

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'électronique et télécommunications

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par le binôme :

- BOUAKEZ Wafa
- KHEDIRI AIDA

THEME

CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ANTENNE PATCH POUR LES APPLICATIONS DE COMMUNICATION 5G

Présenté et évalué, le 12 /06 /2024, par le jury composé de :

| Nom et prénom | Grade | Qualité |
|---------------------------|--------------|----------------|
| Mme. AOUCHE Chaima | MCB | Présidente |
| M. FERROUJJI Karim | MCB | Rapporteur |
| M. NEZZARI Hassene | MCA | Examineur |

Promotion : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



DEDICACE

Louange à Allah, qui nous a comblés de gratitude et de reconnaissance. Par Sa grâce, je regarde aujourd'hui un rêve longtemps attendu devenir une réalité dont je suis fier. Et maintenant, avec l'aide d'Allah le Tout-Puissant, j'achève cette œuvre modeste....

Je dédie ce travail :

A mon père

à celui qui a orné mon nom des plus beaux titres, qui m'a soutenu sans limites et m'a donné sans contrepartie, à celui qui m'a appris que la vie est une lutte et que son arme est la science et la connaissance, à celui qui a semé dans mon âme les nobles vertus, mon premier soutien dans mon parcours, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu, à ma fierté et mon honneur,

A ma mère

à celle pour qui Dieu a fait du paradis le sol sous ses pieds, qui m'a embrassé avec son cœur avant ses mains et a facilité les épreuves avec ses prières, au cœur tendre et à la bougie qui a été pour moi dans les nuits sombres la source de ma force et de mon succès, et la lampe de mon chemin, à l'éclat de ma vie,

A mes sœurs

*à mon inspirateur de succès, à ceux qui ont renforcé mon bras par leur présence et qui ont été pour moi des sources dont je m'abreuve, à la crème de mes jours et à la prunelle de mes yeux à ma grande sœur **Amal**, ma compagne dans toutes mes affaires, que tu restes pour moi un soutien et ma chère **Sirine**, et ma petite **Chifa**, à tous ceux qui ont été une aide et un soutien sur ce chemin, aux amis fidèles... aux compagnons des épreuves et des crises, à ceux qui m'ont comblée de leurs sentiments et de leurs conseils sincères à vous tous mon amour.*

*À l'amie des moments et non des années, partenaire de ce travail... À celle qui a toujours été un appui pour toutes les chutes, je suis reconnaissante d'être avec toi et pour ton soutien... Ma chère **Aïda**.*

BOUAKEZ WAJA





Sans la volonté de Dieu, je n'aurais pas pu accomplir cela. Louange à Dieu au début et à la fin.

Je dédie ce succès à :

A mon père

A celui qui a orné mon nom des plus beaux titres, Mon premier enseignant depuis ma naissance, l'homme qui a voulu me voir réussir un jour - que Dieu ait son âme-

A ma mère

Mon paradis, la femme la plus rayonnante qui m'a constamment soutenue et inspirée. Elle a été présente dans mes moments de fragilité et de résilience, m'a guidée vers l'âge adulte et façonnée en femme. Elle m'a facilité les difficultés par ses prières Je te suis redevable de mon parcours jusqu'ici. Puisse Dieu préserver ta présence parmi nous.

A ma sœur et mes frères

*Ma sœur **Dounia Zed** et mes frères **Chams Eddine** et **Anouar**, ceux qui encouragent mes succès et nourrissent mes ambitions, qui ont écarté de mon chemin tous les obstacles, semant la confiance et la détermination en moi, et à mon pilier et mon épaulé sur laquelle je me suis toujours appuyé ils sont mes compagnons*

*A ma belle-sœur **safa** et mon beau-frère **Mohamed** qui m'ont souhaité bonne chance*

*A mes chères petites-filles : **Zaïneb, Mayson, Rouaa Yakout.***

*A la mémoire de ma tante et ma deuxième maman **Gazala hachichi**; qui nous a quittée voilà 8 mois.*

A toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien, qui ont formulé des vœux pour ma réussite, m'ont entouré de leurs prières et ont célébré avec moi mes moments de bonheur.

*À l'amie des moments et non des années, partenaire de ce travail... À celle qui a toujours été un appui pour toutes les chutes, je suis reconnaissante d'être avec toi et pour ton soutien... Ma chérie **Wafa.***

Aida KHEDIRI





REMERCIEMENT

La louange et la gratitude soient rendues à Allah pour nous avoir accordé le courage et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

*Vraiment, nous ne pouvons pas trouver des mots suffisants pour exprimer notre gratitude envers notre superviseur, **Dr. FERROUDJI KARIM** pour son bon traitement, son soutien, son aide, ses conseils et sa disponibilité constante tout au long de ce travail.*

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont eu l'honneur d'examiner notre travail.

Nos remerciements au responsable de notre département d'électronique et télécommunication.

Nous souhaitons sincèrement remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.



Liste des tableaux

Chapitre I : Les antennes

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Les différents matériaux de substrat..... | 15 |
| Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des antennes patches | 19 |

Chapitre II : La technologie 5G

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Résumé des générations de communication mobile..... | 23 |
| Tableau II.2 : Principales caractéristiques des domaines d'utilisation de la 5G | 25 |

Chapitre III : Conception et Optimisation D'antenne Patch

| | |
|--|----|
| Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne initiale | 39 |
| Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne après adaptation..... | 43 |
| Tableau III.3 : Paramètres de l'antenne patch avec adaptation et optimisation | 45 |
| Tableau III.4 : Résultats de simulation de l'antenne de 28GHz | 48 |
| Tableau III.5 : Résultats de comparaisons d'antenne II et d'antenne III à la fréquence résonance 28 GHz | 52 |
| Tableau III.6 : Gain maximal pour les fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz | 55 |
| Tableau III.7 : Résultats de comparaisons d'antenne II et d'antenne IV à la fréquence résonance 28 GHz | 60 |
| Tableau III.8 : Résultats finaux des performances des antennes | 60 |

Liste des figures

Chapitre I : Les antennes

| | |
|---|----|
| Figure I. 1: Bande passante d'une antenne..... | 7 |
| Figure I.2 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne..... | 8 |
| Figure I.3 : Types de polarisation | 10 |
| Figure I.4 : Représentation de l'angle d'ouverture..... | 10 |
| Figure I. 5 : Antenne cornet..... | 11 |
| Figure I. 6 : Exemples d'antennes filaires..... | 12 |
| Figure I. 7 : Exemples d'antennes à ouverture rayonnante | 12 |
| Figure I. 8 : Exemple d'Antennes à réflecteurs..... | 13 |
| Figure I.9 : Structure de base d'une antenne imprimée..... | 13 |
| Figure I.10 : Différentes formes d'élément rayonnant..... | 14 |
| Figure I.11: Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire..... | 15 |
| Figure I.12 : Techniques d'alimentation | 16 |
| Figure I.13 : Alimentation avec Sonde coaxiale | 17 |
| Figure I.14 : Alimentation par Ligne micro-rubane | 17 |
| Figure I.15 : Alimentation par couplée par ouverture | 17 |
| Figure I.16 : Alimentation par couplée par proximité..... | 18 |
| Figure I.17 : Alimentation par guide d'ondes coplanaire | 18 |

Chapitre II : La technologie 5G

| | |
|---|----|
| Figure II. 1: Evolution des générations mobiles | 22 |
| Figure II. 2: Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation..... | 25 |
| Figure II. 3: Bandes de fréquences de 5G..... | 26 |
| Figure II. 4: Techniques utilisées dans la technologie 5G | 27 |
| Figure II.5 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques)..... | 28 |
| Figure II.6 : La petite cellule..... | 29 |
| Figure II.7: MIMO Massive..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figure II.8 : Technologie Beamforming | 30 |
| Figure II.9 : Technologie full duplex | 31 |
| Figure II.10 : Comparaison entre 4G et 5G..... | 32 |
| Figure II.11 : Les diverses applications de la 5G..... | 32 |

Chapitre II : Conception et Optimisation D'antenne Patch

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Géométrie de l'antenne patch..... | 38 |
| Figure III.2 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch sans adaptation..... | 40 |
| Figure III.3 : Effet de variation de la largeur de la ligne d'alimentation | 41 |
| Figure III.4 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour $w_f = 1.4m$ | 41 |
| Figure III.5 : Géométrie de l'antenne initiale avec ligne quart-d'onde | 42 |
| Figure III.6 : Antenne patch avec une section d'adaptation d'un quart de longueur d'onde | 42 |
| Figure III.7 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch adaptée avec ligne quart d'onde..... | 43 |
| Figure III.8 : S_{11} en fonction de la variation des dimensions de patch L_p et W_p | 44 |
| Figure III.9 : Coefficient de réflexion S_{11} pour $L_p = 4.22mm$ et $W_p=3.18mm$ | 45 |
| Figure III.10 : Coefficient de réflexion S_{11} et la bande passante de l'antenne patch 28GHz | 46 |
| Figure III.11 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR) d'antenne patch de 28GHz | 46 |
| Figure III.12 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 28GHz (a) 2D (b) 3D..... | 47 |
| Figure III.13 : Géométrie d'antenne de base avant l'étude paramétrique..... | 48 |
| Figure III.14 : Représentation de Coefficient de Réflexion en (dB) de nouvelle antenne..... | 49 |
| Figure III.15 : Variation des valeurs de L_{best} , X_{slot} et Y_{slot} et leur effet sur le coefficient de réflexion | 50 |
| Figure III.16 : Géométrie de l'antenne III avant et après l'étude paramétrique | 50 |
| Figure III.17 : Coefficient de réflexion S_{11} en (dB) de l'antenne sur HFSS | 51 |
| Figure III. 18 : VSWR en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne sur HFSS..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figure III.19 : Comparaisons entre la bande passante d'antenne II avec la bande passante d'antenne III..... | 52 |
| Figure III.20 : Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne III pour les fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz..... | 55 |
| Figure III.21 : Géométrie d'antenne de base sans et avec fente | 56 |
| Figure III.22 : Variation des valeurs de R1 et leur impact sur le coefficient de réflexion..... | 56 |
| Figure III.23 : Géométrie de l'antenne IV après l'étude paramétrique..... | 57 |
| Figure III.24 : Représentation des Coefficients de Réflexion en (dB) de l'antenne sur HFSS | 57 |
| Figure III.25 : VSWR en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne sur HFSS | 58 |
| Figure III.26 : Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne IV pour la fréquence 28 GHz | 58 |

Liste des symboles et abréviations

| | |
|--------------|---|
| S_{11} | coefficient de réflexion |
| Z_c | impédance caractéristique de la ligne |
| TOS | Taux d'onde stationnaire |
| ROS | Rapport d'Onde Stationnaire |
| VSWR | Voltage Standing Wave Ratio |
| TOS | Taux d'onde stationnaire |
| ROS | Rapport d'Onde Stationnaire |
| L | longueur |
| W | largeur |
| h | épaisseur |
| $\tan\delta$ | tangente des pertes |
| ϵ_r | permittivité relative |
| CPW | coplanar wave guide |
| 1G | 1 ^{ère} génération |
| 2G | 2 ^{ème} génération |
| 3G | 3 ^{ème} génération |
| 4G | 4 ^{ème} génération |
| 5G | 5 ^{ème} génération |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| CDMA | accès multiple par division de codage |
| MMS | Service de Messagerie Multimédia |
| DVB | diffusion vidéo numérique |
| LTE | Long-Term Evolution |
| QoS | Qualité de Service |
| ITU | Union internationale des télécommunications |
| SFR | Société Française du Radiotéléphone |
| UHF | Ultra Haute Fréquence |
| eMBB | Enhanced Mobile Broadband |
| URLLC | Ultra-Reliable Low Latency Communication |
| mMTC | massive Machine Type Communications |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| BS | station de base |
| TDD | domaine temporel |
| FDD | domaine fréquentiel |
| IoT | l'Internet des objets |
| HFSS | High Frequency Structures Simulators |
| f_r | Fréquence de résonance |
| 2D et 3D | Deux et trois dimensions |

Résumé

De nos jours, avec la généralisation des systèmes de communication sans fil et la nécessité croissante de miniaturiser les antennes pour les intégrer dans de petits objets fonctionnant à des fréquences UHF élevées. De plus, optimiser les performances de ces antennes, notamment en termes d'adaptation d'impédance, de bande passante, de gain, etc., constitue un défi majeur.

Notre travail vise principalement à concevoir une antenne patch adaptée aux systèmes de communication de cinquième génération. Dans ce contexte, nous avons développé une antenne miniature fonctionnant à une fréquence de résonance de 28 GHz, en nous appuyant sur un modèle classique de patch rectangulaire. Pour y parvenir, nous avons utilisé des techniques d'ajustement et d'amélioration afin d'atteindre les performances optimales. Une analyse paramétrique a été réalisée pour déterminer les paramètres les plus influents en vue de satisfaire les exigences spécifiques. Nous avons pris en compte l'impact des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante, le coefficient de réflexion et le gain. À cette fin, nous avons employé l'outil de simulation électromagnétique du logiciel HFSS pour le développement. Les résultats obtenus ont démontré de bonnes performances pour les antennes que nous avons conçues.

Abstract

Nowadays, with the widespread use of wireless communication systems and the growing need to miniaturize antennas to integrate them into small objects operating at high UHF frequencies. Moreover, improving the performance of these antennas, including impedance matching, bandwidth, gain, and other parameters, presents a significant challenge.

Our work primarily aims to design a patch antenna suitable for fifth-generation communication systems. In this context, we have developed a miniature antenna operating at a resonance frequency of 28 GHz, based on a classic rectangular patch model. To achieve this, we employed adjustment and enhancement techniques to reach optimal performance. A parametric analysis was conducted to determine the most influential parameters to meet specific requirements. We considered the impact of the antenna's geometric parameters on resonance frequency, bandwidth, reflection coefficient, and gain. For this purpose, we utilized the electromagnetic simulation tool in the HFSS software for development. The results obtained demonstrated good performance for the antennas we designed.

ملخص

في الوقت الحالي، مع تعميم أنظمة الاتصال اللاسلكي والحاجة المتزايدة لتصغير الهوائيات لدمجها في أجهزة صغيرة تعمل على ترددات UHF مرتفعة، علاوة على ذلك، فإن تحسين أداء هذه الهوائيات، بما في ذلك ملاءمة المقاومة وعرض النطاق والكسب والمعايير الأخرى، يمثل تحديًا كبيرًا.

يهدف عملنا في المقام الأول إلى تصميم هوائي مربع متوافق مع أنظمة الاتصال الجيل الخامس. في هذا السياق، قمنا بتطوير هوائي صغير الحجم يعمل عند تردد انقطاع 28 جيجا هرتز، باعتماد نموذج مربع مستطيل تقليدي للهوائي. لتحقيق ذلك، استخدمنا تقنيات التكيف والتحسين لتحقيق أفضل الأداء. تم إجراء تحليل معلمي لتحديد العوامل الأكثر تأثيرًا من أجل تحقيق المتطلبات الخاصة. لقد اعتبرنا تأثير العوامل الهندسية للهوائي على ترددها الترددي، وعرض النطاق الترددي، ومعامل الانعكاس، والريخ. لهذا الغرض، استخدمنا أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية في برنامج HFSS للتطوير. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أداءً جيدًا للهوائيات التي قمنا بتصميمها.

Sommaire

| | |
|--|------|
| REMERCIEMENT | III |
| Liste des tableaux | IV |
| Liste des figures..... | V |
| Liste des symboles et abréviations | VIII |
| Résumé..... | IX |
| Abstract | IX |
| ملخص..... | X |
| Sommaire | XI |
| <i>INTRODUCTION GENERALE</i> | 1 |

CHAPITRE I : LES ANTENNES

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 5 |
| 2. Caractéristique d'antennes..... | 5 |
| 2.1. Impédance d'entrée | 5 |
| 2.2. Coefficient de réflexion..... | 6 |
| 2.3. Taux d'onde stationnaire (TOS)..... | 6 |
| 2.4. Bande passante | 7 |
| 2.5. Diagramme de rayonnement..... | 7 |
| 2.6. Gain | 9 |
| 2.7. Directivité..... | 9 |
| 2.8. Polarisation..... | 9 |
| a. Polarisation linéaire | 9 |
| b. Polarisation elliptique..... | 10 |
| 2.9. Angle d'ouverture d'une antenne | 10 |
| 2.10. Rendement..... | 10 |
| 3. Types des antennes | 11 |
| 3.1. Antennes cornets | 11 |
| 3.2. Antennes filaires..... | 11 |
| 3.3. Antennes à ouverture rayonnante | 12 |
| 3.4. Antennes à réflecteurs | 12 |
| 4. Antennes imprimées | 13 |
| 4.1. Structure d'une antenne imprimée..... | 13 |
| 4.1.1. L'élément rayonnant..... | 14 |
| 4.1.2. Le substrat | 14 |
| a. Types de substrat | 14 |
| 4.1.3. Plan de masse | 15 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4.2. | Principe de fonctionnement d'une antenne patch..... | 15 |
| 4.3. | Techniques d'alimentation des antennes patch..... | 16 |
| 4.3.1. | Alimentation par contact (sonde ou ligne micro-ruban)..... | 16 |
| 4.3.1.1. | Alimentation avec Sonde coaxiale | 16 |
| 4.3.1.2. | Alimentation par Ligne micro-rubane | 17 |
| 4.3.2. | Alimentation sans contact (couplage électromagnétique par ligne ou fente)..... | 17 |
| 4.3.2.1. | Alimentation par couplage par fente (ouverture)..... | 17 |
| 4.3.2.2. | Alimentation par couplée par proximité..... | 18 |
| 4.3.2.3. | Alimentation par guide d'ondes coplanaire | 18 |
| 4.4. | Domaine d'application des antennes imprimées | 18 |
| 4.5. | Avantages et inconvénients des antennes imprimées : | 19 |
| 5. | Conclusion..... | 19 |

CHAPITRE II : LA TECHNOLOGIE 5G

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introduction..... | 21 |
| 2. | Historique | 21 |
| 3. | Évolution des communications mobiles..... | 22 |
| 4. | Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles 5G..... | 23 |
| 4.1- | Historique | 23 |
| 4.2- | La cinquième Génération (5G)..... | 24 |
| 4.3- | Principe et objectifs de la 5G..... | 24 |
| 4.4- | Domaines d'utilisation de la 5G..... | 25 |
| 4.5- | Bandes de fréquences pour la 5G..... | 26 |
| 4.6- | Types de modulation dans la 5G | 26 |
| 4.7- | Techniques exploitées dans la 5G | 27 |
| 4.7-1. | Ondes millimétrique | 27 |
| 4.7-2. | Les microcellules (Small cells) | 28 |
| 4.7-3. | Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) | 29 |
| 4.7-4. | Beamforming (filtrage spatial) | 30 |
| 4.7-5. | Mode Full-duplex | 31 |
| 4.8- | Comparaison entre 4G et 5G | 31 |
| 4.9- | Domaines d'applications de la 5G..... | 32 |
| 4.10- | Applications des antennes imprimées dans la 5G | 33 |
| 4.11- | Avantages et inconvénients de la 5G..... | 34 |
| A. | Avantage..... | 34 |
| B. | Inconvénients..... | 34 |
| 5. | Conclusion..... | 35 |

CHAPITRE III : CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ANTENNE PATCH

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 37 |
| 2. Conception d'antenne patch 28Ghz..... | 37 |
| 2.1. Cahier des charges..... | 37 |
| 2.2. Géométrie de l'antenne initiale (Antenne I) | 37 |
| 3. Adaptation de l'antenne initiale..... | 40 |
| 3.1. Effet de variation de la largeur de la ligne d'alimentation | 40 |
| 3.2. Adaptation de l'antenne initiale par ligne quart d'onde (Antenne II) | 42 |
| 3.2.1. Etude paramétrique de l'antenne avec adaptation : | 44 |
| 3.3. Résultat après l'étude paramétrique d'antenne..... | 45 |
| 3.3.1. Coefficient de réflexion S11 | 46 |
| 3.3.2. Le rapport d'onde stationnaire VSWR en fonction de fréquence..... | 46 |
| 3.3.3. Diagramme de rayonnement en 2D et 3D | 47 |
| 4. Améliorer d'antenne de base (antenne III) | 48 |
| 4.1. Antenne patch avec plan de masse partiel (antenne III : antenne large bande) | 48 |
| 4.1.1. Coefficient de réflexion (Antenne III)..... | 49 |
| 4.1.1.1. Etude paramétrique (effets de l'élimination des fentes dans le plan de masse) : ... | 49 |
| 4.1.1.2. Résultat de Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (Antenne III)..... | 51 |
| 4.1.1.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne III pour les fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz, 30 GHz : | 53 |
| 5. Antenne patch avec fente (antenne IV : amélioration du gain) | 56 |
| 5.1. Etude paramétrique (impact de l'élimination de fente dans le patch)..... | 56 |
| 5.2. Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (Antenne IV) | 57 |
| 5.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne IV pour les fréquences 28 GHz . | 59 |
| 5.4. La présentation globale des antennes | 60 |
| 6. Conclusion..... | 61 |
| <i>CONCLUSION GENERALE</i> | 63 |
| <i>ANNEXE</i> | 65 |
| <i>RÉFÉRENCES</i> | 76 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La demande croissante de ressources et l'augmentation du nombre de connexions ont engendré une utilisation plus exigeante des services, tant pour les utilisateurs que pour les objets interagissant via diverses applications. La 5G, dernière génération de communications mobiles, est conçue pour relever ces défis tout en ouvrant de nouvelles perspectives. Elle promet des débits de données plus élevés, une latence réduite, une fiabilité accrue et une densité de connexions supérieure. De plus, elle facilite de nouvelles applications comme la réalité virtuelle et augmentée, les véhicules autonomes, les villes intelligentes et les dispositifs de santé connectée, tout en permettant la création et l'intégration de nouveaux réseaux [12].

Le présent mémoire vise à approfondir l'étude de la conception et de l'optimisation d'antennes patch pour les applications de communication 5G. Cette technologie d'antenne, largement privilégiée dans les réseaux sans fil en raison de sa compacité, de son faible coût et de sa facilité de fabrication, offre un potentiel considérable pour répondre aux exigences spécifiques de la 5G. Les antennes patch se distinguent également par leur grande flexibilité de conception, les rendant ainsi adaptées à une variété d'applications. Notre attention se porte particulièrement sur la conception d'antennes 5G en utilisant le logiciel HFSS (High-Frequency Structural Simulator).

Dans ce mémoire, nous aborderons en détail les principes fondamentaux de conception d'antennes patch, en mettant l'accent sur les exigences spécifiques imposées par les applications de communication 5G. Nous explorerons les différentes architectures d'antennes patch ainsi que les techniques d'optimisation utilisées pour améliorer leurs performances en termes de bande passante, d'adaptation, et de gain. Le mémoire est structuré en trois chapitres, chacun examinant des aspects clés de la conception d'antennes 5G par le biais de HFSS.

Chapitre I posera d'abord les bases en présentant des généralités sur les antennes. Nous examinerons les principes fondamentaux des antennes, leurs différentes classifications ainsi que leurs caractéristiques et types. Une attention particulière sera également accordée aux antennes patch, en décrivant leur structure, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leurs applications.

Chapitre II se concentrera sur la technologie 5G, l'évolution des réseaux de communication mobile et nécessité de passer à la cinquième génération, en couvrant ses principes, ses objectifs, ses domaines d'utilisation, ses bandes de fréquences, ses types de modulation, ses techniques et ses applications, jetant ainsi les bases nécessaires pour comprendre les développements ultérieurs de la 5G dans ce mémoire.

Introduction générale

Chapitre III représente la partie principale de ce mémoire, où notre focalisation se porte sur la conception, l'adaptation et l'amélioration et la simulation des antennes patch dédiées aux applications de communication 5G, réalisées à l'aide du logiciel HFSS. Nous procéderons à une analyse minutieuse des performances de ces antennes patch, en mettant particulièrement l'accent sur des aspects tels que la fréquence de résonance, le gain, les diagrammes de rayonnement et d'autres caractéristiques essentielles.

Enfin, ce mémoire se propose de présenter des études de cas et des applications concrètes illustrant l'importance et l'efficacité des antennes patch optimisées pour les réseaux de communication 5G. En combinant des approches théoriques et pratiques, cette recherche vise à contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la conception d'antennes pour les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

CHAPITRE I :
LES ANTENNES

1. Introduction

Une antenne est un transducteur, c'est-à-dire un circuit qui convertit l'énergie d'une forme à une autre. Plus précisément, une antenne permet de transformer une énergie électromagnétique guidée en une énergie électromagnétique rayonnée et vice versa.

L'antenne est souvent définie comme une structure associée à la région de transition entre un circuit de guidage et une onde (l'espace libre). En d'autres termes, une antenne peut recevoir une puissance électrique fournie par un générateur et l'émettre dans l'espace environnant sous forme d'onde électromagnétique (émission). Cependant, elle peut également capturer des ondes électromagnétiques et fournir une puissance électrique à une charge (réception). Dans un système de communication sans fil, l'antenne occupe toujours soit la position initiale dans la chaîne de réception, soit la position finale dans la chaîne d'émission.

Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. En sens inverse, une antenne de réception a la capacité de capter la puissance rayonnée et de la convertir en puissance électromagnétique guidée [1].

L'objectifs de ce chapitre est définit les notions générales sur les antennes, les déférentes caractéristiques utilisée, les types d'antenne. Une attention particulière est accordée aux antennes imprimées, en examinant leurs propriétés et leur structure, le principe de fonctionnement et les déférents types d'alimentation.

2. Caractéristique d'antennes

2.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est essentielle pour adapter l'antenne au générateur qui l'alimente, ou en réception afin d'assurer une transmission optimale de la puissance entre l'alimentation et l'antenne [2].

L'impédance de l'antenne $Z_{entrée}$ représente l'impédance à l'entrée de celle-ci. Elle est représentée par :

$$Z_{entrée} = R_{entrée} + jX_{entrée} \quad (1.1)$$

$Z_{entrée}$: Impédance d'entrée d'antenne.

$R_{\text{entrée}}$: Résistance d'antenne.

$X_{\text{entrée}}$: Réactance d'antenne.

2.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est équivalent au paramètre S_{11} de la matrice de dispersion, une antenne peut être analysée comme un quadripôle [3].

Le coefficient de réflexion représente le rapport entre l'onde réfléchie à l'entrée de l'antenne et l'onde incidente. Cette grandeur est directement reliée à l'impédance caractéristique et à l'impédance d'entrée, conformément à la relation suivante :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{\text{entrée}} - Z_c}{Z_{\text{entrée}} + Z_c} \quad (1, 2)$$

Où :

$Z_{\text{entrée}}$: impédance d'entrée de l'antenne.

Z_c : impédance caractéristique de la ligne.

