

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية - 1-
Université SAAD DAHLAB de BLIDA-1-

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Télécommunication
Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par

 **Brahimi Nassima**

&

 **Abad Narimane**

Conception et Simulation d'une Antenne Miniature pour les Applications de Communication sans fil

Proposé par

❖ **Mme BERKAT Zeyneb**

❖ **Mr MOSBAH Abdelkader**

Année Universitaire 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux.

Dédicaces

Je tiens à dédier cette mémoire à mon cher père, dont le soutien indéfectible et les précieux conseils ont façonné mon parcours académique. Ta mémoire continuera de m'inspirer dans ma quête de connaissance et d'excellence. En hommage affectueux, cette thèse t'est dédiée.

Je dédie également cette mémoire à ma chère maman, qui a été ma source d'amour et de soutien constant. Ta présence bienveillante a été une source d'inspiration. Tes encouragements inébranlables et ta tendresse infinie m'ont donné la force et la détermination d'atteindre ce moment. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Je suis profondément reconnaissante de t'avoir comme mère. Que cette dédicace témoigne de mon amour éternel et de ma gratitude infinie envers toi.

Je souhaite adresser mes vœux de santé, bonheur et réussite à mes très chers frères.

À toute ma famille et mes amis, sans exception, je vous dédie cette thèse.

Enfin, un sincère remerciement à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet. Votre soutien a été précieux.

Brahimi Nassima

Au Nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux.

Dédicaces

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers Allah le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

À ma chère mère, il est impossible de te remercier suffisamment pour m'avoir donné la vie. Aucun mot ne peut exprimer la profondeur de ma gratitude envers toi. Ta présence a toujours été ma source de force, et sans toi, je n'aurais rien accompli. Toute l'éducation que j'ai reçue et le caractère que j'ai développé sont le résultat de tes principes et de tes efforts. Tu as tracé le meilleur chemin pour ma vie. Ma mère, qui trouve son bonheur dans mon avenir, ne m'a jamais oublié dans ses prières. Je t'aime infiniment.

À mon cher père, qui a sacrifié sa vie pour que je devienne ce que je suis aujourd'hui. J'ai grandi, étudié et réussi grâce à toi. Tu m'as fourni tout ce dont j'avais besoin, et c'est grâce à toi que j'ai obtenu ce diplôme. Je suis extrêmement chanceuse de t'avoir comme parent.

À mes très chers frères et à ma sœur, je vous souhaite un avenir rempli de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

À toute ma famille, mes cousins et cousines, et mes amis, je vous remercie pour votre soutien et vos prières pour mon succès.

À toutes les personnes qui m'ont encouragée tout au long de mes études et de ma vie, à tous ceux qui me sont chers, à tous ceux qui m'aiment, et à tous ceux que j'aime, je vous dédie cette reconnaissance sincère.

Abad Narimane

Remerciements

Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude envers le bon DIEU, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du Département de l'électronique de la Faculté de Technologie de l'université SAAD DAHLEB BLIDA. Nous souhaitons saisir cette occasion pour exprimer nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à notre promotrice, Madame **BERKAT Zeyneb**, pour ses précieux conseils et son orientation tout au long de notre recherche. Ses avis éclairés et le savoir qu'elle nous a transmis ont été d'une grande valeur.

Aussi **Mr MOSBAH Abdelkader**, pour la Confiance qu'il nous a témoignée. Aussi pour son aide dans les réalisations expérimentales, les mesures effectuées et la sympathie qu'il nous a porté.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et en l'enrichissant de leurs propositions.

Enfin, nous souhaitons également remercier chaleureusement toutes nos familles et nos ami(e)s qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. Votre soutien a été précieux et nous en sommes profondément reconnaissants.

الملخص

هدف هذا المشروع كان تطوير هوائي مسطح مُصغّر مُعدّ خصيصاً لتطبيقات الجيل الخامس 5 G باستخدام تقنيات التصغير DGS/DMS. تم تصميم الهوائي بشكل خاص للعمل على تردد 3.7 جيجاهرتز، والذي يحمل أهمية كبيرة في شبكات الجيل الخامس بسبب قدرته العالية على النقل ونطاقه المُرضٍ. من خلال تحسين تكييف الهوائي وفقاً للمتطلبات الخاصة، يهدف مشروعنا إلى تحسين الأداء والاتصالية في شبكات الجيل الخامس. للتصميم، استخدمنا برنامج CST STUDIO والتركيبة الأساسية FR-4. يتم تقديم التفاصيل المختلفة للتكوينات والمحاكاة والنتائج النهائية المحققة بالتفصيل في الدراسة.

الكلمات الرئيسية: هوائي مسطح مُصغّر، تطبيقات الجيل الخامس، تقنيات التصغير DGS/DMS الاتصالية، برنامج CST STUDIO، التركيبة الأساسية FR-4.

Résumé :

Ce projet avait pour objectif de développer une antenne planaire miniaturisée adaptée aux applications 5G en utilisant les techniques de miniaturisation DGS/DMS. L'antenne a été spécifiquement conçue pour fonctionner à la fréquence de 3.7 GHz, qui revêt une grande importance dans les réseaux 5G en raison de sa capacité de transmission élevée et de sa portée satisfaisante. En optimisant l'adaptation de l'antenne aux besoins spécifiques, notre projet vise à améliorer les performances et la connectivité des réseaux 5G. Pour la conception, nous avons utilisé le logiciel CST STUDIO ainsi que le substrat FR-4. Les différentes simulations et résultats finaux obtenus sont présentés en détail dans l'étude.

Mots clés : antenne planaire miniaturisée, applications 5G, techniques de miniaturisation DGS/DMS, logiciel CST STUDIO, substrat FR-4.

Abstract:

The objective of this project was to develop a miniaturized planar antenna suitable for 5G applications using DGS/DMS miniaturization techniques. The antenna was specifically designed to operate at a frequency of 3.7 GHz, which holds significant importance in 5G networks due to its high transmission capacity and satisfactory range. By optimizing the antenna's adaptation to specific requirements, our project aims to enhance the performance and connectivity of 5G networks. For the design process, we utilized the CST STUDIO software and the FR-4 substrate. Detailed information regarding different simulations, and final results can be found in the study.

Key words: miniaturized planar antenna, 5G applications, DGS/DMS techniques, CST STUDIO software, FR-4 substrate.

Listes des acronymes et abréviations

BDMA :Big Data Management and Analytics.

BF : Beam Forming.

Bl : Bluetooth.

BW : Bande Width (bande passante).

Femto : 10^{-15} .

FPC : circuit imprimé flexible.

FR4 : Semi-conducteur.

Gbps : Giga bits par second.

GNSS : global Navigation Satellite System.

HAPS :High-altitude platform station.

IA : intelligence artificiel.

IoT : internet des objets.

LDPC : Low-Density Parity-Check (code de contrôle de partie base densité) .

LTE : Long Term Evolution.

MiMo : Multi-inputs Multi-Outputs.

NFC : Near-field communication.

PCB : carte de circuit imprimé (Printed circuit board).

RLC : Circuit contient des résistances inductances et condensateurs.

UE : Use Equipment.

UIT : Union internationale des télécommunications.

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

WPAN : Wireless Personal Area Network.

Listes des caractères

w_e représente la quantité moyenne d'énergie non rayonnée électrique.

w_m représente la quantité moyenne d'énergie non rayonnée magnétique.

w_0 est la pulsation à la fréquence f_0 .

P_a désigne la puissance reçue ou rayonnée par l'antenne.

K : représente le nombre d'onde ou $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

a : désigne le rayon de la petite sphère contenant l'antenne.

G_{max} : Le gain maximum de l'antenne.

Z_e : Impédance d'entrée.

D : Directivité .

$c = 3 \times 10^8$ [la vitesse de la lumière].

$f_r = 3.7$ GHz [Fréquence de résonance].

$\epsilon_r = 4.3$ [permittivité relative].

L : la longueur de patch.

L_{eff} : La longueur de patch en présence de l'effet de débordement (fading affects).

a : la distance du repaire jusqu'à la longueur ou largeur désirer

t : la hauteur du plan de masse (épaisseur).

Table des matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ANTENNES POUR NOUVELLES APPLICATIONS DE COMMUNICATION SANS FIL (5G-6G) 2	2
I. Introduction	3
I.1.1. La technologie du 5G	4
I.1.2. Les types d'antennes utilisées dans la 5G	4
I.1.2.1. Antennes internes FPC / PCB	4
I.1.2.2. Antennes externes dans le bâtiment	6
I.1.2.3. Antennes extérieures	6
I.1.3. Caractéristiques et avantages des antennes 5G :	7
I.1.4. Les technologies utilisées dans la 5G	7
I.1.4.a Nouvelles fréquences radio	7
I.1.4.a.1 Plage de fréquences Sub 6GHz :	7
I.1.4.a.2 Plage de fréquences de 24-71 GHz (la bande millimétrique) :	7
I.1.5.b Couverture FR2	8
I.1.5.c Massive MIMO	9
I.1.5.d Calcul en périphérie	9
I.1.5.e petite cellule	10
I.1.5.f formation de faisceau(Beamforming)	10
I.1.5.j NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)	10
I.1.5.h SDN/NFV (Software-defined networking / Network function virtualization)	10
I.1.5.i Codage canal	11
I.1.6. Conception de l'architecture de réseau mobile 5G	11
I.1.7. Les applications de la Technologie 5G	12
I.1.8. Les avantages de la 5G	12
I.1.9. Les inconvénient de la 5G	13
I.2.1. Définition de la 6G	13
I.2.3. La différence entre la 5G et la 6G	14
I.2.4. Les avantage de la 6G	15
I.2.4 Les défis pour la 6G	16
I.2.4.a. défis architecturaux	16
I.2.4.b. défis technologiques	16

I.2.4.c.défis sociaux.....	16
I.2.5 Formation et gestion des faisceaux 6G.....	17
I.2.6.CALENDRIER DE DÉVELOPPEMENT 6G.....	17
I.2.7.Les application du 6G	18
CHAPITRE II : LES TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES ANTENNES	20
II.1 Introduction	21
II.2 Miniaturisation	21
II.3 Définition d'une antenne miniature	22
II.4 Les techniques de miniaturisation	23
II.5. Avantage et Inconvénient de la miniaturisation	24
II.6. Limites théoriques de la miniaturisation des antennes	25
II.6.1 Facteur de qualité d'une antenne.....	25
II.6.2 Facteur de miniaturisation	26
II.7.Les différents types d'antennes	26
II.7.1 .Antennes Directives.....	27
II.7.2.Antennes Omnidirectionnelles	28
II.7.3. Antennes Sectorielles	28
II.7.4. Antennes Agiles	30
II.8. Caractéristiques d'une antenne	30
II.8.1.Les caractères d'adaptation	30
II.8.1.b.L'impédance d'entrée	31
II.8.2 Les caractères de rayonnement	31
II.10.Conclusion.....	36
CHAPITRE III : SIMULATIONS ET RESULTATS.....	37
III.1.Introduction	38
III.2.Miniaturisation.....	38
III.2.1.La DGS Defected Ground Structure	38
III.2.2.La DMS Defected Microstrip Structure.....	39
III.3.Choix d'antenne à réalisé.....	40
III.3.1.Les antennes patch.....	40
III.3.2.Les équations de l'antenne patch rectangulaire :	40
III.3.2. les applications d'un patch antenne	42
III.4. Choix de logiciel	43
III.5. Processus de conception d'une antenne rectangulaire miniaturisé	44

III.6. Simulation et résultats	45
III.6.1. Le patch référence	45
III.6.2. Miniaturisation par la technique DMS	51
III.6.3. Les résultats définitifs obtenus	53
III.7 Analyse des dimensions des encoches par une étude paramétrique	55
III.7.1. l'étude paramétrique sur a1 et b1 dans la DMS :	55
III.8. Conclusion	60
CONCLUSION GENERALE	61
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	62

Liste des figures

Figure. I. 1 La différence de faisceau utilisée entre la 4G et la 5 G.....	4
Figure. I 2(a) Antenne PCB (b) Antenne FPC.	5
Figure .I 3. Antennes externes dans le bâtiment.....	6
Figure.I 4. Antenne extérieure.....	6
Figure.I 5. a. Femtocell . b. Microcell .c. Picocell.	8
Figure.I 6. Massive MiMo de Nokia.	9
Figure.I 7. L'architecture de réseau mobile 5G.....	11
Figure. I 8. La 6G.	13
Figure .I .9. Les défis de la 6 G.	16
Figure. I 10 . Les applications de la 6G.....	17
Figure .II. 1. Définition de la sphère équivalente d'une antenne	23
Figure .II. 2. Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.....	27
Figure .II. 3. Rayonnement omnidirectionnel.	28
Figure .II. 4. Exemple d'antenne sectorielle.	28
Figure .II. 5. Exemple de réseaux d'antennes élémentaires.	29
Figure .II. 6. Exemple d'antenne à fentes.	29
Figure .II. 7. Coefficient de réflexion.	31
Figure .II. 8. Bande passante et coefficient.	33
Figure .II. 9. Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.	34
Figure .II. 10. Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope.	35
Figure .II. 11. (a) Diagramme de rayonnement omnidirectionnelle (b) diagramme directif.	35
Figure.III. 1. Les différentes formes de coupes	39
Figure.III. 2. Patch antenne.....	40
Figure.III. 3. Les dimensions d'une antenne patch.	41
Figure.III. 4. Dimensions d'une ligne micro ruban.	42
Figure.III. 5. Le patch de référence.....	45
Figure.III. 6. Le S11 et la bande passante d'antenne patch.	46
Figure.III. 7. Le gain du patch référence.	46
Figure.III. 8. Le courant de surface du patch référence.	47
Figure.III. 9. Plan de masse avec des encoches.	47
Figure.III. 10. Le gain d'antenne avec DGS.....	48
Figure.III. 11. Comparaison du S11 en dB.	48
Figure.III. 12. Résultats finaux de l'application du DGS sur l'antenne de référence	49
Figure.III. 13. La comparaison du S11 en dB entre DGS1 et DGS2.	49
Figure.III. 14. Le Gain de DGS finale.	50
Figure.III. 15. Le courant de surface de la DGS.	50
Figure.III. 16. Présente l'application de la technique DMS sur le patch de l'antenne.	51
Figure.III. 17. Le S11 et la bande passante du patch avec la DMS.	51

Figure.III. 18. Le Gain de patch après la DMS.....	52
Figure.III. 19. Le courant de surface de la DMS.	52
Figure.III. 20. Comparaison entre le S11 de la DGS et la DMS.....	53
Figure.III. 21. L'antenne patch final (a) vue de face (b) vue d'arrière.	54
Figure.III. 22. Le Gain de d'antenne patch final.....	54
Figure.III. 23. Le S11 et bande passante de patch final.	54
Figure.III. 24. Le courant de surface du patch final.....	55
Figure.III. 25. Les dimensions des encoches utilisées dans la technique de DMS.	55
Figure.III. 26. Comparaison entre S11 après l'étude paramétrique sur a1.	56
Figure.III. 27. Le gain après l'étude paramétrique sur a1.	56
Figure.III. 28. Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur b1.....	57
Figure.III. 29. Le gain après l'étude paramétrique sur b1.	57
Figure.III. 30. Les dimensions des encoches appliquées dans la méthode DGS.....	58
Figure.III. 31. Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur X1.....	58
Figure.III. 32. Le gain obtenu après l'étude paramétrique sur X1.....	59
Figure.III. 33. Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur Y1.....	59
Figure.III. 34. Le gain après l'étude paramétrique sur Y1.	59

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Les différences entre la 5G et la 6G	15
Tableau. III. 1. Les étapes suivie.....	44
Tableau. III. 2. Les dimensions d'antenne PATCH.....	45

INTRODUCTION GENERALE

Au fil des décennies, la technologie mobile a connu une évolution rapide, devenant désormais une part intégrante de notre quotidien. Les gens semblent plus préoccupés par leur téléphone portable que par leur bien-être. De nombreux experts technologiques considèrent les appareils mobiles et les réseaux sans fil comme l'avenir de la technologie.

