electromagnetic », Prentice Hall, 1999.
- [19] 6G : guide complet sur la sixième génération de réseau sans fil (objetconnecte.com)
- [20]. K.R. Carver and J. W. Mink « Microstrip Antenna technology » IEEE Trans. AntennasPropagat, Vol AP-29, PP2-24, JAN 1981
- [21] H. A. Wheeler, “Fundamental Limitations of Small Antennas,” Proc. IRE, vol. 35, no. 12, pp. 1479–1484, Dec. 1947.
- [22] H. A. Wheeler, “The Radiansphere around a Small Antenna,” Proc. IRE, vol. 47, no. 8, pp. 1325–1331, Aug. 1959.
- [23] A. D. Yaghjian and S. R. Best, “Impedance, bandwidth, and Q of antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 4, pp. 1298–1324, Apr. 2005.
- [24] R. M. Fano, “Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances,” J. Frankl. Inst., vol. 249, no. 2, pp. 139–154, Feb. 1950..
- [25] Panagiotis Blanos, National Technical University of Athens, University of Parts, “Miniaturization of Implantable Antennas for Medical Applications”, June 2013.
- [26] T. Arab « Etude Des Matériaux Composites (Titanate Oxyde) : Application Pour Réalisation Des Substrats D'antenne Miniatures » Magister, Faculté de Technologie.

- [27]. M. Terborch, A. El Amri, H. Terchoune, et O. Barrou, « A compact microstrip patch antenna based on fractal geometry on the ground plane », en 2018 International Conference of Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), Marrakech, avr. 2018, p. 1-8, doi: 10.1109/COMMNET.2018.8360245
- [28] D.NAIMA, C.DOUNYAZED, Application de la technique de miniaturisation dans la conception des systèmes microstrip à GSD, 2019 /2020 pages 22-27.
- [29] Pierre-Yves Jezequel, « Simulation d'antennes avec CST-MWS », Rapport de Stage, Université de RENNES 1,2006.
- [30]. <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/antenne-omnidirectionnelle/> Consulté le 21 Avril 2024
- [31]. <https://pressbooks.pub/wifispeed/chapter/type-dantenne/> Consulté le 21 Avril 2024
- [32]. Anna Niant. Antennes miniatures et structures électromagnétiques à circuits non-Foster. Matériaux. Université Paris Saclay (Commue), 2017. Français.
- [33]: S. TEBACHE. « MÉTHODE DE CARACTÉRISATION HYPERFRÉQUENCE DES ANTENNES IMPRIMÉES » MAGISTER, FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE, UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER, BISKRA 2013.
- [34]: C. Hamid « Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi. Mai 2012.
- [35] A. Balanis, third Edition, Hoboken, NJ: WileyAntenna theory: analysis and design / Constantine, 2005, ISBN 047166782X (hbk.)
- [36] R. Garg, P. Bhatia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, Inc., Norwood, 2001.
- [37] WONG K. L., "Compact and broadband microstrip antennas", John Wiley Sons, 2002.I
- [38] WONG K. L., YANG K. P., "Compact dual-frequency microstrip antenna with a pair of bent slots," Electron. Lett. 34, 225-226, Feb. 5, 1998