Condition d'adaptation :

$$Z_{\text{entrée}} = Z_c \quad \rightarrow \quad S_{11} = 0$$

En décibels, le coefficient de réflexion est exprimé par :

$$S_{11} = 20 \log (|\Gamma|) \quad (1, 3)$$

2.3. Taux d'onde stationnaire (TOS)

Le coefficient de réflexion et le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS), également connu sous le nom de Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) en anglais, expriment tous deux l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. En cas d'adaptation imparfaite, une partie de l'onde réfléchie se combine avec l'onde incidente pour former une onde stationnaire unique. Le ROS ou VSWR est défini comme le rapport entre les valeurs maximales et minimales de l'amplitude de cette onde stationnaire. Cette grandeur peut également être exprimée à partir du coefficient de réflexion selon l'expression [4] :

$$\text{ROS} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1, 4)$$

2.4. Bande passante

La bande passante représente la gamme de fréquences où le coefficient de réflexion reste en dessous d'un seuil spécifique ($S_{11} < -10$ dB), à condition que le diagramme de rayonnement demeure constant dans cette plage. Cela indique que l'antenne est bien adaptée au circuit et présente donc une faible perte due à la désadaptation [5].

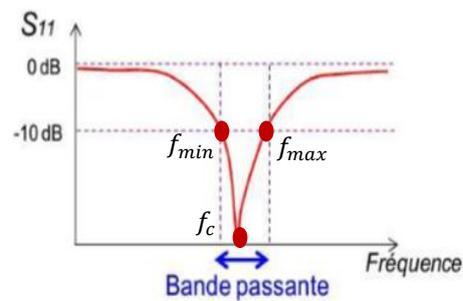


Figure I. 1: Bande passante d'une antenne.

La bande passante est donnée par :

$$BP(\text{GHz}) = f_{max} - f_{min} \quad (1, 5)$$

Il est souvent intéressant de calculer la bande passante fractionnaire (en %) et elle est donnée par :

$$BP (\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \times 100 \quad (1, 6)$$

Où :

- f_{max} : la fréquence maximale.
- f_{min} : la fréquence minimale.
- f_c : la fréquence centrale.

2.5. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement illustre les fluctuations de la puissance émise par l'antenne dans différentes directions de l'espace. L'orientation où la puissance émise est maximale est désignée comme l'axe de rayonnement de l'antenne [6]. Bien que le diagramme

de rayonnement soit défini en trois dimensions, son comportement peut être généralement décrit avec deux diagrammes planaires.

- Le motif horizontal montre l'intensité du champ en fonction de l'angle azimutal ϕ avec un θ fixe (généralement $\theta = 90^\circ$).
- Le motif vertical montre l'intensité du champ en fonction de θ pour un angle fixe ϕ (généralement $\phi = \pm 90^\circ$ ou $0^\circ / 180^\circ$) [5].

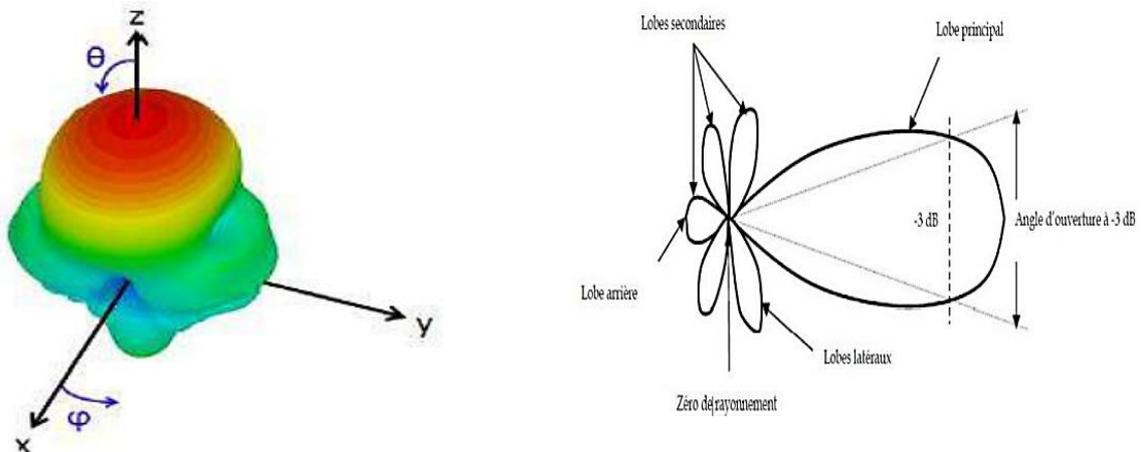


Figure I.2 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

- **D'un lobe principal :** C'est le lobe de rayonnement qui contient l'énergie maximale et la direction maximale du rayonnement.
- **Des lobes secondaires :** Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent les directions nocives du rayonnement de l'antenne. Le niveau du lobe latéral est généralement exprimé comme le rapport de la densité de puissance du lobe au lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau du lobe latéral, exprimé en dB.
- **D'un lobe arrière (rayonnement arrière):** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée (à 180°) du lobe principal, le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport celle rayonnée dans la direction opposée. Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les niveaux de lobes secondaires [7].

2.6. Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope P_a . à condition que les puissances d'alimentation soient les même [7].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a/4\pi} \quad (1, 7)$$

Le gain peut être exprimé en fonction de la directivité, mesurée en dB (décibels par rapport à une antenne isotrope).

$$G = \eta D \quad (1, 8)$$

Où η est le rendement de l'antenne. Si le rendement de l'antenne est égal à 100% ($\eta = 1$), la

Directivité sera égale au gain de l'antenne

2.7. Directivité

Pour les antennes ayant des composantes de polarisation orthogonales, la directivité partielle pour une polarisation spécifique dans une direction donnée est définie comme « la fraction de l'intensité de rayonnement correspondant à cette polarisation, divisée par l'intensité totale de rayonnement moyennée sur toutes les directions ». [8].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{P_r/4\pi} = \frac{4\pi \cdot U(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (1, 9)$$

$U(\theta, \varphi)$ = intensité de rayonnement (W / unité d'angle solide).

P_r = puissance rayonnée de la source isotrope (W).

2.8. Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par l'orientation du champ électrique qu'elle émet. Elle est caractérisée par le type de polarisation d'onde qu'elle transmet dans une direction donnée et dans la zone lointaine. L'état de polarisation de l'onde rayonnée par une antenne peut être linéaire, circulaire ou elliptique :

a. Polarisation linéaire

Dans ce cas, le champ électrique oscille dans une seule direction. On peut avoir une polarisation verticale (oscillation verticale) ou horizontale (oscillation horizontale).

b. Polarisation elliptique

Le champ électrique tourne autour de l'axe de propagation. On distingue deux sens de rotation : horaire et antihoraire.

c. Polarisation circulaire

C'est une combinaison de polarisation linéaire et circulaire. L'ellipse décrit le chemin parcouru par le champ électrique.

L'état de polarisation d'une antenne est essentiel pour assurer une communication efficace, car il influence la réception des ondes par d'autres antennes et dispositifs. Il est important de choisir la polarisation appropriée en fonction de l'application et de l'environnement de déploiement.

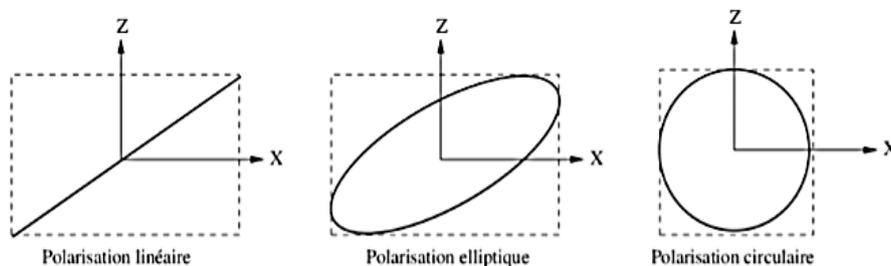


Figure I.3 : Types de polarisation.

2.9. Angle d'ouverture d'une antenne

Est l'angle pour lequel la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable est à la moitié.

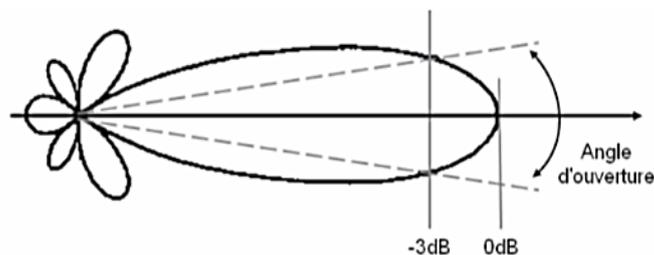


Figure I.4 : Représentation de l'angle d'ouverture.

2.10. Rendement

Le rendement d'une antenne se définit comme le rapport entre la puissance rayonnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance d'alimentation P_a . il a lié à la résistance de pertes.

$$\eta = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (1, 10)$$

3. Types des antennes

Les antennes se classent en différentes catégories selon leur géométrie, leur gain, la direction de leur faisceau et leur bande passante.

Ainsi, On peut les classer comme suit :

- Les antennes cornets,
- Les antennes filaires,
- Les antennes à ouvertures rayonnantes,
- Les antennes à réflecteur,

3.1. Antennes cornets

L'antenne cornet employée en hyperfréquence est une ouverture émissive alimentée par un guide ou un monopôle. Elle se caractérise par sa grande directivité et son gain élevé. On rencontre également les antennes à fente, composées de réseaux de fentes émissives constituées de dipôles ouverts sur un guide. Elles sont relativement simples à mettre en œuvre et deviennent de plus en plus répandues, notamment dans le domaine des radars utilisés pour la surveillance maritime.

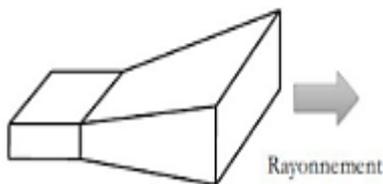


Figure I.5 : Antenne cornet.

3.2. Antennes filaires

Les antennes à fils sont parmi les plus répandues. Elles sont utilisées pour diverses transmissions : sur des véhicules, des bâtiments, des bateaux, des avions... etc. Elles se déclinent en plusieurs types, tels que le dipôle à fil rectiligne, en boucle ou en hélice, parmi

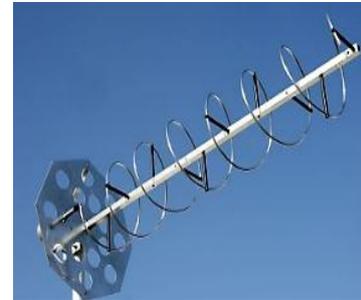
les plus courants. Il est également possible de combiner ces différentes formes de base pour créer une antenne unique. Le dipôle est souvent privilégié comme antenne de référence dans les systèmes de radiocommunication mobile. En effet, il s'agit du type le plus simple.



Fil rectiligne (dipôle)



Boucle circulaire



Hélice

Figure I.6 : Exemples d'antennes filaires.

3.3. Antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante sont plus récentes que les antennes conventionnelles. Leur adoption est motivée par les transmissions à des fréquences plus élevées. En raison de leur facilité d'installation, ces antennes sont largement répandues dans le domaine de l'aviation. Elles peuvent être revêtues d'un matériau diélectrique pour les protéger contre les variations imprévisibles de l'environnement.



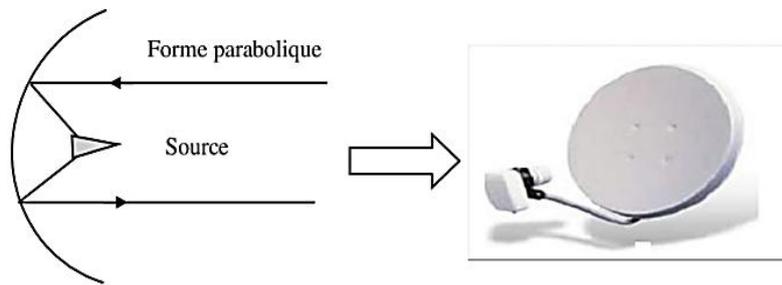
Guide d'onde rectangulaire

Figure I.7 : Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.

3.4. Antennes à réflecteurs

Ces dispositifs d'antenne comprennent principalement une source émettrice projetant un signal vers une surface réfléchissante. Ces antennes trouvent leur utilité principalement dans les applications de communication spatiale nécessitant des liaisons sur de vastes distances,

s'étendant parfois sur plusieurs millions de kilomètres. Le réflecteur parabolique demeure le modèle le plus répandu de cette catégorie d'antennes.



Antenne de réflecteur parabolique.

Figure I.8 : Exemple d'Antennes à réflecteurs.

4. Antennes imprimées

L'antenne imprimée, également appelée antenne patch, est un type récent d'antenne de plus en plus couramment utilisé. Elle est composée d'un diélectrique (substrat) avec un plan de masse métallique sur une face. De l'autre côté, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface (patch) qui génèrent le rayonnement électromagnétique.

4.1. Structure d'une antenne imprimée

La structure de base est rappelée sur la figure I.9

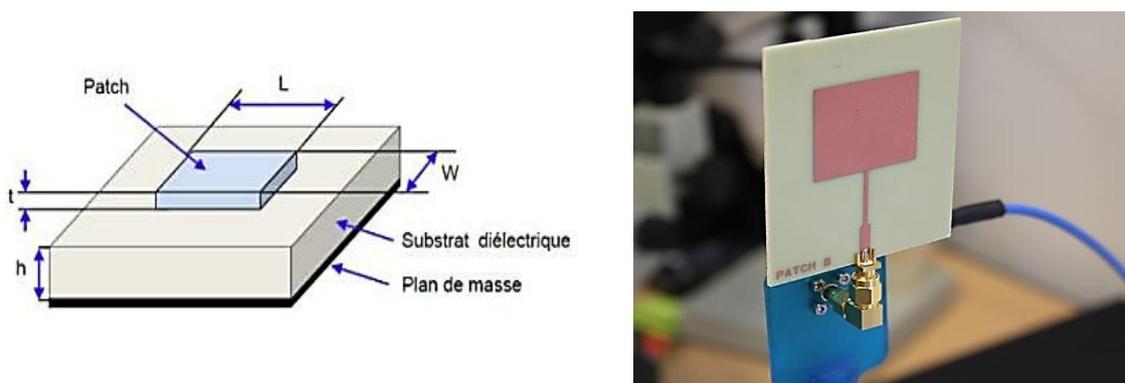


Figure I.9 : Structure de base d'une antenne imprimée.

Les caractéristiques physiques et géométriques associées à cette structure comprennent:

- Les dimensions de l'élément rayonnant en termes de longueur et de largeur (L , W) ;

- L'épaisseur h du diélectrique (qui doit être inférieure à la longueur d'onde à transmettre ;
- La tangente des pertes ($\tan\delta$) dans le substrat, principalement dues aux pertes diélectrique ;
- La permittivité relative du substrat (ϵ_r) ;

4.1.1. L'élément rayonnant

L'élément rayonnant, également appelé patch, est généralement conçu à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre, l'argent ou l'or. Sa forme peut varier considérablement, et le choix du matériau dépend du type d'application souhaité et des paramètres à optimiser, tels que la bande passante, la puissance rayonnée et le gain.

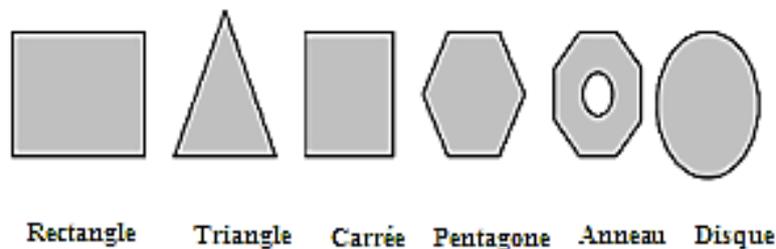


Figure I.10: Différentes formes d'élément rayonnant.

4.1.2. Le substrat

Un substrat diélectrique, est constitué d'un matériau isolant. Sa faible épaisseur par rapport à la longueur d'onde et sa permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$) en font un élément essentiel dans la conception des antennes imprimées.

Parmi les rôles du substrat diélectrique : Amélioration de la puissance rayonnée et optimisation de la bande passante de l'antenne.

a. Types de substrat

Ce tableau présente quelques exemples sur différents matériaux de substrat avec leurs caractéristiques :

| Substrat | Constante diélectrique relative (ϵ_r) | Pertes diélectrique $\tan \delta$ | L'épaisseur h |
|-----------------------|--|-----------------------------------|---------------|
| RT-Duroid-5880 | 2.2 | 0.0009 | 0.127 mm |
| Rogers RT/duroid 5880 | 2.2 | 0.0009 | 0.5 mm |
| FR4_epoxy | 4.4 | 0.002 | 1.6 mm |
| RT-Duroid-5870 | 2.33 | 0.0011 | - |
| Rogers RT 5880 | 2.2 | - | - |

Tableau I.1: Les différents matériaux de substrat [9].

4.1.3. Plan de masse

Dans la conception des antennes patchs, le plan de masse est une surface conductrice en cuivre qui recouvre la partie inférieure du substrat. Il est un élément essentiel pour garantir des performances électriques optimales dans ces antennes. Il est judicieux de choisir la méthode de remplissage qui convient le mieux aux besoins de conception. La modification du remplissage de plan de masse entraîne un changement dans les caractéristiques de rayonnement de l'antenne.

4.2. Principe de fonctionnement d'une antenne patch

Dans sa configuration initiale, une sonde de courant est placée entre le patch rayonnant et le plan de masse pour surveiller le comportement de l'antenne, influençant ainsi la répartition de la charge entre le plan de masse et le substrat au-dessus et en dessous de l'élément.

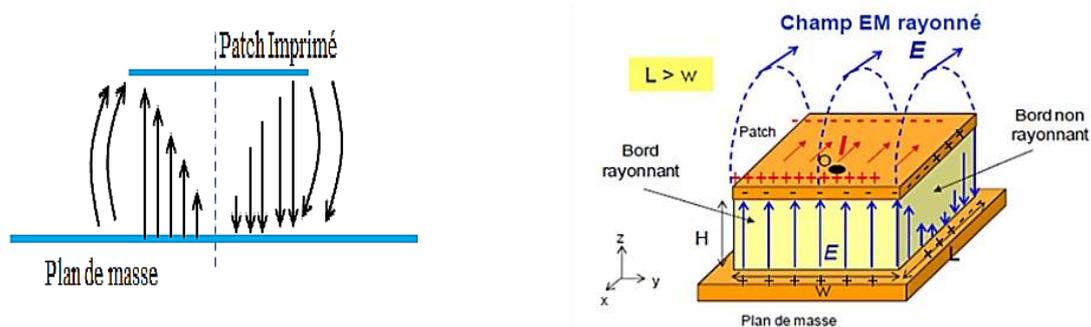


Figure I.11: Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

Entre le bord du patch et le plan de masse, un champ magnétique se forme et déborde, contribuant à générer le champ électromagnétique rayonné. Le champ magnétique maximum est généré par le bord séparé par une distance L , et le champ magnétique de phase opposée s'ajoute de manière constructive, générant un rayonnement dans le plan YZ .

4.3. Techniques d'alimentation des antennes patch

L'alimentation des antennes joue un rôle essentiel dans la conception de ces dispositifs. Elle détermine la manière dont l'antenne est intégrée au système et influe directement sur son rayonnement et ses performances. Pour les antennes imprimées, deux types d'excitation sont couramment utilisés:

1. **Alimentation par contact (sonde ou ligne micro-ruban):** Dans cette méthode, l'énergie est acheminée aux patches rayonnants via un élément de contact tel qu'un câble coaxial ou une ligne micro-ruban.
2. **Alimentation sans contact (couplage électromagnétique par ligne ou fente):** Cette méthode utilise le couplage électromagnétique pour transmettre la puissance de la ligne micro-ruban au patch rayonnant.

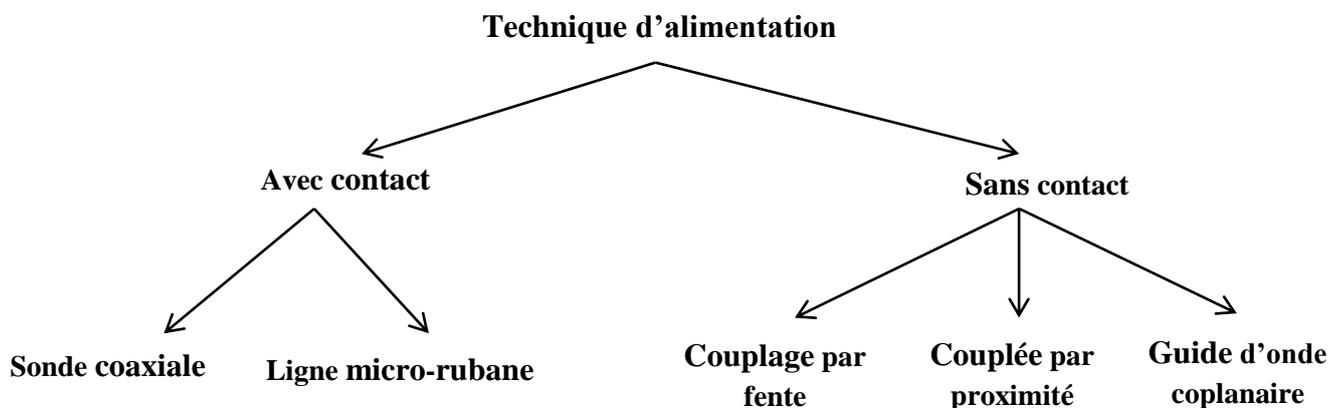


Figure I.12: Techniques d'alimentation.

4.3.1. Alimentation par contact (sonde ou ligne micro-ruban)

4.3.1.1. Alimentation avec Sonde coaxiale

L'alimentation coaxiale, également appelée alimentation par sonde, est une méthode largement reconnue pour alimenter les antennes à plaque. Le conducteur interne du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, tandis que le conducteur externe est connecté au plan de masse (figure I.13).

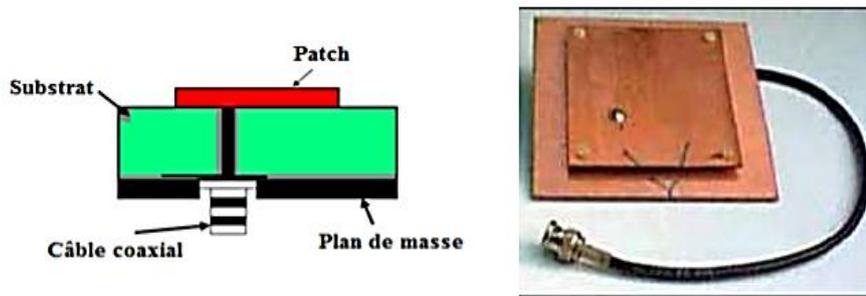


Figure I.13: Alimentation avec Sonde coaxiale.

4.3.1.2. Alimentation par Ligne micro-rubane

Dans ce type d'alimentation alimentaire, la ligne microbande est directement reliée à la plaque microbande Figure (I.14). L'alimentation peut être intégrée au même substrat pour former une structure plane.

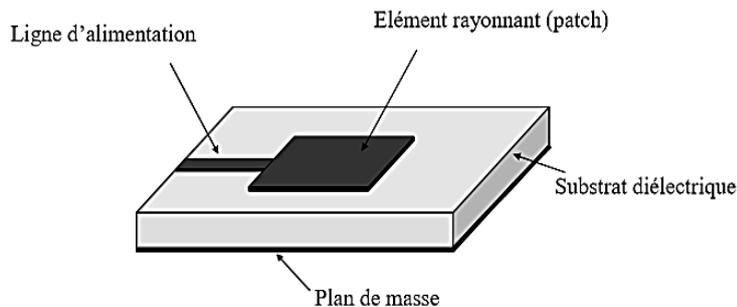


Figure I.14: Alimentation par Ligne micro-rubane.

4.3.2. Alimentation sans contact (couplage électromagnétique par ligne ou fente)

4.3.2.1. Alimentation par couplage par fente (ouverture)

Dans ce type d'alimentation, le patch émetteur et la ligne micro ruban d'alimentation sont séparés par le plan de masse, comme illustré à la figure (I .15). Le lien entre le patch et la ligne d'alimentation est établi par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [10].

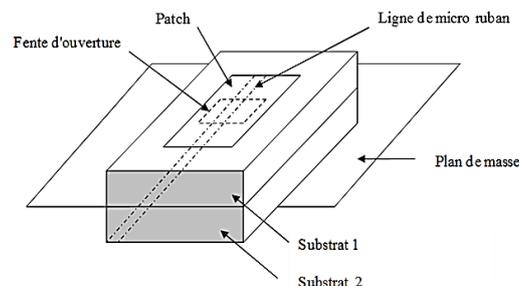


Figure I.15: Alimentation par couplée par ouverture.

4.3.2.2. Alimentation par couplée par proximité

Cette technique d'alimentation est également appelée couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont utilisés, avec la ligne d'alimentation positionnée entre eux et le patch imprimé sur le substrat supérieur, comme illustré à la figure (I.16).

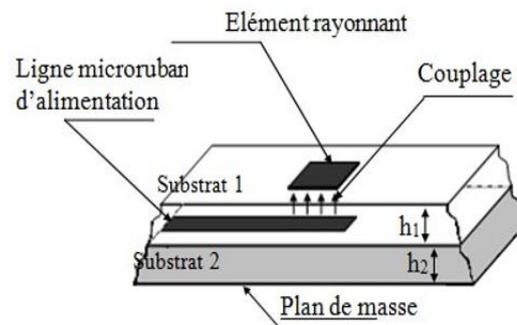


Figure I.16: Alimentation par couplée par proximité.

4.3.2.3. Alimentation par guide d'ondes coplanaire

La structure de l'antenne patch alimentée par une ligne CPW (coplanar wave guide) est plus simple que celle alimentée par couplage via une ouverture. Dans cette antenne, un seul substrat est utilisé ; le patch, élément rayonnant, est situé sur la face supérieure tandis que la ligne CPW est placée sur la face inférieure. Cette disposition facilite l'intégration des dispositifs actifs avec les lignes d'alimentation.

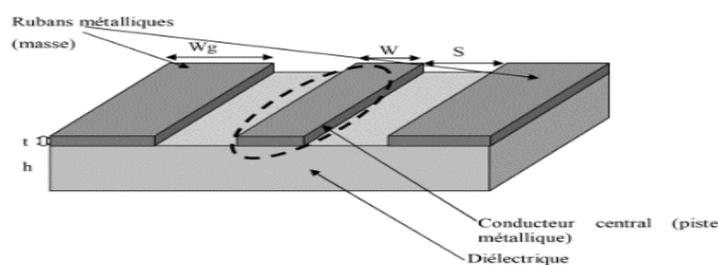


Figure I.17: Alimentation par guide d'ondes coplanaire.

4.4. Domaine d'application des antennes imprimées

Les antennes imprimées trouvent un champ d'application de plus en plus diversifié, englobant notamment :

- La téléphonie mobile,
- Les radars,
- Les communications spatiales,

- La télémétrie et la surveillance des missiles,
- Le guidage et la détection à distance des missiles.