Cette évolution a débuté avec la première génération de systèmes mobiles (1G), qui transmettaient des signaux analogiques, puis la deuxième génération (2G) a introduit les signaux numériques. La troisième génération (3G) est réputée pour sa transmission de données à haut débit, suivie de la 4G, notamment la 4G LTE. Récemment, la technologie 5G, également appelée Internet des objets (IoT), a fait son apparition, suivie de près par la 6G, qui promet une connectivité sans fil plus avancée et étendue que la 5G.

Avec l'explosion des technologies de télécommunication et les recherches scientifiques continues sur les antennes imprimées, il devient évident que les antennes microbandes sont devenues indispensables dans de nombreuses applications, remplaçant les antennes classiques. Toutefois, face aux exigences croissantes du domaine de la communication, les antennes microbandes classiques sont confrontées à des limitations en termes de taille. C'est pourquoi des solutions de miniaturisation sont nécessaires.

Dans ce contexte, le premier chapitre de ce document présente une vue d'ensemble des technologies 5G et 6G, ainsi qu'une comparaison entre les deux, le deuxième chapitre explore le concept de miniaturisation, en examinant ses techniques, ses limitations et certaines caractéristiques de rayonnement propres à certaines antennes.

Enfin, le troisième chapitre se concentre sur la simulation et les résultats. Nous décrivons les étapes nécessaires à la conception et à la simulation d'antennes à l'aide de l'outil logiciel CST Microwave Studio (MWS).

En résumé, ce document explore la progression des technologies mobiles, l'importance de la miniaturisation des antennes et propose une approche de simulation pour la conception d'antennes performantes dans le contexte du déploiement de la 5G et des préparatifs pour la 6G.

**CHAPITRE I : ANTENNES POUR NOUVELLES
APPLICATIONS DE COMMUNICATION SANS FIL (5G-
6G)**

I. Introduction

Tout au long de l'histoire des communications, des avancées significatives ont été réalisées, propulsant les technologies de télécommunication vers de nouveaux horizons. Depuis les premières formes de transmission à distance jusqu'à l'émergence des réseaux 5G et les perspectives prometteuses de la future 6G, l'évolution des télécommunications a redéfini notre façon de communiquer et d'interagir avec le monde qui nous entoure.

La technologie 5G est le dernier jalon majeur dans l'évolution des télécommunications. Elle promet des vitesses de transmission encore plus rapides, une latence réduite et une capacité de connectivité massive, ouvrant ainsi la voie à des innovations telles que les voitures autonomes, l'Internet des objets (IOT) et les villes intelligentes. La 5G offre également une plus grande capacité pour prendre en charge un nombre croissant d'appareils connectés simultanément, permettant ainsi une connectivité sans précédent.

Alors que la 5G commence à se déployer à travers le monde, les chercheurs et les experts travaillent déjà sur la prochaine génération de réseaux de communication : la 6G. La 6G est encore en phase de développement, mais elle promet des avancées encore plus remarquables, notamment des vitesses de transmission ultra-rapides, des capacités de calcul avancées et une interconnectivité globale à grande échelle.

Dans ce contexte en constante évolution, il est essentiel de comprendre l'évolution des télécommunications jusqu'à la 5G et de se préparer à l'arrivée imminente de la 6G. Cette introduction propose un aperçu de cette évolution, en mettant en évidence les promesses et les possibilités offertes par la 5G et en anticipant les développements futurs avec la 6G.

I.1.1. La technologie du 5G

La technologie 5G présente une vitesse de pointe théorique de 20 Gbps, ce qui représente une amélioration significative par rapport à la vitesse de pointe de 1 Gbps offerte par la 4G. De plus, la 5G offre une latence réduite, ce qui se traduit par de meilleures performances pour les applications commerciales (voir Figure I.1) ainsi que pour d'autres expériences numériques telles que les jeux en ligne, la vidéoconférence et les voitures autonomes.). [1]



Figure. I. 1 La différence de faisceau utilisée entre la 4G et la 5 G.

La figure I.1 [2] : présente la technologie de formation de faisceaux qui permet de traiter les signaux de communications des abonnés de manière individuelle, en dirigeant le signal dans une direction spécifique pour chaque abonné.

I.1.2. Les types d'antennes utilisées dans la 5G

I.1.2.1. Antennes internes FPC / PCB

Elles sont conçues avec des performances pré-optimisées et sont logées dans un boîtier en plastique standard. Elles se distinguent par leurs dimensions compactes et leur capacité d'adhésion. Ces antennes minces NFC sont principalement utilisées pour les applications de paiement et de partage de données.

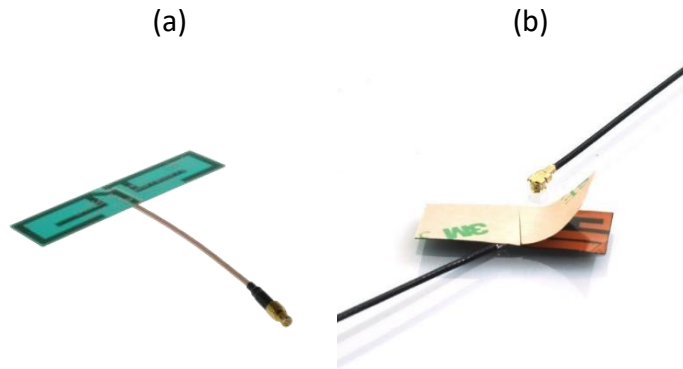


Figure. I 2(a) Antenne PCB (b) Antenne FPC.

La Figure I.2.a [3] illustre un exemple d'antenne PCB qui opère à haute fréquence et permet aux dispositifs de communiquer sur de longues distances en transformant les signaux électriques en ondes électromagnétiques. L'avantage principal des antennes PCB est leur capacité à réduire l'encombrement physique et les coûts d'entretien des appareils [4].

La figure I.2.b [3]: présente un type d'antenne FPC avec les caractéristiques suivantes : [5]

Plage de fonctionnement : 2.4G : 2.400~2.497 Gigahertz

Efficacité : 90%

Largeur de bande (VSWR : maximum 2,0)

Polarisation de 140 mégahertz

SWR : Linéaire-vertical

Rayonnement : Omni directionnel

Gain d'antenne : 1.6dBi

Impédance : 50 ohms

Hors de l'arrondi : 3dBi.

Type de contacteur : Première génération IPEX.

Radiateur d'antenne : FPC.

Température de fonctionnement : -10°C à 60°C.

Température de stockage : -40°C au °C 65.

I.1.2.2. Antennes externes dans le bâtiment

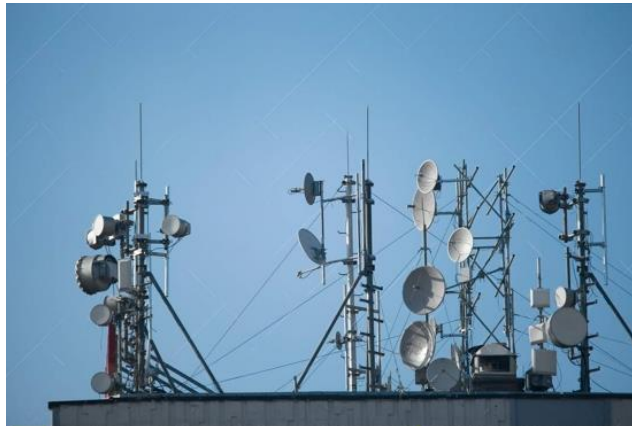


Figure .I 3. Antennes externes dans le bâtiment.

Les antennes externes (voir Figure I.3[6]) se présentent sous la forme d'antennes en lame ou en bâton, et sont largement utilisées dans les routeurs, les applications de connectivité sans fil et les systèmes de sécurité publique. Elles sont aussi couramment rencontrées dans les zones urbaines et à proximité des bâtiments.

I.1.2.3. Antennes extérieures



Figure.I 4. Antenne extérieure.

Les antennes extérieures sont des antennes polyvalentes conçues pour une utilisation portable et fixe, offrant une résistance aux intempéries. Elles sont couramment utilisées dans les radios portables ainsi que dans des applications de collecte de données. La figure I.4 [7] met en évidence une antenne extérieure spécifiquement conçue pour la détection des ondes radio utilisées dans la diffusion télévisuelle.

I.1.3. Caractéristiques et avantages des antennes 5G :

Les caractéristiques et avantages des antennes 5G incluent les éléments suivants [8]:

- Une large gamme d'options d'antennes pour les applications 5G, telles que les cartes de circuits imprimés flexibles (FPC), les PCB, les montages directs et les montages magnétiques.
- Prise en charge des bandes de fréquences allant de 617 MHz à 7125 MHz.
- Compatibilité avec les technologies Wi-Fi, BLE, Zigbee, MiMo et GNSS.
- Offre d'excellents gains à travers la bande passante.
- Adaptabilité aux applications IoT, smartgrid, compteurs, surveillance à distance et réseaux de capteurs.
- Convivialité pour les applications de sécurité, vidéo et graphiques.
- Utilisation possible dans les réseaux radio, les cellules femto et les environnements SOHO.
- Capacité de transmission de données à grande vitesse pour la télémétrie et les applications nécessitant un débit élevé.

I.1.4. Les technologies utilisées dans la 5G

I.1.4.a Nouvelles fréquences radio

L'interface aérienne définie par 3GPP pour la 5G est connue sous le nom de New Radio (NR), et sa spécification est divisée en deux gammes de fréquences, à savoir FR1 (inférieure à 6 GHz) et FR2 (24-54 GHz) [9].

I.1.4.a.1 Plage de fréquences Sub 6GHz :

La bande passante maximale pour FR1 est de 100 MHz en raison de la rareté du spectre continu dans cette plage de fréquences bondée. [3,3 à 4,2] GHz est la bande la plus largement utilisée pour la 5G. Les transporteurs coréens utilisent la bande n 78 à 3,5 GHz.

I.1.5.a.2 Plage de fréquences de 24-71 GHz (la bande millimétrique) :

La bande passante minimale pour la fréquence FR2 est de 50 MHz, tandis que la bande passante maximale atteint 400 MHz. Il convient de noter que plus les fréquences élevées, plus les vitesses de transfert de données sont améliorées.

I.1.5.b Couverture FR2

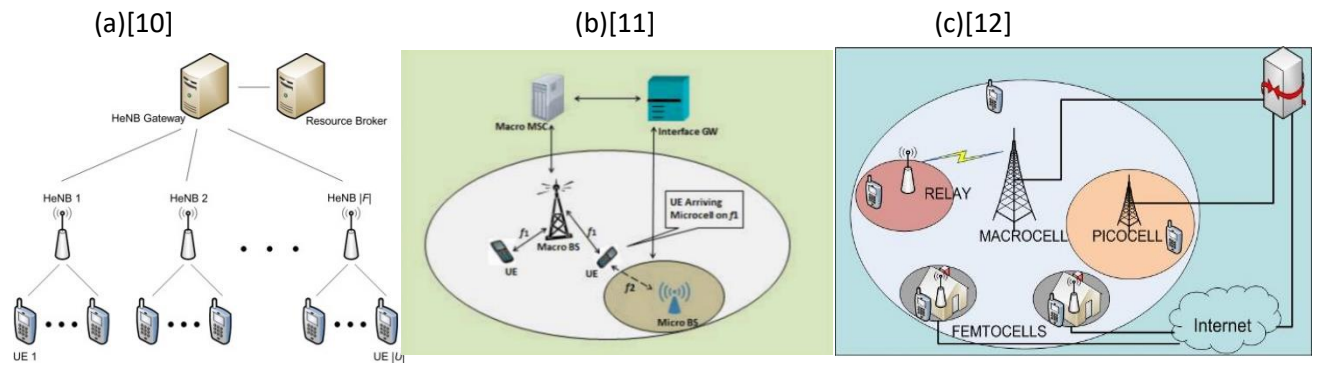


Figure.I 5. a. Femtocell . b. Microcell .c. Picocell.

Certains signaux de la technologie 5G ont une portée limitée en raison de l'utilisation de fréquences plus élevées par rapport à la 4G. Pour répondre à cette exigence, différents types de cellules sont utilisés dans les réseaux 5G.

Une de ces cellules est la femtocell à 10^{-15} , représentée par la figure I.5.a, qui est utilisée lorsque les distances de transmission sont courtes.

La figure I.5.b illustre la cellule micro, représentant 10^{-6} , qui est utilisée pour positionner les stations de base afin d'assurer une bonne couverture des abonnés dans des scénarios de mobilité.

La figure I.5.c représente la cellule pico, avec une valeur de 10^{-12} , qui est utilisée pour fournir une connectivité à domicile.