4.5. Avantages et inconvénients des antennes imprimées :

La technologie des antennes imprimées découle de celle des circuits imprimés, ce qui leur confère plusieurs avantages par rapport aux antennes classiques, telles que les cornets et les dipôles filaires:

| Les avantages | Les inconvénients |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Légèreté et compacité • Intégration d'éléments actifs • Robustesse et simplicité • Adaptabilité aux surfaces courbes • Coût de fabrication réduit. • Faible épaisseur et encombrement • Polarisation flexible: | <ul style="list-style-type: none"> • Faible rendement. • Puissance d'émission réduite à obtenir une polarisation pure. • Bande passante limitée (1 à 5 %). |

Tableau I.2: Avantages et inconvénients des antennes patchs.

5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé à aborder les concepts théoriques fondamentaux ainsi que les caractéristiques clés des antennes. Ensuite, nous avons spécifiquement abordé les antennes patch, en examinant les différentes méthodes d'alimentation, ainsi leurs avantages et Inconvénients. Cette recherche est dédiée à la création d'une antenne patch dans la bande des 28 GHz pour les applications de communication de 5G.

CHAPITRE II :
LA TECHNOLOGIE 5G

1. Introduction

Aujourd'hui, le domaine des télécommunications s'est considérablement élargi pour répondre aux demandes croissantes des clients en termes de rapidité, de diversité et de facilité.

La 5G, nouvelle génération des standards de téléphonie mobile, est en train de révolutionner ce secteur. En général, les communications mobiles seront couvertes par une nouvelle tranchée bande passante située entre 6 GHz et 300 GHz. Cette technologie, qui vise de plus en plus la miniaturisation des composants, met en évidence l'importance et l'utilité des antennes imprimées grâce à leur faible poids, leurs formes miniatures et leur coût réduit.

Ce chapitre se penche le principe de la Technologie 5G, les différentes techniques qu'elle utilise, son type de modulation.

2. Historique

En termes simples, un réseau mobile est un système de téléphonie qui fonctionne grâce à des fréquences radio. Il permet à des millions d'utilisateurs de téléphoner en mouvement, sans contrainte d'immobilité. Le premier réseau mis en service était déjà basé sur le concept de motif cellulaire, il définit dans les laboratoires « Bell Labs » au début des années 1970, est essentiel pour les réseaux mobiles. Il permet de réutiliser les ressources du réseau d'accès radio dans des zones géographiques spécifiques appelées cellules. Chaque cellule est associée à une ressource radio (comme une fréquence ou un code) qui ne peut être utilisée que par une cellule suffisamment éloignée pour éviter les conflits d'utilisation.

Le réseau de téléphonie mobile a connu plusieurs évolutions au fil du temps, se distingue en quatre générations :

- **1^{ère} Génération (1G)** : Apparue dans les années 1980, elle reposait sur un système mobile de service vocal analogique.
- **2^{ème} Génération (2G)** : Développée dans les années 1990, la 2G fut le premier système mobile vocal numérique, basé sur l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).
- **3^{ème} Génération (3G)** : Entre le milieu des années 1990 et les années 2000, l'évolution s'est concentrée sur l'accès multiple par division de codage (CDMA).

- **4^{ème} Génération (4G)** : Cette génération, développée en 2010, visait principalement à augmenter le débit de données. Elle a permis des services tels que les messageries multimédias (MMS), la diffusion vidéo numérique (DVB) et une meilleure qualité pour la télévision à long terme. L'évolution (LTE) constitue le principal système 4G, offrant une qualité de service (QoS) supérieure et une meilleure sécurité des données par rapport aux générations précédentes.

3. Évolution des communications mobiles

Lorsque l'on aborde les communications mobiles, on se réfère à la technologie globale, à la vitesse, à la fréquence et au système en utilisant des générations numériques telles que 3G, 4G ou 5G. Chaque génération est caractérisée par des technologies spécifiques qui lui sont propres. L'évolution des générations des technologies de communication sans fil est représentée un intervalle de 10 ans entre les principales générations dans la Figure II.1 et Tableau II.1 [11].

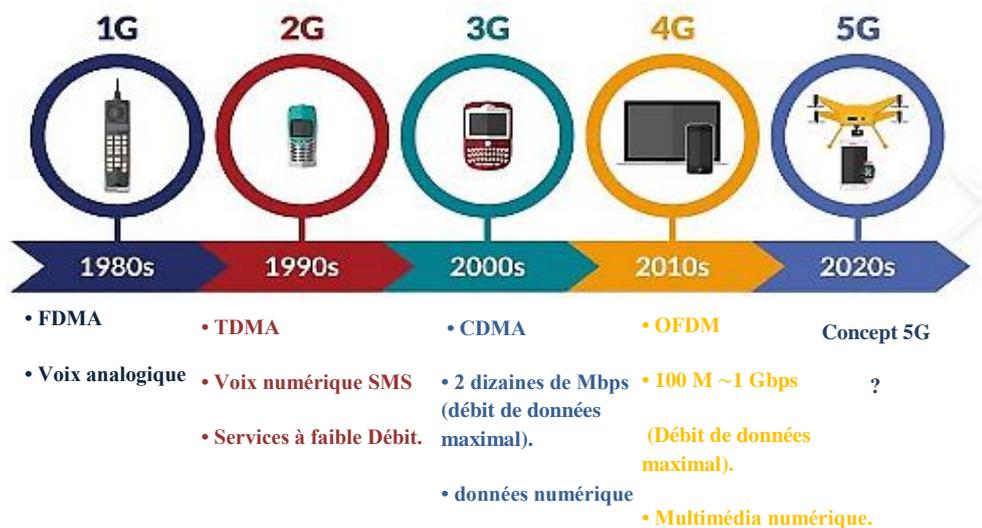


Figure II.1 : Évolution des générations mobiles.

Tableau II.1 synthétise les caractéristiques spécifiques des différentes générations de systèmes de communication mobiles.

| Génération | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|---|--|--|
| 1 ^{ère} Année de Déploiement | 1981 | 1992 | 2001 | 2010 | 2020 |
| Débit de données | 2Kb/s | 64Kb/s | 2Mb/s | 100Mb/s | 10Gb/s |
| Fréquences | 900MHz | 900MHz et 1.8GHz | 800/900MHz 1.7à 1.9GHz 2100MHz | Exemples de (6 GHz à 300 GHz) 800MHz 900MHz 1800MHz 2100MHz 2600MHz | Exemples de (6 GHz à 300 GHz) 28GHz 37GHz 39GHz 64-71GHz |
| Description fonctionnel générale | Téléphones cellulaires analogiques | Téléphones Cellulaires Numériques (GSM/CDMA) | Première bande passante mobile utilisant des Protocoles IP (WCDMA 2000) | Le haut Débit Mobile sur un Standard Unifié (LTE) | Internet Tactile-Améliore Le réseau De Communication M2M |
| Technologie | Analogique | Numérique | Numérique | Numérique | Numérique |
| Latence | 100 ms | 60 ms | 40 ms | 10 ms | 1 ms |

Tableau II.1 : Résumé des générations de communication mobile [12] [13].

4. Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles 5G

4.1- Historique

Chaque génération de réseau a une durée de vie moyenne d'environ 20 ans. Les travaux sur la 4G ont débuté en 2003 et ont été lancés en 2010, se prolongeant jusqu'en 2030.

En ce qui concerne la 5G, son développement a commencé en 2012, et elle a été commercialement déployée en 2020.

4.2- La cinquième Génération (5G)

La 5G, également appelée réseaux mobiles de 5^{ème} génération, regroupe un ensemble de technologies qui marquent la prochaine grande phase des normes de télécommunications mobiles, évoluant à partir des normes actuelles de la 4G LTE (évolution à long terme). Le réseau 5G est validé par l'ITU (Union internationale des télécommunications) en 2020 [14].

La 5G fournir un débit de données très élevé pour un grand nombre d'utilisateurs. Elle doit également prendre en charge plusieurs communications simultanément et permettre le déploiement d'un grand nombre de capteurs. De plus, elle vise à améliorer l'efficacité spectrale du réseau.

4.3- Principe et objectifs de la 5G

Le principe de la 5G est d'utiliser les ondes millimétriques pour transférer rapidement une quantité importante des données, ce qui conduira à une meilleure utilisation de la bande de fréquence (UHF entre 6-300GHZ) ultra-hautes [15].L'objectif de cette nouvelle technologie est basé sur l'augmentation de la capacité et de la vitesse des réseaux par rapport aux générations précédentes, en mettant principalement l'accent sur l'Internet des objets qui nous permet d'avoir un monde complètement connecté.

Parmi les objectifs de la 5G :

- Un débit de 1 Gbps : des débits plus élevés que ceux actuellement disponibles, offrant un accès à Internet haut débit.
- Faible latence : un temps de réponse minimal qui donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Un volume de données (data) très convenable.
- Une antenne peut connecter un nombre de terminaux 100 fois supérieur (connectivité de massive) ; le nombre d'antennes dépend des fréquences utilisées.
- Délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Disponibilité et couverture.
- La durée de vie de la batterie est de 10 ans : moins de consommation et autonomie accrue des batteries.

- Amélioration de la vitesse de transmission des données : le double par rapport à la 4G.

4.4- Domaines d’utilisation de la 5G

L’Union Internationale des Télécommunications (UIT) a défini trois objectifs d'utilisation pour la 5G répartis en domaines : le haut débit mobile amélioré (eMBB), la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC) et la communication massive de type machine (mMTC) (voir figure II.2). Les principales caractéristiques de ces domaines d'application sont résumées dans le tableau II.2.

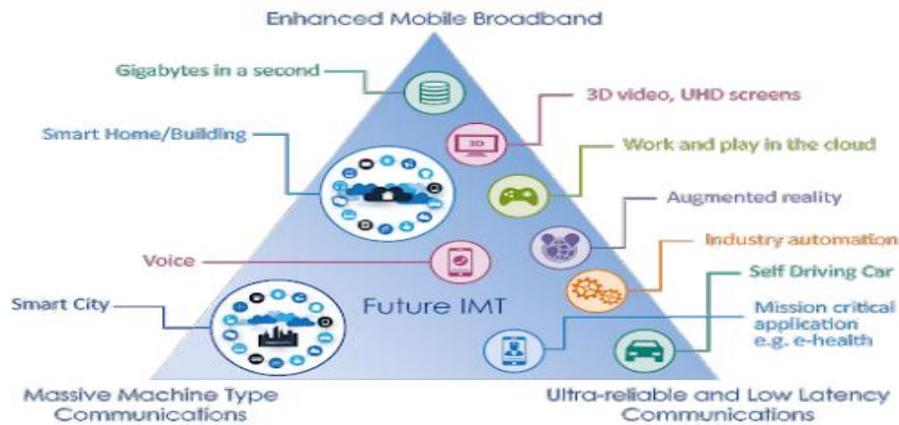


Figure II.2 : Répartition des applications 5G en trois domaines d’utilisation [16].

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

Tableau II.2 : Principales caractéristiques des domaines d’utilisation de la 5G.

4.5- Bandes de fréquences pour la 5G

Afin de répondre à l'augmentation croissante du trafic de données, une bande passante considérablement plus importante est anticipée dans le système 5G. Le choix de la bande de fréquences implique toujours un compromis entre la couverture (définie par la taille de la zone où le service est accessible) et la capacité (mesurée par le débit obtenu). Pour garantir une couverture efficace, les fréquences basses sont privilégiées en raison de leurs bonnes propriétés de propagation. En revanche, pour accroître la capacité et gérer un trafic plus important, les fréquences hautes sont préférables [17].

Pour cette raison, les infrastructures des réseaux mobiles 5G sont structurées en deux gammes distinctes : FR1, qui couvre les bandes sub-6 GHz), certaines étant déjà utilisées par les normes précédentes, et FR2, qui englobe la plage des ondes millimétriques de 24,25 GHz à 52,6 GHz (voir Figure III.3).

Les bandes de fréquences basses demeurent essentielles en raison de leur large couverture géographique dans les réseaux 5G, tandis que les bandes d'ondes millimétriques présentent également un potentiel prometteur pour répondre aux objectifs et exigences de la 5G en matière d'augmentation du débit.

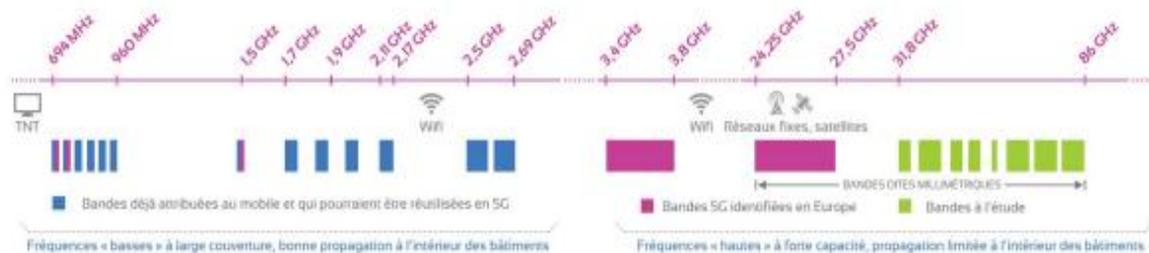


Figure II.3: Bandes de fréquences de 5G [17].

4.6- Types de modulation dans la 5G

Utilisés La transmission des données implique de moduler le signal entre la station de base (BTS) et le terminal, c'est-à-dire de coder l'information avant de l'envoyer sur le canal de transmission. Le multiplexage permet de faire passer plusieurs flux de données sur un même canal de transmission. Depuis les débuts de la téléphonie mobile, différents types de modulation multiplexée ont été utilisés : la 1G utilise la modulation FDMA (Frequency Division Multiple Access), la 2G utilise la TDMA (Time Division Multiple Access), la 3G utilise la CDMA (Code Division Multiple Access) et la 4G utilise l'OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Cependant, la 5G adoptera également l'OFDMA,

similaire à la 4G, mais avec une flexibilité et une souplesse accrues dans le découpage en temps et en fréquence, permettant ainsi de servir des utilisateurs aux besoins très variés [18].

Cette modulation implique la transmission simultanée de signaux sur plusieurs porteuses différentes, ce qui entraîne une forte variabilité des niveaux instantanés en raison d'interférences constructives et destructives.

4.7- Techniques exploitées dans la 5G

Afin de saisir l'impact de la 5G sur les télécommunications, il est essentiel d'analyser les technologies sous-jacentes qui la caractérisent. La 5G se distingue des normes précédentes par l'intégration de multiples technologies clés. Qu'on va décrire brièvement :



Figure II.4: Techniques utilisées dans la technologie 5G.

4.7-1. Ondes millimétrique

Pour comprendre la signification des ondes millimétriques, il est nécessaire de retourner à la définition d'une onde électromagnétique. Bien que l'accent soit souvent mis sur la fréquence en hertz, il est important de se rappeler que les ondes sont principalement définies par leur longueur, représentant la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation lors de sa propagation dans un espace donné. Plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse. Ainsi, les ondes millimétriques sont simplement des ondes ayant une longueur d'onde λ de l'ordre du millimètre, plus courte que les longueurs d'onde en mètres ou en kilomètres utilisées pour les ondes radio.

La bande d'ondes millimétriques est définie comme la partie du spectre électromagnétique s'étendant de 30 à 300 GHz, avec une gamme correspondante de longueurs d'onde de 10 à 1 mm. Historiquement, les fréquences des ondes millimétriques ont été principalement utilisées dans des applications de défense et de radioastronomie, en raison principalement du coût élevé et de la disponibilité limitée des dispositifs électroniques à ces fréquences.

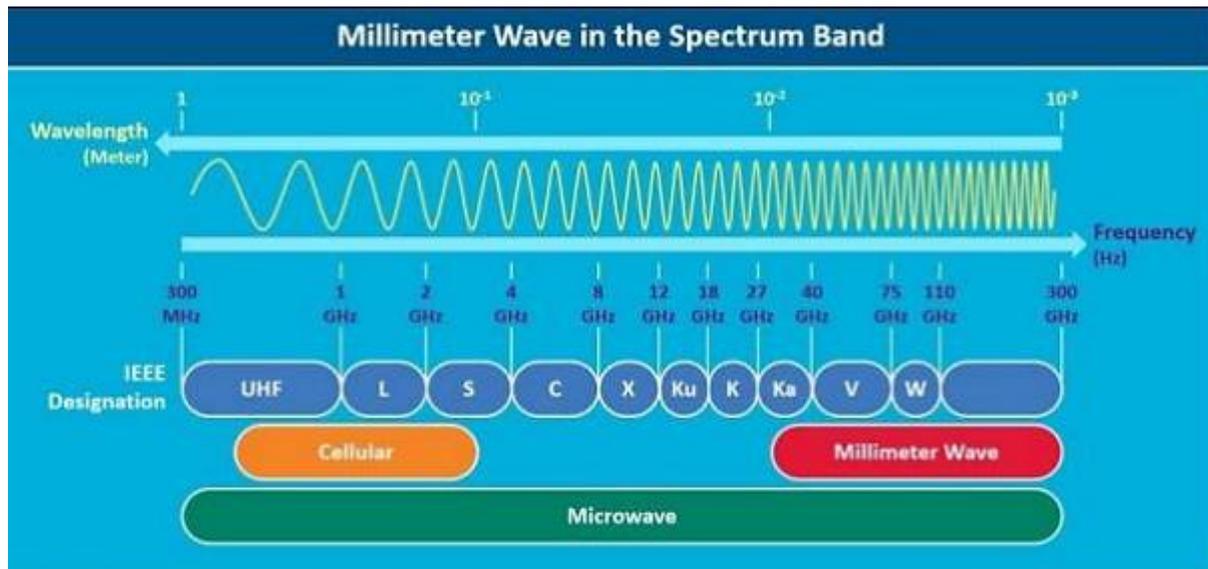


Figure II.5: Spectres des fréquences (ondes millimétriques) [19].

4.7-2. Les microcellules (Small cells)

Les microcellules sont une technologie prometteuse pour les réseaux 4G et 5G, car elles impliquent le déploiement d'un grand nombre de stations de base couvrant des zones géographiques restreintes ainsi que des espaces intérieurs tels que les gares ou les centres commerciaux. Ces microcellules améliorent la couverture et les capacités des réseaux pour répondre à la croissance du trafic de données mobiles, en raison de la multiplication des antennes. Cela permet de réduire le nombre d'utilisateurs connectés à chaque antenne, offrant ainsi des débits plus élevés et une meilleure qualité de service.

Elles jouent un rôle crucial dans la 5G en tant que réponse puissante à la densification du réseau et à la nécessité d'augmenter massivement l'efficacité spectrale ou le débit binaire par unité de surface.

C'est un dispositif qui contribue à l'amélioration de l'efficacité spectrale de la zone d'une part, et à la réduction de la taille de la cellule d'autre part, ce qui entraîne une diminution du nombre d'utilisateurs par cellule. Par conséquent, le rétrécissement des cellules fournit davantage de spectre à chaque utilisateur. En effet, la capacité totale du réseau augmente de manière significative grâce à la réduction des cellules et à la réutilisation du spectre [20].

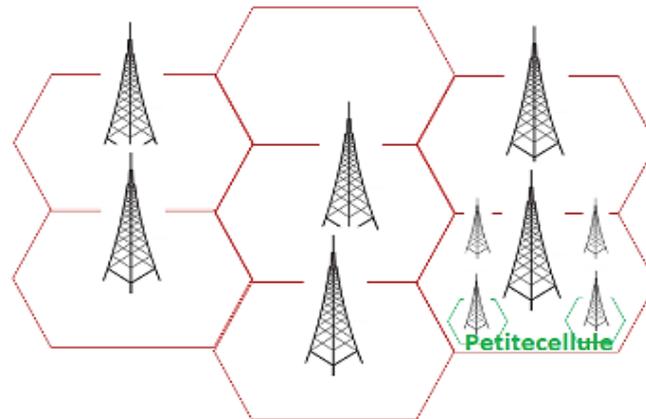


Figure II.6: La petite cellule [21].

4.7-3. Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple Output) repose sur l'utilisation de plusieurs antennes intelligentes pour transmettre simultanément plusieurs flux de données dans les systèmes de communication sans fil [22].

Elle a suscité d'énormes intérêts de recherche ces dernières années. Chaque station de base (BS) utilise plusieurs antennes pour desservir des dizaines d'utilisateurs dans chaque cellule simultanément [23]. Massive MIMO peut offrir les avantages suivants : [24]

- Massive MIMO peut augmenter la capacité du système de 10 fois ou plus et simultanément améliorer l'efficacité énergétique à l'ordre de 100 fois.
- Des composants peu coûteux et de faible puissance peuvent être réalisés dans le système MIMO massive.
- Massive MIMO permet une réduction significative de la latence sur l'interface air.
- Massive MIMO simplifie la couche à accès multiple.

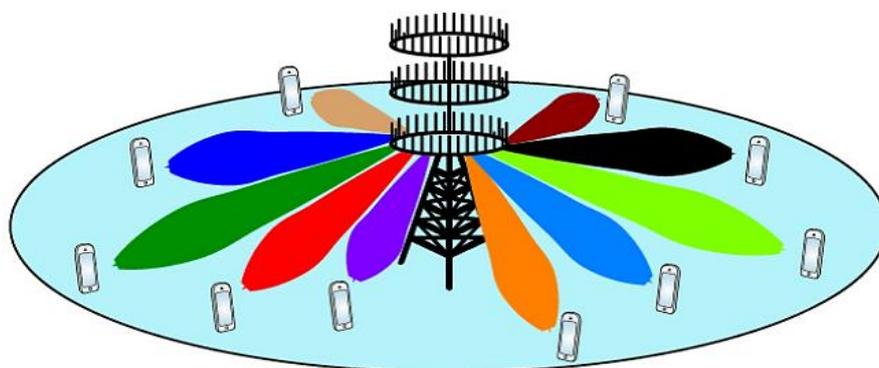


Figure II.7: MIMO Massive [25].

4.7-4. Beamforming (filtrage spatial)

Le beamforming est une technologie réseau qui permet de diriger des faisceaux très ciblés vers les terminaux, ce qui garantit une utilisation plus efficace de l'énergie. Plus précisément, lors de la transmission, la focalisation du faisceau permet de concentrer l'énergie émise par le canal radio vers un récepteur spécifique. En ajustant la phase et l'amplitude des signaux transmis, il est possible d'obtenir une addition constructive des signaux au niveau du récepteur du smartphone ou du terminal, ce qui augmente la puissance du signal reçu et, par conséquent, le débit de l'utilisateur final. De même, lors de la réception, le beamforming assure la capacité de collecter l'énergie du signal provenant d'un émetteur spécifique [26].

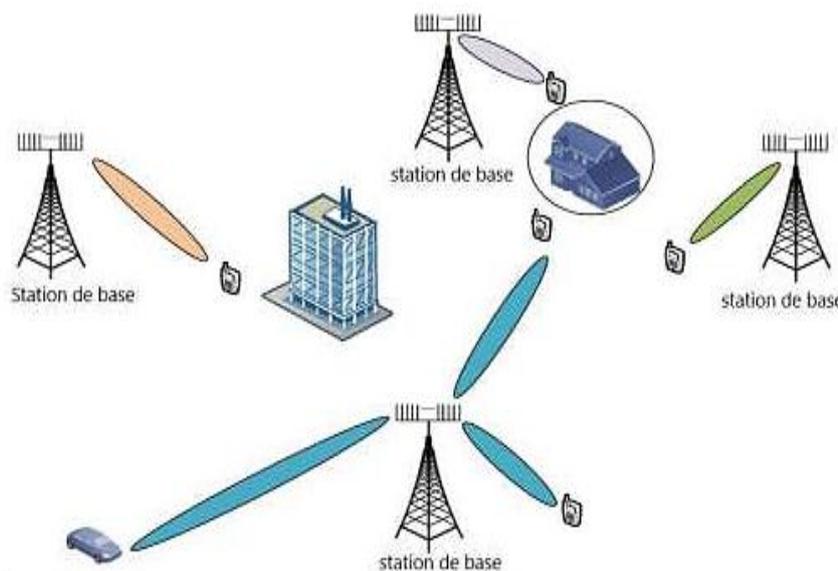


Figure II.8: Technologie Beamforming [27].

Dans les systèmes massifs MIMO, la station de base peut transmettre des données à l'utilisateur via différentes voies, et le beamforming coordonne le déplacement des paquets et le temps d'arrivée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément.

Compte tenu du fait que les ondes millimétriques ne peuvent pas traverser les obstacles et ne se propagent pas sur de longues distances en raison de leur courte longueur d'onde, le beamforming permet l'envoi de faisceaux concentrés vers les utilisateurs. Ainsi, le beamforming permet à un utilisateur de recevoir un signal fort sans interférence avec d'autres utilisateurs et elle aide à augmenter l'efficacité spectrale, et pour les ondes millimétriques, il aide à augmenter le débit de données.

4.7-5. Mode Full-duplex

En général, la transmission et la réception sans fil se font sur des bandes de fréquences différentes pour éviter les interférences. Ainsi, tout système bidirectionnel doit séparer le canal montant et le canal descendant en utilisant soit le domaine temporel TDD, soit le domaine fréquentiel FDD pour obtenir des signaux orthogonaux sans interférences.

Le full duplex désigne la transmission et la réception simultanées sur la même bande de fréquences et au même moment, ce mode permet la transmission et la réception simultanées des données au niveau de la station de base, comme illustré dans la figure II.9. Les réseaux 5G opteront pour le full duplex pour la transmission des signaux, ce qui pourrait potentiellement doubler la capacité du réseau. Cependant, l'un des inconvénients de la technologie full-duplex est qu'elle accroît les interférences du signal avec des échos. Toutefois, ces derniers peuvent être facilement éliminés grâce aux techniques d'égalisation au niveau du récepteur [28].

Le duplexage complet est destiné à permettre la transmission et la réception simultanées d'informations à la même fréquence, au même moment et au même endroit.

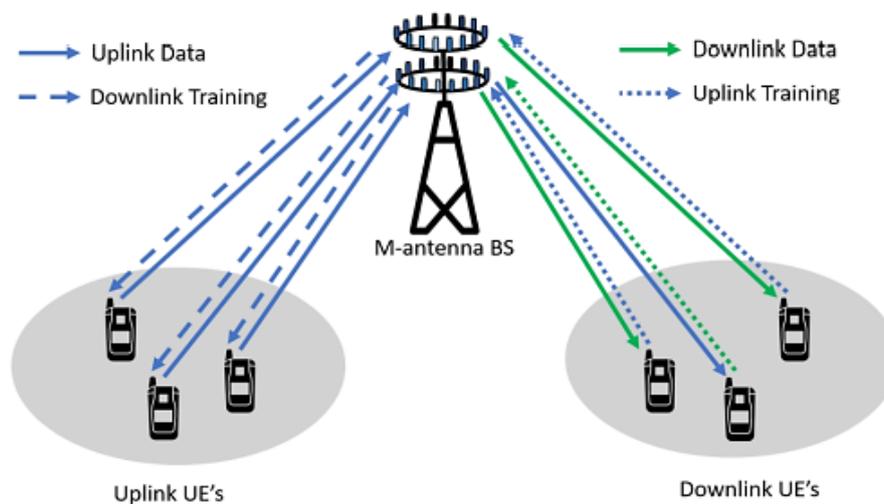


Figure II.9: Technologie full duplex [28].