Il est important de noter que ces différentes cellules sont utilisées dans le cadre de déploiements spécifiques pour optimiser la couverture et les performances du réseau 5G.

I.1.5.c Massive MIMO



Figure.I 6.Massive MiMo de Nokia.

Les antennes MIMO massives, illustrées dans la figure I.6 [13], sont des antennes qui utilisent des techniques d'entrées et sorties multiples pour augmenter à la fois le débit et la densité de capacité dans un secteur donné. Elles sont caractérisées par l'utilisation d'un grand nombre d'antennes, ce qui permet d'améliorer considérablement les performances du système.

De plus, les antennes MIMO massives sont capables de gérer de manière efficace les interférences, ce qui améliore la fiabilité et la robustesse du système. Elles permettent également d'optimiser l'utilisation du spectre radio en exploitant les propriétés directionnelles des antennes.

I.1.5.d Calcul en périphérie

Le calcul en périphérie, également connu sous le nom de "Edge computing", est fourni par des serveurs informatiques situés à proximité de l'utilisateur final. Cette approche vise à réduire la latence, la congestion du trafic de données et à améliorer la disponibilité des services.

L'idée principale derrière le calcul en périphérie est de rapprocher le traitement des données et les capacités de calcul là où elles sont nécessaires, c'est-à-dire près des utilisateurs finaux ou des appareils connectés. Cela permet de minimiser les délais de transmission entre

les appareils et les centres de données distants, ce qui se traduit par une réduction significative de la latence.

I.1.5.e petite cellule

Les petites cellules sont des points d'accès à la radio cellulaire à faible puissance qui opèrent dans des bandes de fréquences autorisées ou non autorisées. Elles ont une portée allant de 10 mètres à quelques kilomètres.

I.1.5.f formation de faisceau(Beamforming)

Le Beamforming analogique, également connu sous le nom de formation de faisceau analogique, est une technique qui exploite la puissance des éléments d'un réseau d'antennes pour diriger les signaux dans des directions spécifiques.

En utilisant des interférences constructives, cette technique permet de concentrer l'énergie des signaux provenant d'angles particuliers, tout en orientant les autres signaux vers des angles différents. Ainsi, le Beamforming analogique permet d'améliorer la qualité et la portée des communications en réduisant les interférences et en augmentant la puissance des signaux utiles.

I.1.5.j NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

C'est une technique d'accès multiple qui vise à améliorer l'efficacité spectrale et la capacité des systèmes cellulaires. Contrairement aux méthodes traditionnelles d'accès multiple, NOMA permet à plusieurs utilisateurs de partager la même ressource fréquentielle et temporelle simultanément. Cette approche repose sur l'allocation de puissance différentielle aux utilisateurs, ce qui signifie que chaque utilisateur reçoit une puissance adaptée à ses besoins et à ses conditions de canal.

I.1.5.h SDN/NFV (Software-defined networking / Network function virtualization)

C'est une approche de conception et de gestion des réseaux de communication qui permet une flexibilité et une agilité accrues. Dans le passé, les technologies de communication mobile étaient principalement axées sur la fourniture de services vocaux et d'accès à Internet.

Cependant, avec l'émergence de nouveaux domaines d'application tels que l'Internet des objets (IoT), de nouvelles exigences et opportunités se sont présentées.

I.1.5.i Codage canal

Dans la 5G New Radio, les techniques de codage des canaux ont évolué des codes Turbo utilisés dans la 4G vers l'utilisation de codes polaires pour les canaux de contrôle, et des codes LDPC (Low Density Parity Check) pour les canaux de données.

I.1.6. Conception de l'architecture de réseau mobile 5G

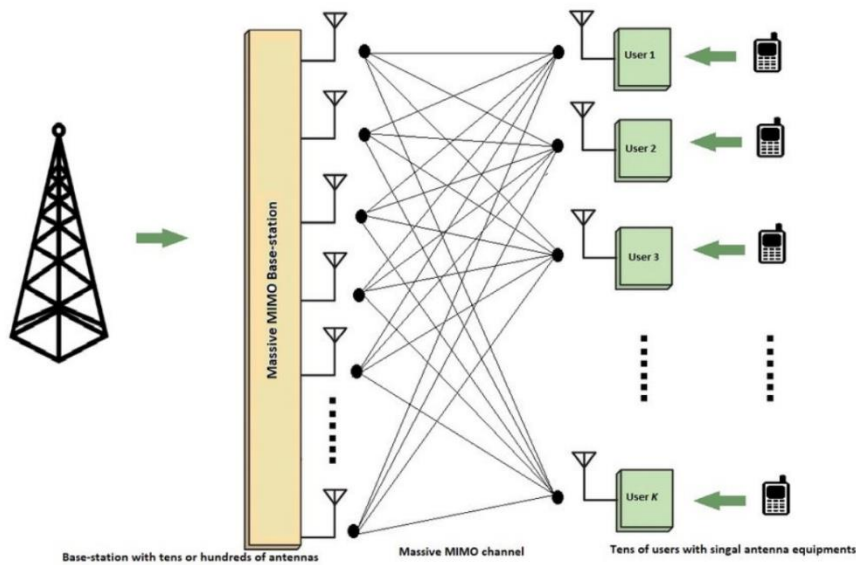


Figure.I 7.L'architecture de réseau mobile 5G.

La figure I.7 [14] présente le modèle de système qui illustre la conception de l'architecture de réseau pour les systèmes mobiles 5G. Cette architecture repose sur un modèle entièrement IP (Internet Protocol) pour assurer l'interopérabilité entre les réseaux sans fil et mobiles.

Le système est composé d'un terminal utilisateur et de plusieurs technologies d'accès radio, qui servent de lien avec le monde extérieur de l'Internet. Chaque technologie d'accès radio nécessite une interface radio spécifique sur le terminal mobile. Ainsi, pour mettre en place cette architecture fonctionnelle, il est nécessaire d'avoir simultanément quatre accès différents aux interfaces spécifiques de l'appareil mobile [14].

I.1.7. Les applications de la Technologie 5G

Voici quelques exemples d'applications de la technologie 5G [14] :

1. Une connectivité sans fil véritablement sans restrictions, sans limitations d'accès ou de zones.
2. Des appareils portables dotés de capacités d'intelligence artificielle.
3. L'utilisation du protocole Internet version 6 (IPv6), où une adresse IP de visite est attribuée en fonction de la localisation et du réseau auquel on est connecté.
4. Une norme mondiale unifiée qui favorise l'interopérabilité.
5. Des réseaux omniprésents offrant une informatique omniprésente : les utilisateurs peuvent être simultanément connectés à plusieurs technologies d'accès sans fil et passer facilement de l'une à l'autre, que ce soit le Wi-Fi, les WPAN ou d'autres technologies d'accès futures. En 5G, ce concept peut être développé avec plusieurs chemins de transfert de données simultanés.
6. La technologie de radio cognitive, également connue sous le nom de radio intelligente, permet à différentes technologies radio de partager efficacement le même spectre en identifiant de manière adaptative les bandes de fréquences inutilisées et en adaptant les schémas de transmission aux exigences des technologies partageant le spectre. Cette gestion dynamique des ressources radio est réalisée de manière distribuée et repose sur la radio définie par logiciel.
7. Les systèmes de plateformes stratosphériques à haute altitude (HAPS) : l'interface radio des systèmes de communication 5G peut être basée sur l'accès multiple par division de faisceaux (BDMA) et les techniques de relais coopératif de groupe, comme suggéré dans un programme de recherche et développement coréen.

I.1.8. Les avantages de la 5G

Les avantages : [15]

- Résolution bidirectionnelle à large bande élevée.
- Consolidation de tous les réseaux sur une seule plateforme. Plus efficace et plus efficient. Facilite la supervision des abonnés pour une action rapide.

- Probabilité de fournir une diffusion de données massive (en Gigabits), prenant en charge plus de 60 000 connexions.
- Facile à gérer avec les générations précédentes.
- Technologie adaptée pour prendre en charge des services hétérogènes, y compris les réseaux privés.
- Possibilité d'offrir une connectivité uniforme, ininterrompue et cohérente dans le monde entier.

I.1.9. Les inconvénients de la 5G

Les inconvénients [15] :

- Coût élevé.
- Exigences en matière d'infrastructure.
- Problèmes de sécurité potentiels.
- La technologie est toujours en développement et des recherches sont en cours pour évaluer sa viabilité.
- L'atteinte de la vitesse promise par cette technologie peut s'avérer difficile dans certains cas en raison de contraintes liées à la 5G.

I.2.1. Définition de la 6G

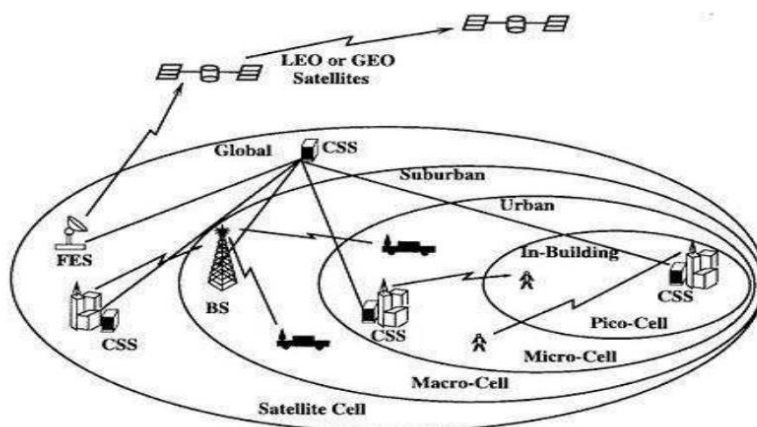


Figure. I 8. La 6G.

La norme des systèmes mobiles de sixième génération (figure I.8 [16]) est en cours de développement pour les technologies de communication sans fil qui prennent en charge

les réseaux de données cellulaires. Prévues comme le successeur de la 5G, la 6G est destinée à offrir des performances nettement plus rapides [17].

Tout comme ses prédécesseurs, les réseaux 6G seront conçus comme des réseaux cellulaires à large bande, avec une couverture divisée en petites zones géographiques appelées cellules .

Cependant, il convient de noter que la 6G est encore au stade de la recherche et du développement. Les normes, les spécifications techniques et les applications précises de la 6G sont encore en cours de définition par les organismes de normalisation et les chercheurs du domaine. Il faudra encore plusieurs années avant que la 6G ne soit déployée commercialement à grande échelle.

I.2.3.La différence entre la 5G et la 6G

1. Fréquences et capacité : La 6G utilisera des fréquences encore plus élevées que la 5G, ce qui permettra d'offrir une capacité nettement supérieure pour la transmission de données. Cela permettra des taux d'échantillonnage plus élevés et une meilleure qualité de transmission.
2. Latence : La 6G vise à réduire considérablement la latence par rapport à la 5G. Cela signifie que les délais de transmission des données seront encore plus courts, ce qui est crucial pour les applications en temps réel telles que la réalité virtuelle, les jeux en ligne et les voitures autonomes.
3. Infrastructure informatique : La 6G introduira une infrastructure informatique plus avancée qui déterminera le meilleur emplacement pour l'informatique. Cela permettra une utilisation plus efficace des ressources et une meilleure gestion des charges de travail.
4. Technologie de détection sans fil : Les fréquences plus élevées utilisées dans la 6G permettront des avancées significatives dans la technologie de détection sans fil. Cela ouvrira de nouvelles possibilités dans les domaines de la surveillance, de la localisation précise et de la collecte de données.
5. Informatique périphérique mobile : La 6G intégrera l'informatique périphérique mobile dans tous les réseaux, y compris les réseaux 5G. Cela permettra aux appareils mobiles de bénéficier des capacités de calcul et de stockage supplémentaires

disponibles au niveau du périphérique, améliorant ainsi les performances et l'efficacité des applications.

Les majeurs facteurs	6G	5G
Débit de données de pointe	>100Gb/s	10-20 Gb/s
Taux de données d'expérience utilisateur	>10Gb/s	1Gb/s
Densité de trafic	>100Tb/s/Km ²	10Tb/s/Km ²
Densité de connexion	>10million /Km ²	1million/Km ²
Retard	<1ms	ms niveau
Mobilité	>1000Km/h	350Km/h
Efficacité du spectre	>3 fois relative à 5G	>3 ~5 fois relative à 4G
Efficacité énergétique	>10 fois relative à 5G	>1000 fois relative à 4G
Pourcentage de cabrage	>99%	environ 70%
Fiabilité	>99.999%	environ 99.9%
Précision de positionnement	Au niveau de Centimètres	au niveau de mètre
Sensibilité du récepteur	<-130dBm	environ -120dBm

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

Le tableau I.1 présente les différences techniques entre la 5G et la 6G en termes de caractéristiques de communication radio [18].

I.2.4. Les avantages de la 6G

La 6G aura un impact significatif sur de nombreux domaines gouvernementaux et industriels en ce qui concerne la sécurité publique et la protection des biens essentiels.

Ces impacts incluent [19]:

- La détection des menaces.
- La surveillance de la santé.
- La reconnaissance des caractéristiques et des visages.
- La prise de décision dans des domaines tels que l'application de la loi et les systèmes de crédit social.
- Les mesures de la qualité de l'air.
- La détection des gaz et de la toxicité.

Parmi les avantages techniques de la 6G :

- Jusqu'à dix millions d'objets connectés par km².
- Des vitesses allant jusqu'à 100 Gbit/s.
- Une latence de seulement quelques microsecondes.

I.2.4 Les défis pour la 6G



Figure I.9. Les défis de la 6G.

La figure I.9 [20] présente les défis auxquels la 6G doit faire face, commençant par :

I.2.4.a. défis architecturaux

- Le fonctionnement du IA.
- Les types d'antennes utilisées.
- L'architecture des stations de base.
- La réduction des coûts et l'accélération des déploiements.

I.2.4.b. défis technologiques

- Les bandes radio en Téra hertz (communication optique).
- Expansion de la zone de couverture.
- L'utilisation d'ondes radio à large portée.

I.2.4.c. défis sociaux

- Niveau de sécurité très élevé.
- Décarbonation : utilisation sans émission de CO₂.
- Maximisation et efficacité des fréquences radio utilisées.
- Restructurer les zones de couverture et les serveurs de liaison.

I.2.5 Formation et gestion des faisceaux 6G

La formation et la gestion des faisceaux jouent un rôle crucial dans la transition vers la technologie sub-THz. Une formation optimale des faisceaux permet d'obtenir une dynamique élevée et une grande flexibilité tout en maintenant des coûts et des niveaux de consommation d'énergie raisonnables.

Cependant, les liaisons de communication à haute fréquence doivent être protégées contre la diffusion et la diffraction du signal. L'utilisation d'un système de signaux de référence et de mesures par l'équipement utilisateur (UE) peut entraîner une surcharge importante sur la capacité du canal, ce qui peut constituer un défi lors de la transition vers la 6G.

Dans le domaine des communications sans fil utilisant des bandes de fréquences élevées sub-TéraHertz, il est difficile de garantir des mesures précises .

I.2.6.CALENDRIER DE DÉVELOPPEMENT 6G



Figure. I 10 .Les applications de la 6G.

Les progrès de la 6G devraient se faire en parallèle avec le déploiement et la commercialisation des réseaux 5G, ainsi qu'avec les derniers développements de l'évolution à long terme (LTE) de la 4G, tels que LTE-C, qui ont suivi LTE-Advanced et LTE-B.

La vision de la 6G est prévue pour 2022-2023 afin de définir les exigences et d'évaluer le développement, les technologies, les normes, etc. de la 6G. Des organismes de normalisation tels que l'Union internationale des télécommunications (UIT) et le partenariat

de troisième génération (3GPP) devraient élaborer les spécifications pour le développement de la 6G d'ici 2026 à 2027.

Les opérateurs de réseaux commenceront les travaux de recherche et développement (R&D) sur la 6G d'ici cette période afin de réaliser des essais de réseau 6G d'ici 2028-2029, en vue de lancer les réseaux de communication 6G d'ici 2030 [21].

I.2.7. Les applications du 6G

Voici quelques applications potentielles du 6G selon [20]:

Dans le domaine médical:

- Opérations à distance utilisant l'IA.
- Système d'information intégré.
- Réduction des émissions de CO2.
- Capteurs omniprésents.
- Système de fusion multi-sensorielle.

Dans le domaine industriel:

- Système de fusion multi-sensorielle.
- Ultra-fiabilité.
- Analyse de données agile.
- Dispositifs hétérogènes.

Dans le domaine de l'ingénierie :

- Récolte d'énergie.
- Véhicules autonomes.
- Réseaux intelligents.
- Transfert de puissance.
- Et d'autres applications.

II. Conclusion

Aujourd'hui, les téléphones mobiles offrent une gamme de fonctionnalités variées, allant de la taille compacte à une grande capacité de stockage, en passant par des fonctionnalités telles que la numérotation rapide, le lecteur vidéo, le lecteur audio et l'appareil photo. Grâce aux développements récents d'Internet et de la technologie Bluetooth, le partage de données entre appareils est devenu très facile. Les réseaux de communication mobile de 6e génération (6G) vont encore plus loin en intégrant des satellites pour assurer une couverture mondiale. Ils peuvent également combiner des nano-cœurs et de l'intelligence artificielle, permettant ainsi à tous les opérateurs de réseau de se connecter à un seul noyau. Cette évolution et cette expansion technologique transformeront certains aspects de notre monde. Bien que le coût des appels mobiles puisse être relativement élevé avec la 6G, ces coûts devraient s'améliorer à l'avenir, offrant ainsi des avantages aux utilisateurs de tous les niveaux.

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

II.1 Introduction

Au fil des années, les avancées technologiques dans le secteur de la téléphonie mobile ont conduit à une demande croissante de miniaturisation des antennes. La miniaturisation des antennes consiste à réduire leur taille et leur poids tout en maintenant leurs performances de communication.

Cette tendance a été motivée par plusieurs avantages significatifs. En effet, des antennes plus petites offrent une plus grande flexibilité dans la conception des dispositifs mobiles, permettant ainsi de créer des téléphones portables plus compacts et légers. De plus, la miniaturisation des antennes facilite leur intégration dans des applications plus variées, comme les objets connectés, les vêtements intelligents et les dispositifs médicaux.

Cela ouvre de nouvelles perspectives pour l'Internet des objets (IoT) et les communications sans fil dans divers domaines d'application.

Dans ce chapitre, nous aborderons en détail les concepts de miniaturisation des antennes, en mettant en évidence les avantages qu'elle offre, ainsi que ses inconvénients et les limites théoriques auxquelles elle est confrontée. Nous examinerons également les différentes approches utilisées pour concevoir et mettre en œuvre des antennes miniatures afin de répondre aux besoins de la téléphonie mobile et des applications sans fil modernes.

II.2 Miniaturisation

La miniaturisation est un processus visant à réduire les dimensions des objets. Dans le domaine de l'électronique, la miniaturisation vise à réduire la taille des composants tout en préservant leur fonctionnalité et leur forme d'origine. Dans le contexte des antennes, la miniaturisation est utilisée pour répondre aux exigences de taille imposées par les normes de communication. La tendance à la miniaturisation existe depuis longtemps et a évolué à travers différentes dimensions de l'espace, à savoir les axes X, Y et Z. Cela a conduit à la création d'antennes de plus en plus petites.

Cependant, il convient de noter que la miniaturisation des antennes peut entraîner une perte de performance. Les performances d'une antenne plus petite peuvent être moins optimales par rapport à une antenne de taille plus grande. Malgré cela, la majorité des

antennes actuelles sont bien adaptées aux systèmes de télécommunications, avec des pertes de seulement quelques décibels et des gains positifs.

Les techniques de miniaturisation ont évolué pour répondre aux exigences de l'intégration des grands écrans, offrant ainsi une meilleure visibilité et facilitant la manipulation des menus et des options. Dans ce contexte, les fabricants ont adopté une nouvelle règle qui permet une plus grande liberté dans les dimensions X et Y. Cela signifie que les antennes doivent être de petite taille afin de ne pas entrer en conflit avec d'autres composants sur la même carte électronique.

Cette approche permet de garantir une compatibilité harmonieuse entre les antennes et les autres éléments de l'appareil électronique, tout en assurant leur bon fonctionnement dans les systèmes de communication actuels. Ainsi, les avancées dans les techniques de miniaturisation offrent une plus grande flexibilité pour intégrer efficacement les antennes dans les dispositifs électroniques modernes [22].

II.3 Définition d'une antenne miniature

Une antenne miniature est caractérisée par sa petite taille, avec un élément rayonnant contenu dans une sphère appelée la sphère de Chu (illustrée dans la figure II.1[23]), dont le rayon est inférieur à la valeur de " $\lambda/2\pi$ ". Cette valeur représente la distance de transition entre les champs proches et les champs lointains, où l'énergie électromagnétique stockée dans l'antenne devient équivalente à l'énergie électromagnétique rayonnée [24].

En d'autres termes, une antenne est considérée comme miniature lorsque son élément rayonnant est contenu dans une sphère dont le rayon est égal à $\lambda_0/2$, où λ_0 représente la longueur d'onde fonctionnelle de l'antenne. Pour qu'une antenne soit qualifiée de miniature, elle doit respecter les conditions suivantes [25]:

- Ses dimensions doivent être inférieures au quart de la longueur d'onde opérationnelle.
- Sa taille maximale doit être inférieure à un quart d'onde (équation II.1).

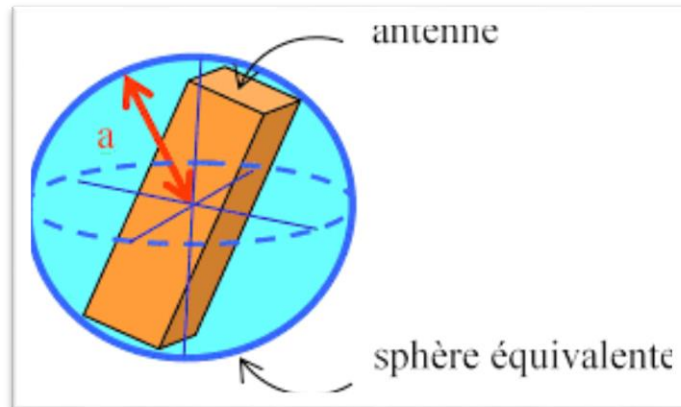


Figure .II. 1.Définition de la sphère équivalente d'une antenne .

Ces critères garantissent que l'antenne est suffisamment petite pour fonctionner efficacement dans des applications où l'espace est limité. En respectant ces conditions, les antennes miniatures sont capables de rayonner et de recevoir des signaux électromagnétiques de manière optimale, tout en occupant un espace réduit dans les dispositifs électroniques.

$$L_{max} < \frac{\lambda_0}{4\pi} \quad (II.1)$$

II.4 Les techniques de miniaturisation

De nombreuses techniques ont été développées pour réduire la taille des antennes à une fréquence donnée, et ces techniques sont largement détaillées dans des ouvrages de référence et des documents internationaux. Ces méthodes de miniaturisation se concentrent principalement sur l'élément rayonnant de l'antenne. Elles comprennent, d'une part, des changements locaux de la structure rayonnante en utilisant des éléments localisés ou des courts-circuits, et d'autre part, des modifications ponctuelles de sa géométrie.

Parmi les différentes techniques de miniaturisation des antennes, voici quelques exemples [26]:

- Modification de la géométrie :
 - Repliement de l'élément rayonnant.
 - Réduction de la taille d'antenne patch jusqu'à 50%.

- Modification de la forme de l'élément rayonnant :
 - En forme triangulaire
 - En forme de nœud-papillon
 - Méandres verticaux ou repliement de la structure.
 - Méandres latéraux ou verticaux très étroits.
- Utilisation d'un substrat à haute constante diélectrique.
- Ajout des courts circuits verticaux entre l'élément rayonnant et le plan de masse en deux façons :
 - Court-circuit plain.
 - Court-circuit languette.
- Ajout de résonateurs parasites :
 - Juxtaposés.
 - Juxtaposés avec un ajout de court-circuit.
 - Superposés.
 - Superposés avec un ajout de court-circuit.
- Insertion de fentes dans l'élément rayonnant pour :
 - Fente demi-onde (non-débouchant).
 - Fente quart d'onde (débouchant).
 - Allonger des longueurs électriques.
 - Créer de nouveaux résonateurs.
- Insertion d'une charge capacitive :
 - À l'extrémité de l'élément rayonnant.
 - Dans l'élément rayonnant.
- Utilisation des charge capacitif et ou inductif réalisé par des composante localisés.

II.5. Avantage et Inconvénient de la miniaturisation

La miniaturisation offre de nombreux avantages. Elle permet de réduire l'espace occupé par les éléments, ce qui les rend plus pratiques à transporter, stocker et intégrer dans des réseaux résistants. En outre, elle contribue à la réduction de la consommation de matériaux et d'énergie. La miniaturisation permet également la production de plusieurs appareils, ce qui favorise la diversité des applications et stimule l'innovation.

Cependant, la miniaturisation présente certains inconvénients. Par exemple, l'opération de séparation des métaux peut devenir complexe, limitant ainsi les avantages obtenus en termes de matériau et d'économies d'énergie. De plus, le recyclage des nanomatériaux dans le domaine des nanotechnologies est presque impossible, ce qui pose des défis en termes de durabilité.

En outre, la réduction de la surface d'échange peut entraîner un chauffage excessif des circuits électroniques, ce qui peut affecter leurs performances. En ce qui concerne les antennes, leur miniaturisation peut également entraîner une dégradation de leurs performances [27].

II.6. Limites théoriques de la miniaturisation des antennes

Malgré les progrès remarquables réalisés dans le domaine de la microélectronique, la miniaturisation rencontre actuellement deux types de limites.

II.6.1 Facteur de qualité d'une antenne

La miniaturisation d'une antenne implique de trouver un équilibre entre les dimensions souhaitées minimales et les performances acceptables en termes de diagramme de rayonnement, d'efficacité et de gain à la fréquence de fonctionnement. Pour obtenir une efficacité de rayonnement optimale, les dimensions de la structure doivent rester proches de la demi-longueur d'onde. Les limites théoriques de la miniaturisation des antennes font l'objet de nombreuses discussions, mais les travaux pionniers de Wheeler, Chu, Harrington et Mc Lean restent des références importantes. Leurs études sur le facteur de qualité Q des antennes ont permis d'établir les limites de performance des antennes électriquement petites.

Le facteur de qualité Q est défini comme le rapport entre l'énergie maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée (équation II.2).

$$Q = \frac{2 \times W_0 \times \text{Max}(W_e, W_m)}{Pa} \quad (\text{II.2})$$

Où :

- w_e représente la quantité moyenne d'énergie non rayonnée électrique.
- w_m représente la quantité moyenne d'énergie non rayonnée magnétique.

- w_0 est la pulsation à la fréquence f_0 .
- P_a désigne la puissance reçue ou rayonnée par l'antenne.

Bien qu'il existe de nombreuses expressions nouvelles pour la limite du facteur de qualité, celle établie par Chu et Wheeler reste largement utilisée (équation III.2). Cette limite théorique du facteur de qualité est considérée comme un minimum théorique inatteignable. Elle permet d'évaluer les solutions d'antennes miniatures par rapport à cette limite théorique [28].

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

Avec :

K : représente le nombre d'onde ou $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

a : désigne le rayon de la petite sphère contenant l'antenne.

II.6.2 Facteur de miniaturisation

Le facteur de miniaturisation est évalué selon deux approches distinctes. La première consiste à réduire la taille de l'antenne de manière à ce qu'elle se rapproche de l'antenne de référence. La seconde méthode suppose une antenne compacte avec les mêmes dimensions maximales, puis compare le rapport de fréquences à un niveau d'adaptation ou de gain spécifié dans l'axe donné [29].

II.7. Les différents types d'antennes

La sélection d'une antenne dépend principalement de la forme et de la taille de la zone à couvrir, dans le but d'optimiser la couverture. Ces paramètres influenceront le choix de l'angle d'ouverture en azimut et du gain de l'antenne. Il convient de souligner que selon la Formule II.4, le gain de l'antenne augmentera d'environ 3 dB pour une réduction de moitié de l'angle d'ouverture.

$$G_{max} = \frac{K}{\theta_{site} \theta_{azimut}} \quad (II.4)$$

Avec :

G_{max} : Le gain maximum de l'antenne.

K : une constante prise entre 30000 et 40000.

θ_{site} et θ_{azimut} en degré représentant les angles d'ouverture dans les deux plans principaux.