4.8- Comparaison entre 4G et 5G

La norme 5G apporte des débits encore plus élevés que la 4G, avec la possibilité de garantir ces débits (contrairement à la 4G qui ne garantit qu'un débit maximal possible), ainsi qu'une réduction significative du temps de latence. Le débit maximal atteint 1 Gbit/s pour la 4G et 20 Gbit/s pour la 5G. Les communications sont garanties jusqu'à une vitesse de

déplacement de 350 km/h pour la 4G, tandis qu'elles le sont jusqu'à 500 km/h pour la 5G. De plus, la 5G permet de connecter jusqu'à 10 fois plus d'objets que la 4G.

En ce qui concerne la consommation énergétique, la 5G consomme dix fois moins d'énergie que la 4G pour un volume de données transportées équivalent. Plus globalement, le réseau 5G répond à des enjeux environnementaux, avec un fort potentiel d'économie d'énergie et une meilleure maîtrise de la diffusion des ondes. Les différentes technologies radio de la 5G permettent de réduire la consommation énergétique du réseau et des terminaux. Le fait que la 5G utilise une focalisation plutôt qu'une diffusion des ondes électromagnétiques contribue à mieux maîtriser leurs effets sur les individus et l'environnement environnant.

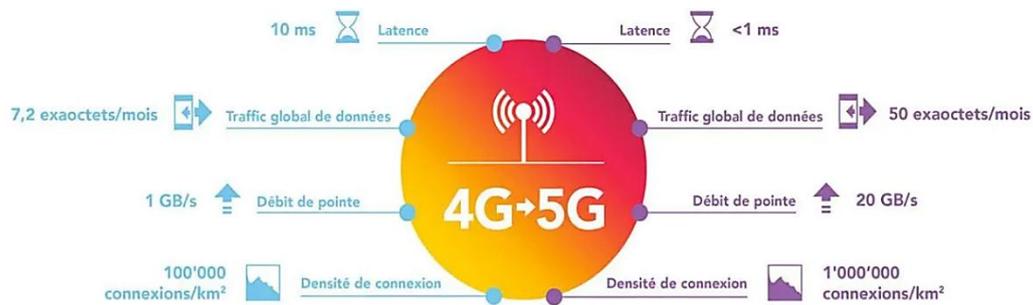


Figure II.10 : Comparaison entre 4G et 5G [29].

4.9- Domaines d'applications de la 5G

La technologie 5G connaît des avancées considérables pour simplifier notre quotidien. En réalité, les performances annoncées de la 5G devraient également impacter de nombreux secteurs et favoriser l'émergence de nouveaux usages. Pour les utilisateurs de Smartphones qui ont besoin d'une grande quantité de données, l'adoption de la 5G permettra le déploiement massif de l'Internet des objets (IoT). Son utilisation peut être particulièrement bénéfique dans des contextes industriels ou pour des applications liées à la santé. Les diverses applications de la 5G sont illustrées dans la Figure II.14.



Figure II.11 : Les diverses applications de la 5G [30].

- **Domaine de la santé :** La 5G ouvre de nouvelles possibilités en santé, comme la téléconsultation pour améliorer la communication entre médecins et patients, la télésurveillance pour permettre le suivi à distance des données de santé, et la téléchirurgie pour réaliser des opérations robotisées dans des salles automatisées [31].
- **Domaine de l'industrie :** La 5G annonce être un catalyseur de la révolution numérique pour l'ensemble des secteurs industriels (automobile, logistique, agriculture, etc.) grâce aux nouveaux usages qu'elle introduit et aux perspectives novatrices qu'elle ouvre en matière de compétitivité. Voici quelques-unes des nouvelles opportunités industrielles créées par la 5G : Surveillance, contrôle et ajustement à distance de machines industrielles et de lignes de production robotisées. Ces équipements peuvent être ajustés rapidement et commodément Gestion logistique intégrale d'un nombre considérable de colis ou d'articles, en particulier dans les centres de tri de grande envergure (par exemple : ports, gares, aéroports, etc.) [31].
- **Domaine du multimédia :** La 5G permettra de bénéficier de vidéos d'une qualité exceptionnelle, de jeux en réseau en temps réel, d'expériences immersives interactives, de streaming à la demande et de l'extension des réseaux sociaux collaboratifs.
- **Domaine des véhicules autonomes connectés :** L'industrie automobile pourrait exploiter ces nouveaux réseaux pour permettre aux véhicules non seulement de prendre des décisions autonomes, mais également de communiquer entre eux avec des délais de réaction adaptés aux exigences des déplacements à grande vitesse [31].

4.10- Applications des antennes imprimées dans la 5G

Avec les recherches continues, les développements et l'utilisation des antennes micro ruban, il est prévu qu'elles remplacent progressivement les antennes classiques dans la plupart des applications. Voici quelques exemples d'applications réussies :

- Télécommunication par satellites.
- Commande et contrôle.
- Équipements portatifs.
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Antennes d'émission utilisées en médecine.
- Récepteurs satellites de navigation.

- Ces antennes micro ruban offrent une polyvalence et une efficacité qui les rendent essentielles dans divers domaines technologiques.

4.11- Avantages et inconvénients de la 5G

A. Avantage

- **Débit :** La 5G va offrir une vitesse nettement supérieure : des débits de 10 Gbit/s par rapport aux 100 Mb/s actuels. Cette vitesse peut être comparée à celle du réseau de fibres standard disponible chez vous à l'heure actuelle.
- **Latence réduite :** Le "latence" désigne le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction.
- **Connectivité massive :** Des utilisateurs pourront être connectés simultanément sans que la vitesse de votre connexion ne soit affectée.
- **Objets connectés :** Tous vos articles de tous les jours pourront être connectés de manière simple et économique au réseau. Cela entraînera une explosion des quantités de données transmises [32].

B. Inconvénients

- **Inquiétudes environnementales de la 5G :**

L'arrivée d'une nouvelle technologie s'accompagne nécessairement de nouveaux équipements... des antennes omniprésentes (jusqu'aux réverbères et aux abribus), des nouveaux téléphones deux fois plus coûteux, des centres de données pour le stockage des informations, bref, des équipements très énergivores à fabriquer.

- **Les dangers de la 5G pour notre santé :**

La 5G pourrait avoir des répercussions sur la santé, suscitant ainsi certaines appréhensions en raison des ondes électromagnétiques et de l'impact sur l'environnement, notamment en raison du nombre d'antennes 5G à déployer.

- **Avoir un téléphone compatible avec le réseau 5G :**

Les smartphones devront être compatibles avec la 5G, tout comme cela s'est passé pour la 4G après son lancement. Les smartphones 5G sont donc disponibles dans les pays ayant déjà lancé le réseau 5G. Le premier smartphone compatible avec la 5G est un Samsung, car la Corée du Sud a été le premier pays à lancer son réseau 5G. Xiaomi a également lancé une version équipée de la technologie 5G, et d'autres Smartphones 5G sortiront d'ici la fin de l'année.

5. Conclusion

Ce chapitre examine les avantages de l'intégration des réseaux 5G pour créer un monde plus intelligent, plus sain et plus confortable grâce aux technologies avancées. La 5G est cruciale pour optimiser les antennes, permettant des débits élevés et des latences réduites. Les antennes doivent évoluer en intégrant des technologies comme le MIMO et les faisceaux directionnels. L'intégration des ondes millimétriques présente des défis nécessitant des solutions innovantes. Ainsi, l'évolution des antennes est essentielle pour exploiter pleinement la 5G et transformer les télécommunications.

CHAPITRE III :
CONCEPTION ET OPTIMISATION
D'ANTENNE PATCH

1. Introduction

Après avoir posé les fondations théoriques et méthodologiques dans les chapitres précédents, nous orientons notre attention dans ce chapitre vers la conception, la simulation et l'optimisation des antennes patch afin de répondre à des exigences spécifiques. Nous utiliserons le logiciel HFSS (High Frequency Structures Simulators) pour cette tâche, Les étapes de la conception sont détaillées dans l'annexe (voir l'annexe).

Nous visons principalement à concevoir une antenne rectangulaire résonante à une fréquence de 28 GHz, en mettant l'accent sur la conception, l'amélioration et la simulation des antennes patch dédiées aux applications de communication 5G.

Ce chapitre est divisé en quatre parties :

- **Antenne I** : Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance de 28 GHz.
- **Antenne II** : Adaptation de l'antenne initiale par ligne quart d'onde.
- **Antenne III**: amélioration d'antenne patch avec plan de masse partiel (antenne large bande).
- **Antenne IV** : Antenne patch avec fente (amélioration du gain).

2. Conception d'antenne patch 28Ghz

2.1. Cahier des charges

Cette partie consiste à réaliser une antenne patch rectangulaire en utilisant le logiciel HFSS avec les caractéristiques suivantes :

- ✓ Type de substrat : Rogers RT/Duroid 5880 avec une permittivité relative de 2,2, tangente de perte diélectrique : $\delta = 0.0009$ et une épaisseur de 0,5 mm.
- ✓ Fréquence de résonance $f_r = 28$ GHz.
- ✓ L'alimentation par ligne micro ruban.
- ✓ L'adaptation à 50 Ohm.

2.2. Géométrie de l'antenne initiale (Antenne I)

La structure de l'antenne choisie est représentée dans la figure I.1. Elle est constituée d'un patch rectangulaire de longueur L_p et de largeur W_p imprimé sur la face supérieure d'un

substrat diélectrique de type Rogers 5880 avec des dimensions de $W_s \times L_s$ et un épaisseur h . Le plan de masse est imprimé sur la face inférieure du substrat et couvre toute sa surface.

La figure III.1 illustre la structure de l'antenne initiale.

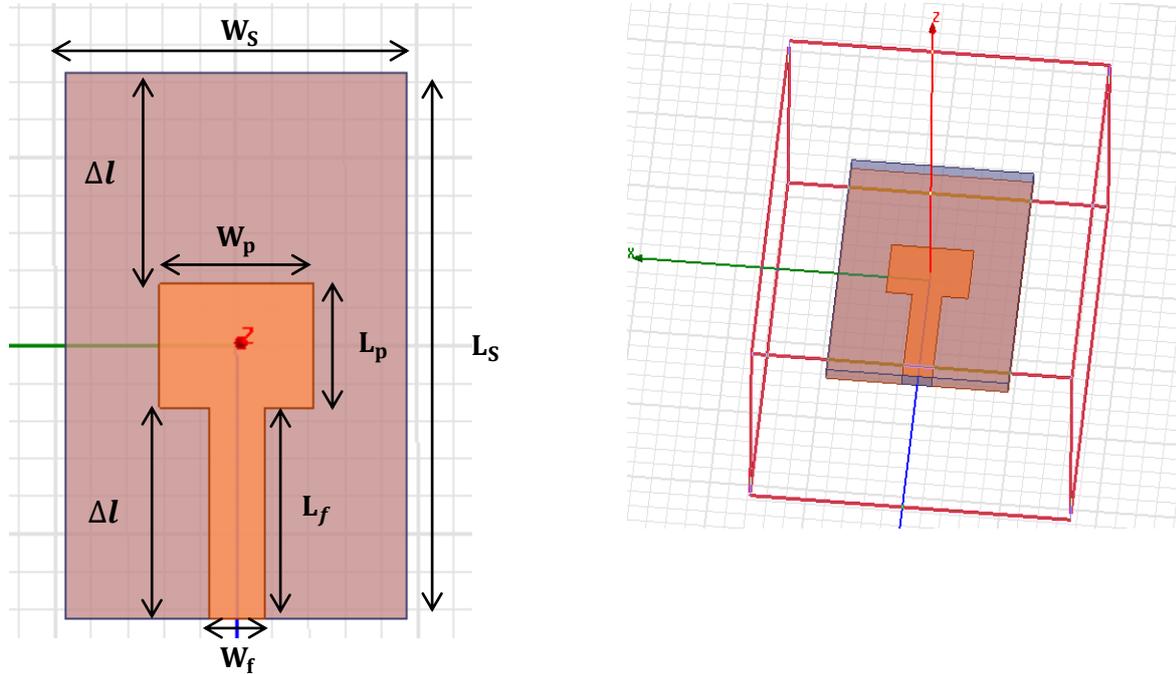


Figure III.1 : Géométrie de l'antenne patch.

Les calculs des dimensions du patch et du plan de masse sont effectués à l'aide d'équations standard disponibles dans la littérature [33].

Les formules suivantes permettent de calculer les dimensions du patch:

Les dimensions du patch ont été étendues sur toute sa longueur à chaque extrémité par une distance Δl comme :

$$\Delta l = 0.42h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.831\right)} \quad (3, 1)$$

La longueur effective du patch L devient maintenant :

$$L_p = l_{eff} - 2\Delta l \quad (3.2)$$

Pour une fréquence de résonance f_r , la longueur effective est donnée par :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta l \quad (3, 3)$$

ϵ_{eff} Est la permittivité effective. Elle donnée par :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(-1) \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3, 4)$$

Pour un rayonnement efficace, la largeur est donnée par :

$$W_p = \frac{c}{2 * f_r} \times \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

Avec :

C : la vitesse de propagation dans le vide ($C = 3 \times 10^{-8}$ m/s).

ε_{eff} : La permittivité effective du substrat.

ε_r : La permittivité relative.

l_{eff} : La longueur effective.

Les valeurs des différents paramètres de l'antenne initiale sont montrées dans le Tableau III.1 :

| | Paramètres de l'antenne | Dimensions (mm) |
|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| substrat | longueur (L_s) | 14.52 |
| | Largeur (W_s) | 9.4 |
| | Epaisseur (H_s) | 0.5 |
| Patch | longueur (L_p) | 3.29 |
| | Largeur (W_p) | 4.24 |
| Alimentation (Feed) | longueur (L_f) | 6.608 |
| | Largeur (W_f) | 1.541 |

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne initiale.

Le coefficient de réflexion (S11) de l'antenne initiale est représenté dans la figure III.2, obtenus par le logiciel HFSS. Ce coefficient de réflexion, mesuré à l'entrée de l'antenne, représente le transfert d'énergie par cette dernière. Sa valeur varie en fonction de la fréquence. En pratique, pour garantir une bonne adaptation dans la bande de fréquence souhaitée, S11 doit être inférieur à -10 dB.

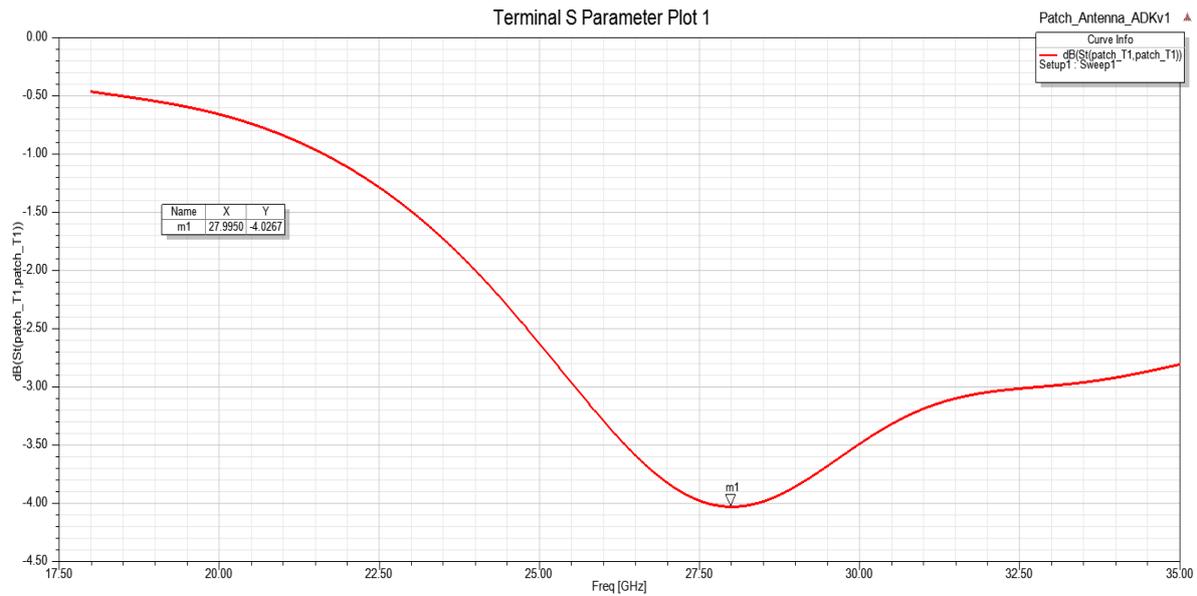


Figure III.2 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch sans adaptation.

Selon les résultats obtenus, le coefficient de réflexion S_{11} atteint une valeur de -4.026 dB à la fréquence de résonance de 28 GHz, dépassant la valeur seuil de -10 dB nécessaire pour une adaptation optimale. Ainsi, l'antenne démontre une mauvaise adaptation à la fréquence souhaitée. Ce résultat souligne la nécessité d'une adaptation appropriée de l'antenne.

3. Adaptation de l'antenne initiale

Dans cette partie nous allons varier quelques paramètres fondamentaux qui caractérisent la géométrie d'une antenne, afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne à la fréquence désirée.

3.1. Effet de variation de la largeur de la ligne d'alimentation

Nous allons ajuster la largeur de la ligne d'alimentation (w_f) dans une plage allant de 1.4 mm à 1.6 mm, avec un pas de variation de 0.01 mm. L'objectif est de déterminer la valeur de w_f qui correspond à la valeur minimale du coefficient de réflexion S_{11} .

La figure III.3 illustre les variations du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes largeurs de la ligne d'alimentation simulée sous HFSS.

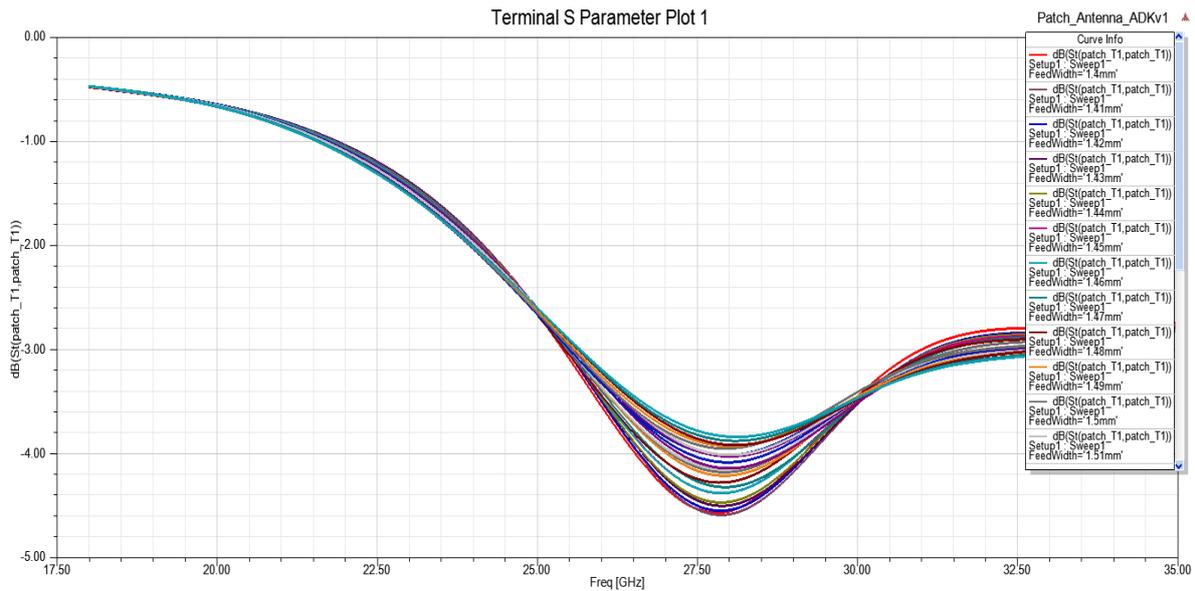


Figure III.3 : Effet de variation de la largeur de la ligne d'alimentation.

D'après cette figure nous remarquons que la valeur $w_f = 1.4\text{mm}$ permet d'obtenir la meilleure valeur pour le coefficient de réflexion S_{11} .

La figure ci-dessous représente le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour la valeur $w_f = 1.4\text{mm}$ de largeur de la ligne d'alimentation.

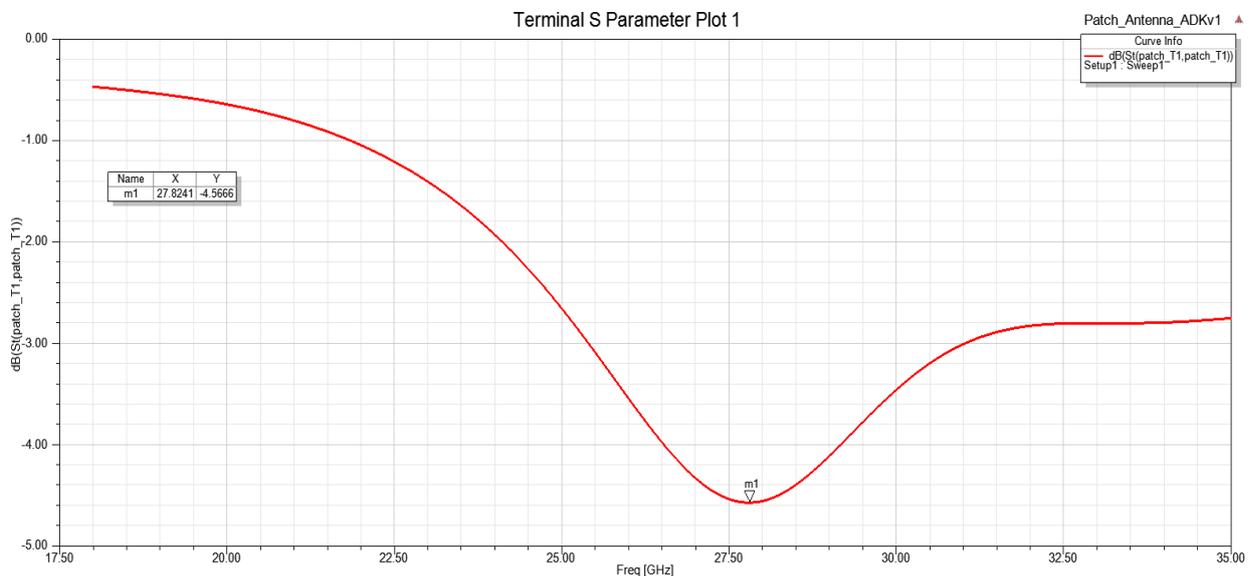


Figure III.4 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour $w_f = 1.4\text{mm}$.

En utilisant une largeur $w_f = 1.4\text{mm}$, une amélioration du coefficient de réflexion S_{11} est remarquée par rapport au cas précédent (de -4.026 dB à -4.56 dB). Mais le S_{11} est toujours supérieur à -10 dB ce qui nécessite une autre méthode d'adaptation.

3.2. Adaptation de l'antenne initiale par ligne quart d'onde (Antenne II)

Parmi les méthodes d'adaptation utilisées pour améliorer l'efficacité de l'antenne, nous avons choisi la technique d'adaptation par ligne quart d'onde (Edge feed). Cette ligne est de dimension $W_e \times L_e$ comme montrer sur le Tableau III.1.

La figure ci-dessous montre l'élaboration initiale de l'antenne avec une ligne quart d'onde.

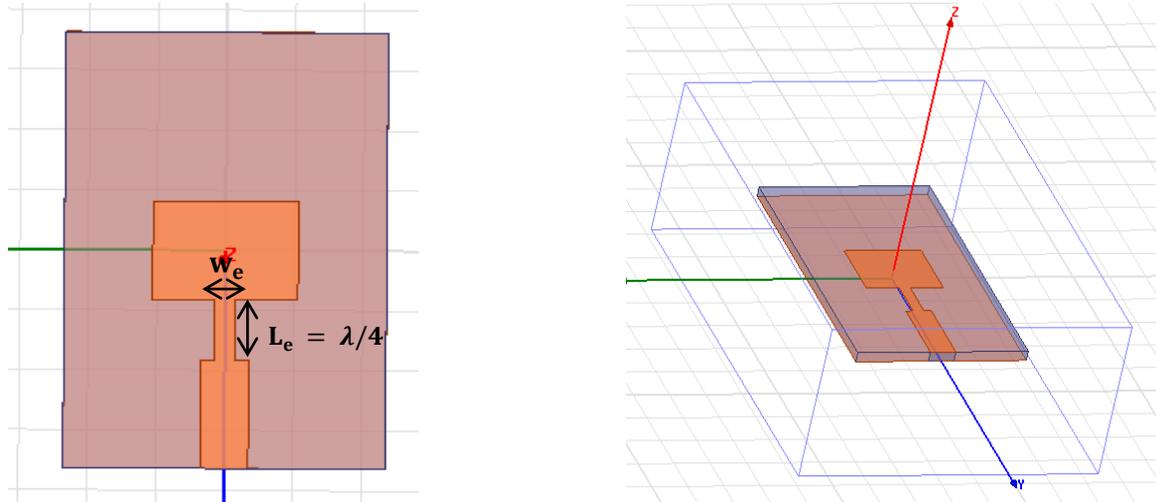


Figure III.5 : Géométrie de l'antenne initiale avec ligne quart-d'onde.

Alimenté par une ligne de transmission d'un quart de longueur d'onde :

Une ligne de transmission d'un quart de longueur d'onde avec une impédance caractéristique Z_1 peut être utilisée pour adapter une antenne microstrip à une ligne de transmission d'une impédance caractéristique Z_0 comme illustré dans la Figure III.6 [13].

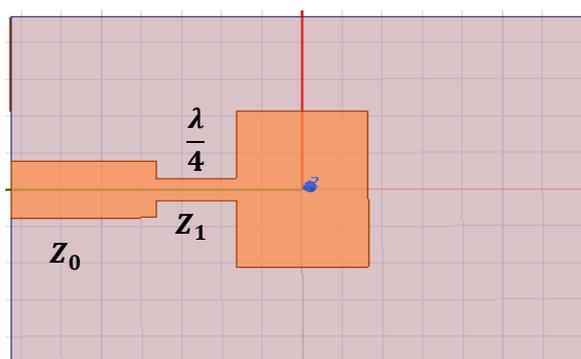


Figure III.6 : Antenne patch avec une section d'adaptation d'un quart de longueur d'onde.

L'objectif est d'adapter l'impédance d'entrée de l'antenne (Z_A) à la ligne de transmission (Z_0), après transformation, l'impédance vue depuis le début de la ligne d'un quart de longueur d'onde devient par [13].

$$Z_{in} = Z_0 = \frac{Z_1^2}{Z_A} \tag{3.6}$$

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 * Z_A} \tag{3.7}$$

Les paramètres géométriques de l'antenne adapté par une ligne quart-d'onde sont regroupés dans ce tableau :

| | Paramètres de l'antenne | Dimensions (mm) |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Ligne quart d'onde (Edge feed) | longueur (L_e) | 2.007 |
| | Largeur (W_e) | 0.599 |
| Alimentation (Feed) | longueur (L_f) | 3.608 |
| | Largeur (W_f) | 1.4 |

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne après adaptation.

La figure III.6 montre le coefficient de réflexion de l'antenne avec adaptation.