Les antennes peuvent être classées en quatre groupes distincts en fonction de leur utilisation et de leur ouverture à -3 dB en azimut [30].

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

II.7.1 .Antennes Directives

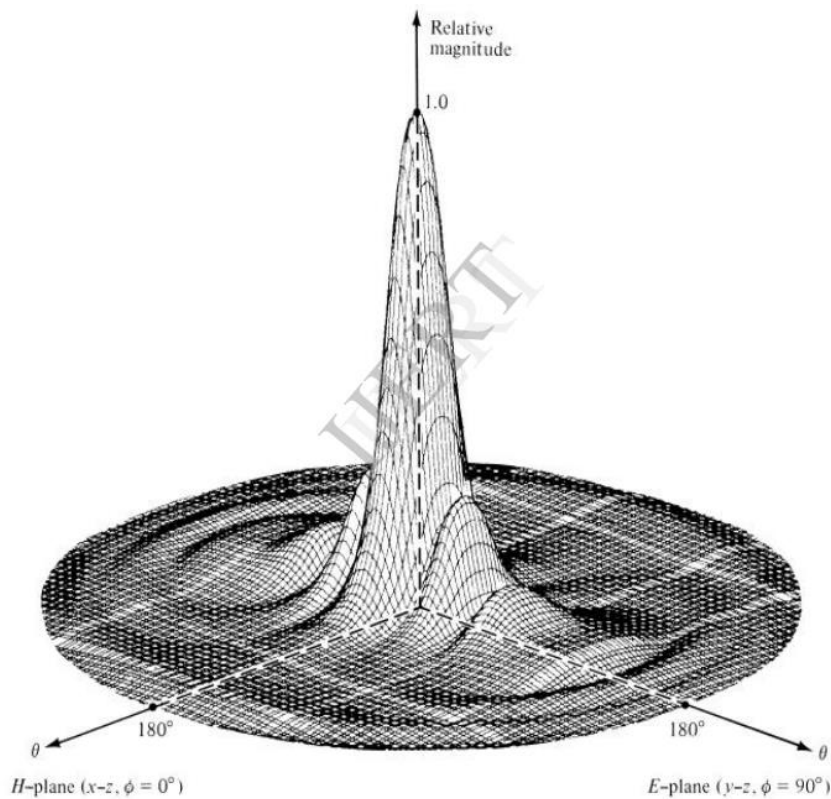


Figure .II. 2. Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

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

Leur diagramme de rayonnement concentre l'énergie dans une direction, ce qui se traduit par un gain élevé (voir Figure II.2[31]).

II.7.2. Antennes Omnidirectionnelles

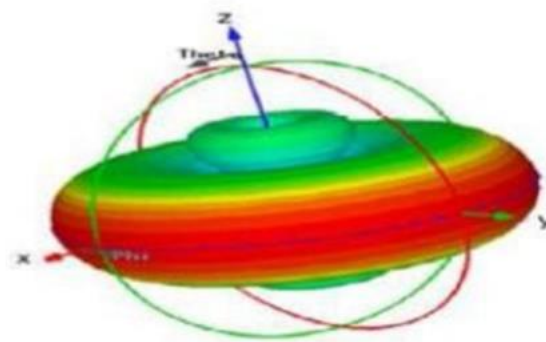


Figure .II. 3. Rayonnement omnidirectionnel.

Ces antennes se caractérisent par des gains relativement faibles (généralement inférieurs à 10 dB) et sont positionnées au centre de la cellule. Elles rayonnent l'énergie de manière uniforme dans l'espace (voir Figure II.3), sans direction privilégiée (modèle de rayonnement à 360°).

II.7.3. Antennes Sectorielles

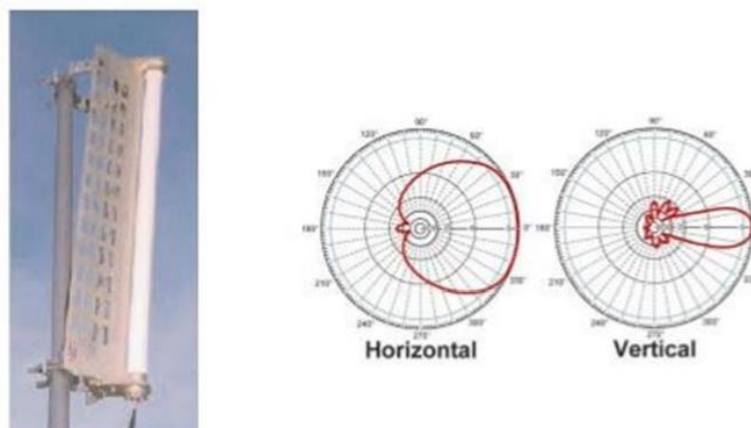


Figure .II. 4. Exemple d'antenne sectorielle.

Ces antennes sont couramment utilisées pour les stations de base qui émettent vers un mobiles, comme dans le déploiement du Wi-Fi, ou encore utilisées comme antennes de stations de base pour la téléphonie mobile en zone urbaine. Cela est illustré dans la Figure II.4.

II.7.3.1. Les réseaux d'antennes patchs



Figure .II. 5.Exemple de réseaux d'antennes élémentaires.

De la même manière que pour les antennes directives, un réseau d'antennes peut être utilisé pour concevoir des antennes sectorielles. En général, un réseau d'antennes élémentaires mono ou bidimensionnelles est utilisé, comme illustré dans la Figure II.5.

II.7.3.2. Antennes à fentes

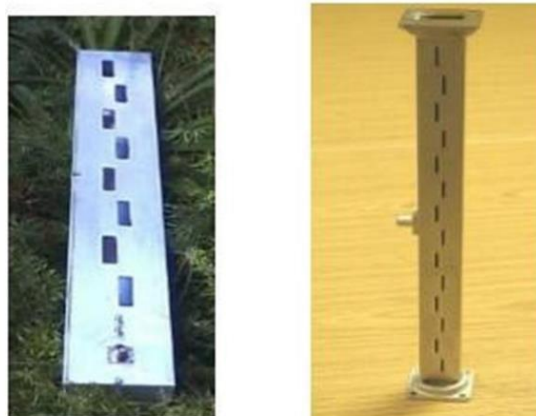


Figure .II. 6.Exemple d'antenne à fentes.

L'antenne à fentes se distingue par sa structure en forme de cornière ou de guide d'ondes, avec des fentes spécifiquement dimensionnées et positionnées en fonction de la fréquence utilisée, comme illustré dans la Figure II.6.

II.7.4. Antennes Agiles

Les antennes agiles sont des antennes capables de modifier leurs caractéristiques grâce à un système de contrôle actif. Elles sont utilisées pour rendre les systèmes de télécommunications sans fil plus flexibles. On peut classer les antennes agiles en deux catégories:

- Les antennes agiles en fréquence, qui permettent de faire varier la fréquence de fonctionnement de l'antenne.
- Les antennes agiles en rayonnement multifaisceaux, qui permettent de modifier les caractéristiques du rayonnement de l'antenne (direction de pointage, directivité, angle d'ouverture du lobe principal, etc.)

II.8. Caractéristiques d'une antenne

Un système de communication sans fil comprend un bloc de transmission et un bloc de réception, reliés par un canal de propagation. Une antenne est un dispositif passif qui transforme les signaux électriques en signaux électromagnétiques. Les antennes de petite taille et les antennes de taille normale présentent des caractéristiques similaires, telles que l'impédance d'entrée, la bande passante et le gain. Nous examinerons ces caractéristiques en détail dans les sous-sections suivantes [33].

II.8.1. Les caractères d'adaptation

Ces caractéristiques sont cruciales pour évaluer les performances d'adaptation de l'antenne. Elles sont définies comme suit :

II.8.1.a .Le coefficient de réflexion S11

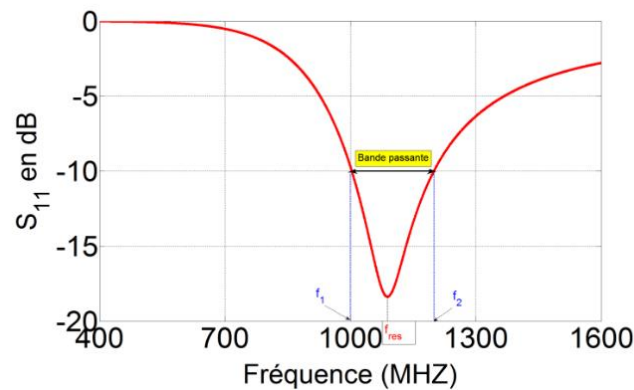


Figure .II. 7.Coefficient de réflexion.

Le coefficient de réflexion S_{11} , illustré dans la Figure II.7, mesure la quantité d'énergie réfléchiée par l'antenne. Il indique dans quelle mesure l'antenne absorbe efficacement l'énergie du signal. L'optimisation de l'antenne se base sur ce paramètre pour améliorer son efficacité d'absorption et minimiser les pertes dues à la réflexion.

II.8.1.b.L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance perçue par la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Elle représente la résistance et la réactance combinées à cette interface. L'impédance d'entrée peut être calculée à l'aide de la formule suivante [33]:

$$Z_e = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (II.5)$$

II.8.2 Les caractères de rayonnement

L'antenne joue un rôle essentiel dans un système de communication radio, car ses caractéristiques telles que le diagramme de rayonnement, le gain et le rendement ont une influence directe sur les performances en termes de qualité et de portée du système [33].

II.8.2.a.Directivité et gain

La directivité d'une antenne est le rapport entre l'intensité de rayonnement U dans une direction donnée et la puissance totale rayonnée P_{rad} , divisée par 4π . Elle est calculée selon la formule suivante :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (II. 6)$$

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

$$G = e. D = e. \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (II. 7)$$

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

$$G = \frac{\text{intensité se rayonnement}}{\text{puissance totale d'entrée}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (II. 8)$$

II.8.2.b.Le rendement

Le rendement d'une antenne, également appelé efficacité, est le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance d'alimentation de l'antenne. Il est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{Gain}{Directivité} \quad (II. 9)$$

Avec :

P : représente la puissance totale rayonné par l'antenne.

P_a : représente la puissance d'alimentation de l'antenne.

II.8.2.c. la bande passante

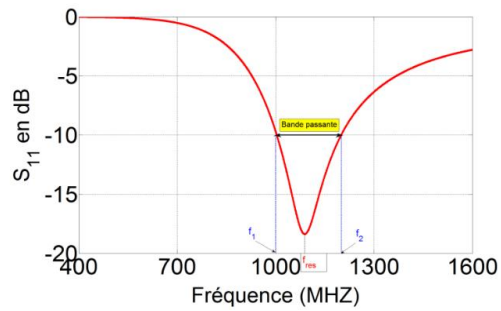


Figure .II. 8.Bande passante et coefficient.

La bande passante d'une antenne, représentée dans la figure II.8, est la plage de fréquences à travers laquelle l'énergie est efficacement transférée de l'alimentation vers l'antenne ou du récepteur vers l'antenne.

À l'intérieur de la bande passante, le coefficient de réflexion est généralement faible. Pour optimiser la bande passante, il est possible d'ajuster directement les caractéristiques de l'antenne pour modifier son impédance, ou d'ajouter des éléments d'adaptation. Cette notion est exprimée par l'équation suivante : [34]

$$BP = BW = \Delta F = f_2 - f_1 \quad (II. 10)$$

II.8.2.d.Facteur de qualité

D'un point de vue électrique, nous avons observé que l'antenne peut être considérée comme un circuit résonant RLC. La bande passante (BW) de l'antenne est liée au facteur de qualité (Q) du circuit RLC à la fréquence de résonance ($f_{rés}$). Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance.

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

$$Q = \frac{f_{rés}}{BW} \quad (II. 11)$$

Une antenne avec un facteur de qualité élevé rayonne de manière très efficace à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquences très étroite, ce qui peut limiter les

interférences hors de cette bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des limites de la bande de fréquences de fonctionnement sera atténué [35].

II.8.2.e. Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la variation de la puissance rayonnée dans différentes directions de l'espace. Il permet de visualiser les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [36]. Ce diagramme peut être représenté en 3D, ce qui offre une meilleure visualisation des lobes principaux et des lobes secondaires, ou en 2D, sous forme de représentation polaire ou cartésienne (figure II.9 [37]).

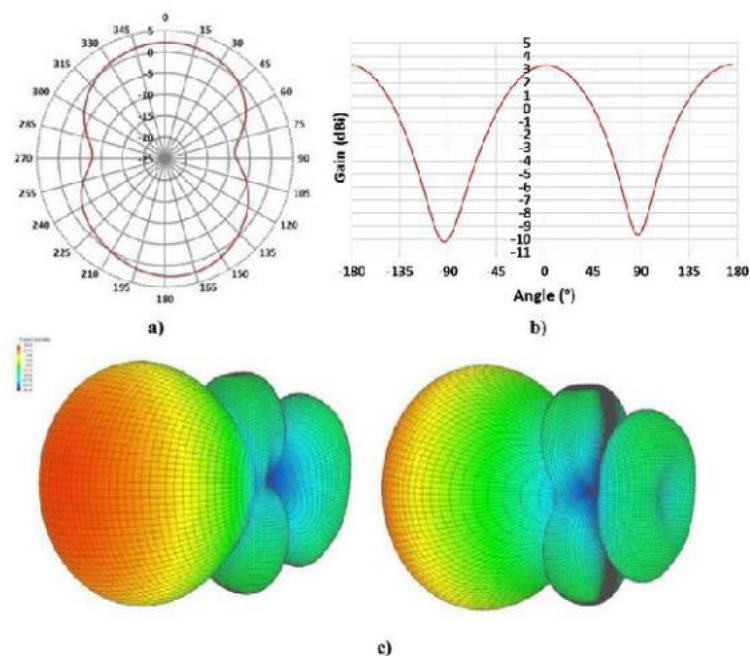


Figure .II. 9.Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

Une antenne isotrope (Figure II.10 [37]) est un modèle théorique qui rayonne de manière uniforme son énergie dans toutes les directions de l'espace. Bien que diverses recherches tentent de se rapprocher de cette caractéristique [37], une telle antenne demeure purement théorique et sert de référence pour évaluer la directivité ou le gain d'une antenne réelle.