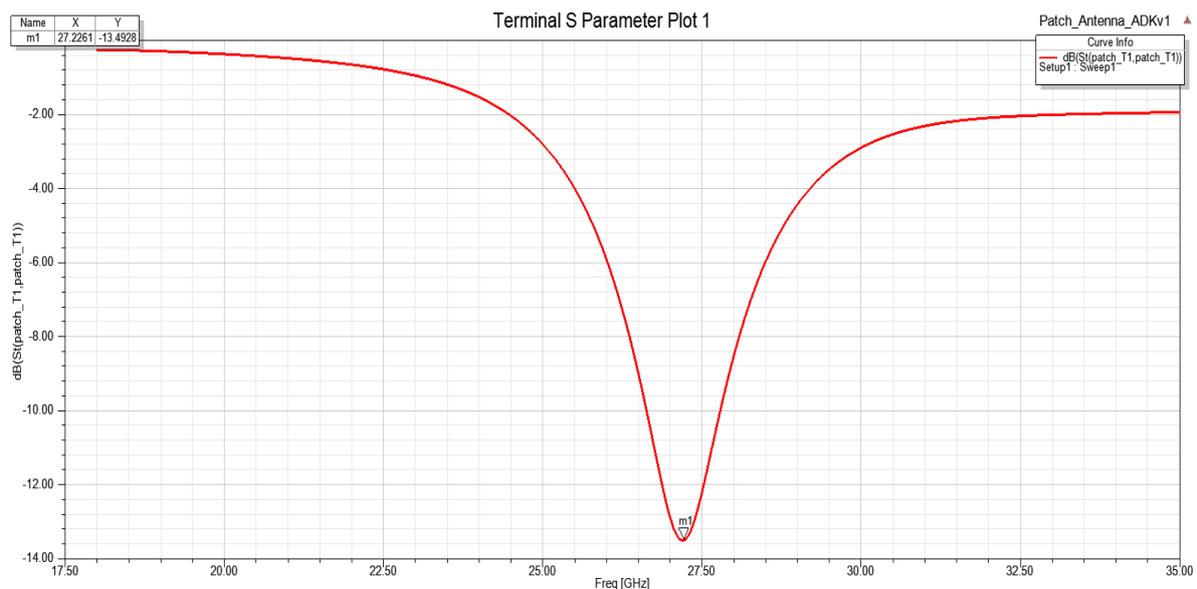


Figure III.7 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch adaptée avec ligne quart d'onde.

La figure III.7 montre clairement comment la présence de la ligne quart d'onde affecte le coefficient de réflexion S_{11} , ce qui rend l'adaptation plus efficace. Cependant, il est important de noter que la fréquence obtenue, 27.22 GHz, est éloignée fréquence de résonance cible de 28 GHz. Par conséquent, nous allons explorer différentes dimensions de patch dans la suite de l'étude afin d'atteindre une fréquence de résonance de 28 GHz.

3.2.1. Etude paramétrique de l'antenne avec adaptation :

Nous allons ajuster les dimensions du patch de la manière suivante :

- ✓ La longueur L_p entre 4.2mm à 4.4mm avec un pas 0.01mm.
- ✓ Le largeur W_p entre 3.1mm à 3.5 mm avec un pas 0.01mm.

Nous procédons à cette variation dans le but d'atteindre une fréquence de résonance de 28 GHz comme montrer sur la figure III.8.

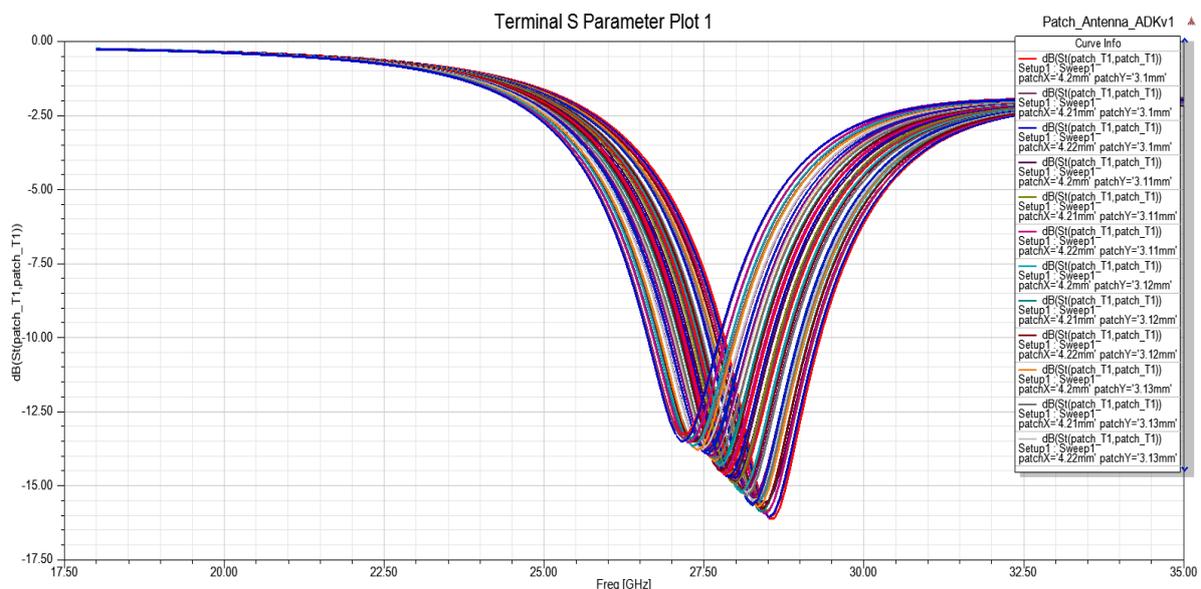


Figure III.8 : S_{11} en fonction de la variation des dimensions de patch L_p et W_p .

La figure III.8 illustre le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et avec la variation des dimensions de patch. Nous remarquons que pour les valeurs $L_p = 4.22\text{mm}$ et $W_p = 3.18\text{mm}$, l'antenne présente une fréquence de résonance de 27.995 GHz comme illustrer dans la figure III.9.

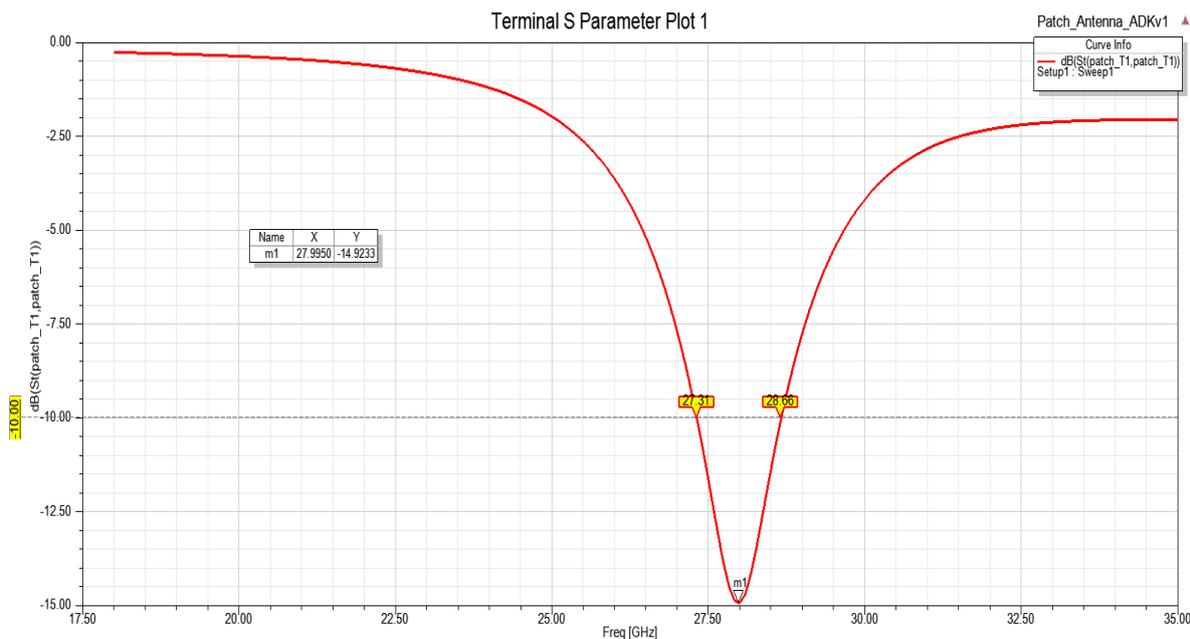


Figure III.9 : Coefficient de réflexion S_{11} pour $L_p = 4.22\text{mm}$ et $W_p=3.18\text{mm}$.

Les paramètres géométriques de l'antenne avec adaptation optimisée sont représentés dans le tableau suivant:

| | Paramètres de l'antenne | Dimensions (mm) |
|-----------|-------------------------|-----------------|
| Patch | longueur (L_p) | 3.18 |
| | Largeur (W_p) | 4.22 |
| Edge feed | longueur (L_e) | 2.007 |
| | Largeur (W_e) | 0.599 |
| Feed | longueur (L_f) | 3.608 |
| | Largeur (W_f) | 1.4 |

Tableau III.3 : Paramètres de l'antenne patch avec adaptation et optimisé.

3.3. Résultat après l'étude paramétrique d'antenne

Les performances de l'antenne adaptée après l'étude paramétrique sont évaluées à travers plusieurs paramètres, tels que le coefficient de réflexion, le rapport d'ondes stationnaires en tension (VSWR), le gain maximal et les diagrammes de rayonnement, en utilisant le logiciel HFSS.

3.3.1. Coefficient de réflexion S_{11}

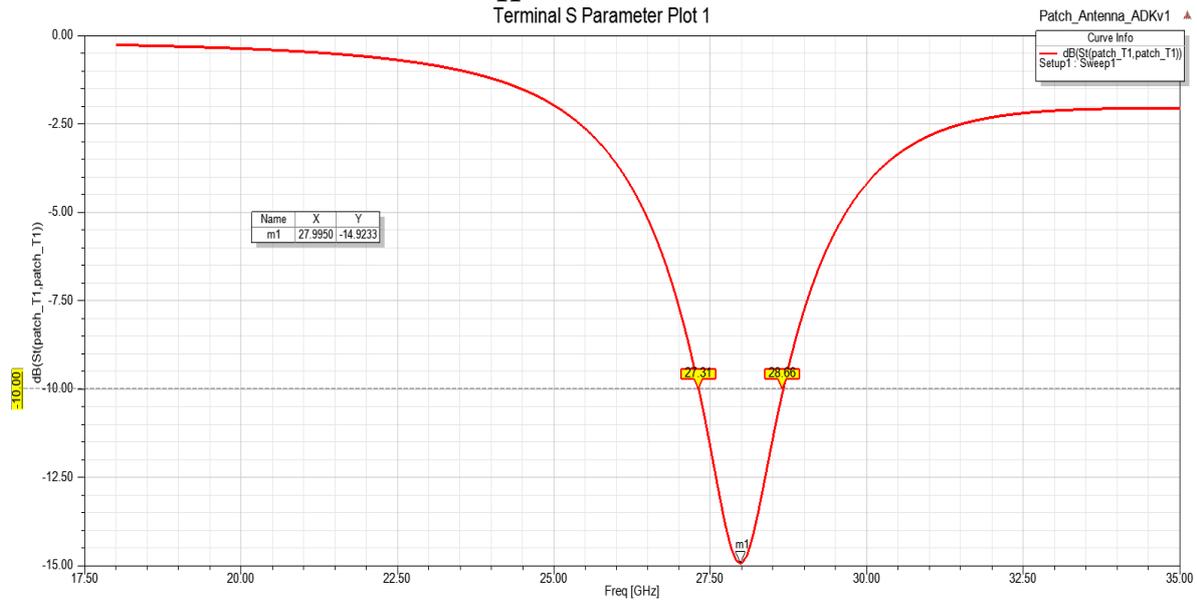


Figure III.10 : Coefficient de réflexion S_{11} et la bande passante de l'antenne patch 28GHz.

La figure III.10 représente le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence. Nous avons obtenu un coefficient de réflexion de $|S_{11}| = -14.92$ dB à la fréquence de résonance : $f_r = 27.99$ GHz ce qui montre une adaptation acceptable de notre antenne de base.

3.3.2. Le rapport d'onde stationnaire VSWR en fonction de fréquence

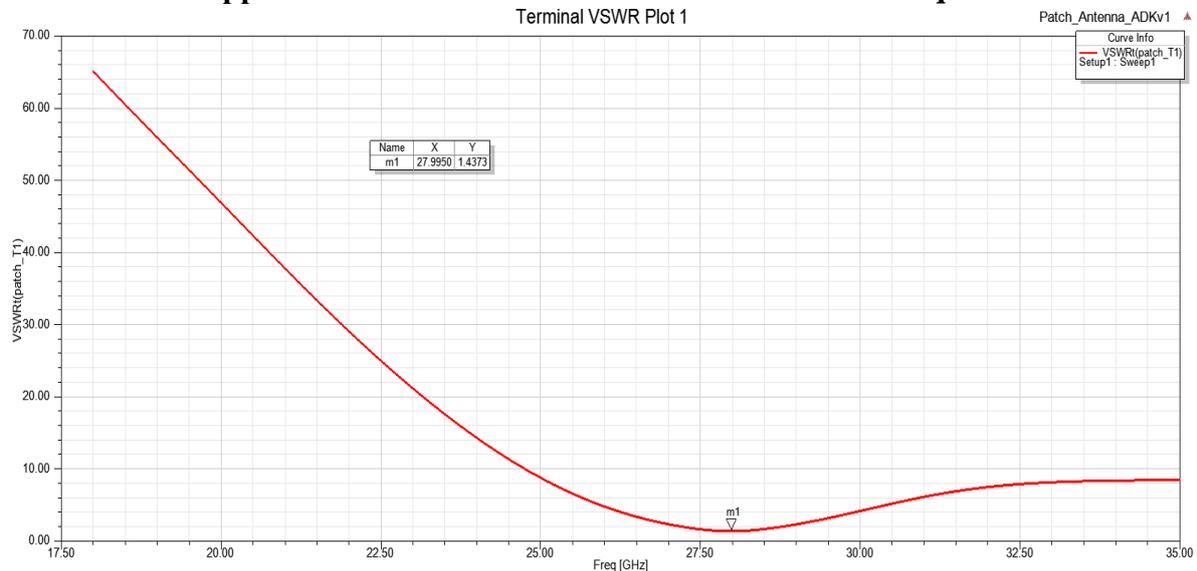


Figure III.11 : Rapport d'onde stationnaire(VSWR) d'antenne patch de 28GHz.

Les résultats de simulation présentés dans la Figure III.11 montrent le rapport d'ondes stationnaires (VSWR) de l'antenne de base. À la fréquence de résonance de 27.99 GHz, le VSWR est mesuré à 1.43. Cette valeur de VSWR inférieure à 2 indique que l'antenne est bien adaptée ($1 \leq \text{VSWR} \leq 2$, $S_{11} \leq -10$ dB).

3.3.3. Diagramme de rayonnement en 2D et 3D

Pour la fréquence 28GHz

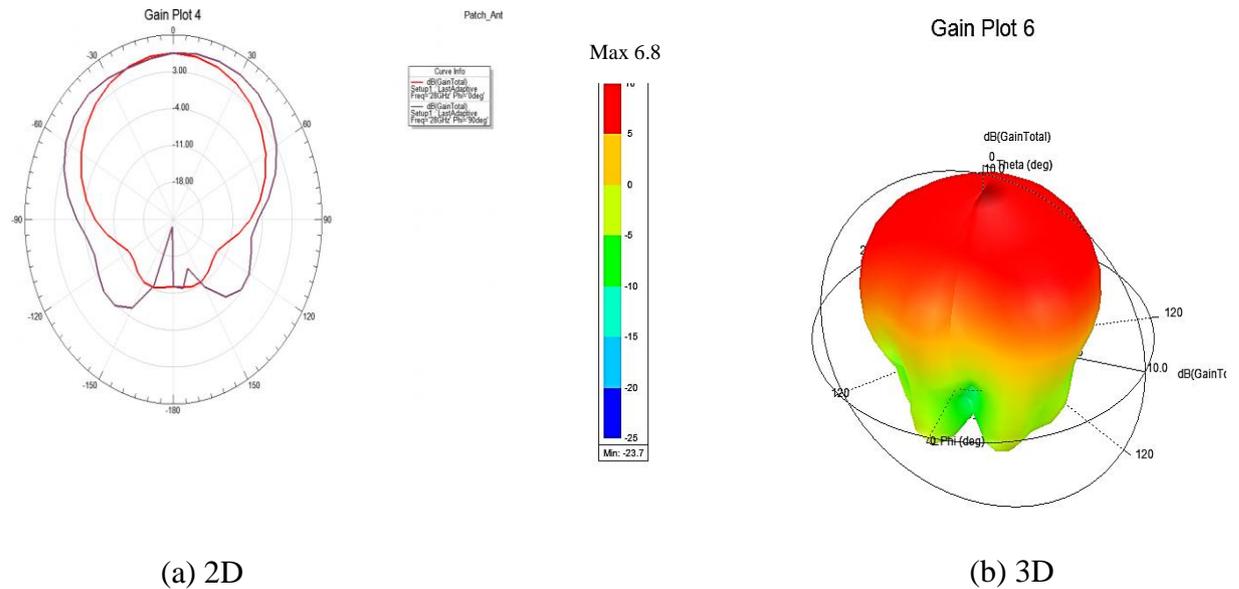


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 28GHz (a) 2D (b) 3D.

La figure III.12 illustre les diagrammes de rayonnement simulés en 2D et en 3D dans le plan E ($\varphi = 0^\circ$) et dans le plan H ($\varphi = 90^\circ$), correspondant à la fréquence de résonance de 28 GHz. Voici les caractéristiques de rayonnement spécifiques de l'antenne :

- Le diagramme de rayonnement en 3D à 28GHz :
 - On constate que le rayonnement de l'antenne est directionnel et présente un gain maximal de $G=6.8$ dB.
- Le diagramme de rayonnement en 2D à 28GHz :
 - l'antenne présente un lobe principal avec la direction du rayonnement maximale dans le plan E ($\theta = 0^\circ$) et dans le plan H ($\theta = 10^\circ$). Cela indique que l'émission de l'antenne est principalement concentrée dans une direction spécifique, atteignant l'intensité la plus élevée à cette fréquence.
 - Ce diagramme montre que l'antenne conçue affiche une caractéristique quasi-omnidirectionnelle sur le plan E.

Le tableau suivant résume les résultats de simulation :

| Antenne patch rectangulaire fonctionne à une fréquence de 28 GHz | |
|--|--------|
| La bande passante (GHz) | 1.35 |
| Le coefficient de réflexion (S_{11} en dB) | -14.92 |
| Le rapport d'onde stationnaire VSWR | 1.43 |
| Le gain (dB) | 6.8 |

Tableau III. 4 : Résultats de simulation de l'antenne de 28GHz.

4. Améliorer d'antenne de base (antenne III)

4.1. Antenne patch avec plan de masse partiel (antenne III : antenne large bande)

Dans cette partie, nous avons effectué des ajustements à l'antenne de base (antenne initiale avec adaptation) afin d'élargir sa bande passante. Pour ce faire, nous avons entamé une découpe dans le plan de masse imprimé sur la face inférieure du substrat, en plus d'ajouter une fente rectangulaire de dimensions initiales $X_{slot} \times Y_{slot}$. Ces ajustements sont clairement visibles dans la figure III.13. Il convient de souligner que ces modifications ont exclusivement touché le plan de masse, sans altérer le patch lui-même.

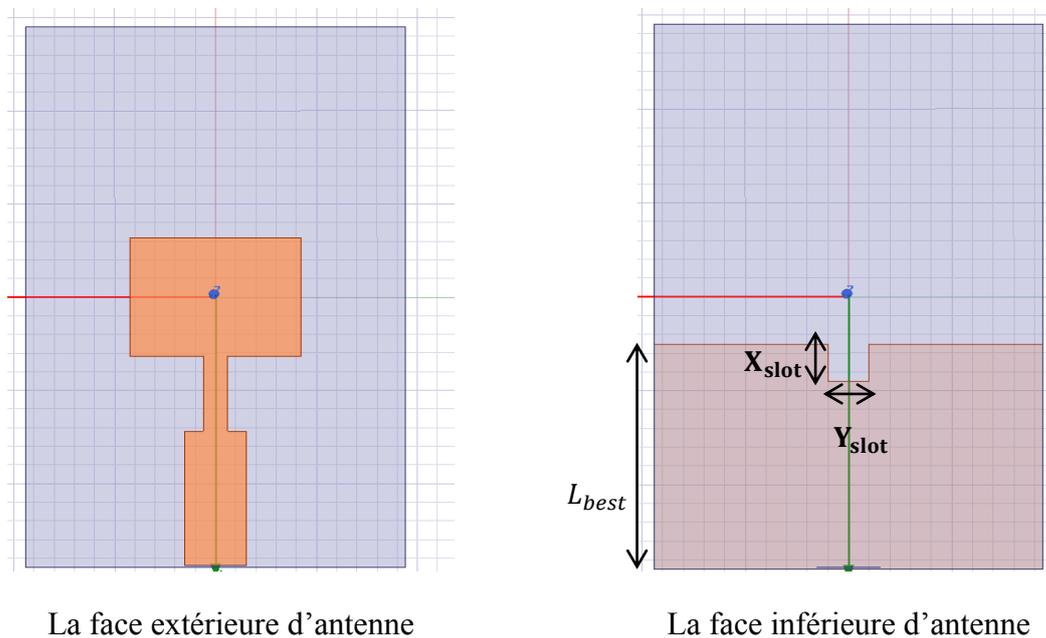


Figure III.13 : Géométrie d'antenne de base avant l'étude paramétrique.

Dans cette section, nous accordons une attention particulière à la modification de la longueur L_{best} du plan de masse de l'antenne, de sorte que $L_{best}=6$ mm (la valeur initiale est 14,52 mm).

Ceci concerne spécifiquement la dimension du plan de masse, et les dimensions de la fente avec la longueur $X_{slot} = 1\text{mm}$ et largeur $Y_{slot} = 1\text{mm}$ de fente.

4.1.1. Coefficient de réflexion (Antenne III)

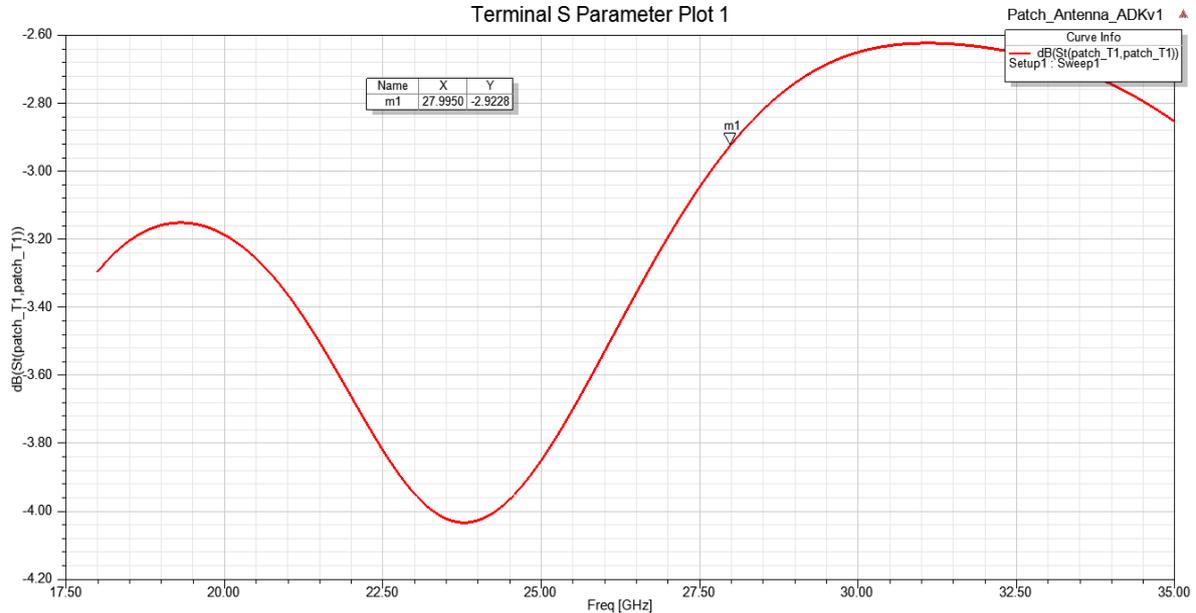


Figure III.14 : Représentation de Coefficient de Réflexion en (dB) de nouvelle antenne.

D'après les résultats obtenus, le coefficient de réflexion S11 atteint -2,92 dB à la fréquence de résonance de 28 GHz, dépassant ainsi la valeur limite de -10 dB. Cependant, cela ne produit pas une large bande passante et l'antenne à une grande réflexion sur cette plage de fréquence.

4.1.1.1. Etude paramétrique (effets de l'élimination des fentes dans le plan de masse) :

Une analyse paramétrique a été effectuée pour optimiser les performances des antennes patch destinées aux applications de communication 5G à la fréquence de 28 GHz. Dans cette section, nous explorerons différentes variations des paramètres essentiels qui définissent la géométrie du plan de masse, dans le but d'améliorer la bande passante de l'antenne à la fréquence souhaitée.

Pour cela, nous avons choisi cette variation des dimensions :

- ✓ La largeur de masse L_{best} entre 4mm à 7mm avec un pas 0.5mm.
- ✓ La longueur de fente dans la masse X_{slot} entre 1mm à 8mm avec un pas 0.5mm

La largeur de fente dans la masse Y_{slot} entre 0.5mm à 1.5mm avec un pas 0.5mm

La figure III.15 présente les coefficients de réflexion correspondant de cette étude paramétrique.