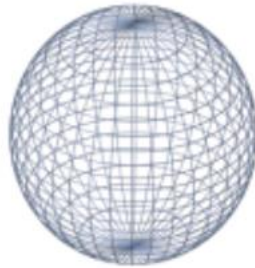


Figure .II. 10.Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope.

Certaines antennes, telles que les antennes à réflecteur parabolique, concentrent la puissance dans une plage angulaire spécifique, plus ou moins large. On les appelle des antennes directives (figure II.11(b)). On les trouve à la fois sur les satellites et au sol. Elles nécessitent d'être pointées vers le destinataire de la liaison.

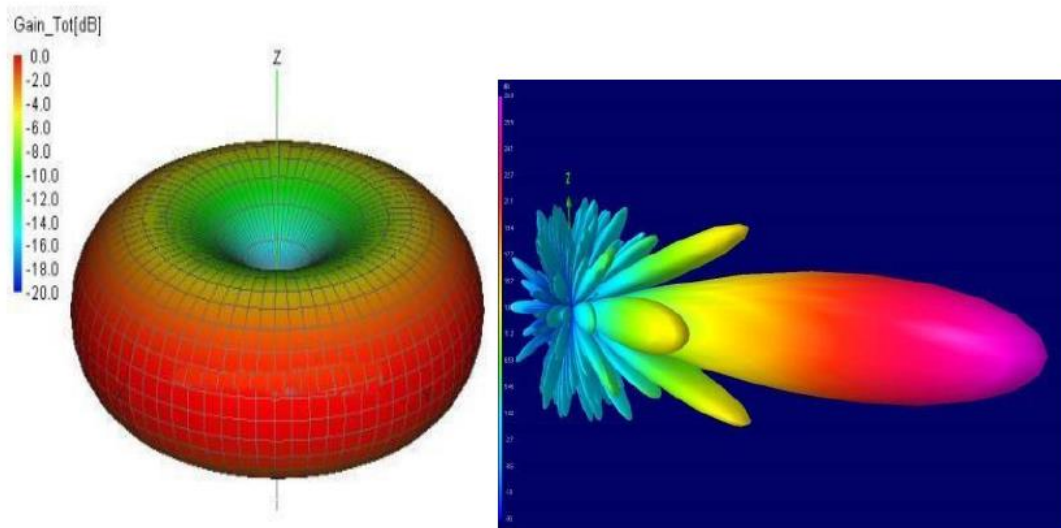


Figure .II. 11. (a) Diagramme de rayonnement omnidirectionnelle (b) diagramme directif.

En revanche, les antennes omnidirectionnelles (figure II.11 (a)) rayonnent de manière uniforme dans un plan de l'espace. Elles ne nécessitent pas de pointage particulier et sont utilisées, par exemple, sur les terminaux de téléphonie mobile par satellites (ou sur votre smartphone).

II.8.f. Angle d'ouverture à (-3dB)

Si G représente le gain maximum d'une antenne dans un plan spécifique, alors son ouverture dans ce plan correspond à l'angle entre deux directions de ce plan où le gain est réduit de moitié (Gain à -3 dB), soit $G/2$.

II.10.Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié divers aspects des antennes dans le contexte des réseaux de télécommunications. Nous avons commencé par acquérir une compréhension des concepts fondamentaux de l'électromagnétisme ainsi que des types d'antennes utilisés.

Ensuite, nous nous sommes penchés sur les techniques de miniaturisation des antennes, qui sont indispensables pour répondre à la demande croissante de dispositifs de communication compacts. Les antennes miniatures présentent plusieurs avantages.

En résumé, ce chapitre nous a fourni une base solide pour appréhender les principes et les applications des antennes dans les systèmes de télécommunications. Nous avons exploré les différentes catégories d'antennes, leurs caractéristiques, ainsi que les techniques utilisées pour les rendre plus petites. Ces connaissances sont essentielles pour concevoir et optimiser les performances des antennes dans les réseaux sans fil modernes.

**CHAPITRE III : SIMULATIONS ET
RESULTATS**

III.1.Introduction

Avec l'évolution rapide des communications sans fil, de nombreux efforts ont été déployés pour réduire la taille des antennes avec les avancées rapides des communications sans fil, de nombreux travaux ont été entrepris afin de réduire la taille des antennes à bande Microstrip.

Des méthodes novatrices permettent de miniaturiser les antennes tout en maintenant des performances de communication optimale telle que l'utilisation de substrats diélectriques à haute permittivité permet de réduire les dimensions physiques de l'antenne tout en préservant les caractéristiques électriques souhaitées. Les structures de Microstrip défectueuses (DMS) et les structures défectueuses au sol (DGS) offrent également des solutions efficaces pour réduire la taille de l'antenne et améliorer ses performances.

Grâce à ces avancées, il est désormais possible de concevoir des antennes Microstrip plus compactes, offrant une plus grande flexibilité d'intégration dans des dispositifs et des systèmes de communication de petite taille. La recherche continue dans ce domaine de réduction de taille des antennes Microstrip contribue à répondre aux exigences croissantes des communications sans fil en matière de compacité et de performances élevées.

III.2.Miniaturisation

III.2.1.La DGS Defected Ground Structure

La Defected Ground Structure (DGS), ou structure défectueuse au sol en français, est une technique utilisée dans la conception d'antennes et de circuits micro-ondes. Elle consiste à créer des motifs ou des structures spécifiques sur la couche de masse (sol) adjacente à l'antenne ou au circuit, afin de modifier ou perturber les caractéristiques électromagnétiques de la structure. [38].

La DGS est principalement utilisée pour améliorer les performances des antennes et des circuits en réduisant les effets indésirables tels que les résonances parasites, les couplages indésirables, les pertes et les interférences électromagnétiques. En modifiant la structure du sol adjacent, la DGS peut modifier les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques, ce qui permet d'optimiser les performances de l'antenne ou du circuit en

termes de bande passante, de directivité, de gain, de réjection des fréquences indésirables [38].

III.2.1.a. les différentes formes de la structure DGS

Une analyse détaillée a été réalisée sur des antennes micro-rubans rectangulaires, en examinant deux différentes structures DGS utilisant des fentes variées, telles qu'une fente carrée et une fente triangulaire (voir la figure III.1 [40]), sur le plan de masse [39].

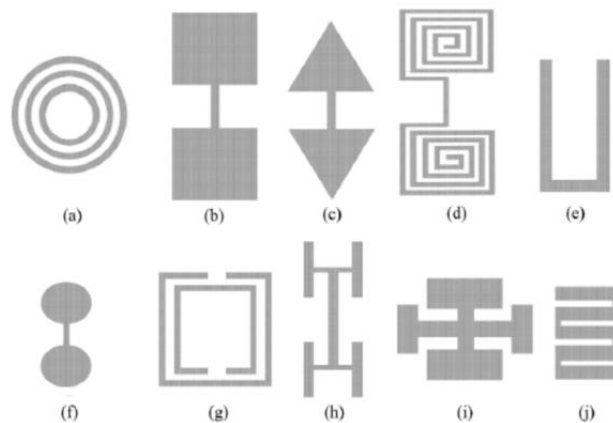


Figure.III. 1. Les différentes formes de coupes .

III.2.2.La DMS Defected Microstrip Structure

La présence de la structure DMS (Defected Microstrip Structure) augmente la longueur électrique de la ligne de microstrip et perturbe la distribution du courant à travers le patch de l'antenne. En conséquence, la capacité efficace et l'inductance de la ligne de microstrip augmentent, ce qui conduit à des caractéristiques d'onde lente de l'antenne patch de microstrip avec DMS. Cette modification permet de réduire la taille globale de l'antenne.

III.3.Choix d'antenne à réalisé

III.3.1.Les antennes patch

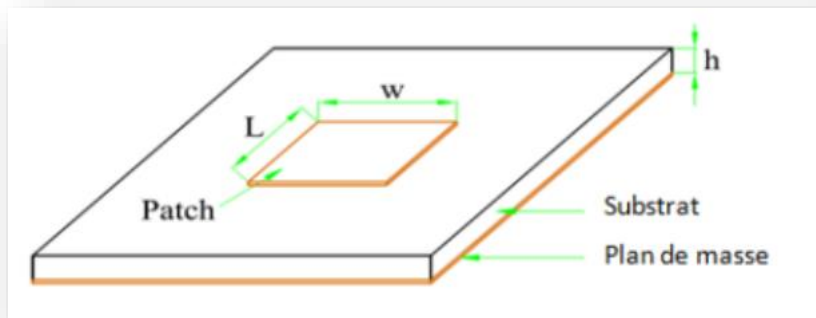


Figure.III. 2.Patch antenne.

La figure III.2 [41] présente une antenne patch aussi connue sous le nom d'antenne planaire, est un type d'antenne moderne qui gagne en popularité dans son développement et son utilisation. Elle est composée d'un matériau diélectrique avec un plan de masse métallique sur une face. De l'autre côté, une structure métallique gravée permet de supporter des courants de surface qui génèrent le rayonnement électromagnétique [4].

III.3.2.Les équations de l'antenne patch rectangulaire :

- La largeur du patch [42] :

$$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (III.1)$$

$c = 3 \times 10^8$ [la vitesse de la lumière].

$f_r = 3.7$ GHz [Fréquence de résonance].

$\epsilon_r = 4.3$ [permittivité relative].

- La longueur du patch

$$l = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (III.2)$$

L : la longueur de patch.

L_{eff} : La longueur de patch en présence de l'effet de débordement (fading affects).

- Fréquence de résonance

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.3)$$

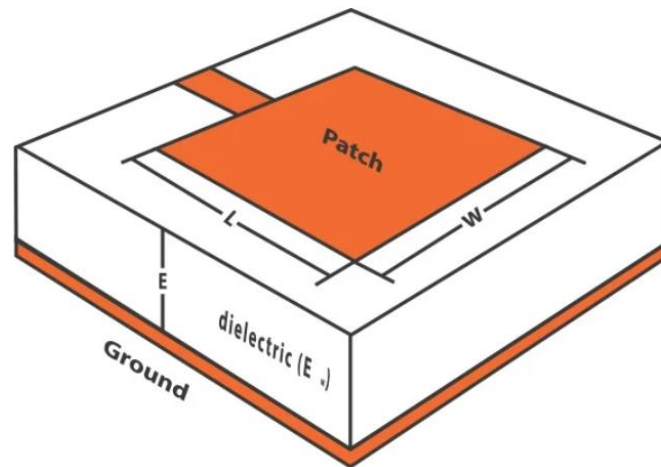


Figure.III. 3. Les dimensions d'une antenne patch.

➤ **Constant diélectrique ϵ_{reff}**

$$\frac{\epsilon_{r+1} \epsilon_{r-1}}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1} \quad (III.4)$$

➤ **L'extension de la longueur (ΔL)**

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

➤ **La longueur de la ligne d'alimentation**

➤ **Simple**

$$L_f = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.8)$$

➤ **Quart d'onde**

$$L_f = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.9)$$

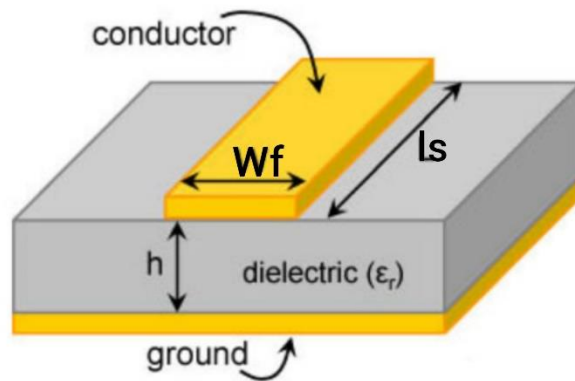


Figure.III. 4.Dimensions d'une ligne micro ruban.

III.3.c.Longueur et largeur de plan de masse

➤ **La largeur**

$$w_s = w + (5 \times a \times 10) \times t \quad (III.10)$$

➤ **La longueur**

$$l_s = l + (5 \times a \times 10) \times t \quad (III.11)$$

Avec :

a: la distance du repaire jusqu'à la longueur ou largeur désirer

t: la hauteur du plan de masse (épaisseur).

III.3.2. les applications d'un patch antenne

Voici quelques exemples d'applications citées [43] pour les antennes patch :

- Les communications par satellites.
- Les systèmes de commande et de contrôle.
- La télémétrie pour les missiles.
- Les dispositifs portables.
- Les composants d'alimentation pour les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.

- Les récepteurs de navigation par satellite.

III.3.les avantages et les limitations

Les avantages :

- Faible encombrement.
- Faible épaisseur.
- Simplicité de réalisation et reproduction.
- Fort rendement d'ouverture.
- Polarisation variable simplement avec la position d'alimentation.
- Possibilité de les conformer sur des surfaces non planes.
- Possibilité d'association à des éléments actifs ou passifs tels que : amplificateurs, modulateurs, déphaseurs, etc...
- Faible poids.

Les limitations :

- Rendement faible (concentration des champs sur les parois métalliques).
- Effet de couplage parasite entre les éléments.
- Pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Puissance supportée limitée.
- Rayonnement parasite de l'alimentation.
- Bande passante très étroite
- Gain faible due aux pertes.

III.4. Choix de logiciel

Le logiciel MicroWave Studio de CST (Computer Simulation Technology) que nous utilisons utilise la méthode des intégrales finies (**FIT : Finite Integration Technique**) développée par Weiland en 1977 [43].

La manipulation du logiciel comprend les étapes suivantes :

1. Sélection de l'environnement dans lequel la structure sera créée. Cela inclut la sélection des unités, des matériaux, de l'environnement environnant et des conditions aux limites.
2. Définition de la plage de fréquence dans laquelle le problème sera analysé.
3. Pour les antennes planaires imprimées, il est essentiel de sélectionner les conditions aux limites de manière à ce que toutes les faces aient accès à l'espace libre, à l'exception de celle où le plan de masse est défini, c'est-à-dire la face opposée au patch.

Il est important de noter que l'utilisation de ce logiciel nous permet de modéliser et de simuler de manière précise le comportement des antennes planaires imprimées, en prenant en compte tous les aspects environnementaux et les conditions aux limites appropriées.

III.5. Processus de conception d'une antenne rectangulaire miniaturisé

Les étapes	Description
La première étape	Calcule des dimensions
La deuxième étape	La réalisation du patch
La troisième étape	Simulation et optimisation des résultats
La quatrième étape	Confirmations des résultats et calcule
La cinquième étape	La discussion des résultats

Tableau. III. 1.Les étapes suivie.