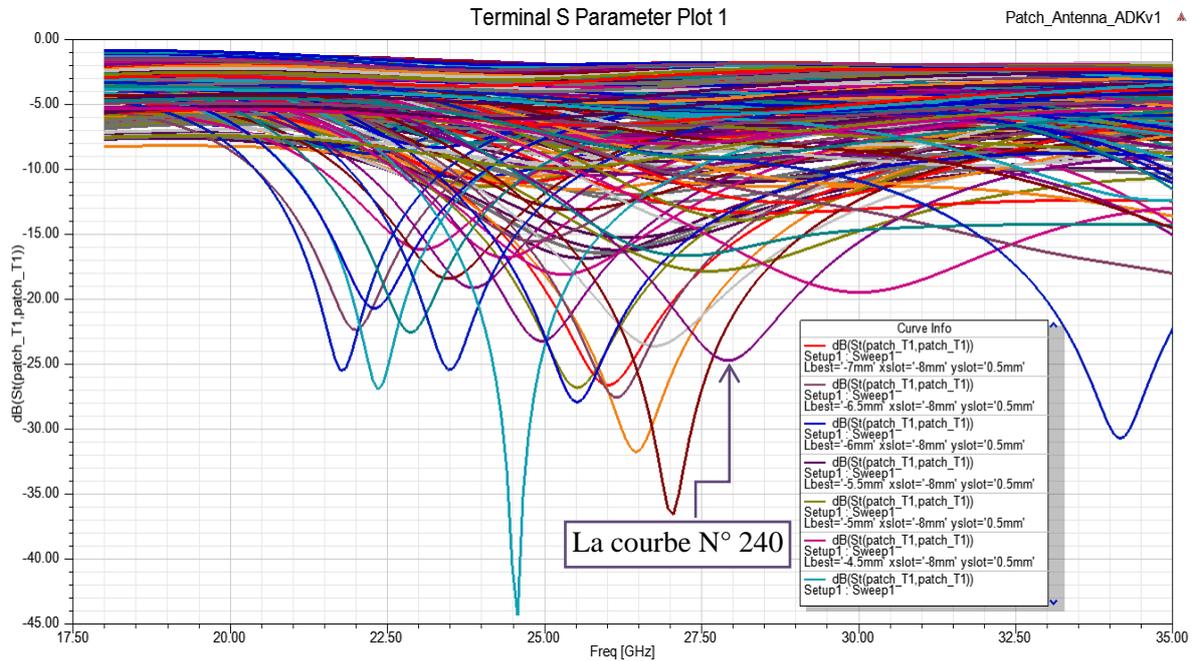
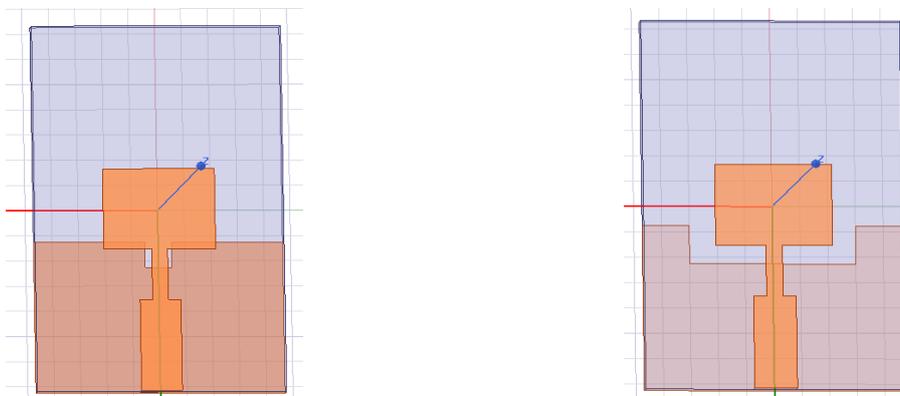


Figure III.15: Variation des valeurs de L_{best} , X_{slot} et Y_{slot} et leur effet sur le coefficient de réflexion.

Comme illustré dans la figure III.15, nous avons obtenu 315 courbes de coefficient de réflexion grâce à l'étude paramétrique. D'après ce résultat nous avons distingué visuellement la meilleure courbe qui est la courbe N° 240. Cette dernière présente la fréquence de résonance la plus proche de 28 GHz avec la meilleure valeur de S11 (comme montré dans la figure III.15). Les dimensions correspondantes sont : $L_{best}=6.5\text{mm}$, $X_{slot}=6\text{mm}$ $Y_{slot}=1.5\text{mm}$, comme illustre dans la figure III.15.b.



a: Les dimensions avant l'étude paramétrique. b: Les dimensions après l'étude paramétrique.

Figure III.16: Géométrie de l'antenne III avant et après l'étude paramétrique.

4.1.1.2. Résultat de Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (Antenne III)

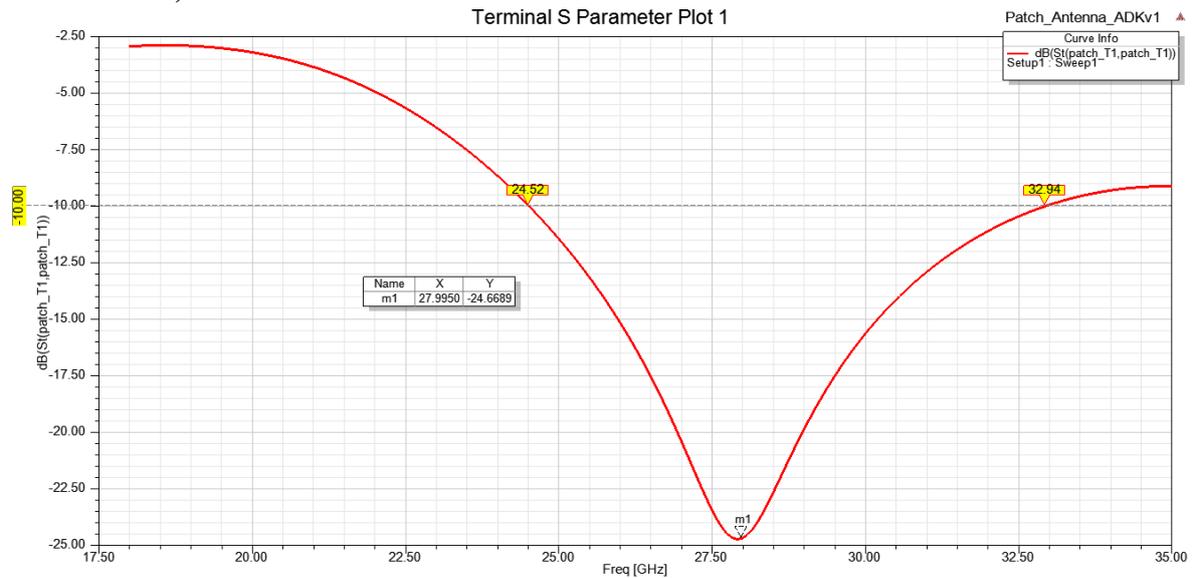


Figure III.17: Coefficient de réflexion S_{11} en (dB) de l'antenne sur HFSS.

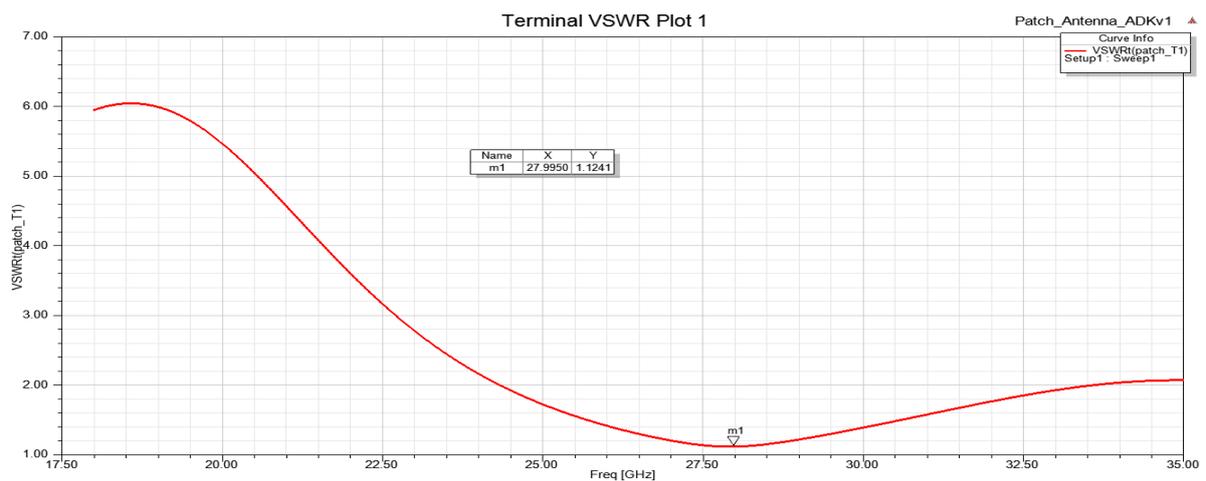


Figure III. 18: VSWR en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne sur HFSS.

Les figures III.17 et III.18 représente, respectivement, le coefficient de réflexion (S_{11}) et le taux d'onde stationnaire (VSWR) en relation avec la fréquence, tel que généré par le logiciel HFSS. Une observation importante est que le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10 dB dans la plage de fréquences de 24.52 GHz à 32.94 GHz, a la valeur de -24.66 dB est située à une fréquence de résonance cible différente de 28 GHz. Tandis que le taux d'onde stationnaire (VSWR) est inférieur à 2 dans toute la bande passante de 24.52 GHz à 32.94 GHz. À la fréquence de résonance de 27.99 GHz, le VSWR est évalué à 1.12.

D'après ce résultat, nous pouvons conclure que la bande passante obtenue est de 8,42 GHz, comme illustré à la figure III.19. Cette valeur est nettement plus large que celle obtenue avec (Antenne II), qui avait une bande passante de 1,35 GHz.

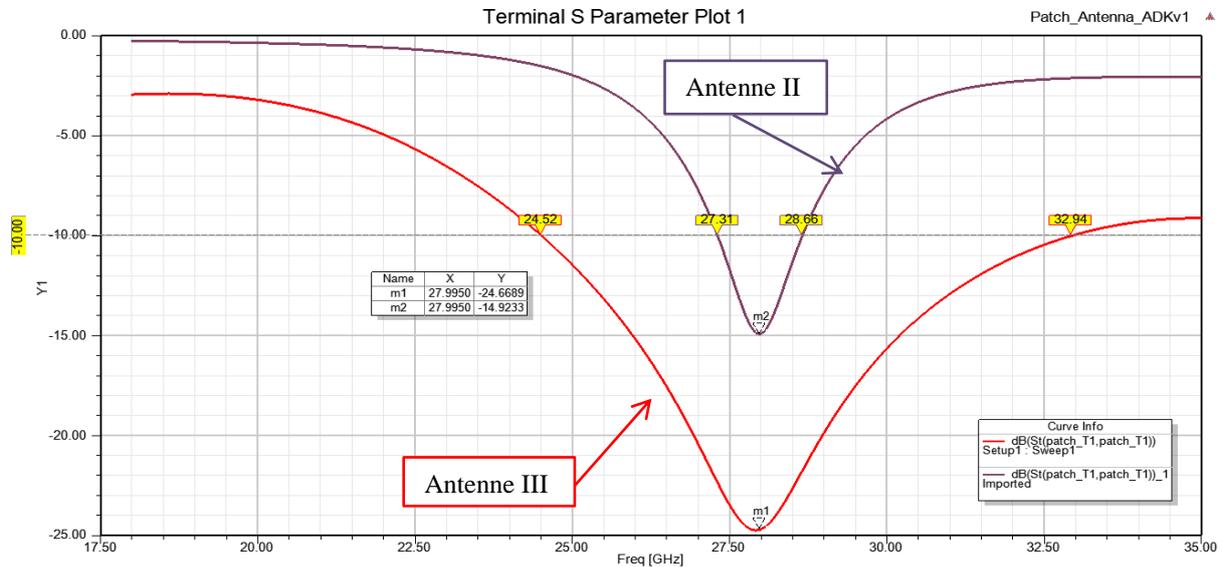


Figure III.19 : Comparaisons entre la bande passante d'antenne II avec la bande passante d'antenne III.

Puisque la taille d'une antenne augmente à mesure que la fréquence diminue, la conception proposée permet une miniaturisation efficace. Elle est conçue pour rayonner à une fréquence de 28 GHz, mais avec une bande passante allant de 24,5 GHz à 30 GHz. Par exemple, une antenne conçue pour émettre à 24,5 GHz aurait généralement des dimensions de 1,7 x 1 cm². Toutefois, notre antenne, également calibrée pour émettre à 24,5 GHz, ne mesure que 1,4 x 0,9 cm², illustrant ainsi une réduction significative de la taille tout en conservant les mêmes performances.

Le tableau suivante montre la comparaisons entre la différents paramètres d'antenne II et d'antenne III à la fréquence résonance 28 GHz :

| Résultat | Antenne II | Antenne III |
|--|------------|-------------|
| La bande passante (GHz) | 1.35 | 8.42 |
| Le coefficient de réflexion (S_{11} en dB) | -14.92 | -24.66 |
| Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) | 1.43 | 1.12 |
| Le gain (dB) | 6.8 | 4.3 |

Tableau III. 5 : Résultats de comparaisons d'antenne II la et d'antenne III à la fréquence résonance 28 GHz.

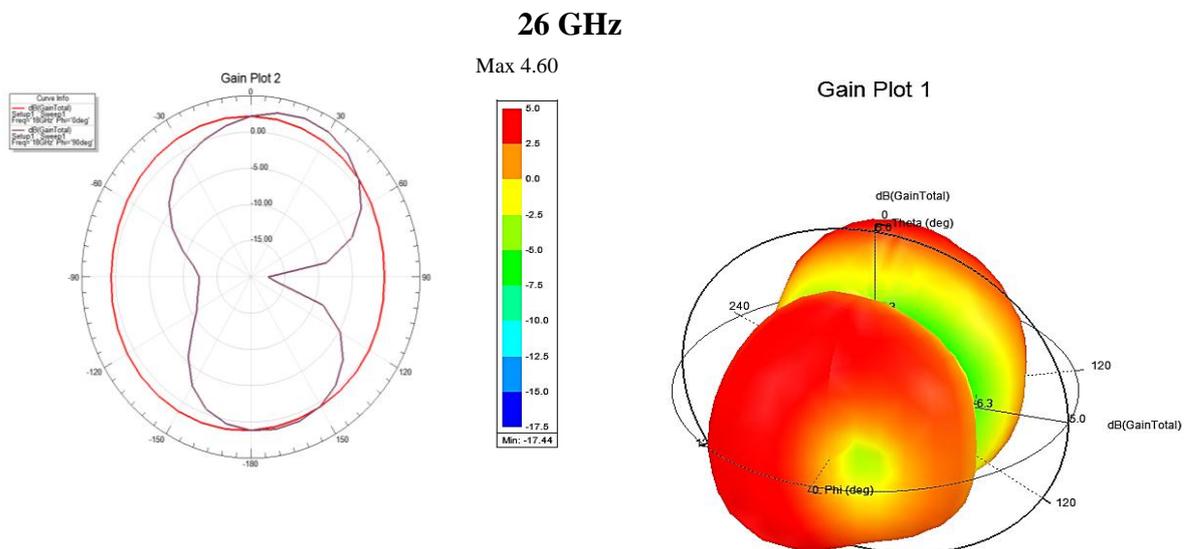
D'après le tableau III.5, l'antenne III a une bande passante beaucoup plus large que celle de l'antenne II. Cela suggère que l'antenne III pourrait être plus adaptée à des applications nécessitant une large gamme de fréquences, comme les communications à large bande ou les systèmes à ultra-large bande.

De plus, l'antenne III présente un coefficient de réflexion plus bas, et un meilleur rapport d'onde stationnaire, ce qui indique une meilleure performance en termes de transmission d'énergie par rapport à l'antenne II.

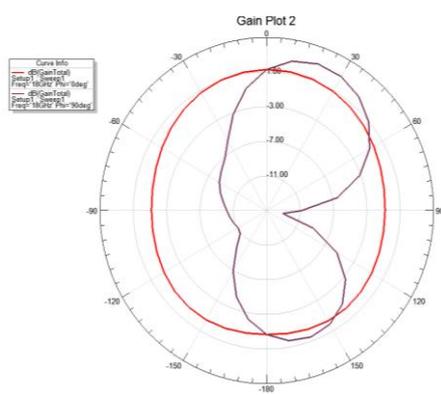
Cependant, l'antenne II a un gain supérieur. Le choix entre les deux dépendra donc de l'application : l'antenne III conviendrait mieux pour des applications à large bande, tandis que l'antenne II serait préférable pour des applications nécessitant un gain plus élevé ou une meilleure directivité.

4.1.1.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne III pour les fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz, 30 GHz :

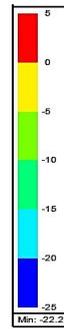
Selon la Figure III.19, l'antenne rayonne dans la bande passante à différentes fréquences telles que 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz. Ces fréquences ont été choisies pour observer le rayonnement de l'antenne dans cette plage.



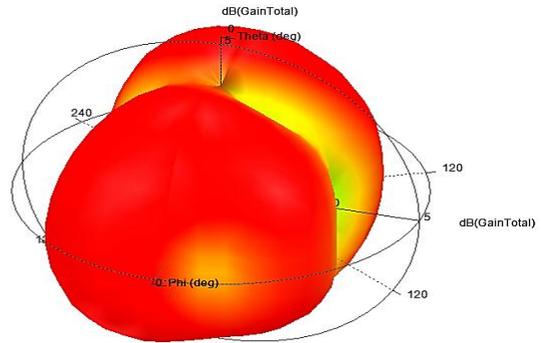
27 GHz



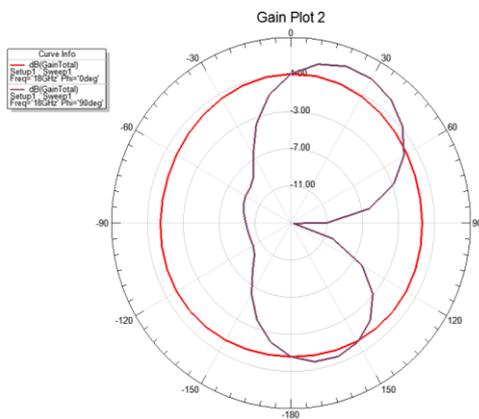
Max 4.4



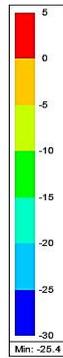
Gain Plot 1



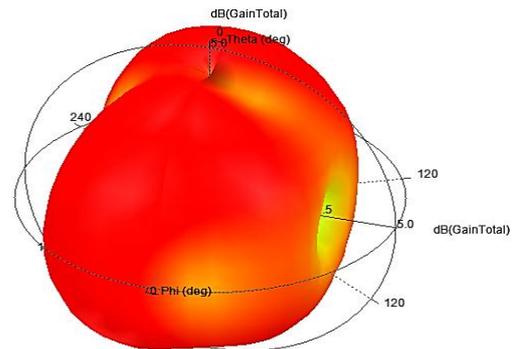
28 GHz



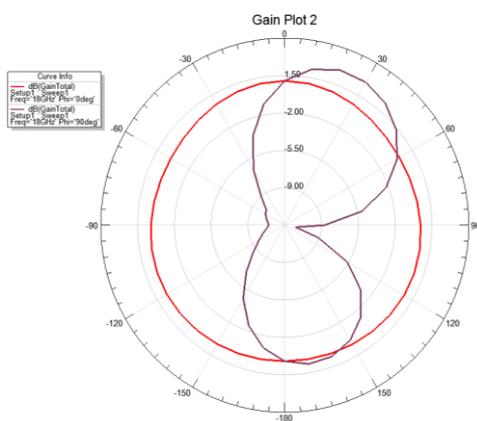
Max 4.3



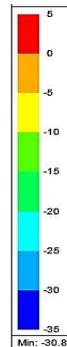
Gain Plot 1



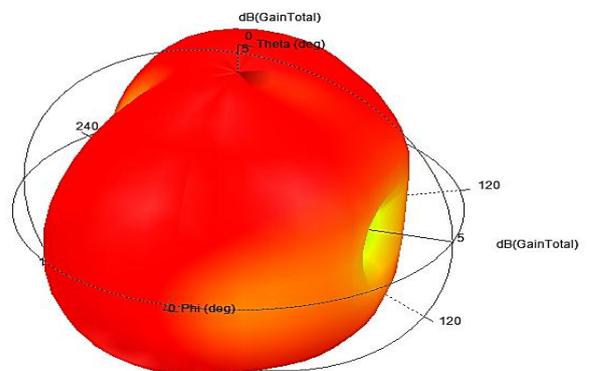
29 GHz



Max 4.4



Gain Plot 1



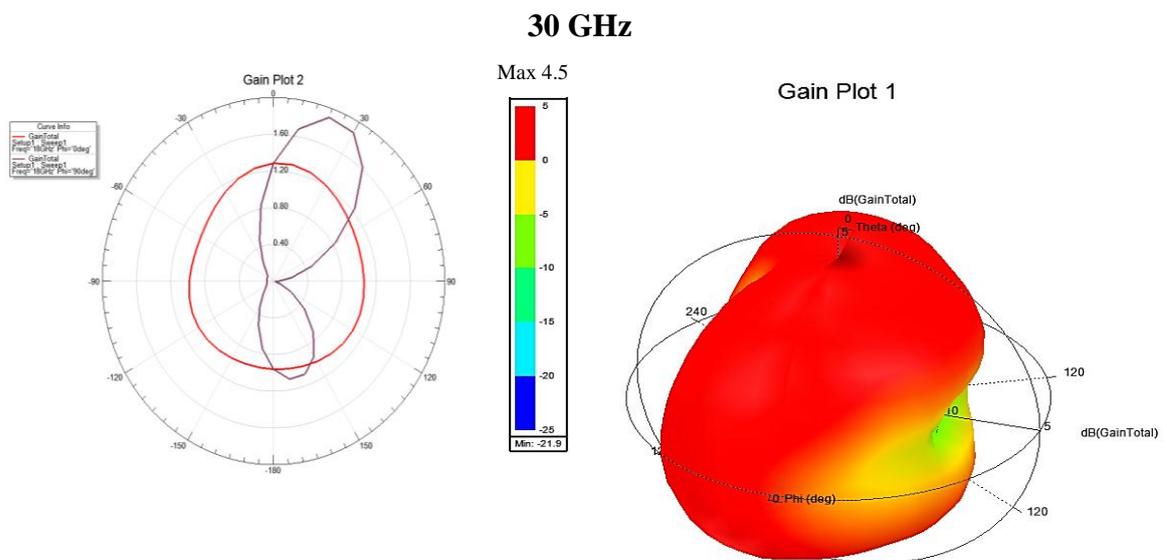


Figure III.20 : Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne III pour les fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz.

La Figure III.20 présente les diagrammes de rayonnement simulés en 2D et en 3D dans le plan E ($\varphi = 0^\circ$) et dans le plan H ($\varphi = 90^\circ$) pour les fréquences de 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz. Voici les caractéristiques de rayonnement spécifiques de l'antenne :

- Le diagramme de rayonnement en 3D à 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz:
 - On observe que le rayonnement de l'antenne est directionnel, avec un gain maximal de :

| | | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| La fréquence | 26 GHz, | 27 GHz, | 28 GHz, | 29 GHz, | 30 GHz, |
| Le gain maximal | 4.60 dB | 4.4 dB | 4.3 dB | 4.4 dB | 4.5 dB |

Tableau III. 6 : Gain maximal de déférente fréquences 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz.

- Le diagramme de rayonnement en 2D à 26 GHz, 27 GHz, 28 GHz, 29 GHz et 30 GHz :
 - L'antenne présente deux lobes principaux, Ce diagramme démontre que l'antenne conçue présente un comportement omnidirectionnel dans le plan E.

5. Antenne patch avec fente (antenne IV : amélioration du gain)

Dans cette partie, nous avons apporté des modifications à l'antenne de base afin d'augmenter encore son gain. Nous avons ajouté une fente circulaire au patch avec un diamètre R1, comme illustré dans la figure III.21. Il convient de noter que les dimensions de l'antenne de base précédente ont été maintenues lors de ces modifications.

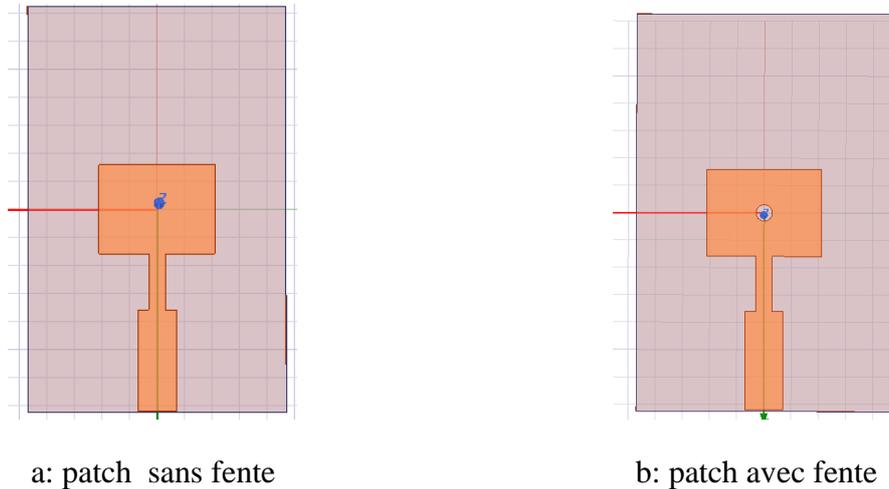


Figure III.21 : Géométrie d'antenne de base sans et avec fente.

5.1. Etude paramétrique (impact de l'élimination de fente dans le patch)

Dans le cadre de cette analyse paramétrique, nous avons entrepris d'optimiser les performances de patch à une fréquence de 28 GHz. Nous explorerons dans cette section les différentes variations qui influencent la géométrie de la fente du patch, à la raison d'améliorer le gain de l'antenne à la fréquence souhaitée. Pour ce faire, La dimension de la fente R1 a été ajustée de 0,2 mm à 0.9 mm, avec un pas de 0,01mm.

La figure III.22 illustre les coefficients de réflexion correspondants à cette analyse paramétrique.

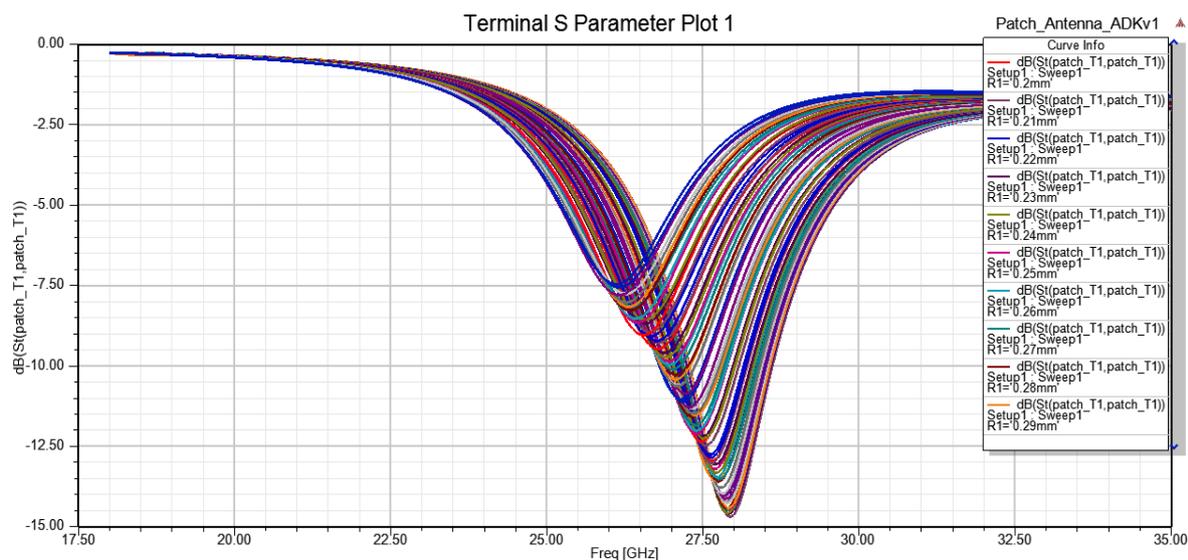


Figure III.22 : Variation des valeurs de R1 et leur impact sur le coefficient de réflexion.

Tel que représenté dans la figure III.22, notre analyse paramétrique a généré 71 courbes de coefficient de réflexion. En se basant sur ces résultats, nous avons identifié visuellement la courbe optimale ayant une valeur de $R1=0.3$. Celle-ci présente une fréquence de résonance la plus proche de 28 GHz avec le meilleur gain. La Géométrie de l'antenne IV après l'étude paramétrique est illustrée sur la figure III.23.

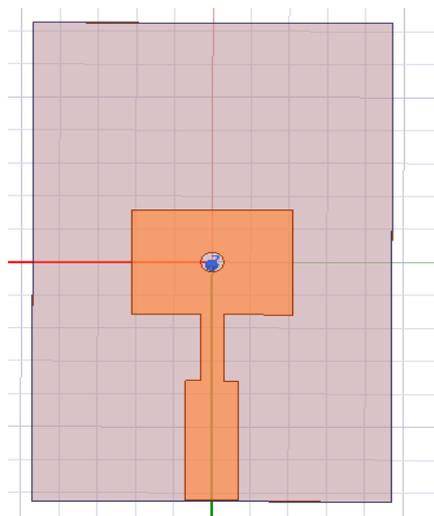


Figure III.23 : Géométrie de l'antenne IV après l'étude paramétrique.

5.2. Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (Antenne IV)

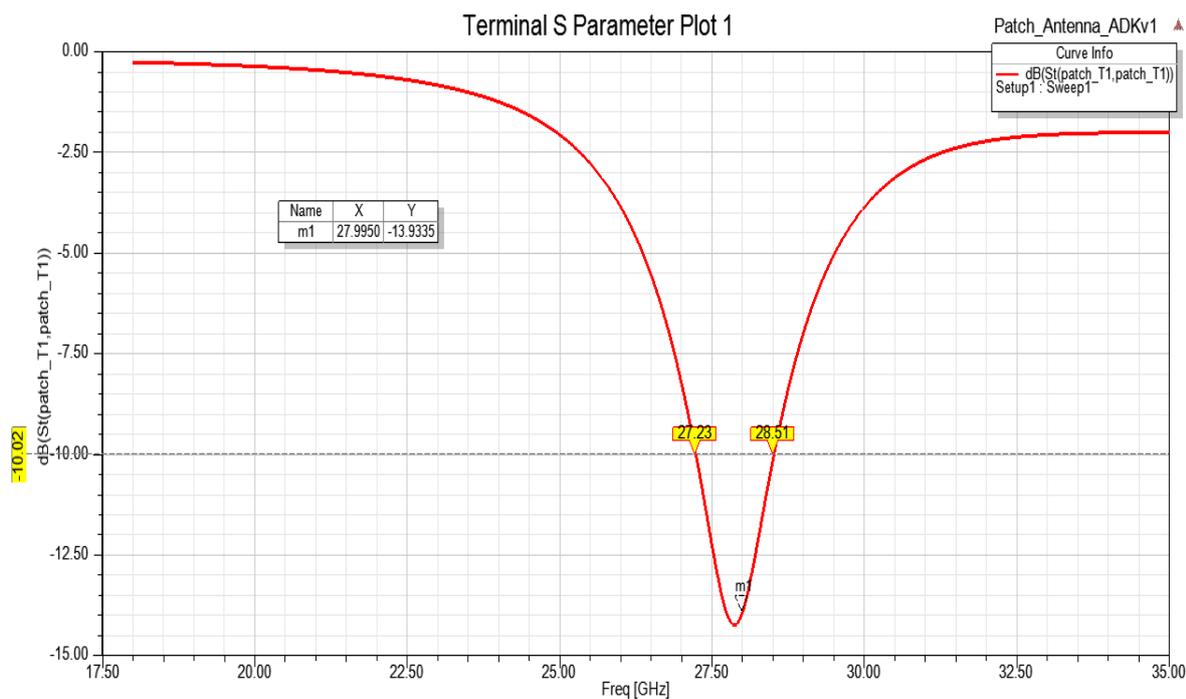


Figure III.24 : Représentation des Coefficients de Réfexion en (dB) de l'antenne sur HFSS.

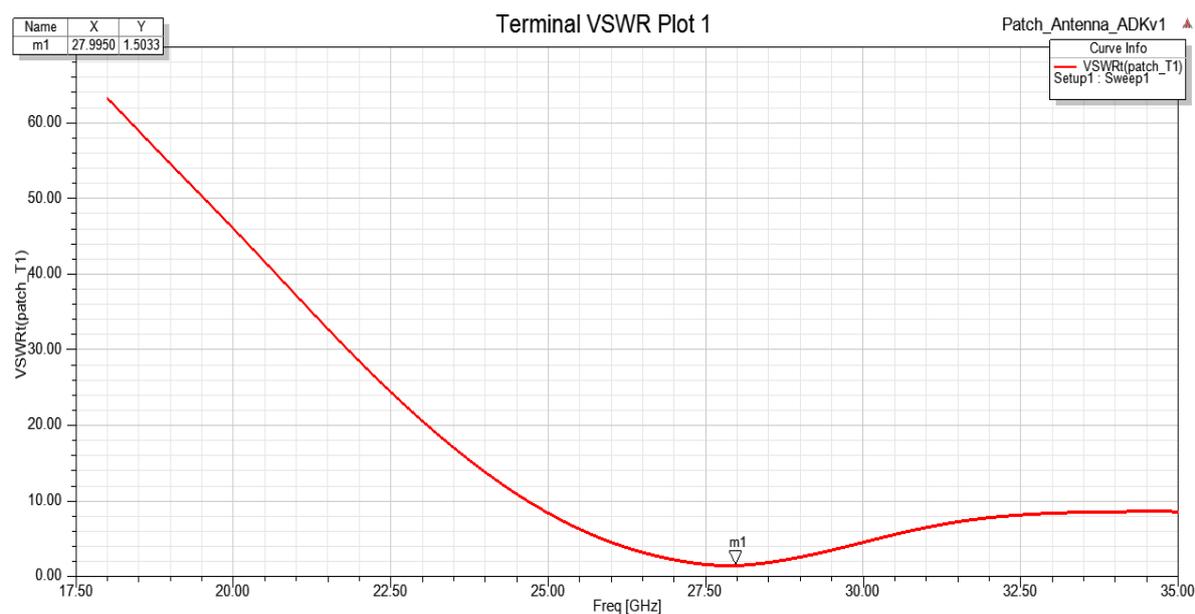


Figure III.25 : VSWR en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne sur HFSS.

Les figures III.24 et III.25 montre le coefficient de réflexion (S11) et le taux d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence. Il est remarquable que le coefficient de réflexion S11 reste en dessous de -10 dB sur la plage de fréquences de 27.23 GHz à 28.51 GHz, atteignant une valeur de -13.93 dB à une fréquence de résonance cible différente de 28 GHz. Par ailleurs, le taux d'onde stationnaire (VSWR) demeure inférieur à 2, évalué à 1.5. Avec une bande passante de 1.28 GHz.

5.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne IV pour les fréquences 28 GHz

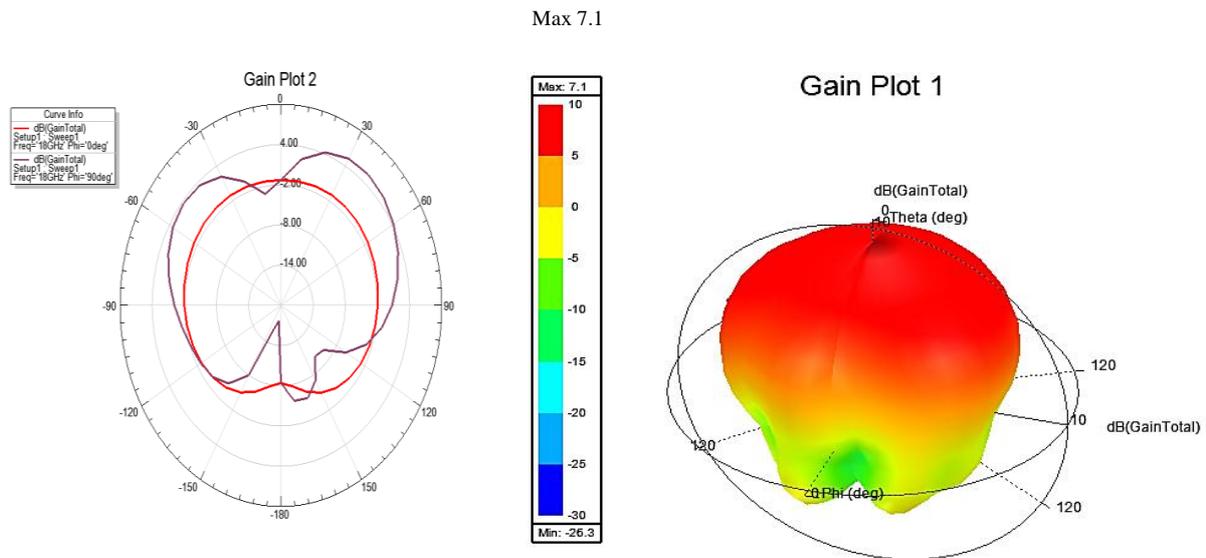


Figure III.26 : Diagrammes de rayonnement 2D et 3D de l'antenne IV pour les fréquences 28 GHz.

La Figure III.26 illustre les diagrammes de rayonnement simulés en 2D et en 3D dans les plans E ($\varphi = 0^\circ$) et H ($\varphi = 90^\circ$) pour une fréquence de 28 GHz. Voici les caractéristiques spécifiques de rayonnement de l'antenne :

- Le diagramme de rayonnement en 3D à 28 GHz :
 - Il est observé que le rayonnement de l'antenne est directionnel, atteignant un gain maximal de 7.1 dB.
 -
- Le diagramme de rayonnement en 2D à 28 GHz :
 - L'antenne présente un lobe principal avec une direction de rayonnement maximale dans le plan E ($\theta=0^\circ$) et dans le plan H ($\theta=30^\circ$).
 - Ce diagramme met en évidence la caractéristique quasi-omnidirectionnelle de l'antenne conçue sur le plan E.

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les différents paramètres de l'antenne II et de l'antenne IV à la fréquence de résonance de 28 GHz :

| Résultat | Antenne II | Antenne IV |
|---|------------|------------|
| La bande passante (GHz) | 1.35 | 1.28 |
| Le coefficient de réflexion (S_{11} en dB) | -14.92 | -13.93 |
| Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) | 1.43 | 1.5 |
| Le gain (dB) | 6.8 | 7.1 |

Tableau III. 7 : Résultats comparaisons d'antenne II la et d'antenne IV a la fréquence résonance 28 GHz.

Selon les données du tableau, on constate une amélioration du gain, mais une diminution du S_{11} , du VSWR et de la bande passante

5.4. La présentation globale des antennes

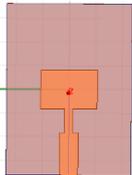
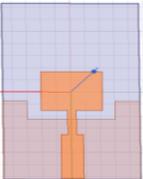
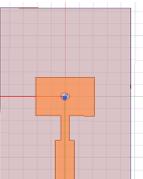
| Les antennes | La bande passante (GHz) | Le coefficient de réflexion (S_{11} en dB) | Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) | Le gain (dB) |
|---|-------------------------|---|---------------------------------------|--------------|
| <p>Antenne II</p>  | 1.35 | -14.92 | 1.43 | 6.8 |
| <p>Antenne III</p>  | 8.42 | -24.66 | 1.12 | 4.3 |
| <p>Antenne IV</p>  | 1.28 | -13.93 | 1.5 | 7.1 |

Tableau III. 8 : Résultats finaux des paramètres des antennes.

Une comparaison des performances des antennes II, III et IV en fonction de la bande passante, du coefficient de réflexion (S_{11}), du rapport d'onde stationnaire (VSWR) et du gain est présentée dans le tableau III.8:

Bande Passante

- Antenne III a la plus grande bande passante avec 8,42 GHz, ce qui la rend idéale pour des applications à large bande.
- Antenne II suit avec une bande passante de 1,35 GHz, ce qui est raisonnable pour des applications à bande plus étroite.
- Antenne IV à la bande passante la plus étroite, à 1,28 GHz, indiquant une utilisation limitée aux applications à bande restreinte.

Coefficient de Réflexion (S_{11}) et Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) :

- Antenne III a le meilleur coefficient de réflexion, avec -24,66 et le meilleur VSWR à 1,12, indiquant une excellente adaptation d'impédance et une faible réflexion donc une bonne adaptation du signal.
- Antenne II a un coefficient de réflexion de -14,92, avec un VSWR de 1,43 ce qui est acceptable mais moins performant que l'antenne III.
- Antenne IV a le coefficient de réflexion le moins favorable, avec -13,93 et un VSWR à 1,5, suggérant plus de réflexion que les autres antennes.

Gain (dB)

- Antenne IV a le gain le plus élevé à 7,1 dB, ce qui est avantageux pour des applications nécessitant une plus grande portée ou directivité.
- Antenne II suit avec un gain de 6.8 dB, légèrement inférieur à celui de l'antenne II.
- Antenne III a le gain le plus bas, à 4,3 dB, indiquant qu'elle pourrait être moins efficace pour des applications nécessitant une transmission à longue distance ou une forte directivité.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la conception et l'optimisation d'une antenne rectangulaire pour des applications 5G. Grâce à l'utilisation de la technique d'adaptation par

ligne à quart d'onde et à une étude paramétrique, nous avons obtenu une bonne adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance de 28 GHz.

Des modifications ont été apportées à l'antenne précédente pour améliorer le coefficient de réflexion, la bande passante et le gain. De plus, une attention particulière a été accordée à la miniaturisation pour rendre l'antenne plus compacte. Si la bande passante est le critère le plus important, alors l'antenne III, avec une bande passante de 8,42 GHz, serait le meilleur choix. Elle offre également le meilleur coefficient de réflexion (S_{11}) et le rapport d'onde stationnaire (VSWR), indiquant une bonne adaptation et une faible réflexion.

De plus, l'antenne III présente des caractéristiques de miniaturisation remarquables, ce qui la rend idéale pour des applications où l'espace est limité. Son design compact tout en offrant une large bande passante la rend polyvalente et adaptable à divers scénarios d'utilisation.

Cependant, si le gain est le critère le plus important, l'antenne II, avec un gain de 6,8 dB, et l'antenne IV, avec un gain de 7,1 dB, seraient les meilleures options. Toutefois, ces antennes présentent des bandes passantes plus étroites et des coefficients de réflexion moins favorables par rapport à l'antenne III.

Par conséquent, le choix final doit tenir compte de ces différents aspects en fonction des besoins spécifiques de l'application.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La conception et l'optimisation d'antennes patch pour les applications de communication 5G constituent un domaine de recherche crucial dans le paysage des télécommunications modernes. Ce mémoire a exploré en profondeur les principes fondamentaux, les défis et les opportunités liés à cette technologie d'antenne spécifique dans le contexte de la 5G.

En mettant l'accent sur la compacité, le faible coût et la flexibilité de conception des antennes patch, ainsi que leur capacité à répondre aux exigences spécifiques de la 5G, cette étude a mis en lumière l'importance de cette technologie dans le déploiement efficace des réseaux 5G.

À travers l'utilisation du logiciel HFSS, nous avons exploré les différentes architectures d'antennes patch et les techniques d'optimisation pour améliorer leurs performances, notamment en termes de bande passante, adaptation et de gain.

Une étude comparative des antennes conçus nommés : II, III et IV a mis en lumière les différences majeures en termes de performances liées à la bande passante, au coefficient de réflexion (S_{11}), au rapport d'onde stationnaire (VSWR), et au gain. Ces résultats illustrent que chaque antenne a ses avantages et inconvénients, ce qui influe sur le choix de l'antenne la plus appropriée en fonction des exigences spécifiques de l'application.

L'antenne III se distingue par sa large bande passante de 8,42 GHz, ce qui la rend idéale pour des applications nécessitant une large plage de fréquences. Elle offre également le meilleur coefficient de réflexion et le meilleur rapport d'onde stationnaire, ce qui suggère une excellente adaptation d'impédance et une faible réflexion. L'antenne III, avec son excellent équilibre entre bande passante, coefficient de réflexion, et miniaturisation, constitue une option solide pour de nombreux scénarios. Cependant, son gain de 4,3 dB est le plus bas, ce qui peut limiter son utilisation pour des applications à longue portée.

L'antenne II, avec une bande passante de 1,35 GHz, un coefficient de réflexion de -14,92, un VSWR de 1,43 et un gain de 6,8 dB, offre des performances intermédiaires, ce qui la rend adaptée pour des applications à bande passante modérée avec un gain acceptable.

L'antenne IV présente la bande passante la plus étroite (1,28 GHz) et un coefficient de réflexion moins favorable (-13,93), suggérant une réflexion plus élevée. Cependant, son gain de 7,1 dB en fait une bonne option pour des applications nécessitant une plus grande portée ou une directivité accrue.

Conclusion générale

En prenant en compte ces différents paramètres, le choix de l'antenne doit être fait en fonction des besoins spécifiques de l'application, tels que la bande passante, le gain, ou l'adaptation d'impédance, tout en tenant compte de l'espace disponible. Cette analyse comparative fournit des orientations précieuses pour le développement et l'optimisation d'antennes patch dans le contexte des applications 5G.

Les applications 5G qui utilisent des antennes dans la plage de 25 GHz à 32 GHz couvrent une gamme variée d'applications, notamment la connectivité mobile, l'industrie, les véhicules connectés, la réalité augmentée/réalité virtuelle, et les événements à haute densité (conférences...). Ces antennes jouent un rôle crucial dans la fourniture de performances élevées en termes de vitesse, de latence et de capacité de réseau pour répondre aux exigences croissantes de la connectivité 5G.

Enfin, ce mémoire a illustré l'efficacité et l'importance des antennes patch optimisées pour les réseaux de communication 5G.

Objectif est de combiné des approches théoriques et pratiques, cette recherche aspire à contribuer de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine de la conception d'antennes pour les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération, ouvrant ainsi la voie à des innovations continues dans le domaine de la télécommunication.

ANNEXE

ANNEXE (Présentation du logiciel HFSS)

1. Introduction :

HFSS représente une solution robuste pour la simulation électromagnétique(EM) en 3D, spécialement conçue pour la modélisation précise et efficace de dispositifs passifs volumétriques. Avec une interface utilisateur conviviale sur Windows, il intègre simulation, visualisation, modélisation solide et automatisation. Grâce à des fonctionnalités avancées telles que la méthode des éléments finis et le maillage adaptatif, HFSS fournit rapidement des solutions précises pour les problèmes d'électromagnétisme 3D. Ses graphiques de qualité supérieure permettent une analyse détaillée des résultats, incluant le calcul de paramètres tels que les paramètres S_{11} et les champs électromagnétiques et la fréquence de résonance.

2. Termes Ansoft

La fenêtre d'Ansoft HFSS comprenant divers panneaux facultatifs :

2.1. Fenêtre du modelleur 3D

La fenêtre du modelleur 3D affiche le modèle et son arborescence associée pour la conception active.

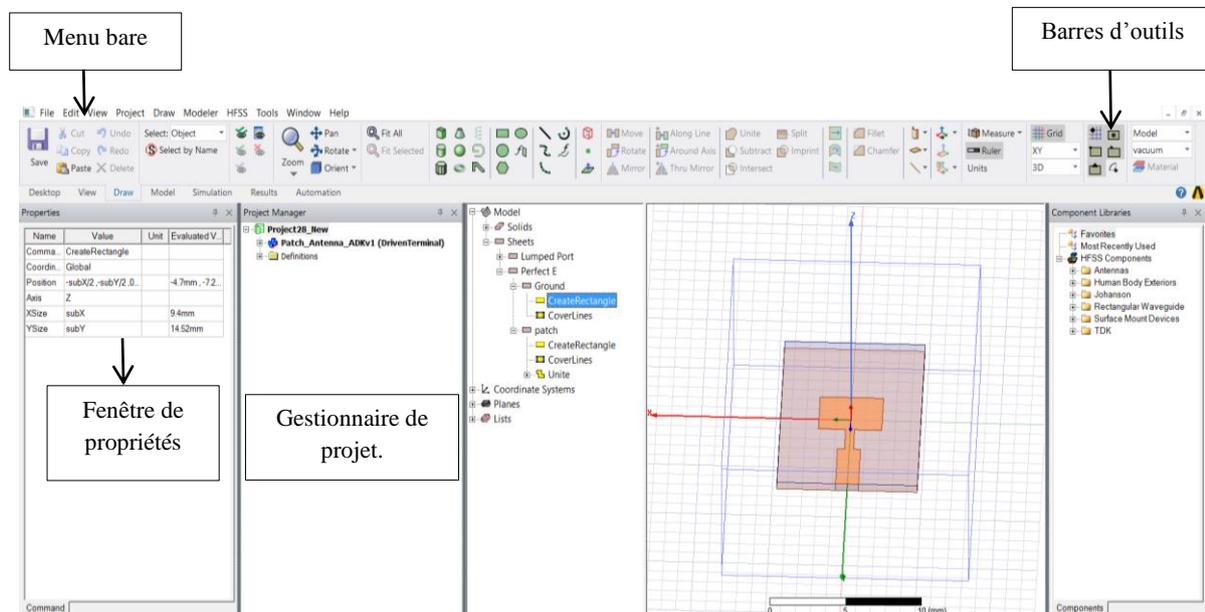


Figure. A.1 : Soustraction des objets.

2.2. Un gestionnaire de projet

Le gestionnaire de projet inclut un arbre de conception qui présente la structure complète du projet.

Références

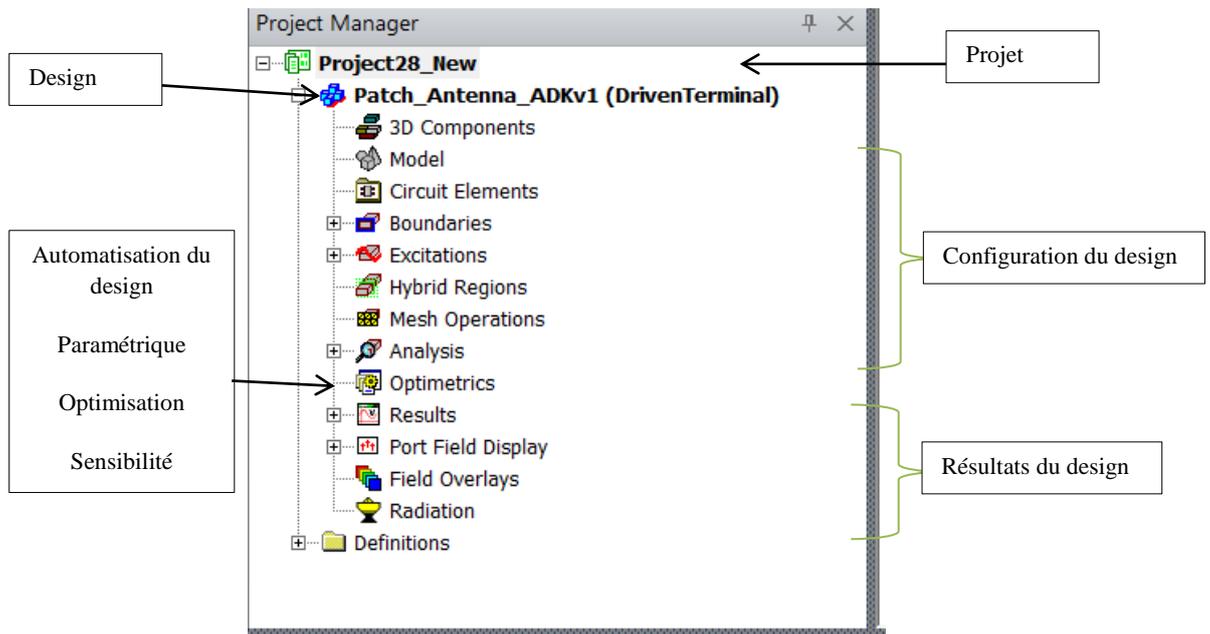


Figure. A.2 : gestionnaire de projet.

2.3.Un gestionnaire de messages

Cela vous permet de repérer les erreurs ou les avertissements avant de lancer une simulation.

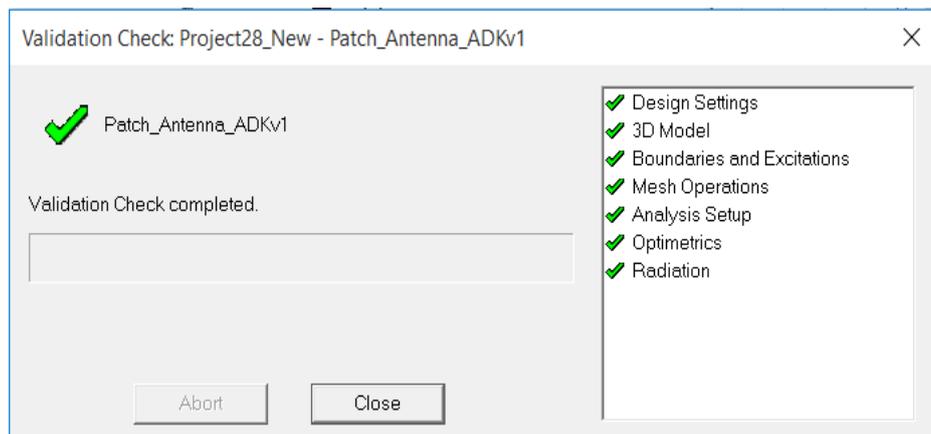


Figure. A.3 : Gestionnaire de messages.

2.4.Une fenêtre de propriétés

La fenêtre des propriétés présente et offre la possibilité de modifier les paramètres ou les attributs du modèle.

Références

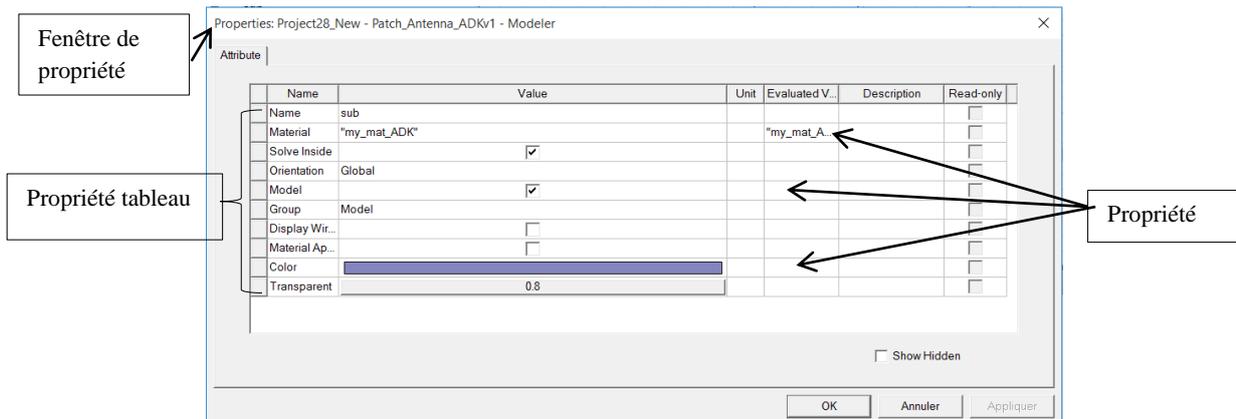


Figure. A.4 : Fenêtre de propriétés.