III.6. Simulation et résultats

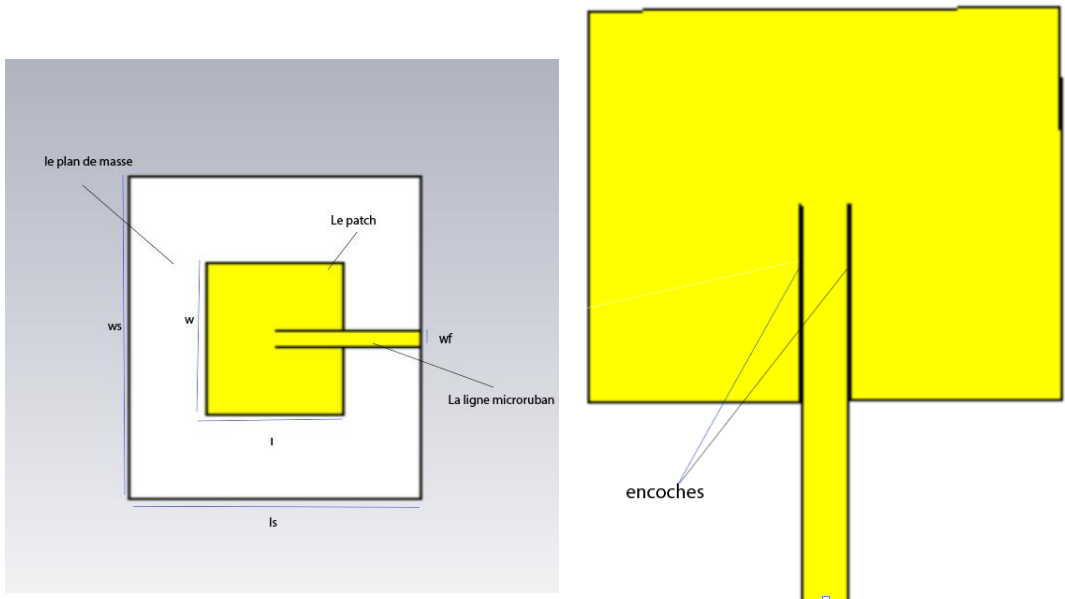


Figure.III. 5. Le patch de référence.

III.6.1. Le patch référence

Symboles	w	L	Wf	Lf	h	t	ls	ws
Dimensions (mm)	23.1	18.7	2.27	20	1.6	0.035	40	49

Tableau. III. 2.Les dimensions d'antenne PATCH.

L'antenne a été conçue pour fonctionner à une fréquence de 3.7 GHz, adaptée à la communication radio (NR). Pour la simulation de cette antenne, nous utiliserons un substrat FR-4 ayant une permittivité de 4.3 et une hauteur de substrat (h) de 1.6 mm, ainsi qu'une ligne de transmission demi onde.

Coefficient de réflexion :

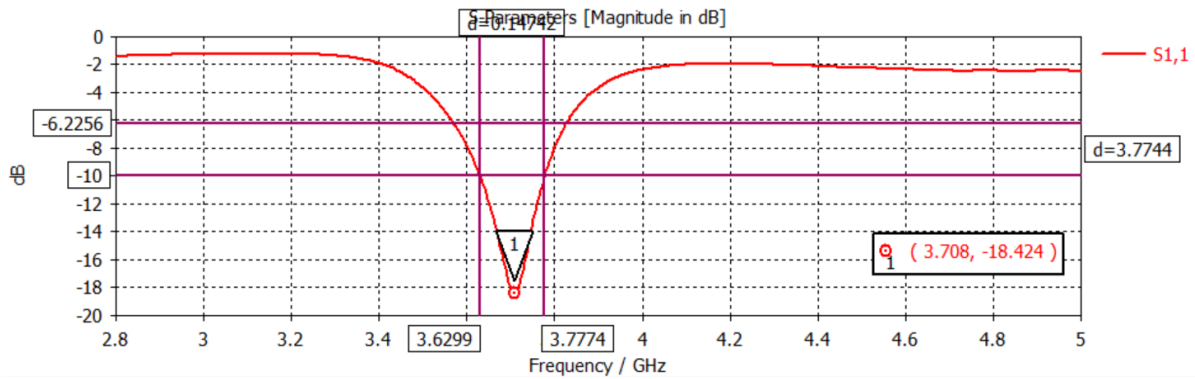


Figure.III. 6.Le S_{11} et la bande passante d'antenne patch.

La figure III.6 présente le coefficient de réflexion S_{11} , il va nous permettre de visualiser la bande passante désirée. On peut constater que cette antenne peut couvrir la bande suivantes [3.77-3.62 GHz] avec un $S_{11}=-18$ dB.

La largeur de bande $W_b = F(m_1) - F(m_2) = (3.77 - 3.62)$ GHz donc $W_b = 150$ MHz.

Gain d'antenne patch

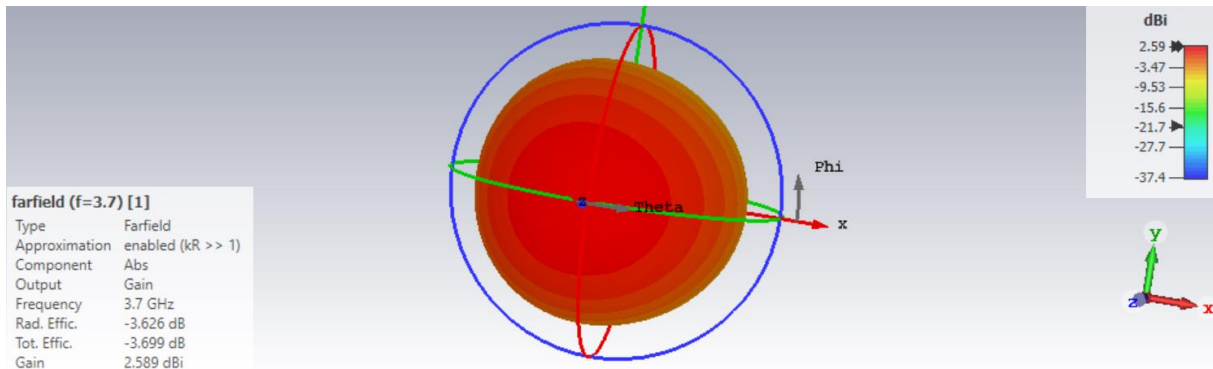


Figure.III. 7.Le gain du patch référence.

Le diagramme de rayonnement simulé est représenté dans les deux figures(III.7) , en présentation en 3D, On remarque que l'antenne est directive avec un Gain égale à 2.59 dB.

Densité de courant :

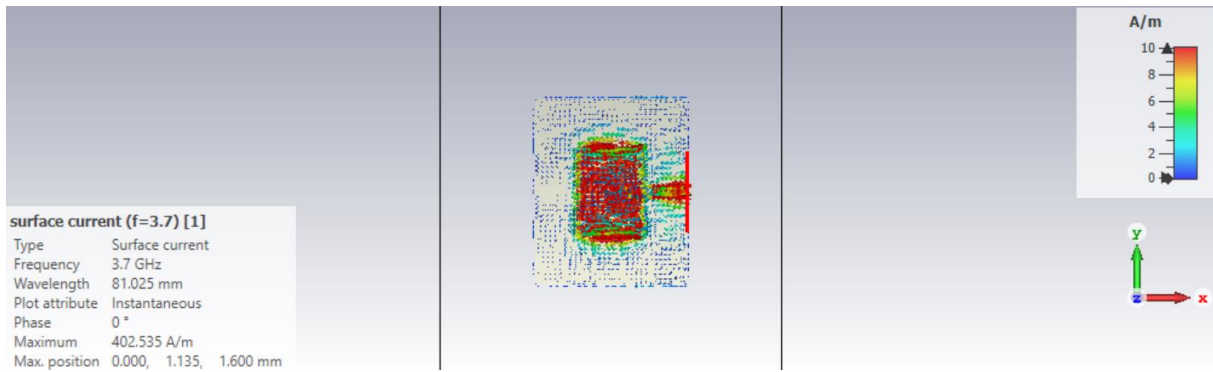


Figure.III. 8.Le courant de surface du patch référence.

L'analyse de la distribution du courant sur l'antenne étudiée permet de mieux appréhender la répartition des courants sur la structure. La Figure (III.8) met en évidence la distribution du courant sur l'ensemble de la ligne d'alimentation ainsi que sur l'élément rayonnant. On remarque également l'absence de densité de courant électrique à l'extrémité de l'antenne.

III.6.2. Miniaturisation par la technique DGS

Nous avons utilisé la méthode DGS (Defected Ground Structure). Pour commencer, nous avons réalisé plusieurs petites coupes autour du plan de masse. Suite à l'analyse des résultats, nous avons déterminé qu'il était plus efficace d'utiliser des rectangles pour couper les zones où le courant est faible (voir Figure III.9).

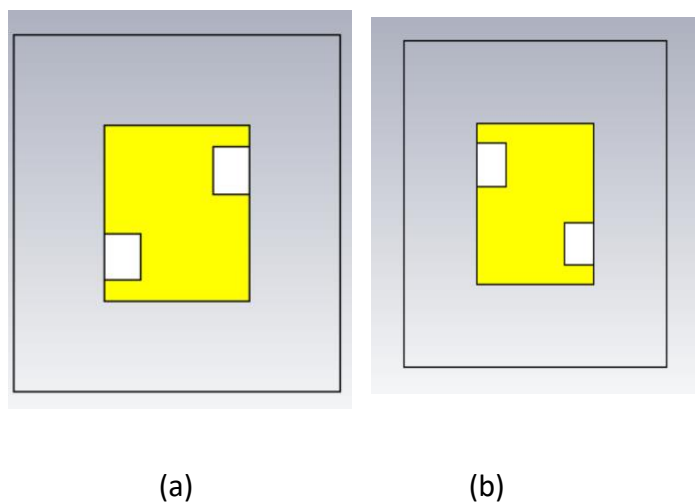


Figure.III. 9. Plan de masse avec des encoches.

Gain d'antenne avec DGS

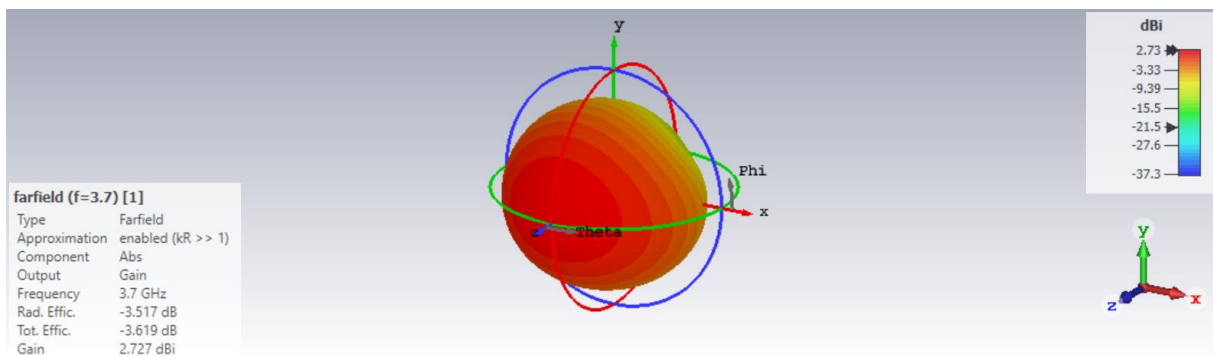


Figure.III. 10.Le gain d'antenne avec DGS.

La Figure III.10 illustre le gain de l'antenne avec DGS, montrant une légère amélioration de la valeur de 2.73 dB à la fréquence de 3.7 GHz.

Comparaison entre le S11 d'antenne de référence et l'antenne avec DGS

Le graphique ci-dessous présente la comparaison entre les différentes coupes du plan de masse. Le coefficient de réflexion S11 du patch (a) est de -22.311 dB, tandis que celui du patch (b) est de -22.244 dB.

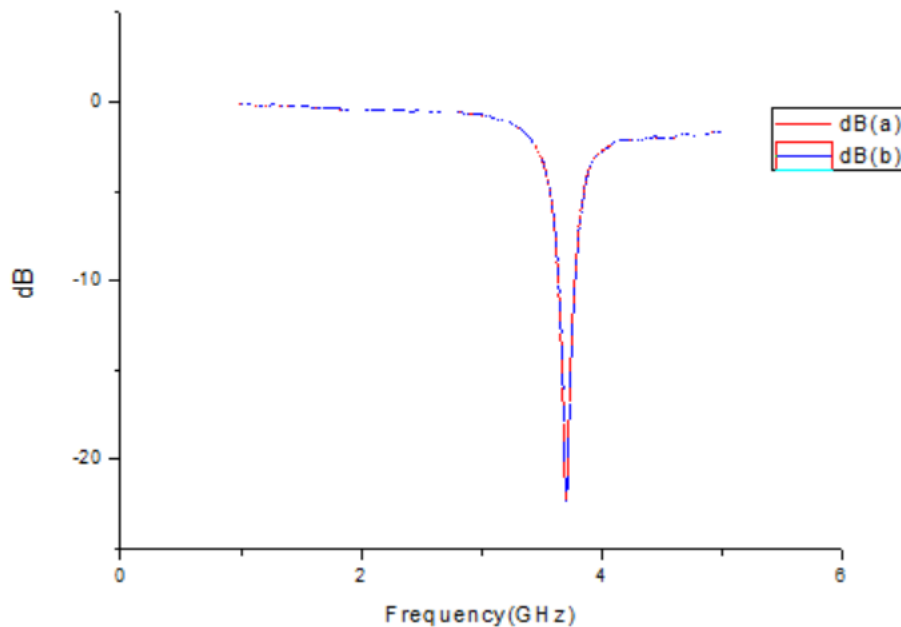


Figure.III. 11. Comparaison du S11 en dB.

Simulation finale de l'antenne patch avec la méthode DGS

Nous avons appliqué la méthode DGS en respectant la distribution du courant de surface sur le plan de masse, dans le but d'atteindre notre objectif de miniaturisation de l'antenne.