2.5. Une fenêtre d'avancement

La fenêtre d'avancement indique l'évolution de la résolution.

3. Modélisateur 3D Arbre de conception

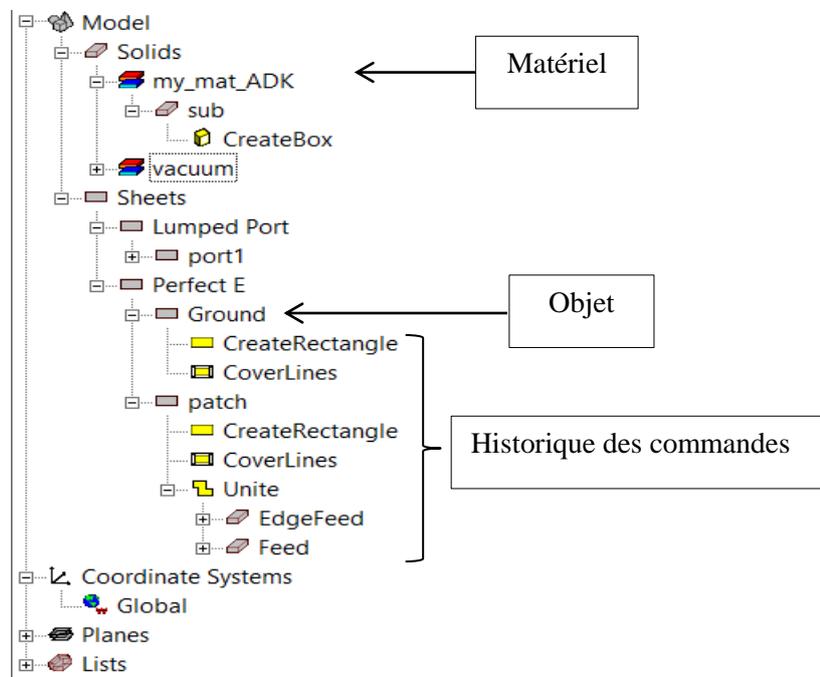


Figure. A.5 : Modélisateur 3D Arbre de conception.

Références

4. Création des projets

Dans le menu Fichier, sélectionnez Nouveau pour créer un nouveau projet. Vous pouvez spécifier le nom du projet lors de sa sauvegarde en utilisant les options Enregistrer ou Enregistrer sous dans le menu Fichier. Pour ouvrir un projet déjà sauvegardé, utilisez la commande Ouvrir dans le menu Fichier. Pour concevoir une structure dans HFSS, suivez cette procédure générale. Il est important de noter que bien que les étapes ne nécessitent pas d'être exécutées séquentiellement après l'insertion d'une conception, elles doivent être accomplies avant qu'une solution puisse être générée.

Choisir les nouvelles unités pour le modèle à partir de la liste déroulante d'unités choisies.

4.1. Dessiner un modèle

Pour créer une structure en 3D, utilisez simplement les outils de dessin fournis par le logiciel. Nous nous concentrons ici sur les aspects les plus complexes de cette procédure. Vous pouvez créer des objets 3D en utilisant les commandes de dessin HFSS (HFSS > draw > Commandes). Les objets sont alors dessinés dans la fenêtre du modèleur 3D (voir figure).

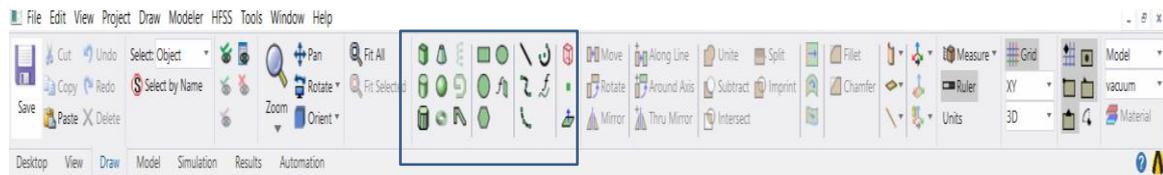


Figure. A.6 : Dessiner un modèle.

4.2. Utilisation des variables du projet

Dans HFSS, nous avons la possibilité de définir des variables afin de les associer à divers paramètres de la structure, tels que les dimensions ou les propriétés des matériaux (voir figure A.7).

L'utilisation de variables pour lier les dimensions simplifie la gestion des éventuels changements ultérieurs. Par exemple, pour modifier les dimensions et les excitations d'un élément comme le plot dans notre cas, il suffit de modifier la valeur de la variable correspondante.

Pour définir une variable, il faut accéder à Projet > Variables du projet et saisir son nom, sa valeur et son unité. Une fois une variable définie, on peut utiliser son nom à la place de sa

Références

valeur. HFSS permet également l'utilisation de fonctions mathématiques sur les variables définies.

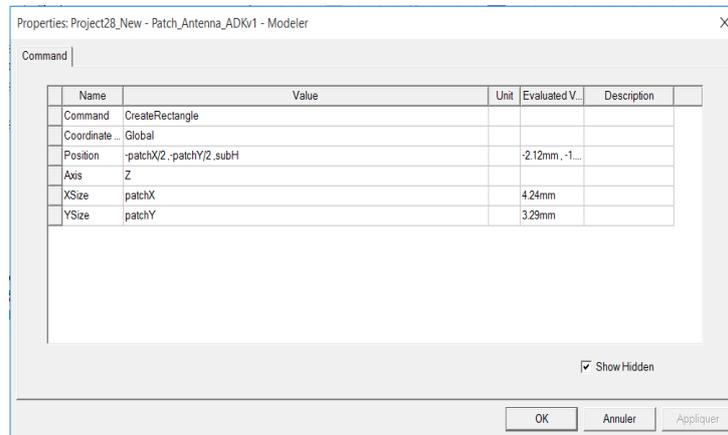


Figure. A.7 : Utilisation des variables du projet.

4.3. Soustraction des objets

Il est fréquent de devoir éliminer certaines parties d'un objet.

- Commencez par dessiner l'objet principal ainsi que les objets à soustraire de celui-ci.
- Sélectionnez l'objet principal.
- En maintenant enfoncée la touche CTRL, sélectionnez les objets à soustraire.
- Cliquez sur "**Subtract**" .
- Les objets répertoriés dans la section "Parties de l'outil" seront soustraits des objets répertoriés sous "Parties vides".
- Si vous souhaitez que HFSS conserve une copie des objets soustraits, cochez l'option "Cloner les objets de l'outil avant de soustraire".
- Appuyez sur OK pour valider.

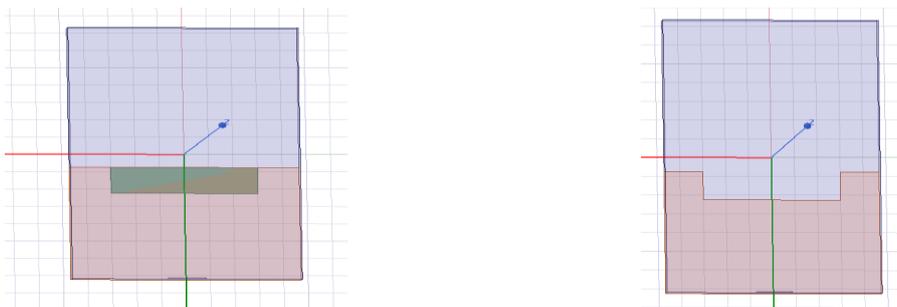


Figure.A.8: Soustraction des objets.

Références

4.4.Barres d'outils

Les boutons des barres d'outils offrent des raccourcis vers les commandes les plus couramment utilisées. Bien que la plupart des barres d'outils soient présentées dans l'illustration de l'écran initial d'Ansoft HFSS, votre fenêtre Ansoft HFSS peut être configurée différemment. Vous avez la possibilité de personnaliser l'affichage de vos barres d'outils selon vos préférences. Certaines barres d'outils sont toujours visibles, tandis que d'autres apparaissent automatiquement lorsque vous sélectionnez un document correspondant. Par exemple, lorsque vous choisissez un rapport 2D dans l'arborescence du projet, la barre d'outils de l'état 2D s'affiche.

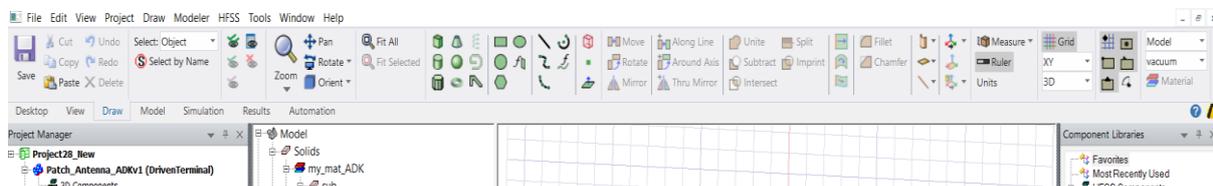


Figure.A.9: Barres d'outils.

4.5.Boundaries

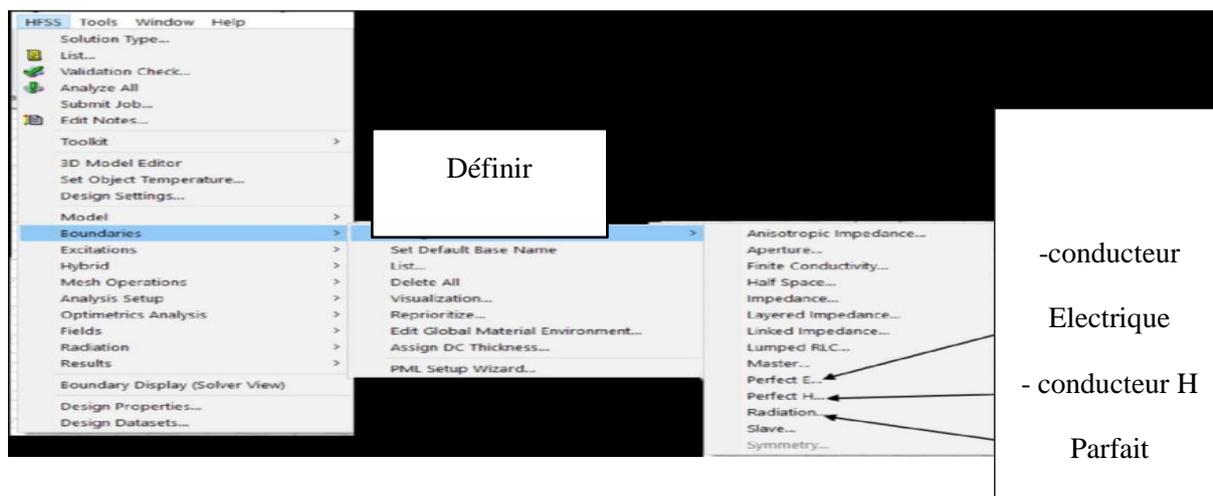


Figure.A.10: Boundaries.

➤ Perfect E :

Ce type de limite est souvent désigné sous le nom de "conducteur parfait". Dans cette situation, le champ électrique est perpendiculaire à la surface. Deux critères automatiques permettent de définir un conducteur comme étant parfaitement conducteur :

- ✓ Lorsqu'une surface de l'objet entre en contact avec un substrat, elle est automatiquement catégorisée comme une limite parfaitement conductrice et est désignée comme une condition limite extérieure.

Références

✓ Lorsqu'un objet est associé à un matériau PEC (Perfect Electric Conductor), il est automatiquement soumis à la condition de limite électriquement parfaite.

- **Perfect H :**

Si un matériau est un conducteur magnétiquement parfait, le champ magnétique est tangentiel à sa surface.

4.6.Analyze Setup

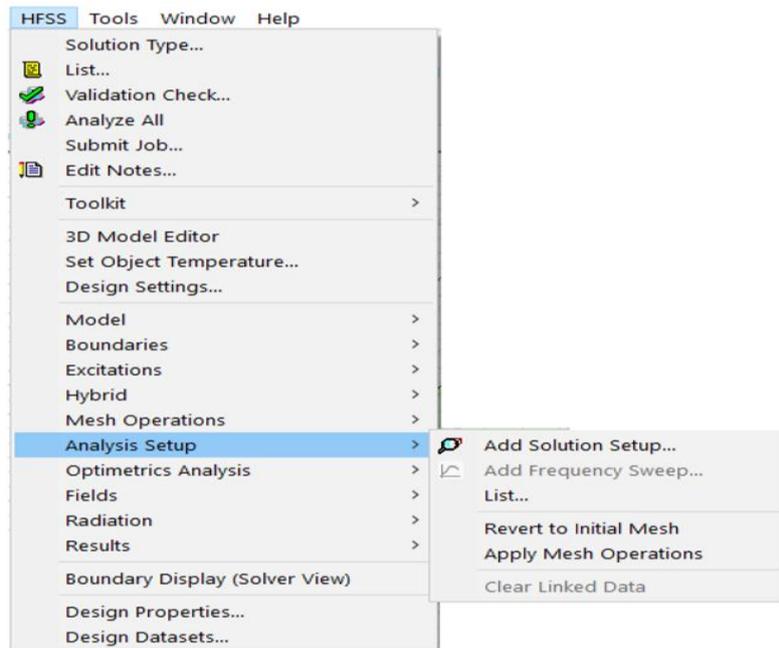


Figure.A.11: Analyze Setup.

5. Tracer S11 et VSWR :

Tout d'abord, nous accédons au gestionnaire de projet, puis pour les résultats, nous affichons une liste comprenant la création d'un rapport de données de solution terminale et un tracé rectangulaire. Nous sélectionnons l'unité en décibels

Références

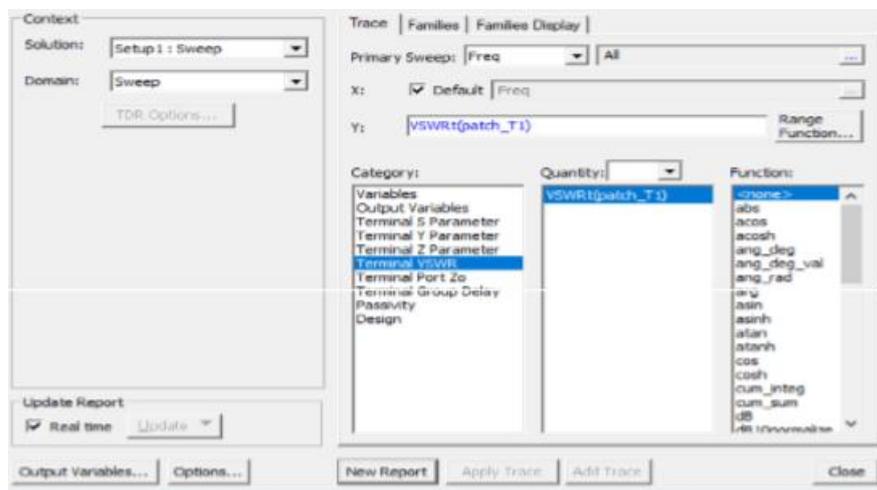
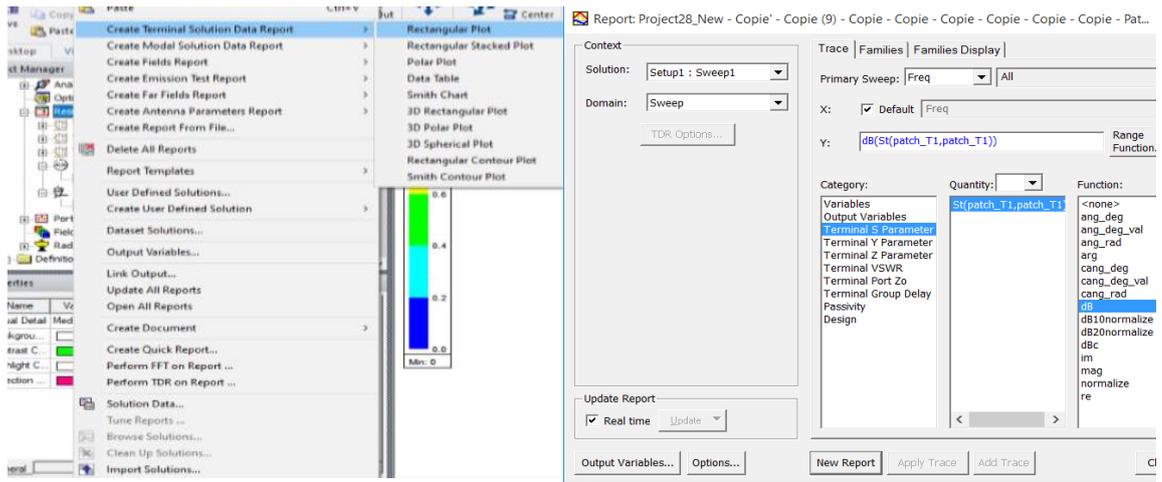
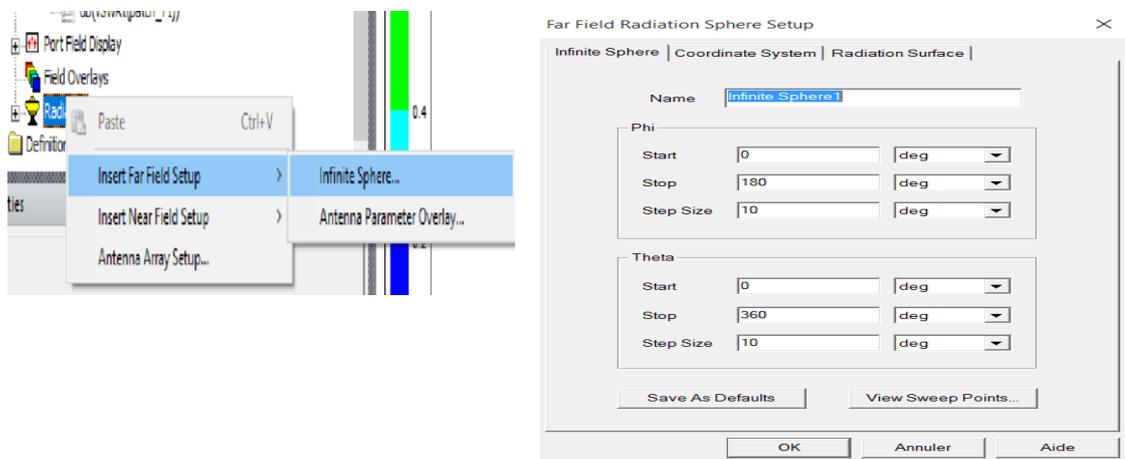


Figure.A.12: S11 et VSWR.

6. Diagramme de rayonnement :

D'abord, nous accédons au gestionnaire de projet, puis nous cliquons sur "insérer une configuration de champ lointain" (sphère infinie) et ajustons les paramètres.



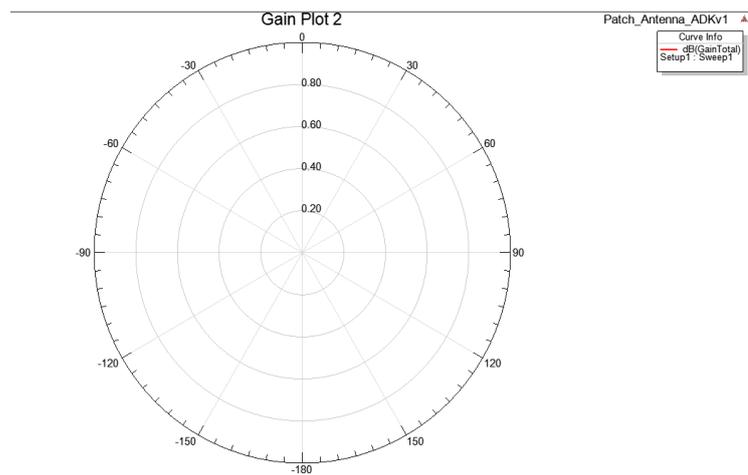
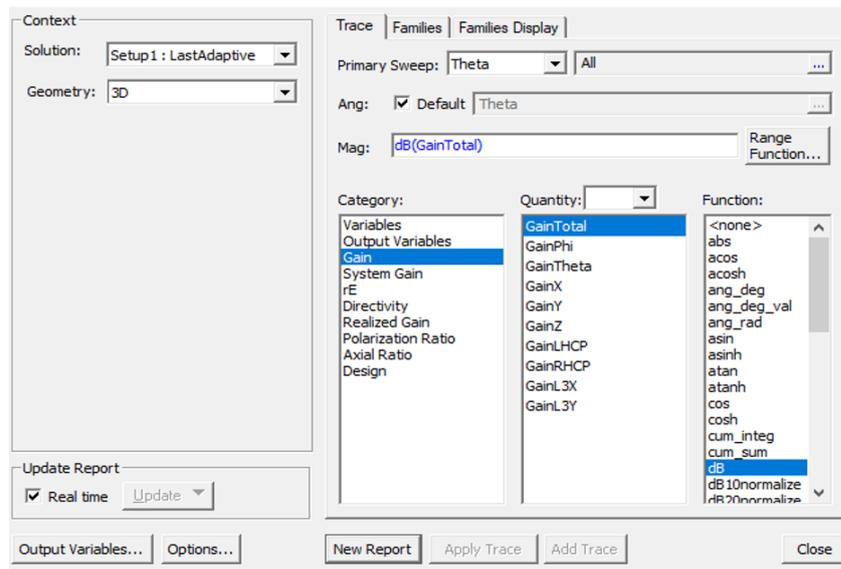


Figure.A.13: Diagramme de rayonnement.

7. Conclusion

Dans cette annexe supplémentaire, nous exposons et détaillons les étapes essentielles à la conception d'un projet HFSS. Nous exemplifions ce processus en utilisant une antenne patch rectangulaire excitée par des lignes micro-ruban. HFSS est un logiciel de simulation électromagnétique qui permet d'analyser des structures en établissant des modèles 3D et en fournissant une représentation visuelle claire des résultats en 2D et 3D.

RÉFÉRENCES

Références

- [1] Picon, Odile et al. « Les antennes: Théorie, conception et application ». Dunod, Paris, 2009.
- [2] Taleb, S. « Simulations de systèmes d'antennes pour imagerie micro-ondes ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [3] Chaabane, A. « Conception d'une antenne big large bande à fort gain ». Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2017.
- [4] Azzaz Rahmani, Salima, et Nouredine Boukli Hacene. "Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques : Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multibandes." Univ Européenne, avril 2012.
- [5] Souai, S. Réseaux d'antennes miniatures super-directifs reconfigurables basses fréquences pour l'IoT. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, 2021.
- [6] Nadir, H. Contribution à la conception d'antennes ultra large bande impulsionsnelles d'encombrement réduit. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2018.
- [7] Ragad, Hedi. Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF. Thèse de doctorat, Université de Nantes; Université de Tunis El Manar, Tunisie, 2013.
- [8] Balanis, C. A. Antenna theory: analysis and design. 3rd edition, John Wiley & Sons, INC, 2005.
- [9] Rana, Md Sohel, et al. "Microstrip patch antennas for various applications: a review." Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 29.3 (2023): 1511-1519.
- [10] Belguessoum, Ahmed. Conception et réalisation d'une antenne multibandes alimentée par un guide d'onde coplanaire CPW. Thèse de doctorat, University of Ottawa (Canada), 2008
- [11] Pirinen, Pekka. "A brief overview of 5G research activities." 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. IEEE, 2014.
- [12] Drissi, Meriem. Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les' smal cell'. Thèse de doctorat, Normandie Université; Université des sciences, des techniques et de médecine de Tunis, 2023.
- [13] Saada, Mohammed H. Abu. Design of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas for 5G Communication System. The Islamic University–Gaza, 2017

Références

- [14] Gohil, Asvin, Hardik Modi, and Shobhit K. Patel. "5G technology of mobile communication: A survey." 2013 international conference on intelligent systems and signal processing (ISSP). IEEE, 2013.
- [15] Ezratty, Olivier. Opinions libres. Opinions libres, 2006.
- [16] Muteau, S. "Les dessous de la 5G." *Économie numérique*, 30 août 2017.
- [17] Joao, Kelson Henrique. Dispositifs intégrés à très haute efficacité pour la gestion de l'énergie dans les émetteurs de télécommunications de 5ème génération (5G). Diss. Université de Limoges, 2022
- [18] Hajri, S-E. "L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs." Thèse de doctorat, Université de Paris Saclay, 2018.
- [19] Source : Large bande mobile à ondes millimétriques : Unleashing 3-300 GHz Spectrum, 2011.
- [20] Nakamura, T., Nagata, S., Benjebbour, A., Kishiyama, Y., Hai, T., Xiaodong, S., Ning, Y., & Nan, L. "Trends in small cell enhancements in LTE advanced." *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [21] Launay, F. (2023). Les réseaux de mobiles 4G et 5G. Cours, France, Université de Poitiers. Disponible sur : (<https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/reseaux-heterogenes/>).
- [22] Rusek, Fredrik, et al. "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays." *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [23] Hassan, N., & Fernando, X. "Massive MIMO Wireless Networks: An Overview." *Electronics*, vol. 6, no. 63, 5 septembre 2017.
- [24] Qiao, J. "Enabling Millimeter Wave Communication For 5g Cellular Network Mac-Layer Perspective." Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Canada, 2015.
- [25] Idowu-Bismark, Olabode, Francis Idachaba, and A. A. A. Atayero. "A Survey on Traffic Evacuation Techniques in Internet of Things Network Environment." *Indian Journal of Science and Technology* (2017).
- [26] Thierry Borgel. "Anticipation et opportunités : Influence de la 5G sur les architectures.", Cigref, 2020.

Références

- [27] Khammari, Hedi, et al. "Spatio-radio resource management and hybrid beamforming for limited feedback massive MIMO systems." *Electronics* 8.10 (2019): 1061.
- [28] Chataut, Robin, and Robert Akl. "Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction." *Sensors* vol. 20, no. 10 (2020): 2753.
- [29] Studer, X. (2019, avril). Réseaux mobiles: Pionnier de la 5G, Sunrise dépasse Swisscom. Le blog high-tech & telecom de Xavier Studer. (<https://www.xavierstuder.com/2019/04/reseaux-mobiles-pionnier-de-la-5g-sunrise-depasse-swisscom/4g-5g/>)
- [30] Nagdive, T. (n.d.). 5G Wireless Networks. LinkedIn. (<https://www.linkedin.com/pulse/5g-wireless-networks-tushar-nagdive>)
- [31] Carabot, Jean-Yves. "La 5G : Opportunités et enjeux." Club Médias et Télécoms, 2021.
- [32] Bousalah Fayza. "Design of Miniature Planar Antennas for 5G Systems". *Advances in Wireless Communications and Networks*, vol. 7, no 1, 1-8. 2021.
- [33] Hammerstad, E. O. (1975). Equations for Microstrip Circuit Design. 1975 5th European Microwave Conference.