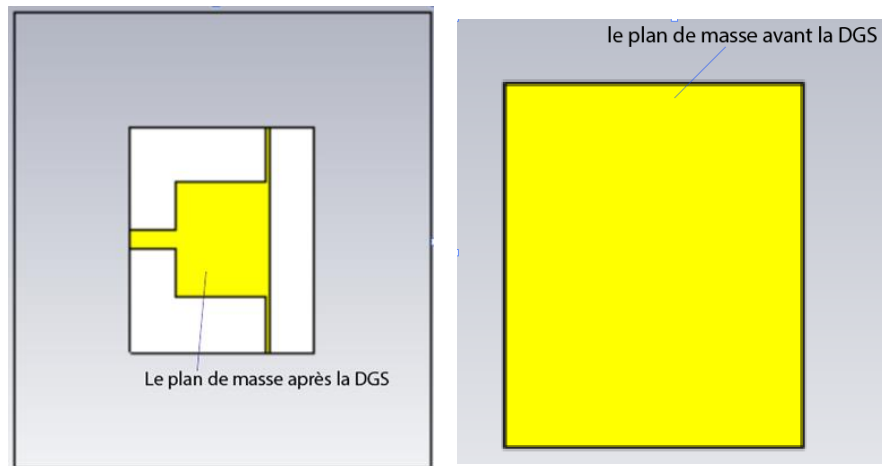


Figure.III. 12. Résultats finaux de l'application du DGS sur l'antenne de référence .

Coefficient de réflexion

La figure III.13 présente une comparaison entre les deux propositions de la méthode DGS appliquée à l'antenne de référence. On remarque une amélioration dans la deuxième proposition du DGS, où le coefficient de réflexion S11 est égal à -24 dB.

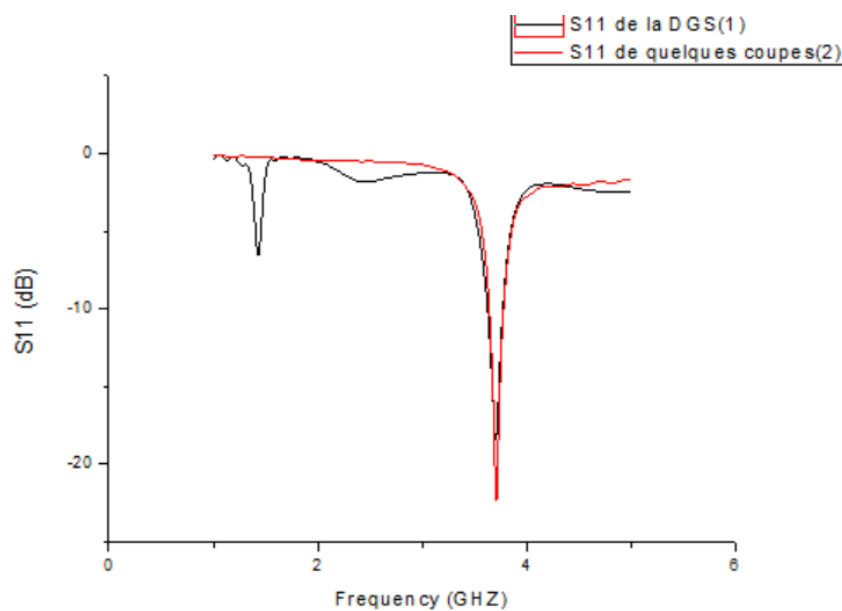


Figure.III. 13.La comparaison du S11 en dB entre DGS1 et DGS2.

Gain d'antenne

On observe une amélioration notable du Gain pour la deuxième proposition de la méthode DGS , Gain =4.31 dBi pour $f=3.7\text{GHz}$ (figure III.14) .

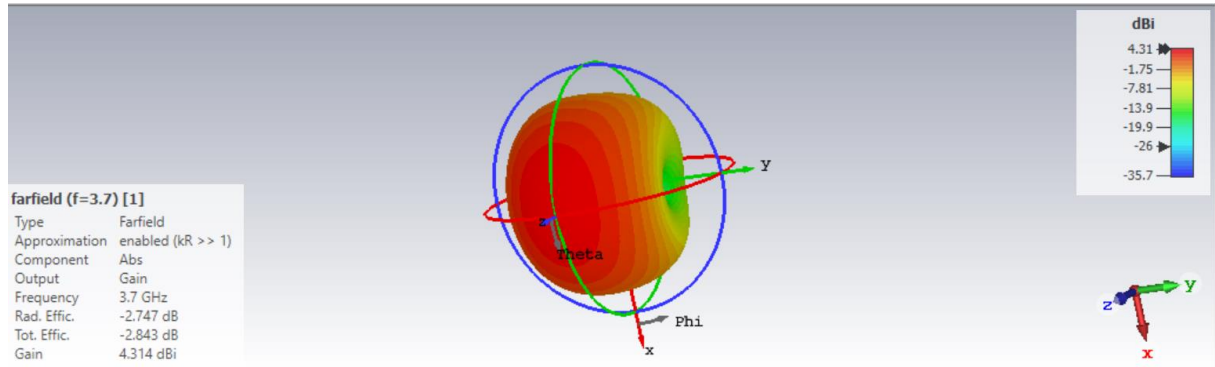


Figure.III. 14.Le Gain de DGS finale.

Courant de surface :

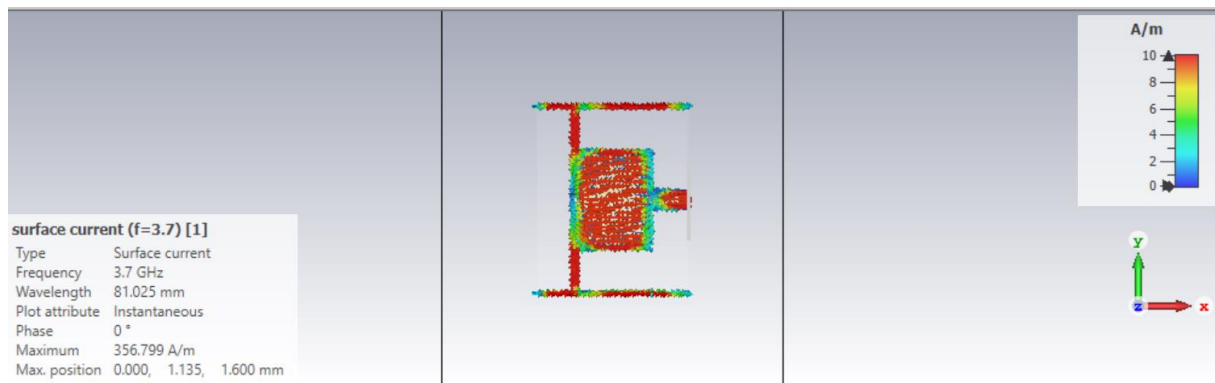


Figure.III. 15.Le courant de surface de la DGS.

La Figure III.15 met en évidence la distribution du courant au centre du patch ainsi qu'aux extrémités du plan de masse. L'observation de la distribution du courant sur l'antenne miniaturisée grâce à la méthode DGS permet une meilleure compréhension de la répartition des courants sur la structure, ce qui nous conduit à l'utilisation d'une deuxième technique de miniaturisation, à savoir la DMS.

III.6.2. Miniaturisation par la technique DMS

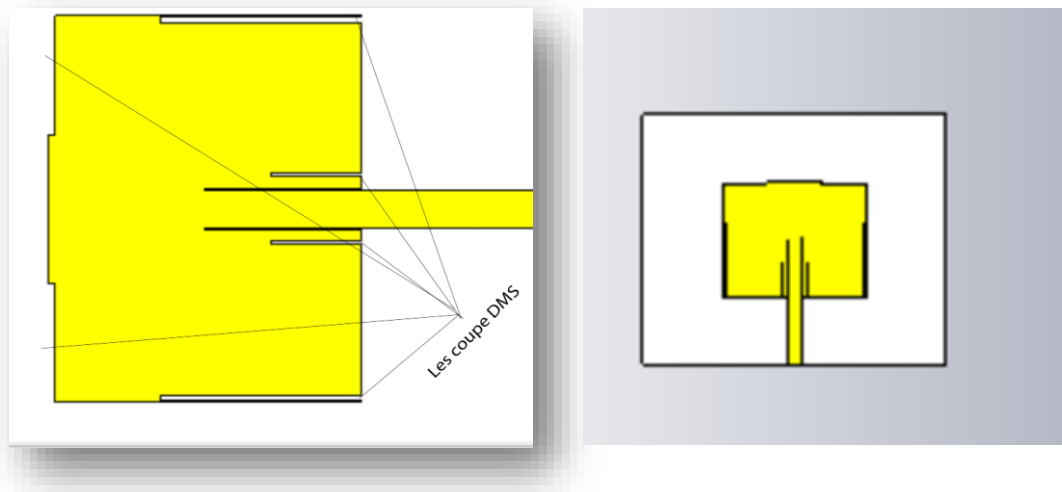


Figure.III. 16.Présente l'application de la technique DMS sur le patch de l'antenne.

Nous avons envisagé l'utilisation d'une deuxième technique de miniaturisation, à savoir la DMS. Cela implique une modification de la géométrie de l'antenne de référence en utilisant des encoches sur l'élément rayonnant. Nous souhaitons évaluer les améliorations potentielles en termes de gain et de S11 que cette technique pourrait apporté (figure III.16).

Coefficient de réflexion

Nous allons représenter le coefficient de réflexion de cette antenne afin d'observer la bande passante souhaitée. La Figure III.17 illustre le coefficient de réflexion S11 obtenu. Nous constatons que cette antenne peut couvrir la plage de fréquence [3.686-3.799 GHz]. De plus, nous observons une amélioration de l'adaptation avec une valeur de S11 réduite à -15 dB.

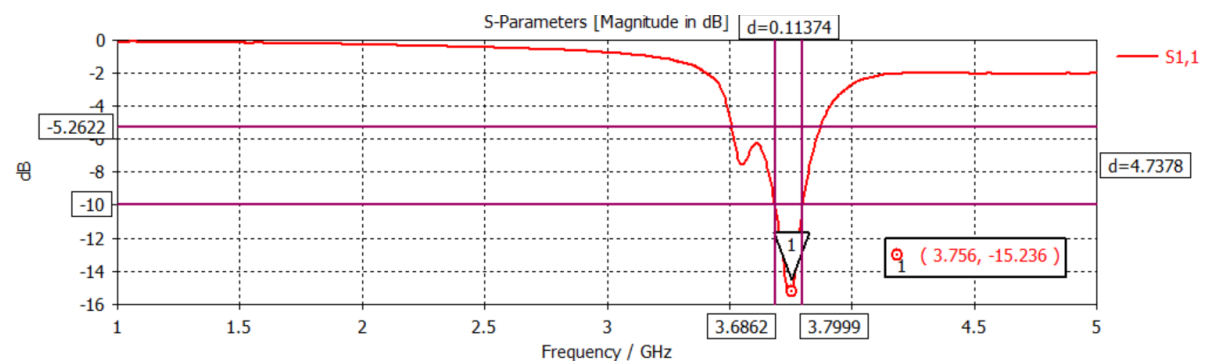


Figure.III. 17.Le S11 et la bande passante du patch avec la DMS.

Gain d'antenne avec DMS

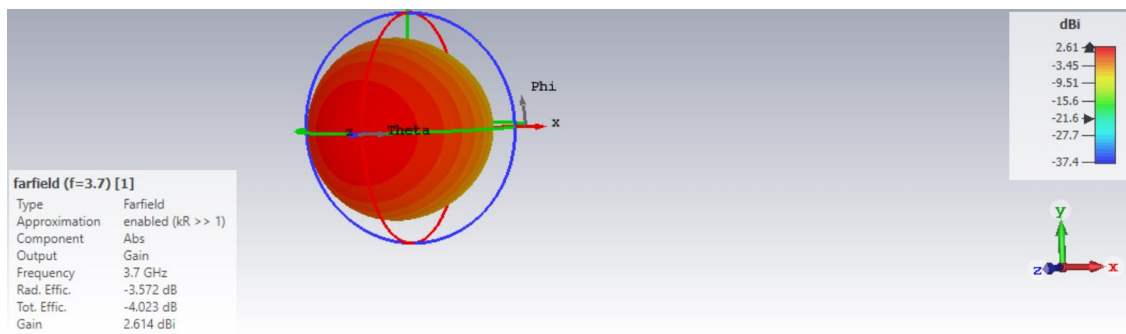


Figure.III. 18.Le Gain de patch après la DMS.

La Figure (III.18) présente le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne. Nous pouvons observer que l'antenne présente un rayonnement directionnel, avec un gain de 2.61 dBi.

Courant de surface :

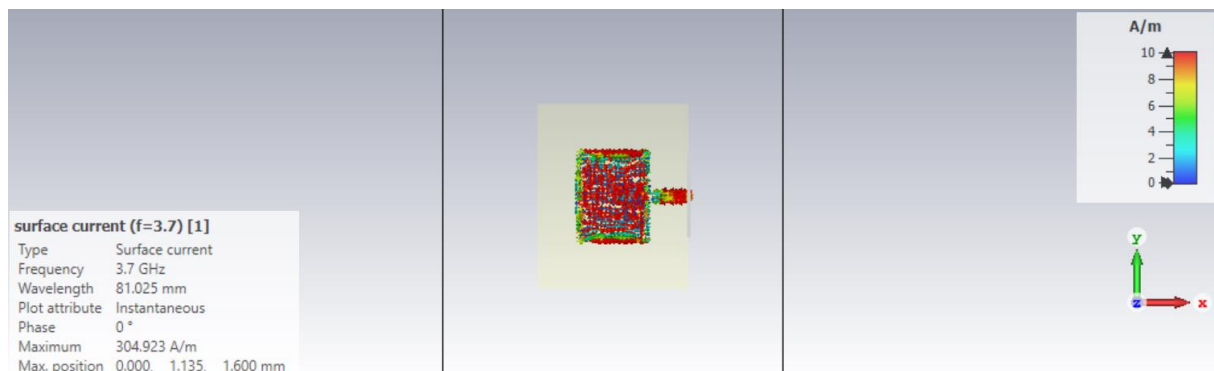


Figure.III. 19.Le courant de surface de la DMS.

La Figure (III.19) met en évidence la distribution du courant sur toute la surface du patch ainsi que sur la ligne d'alimentation du patch. Sur la base de cette simulation, nous considérerons cette configuration comme la version finale de la méthode DMS.

Comparaison du S11 entre antenne avec DGS et antenne avec DMS

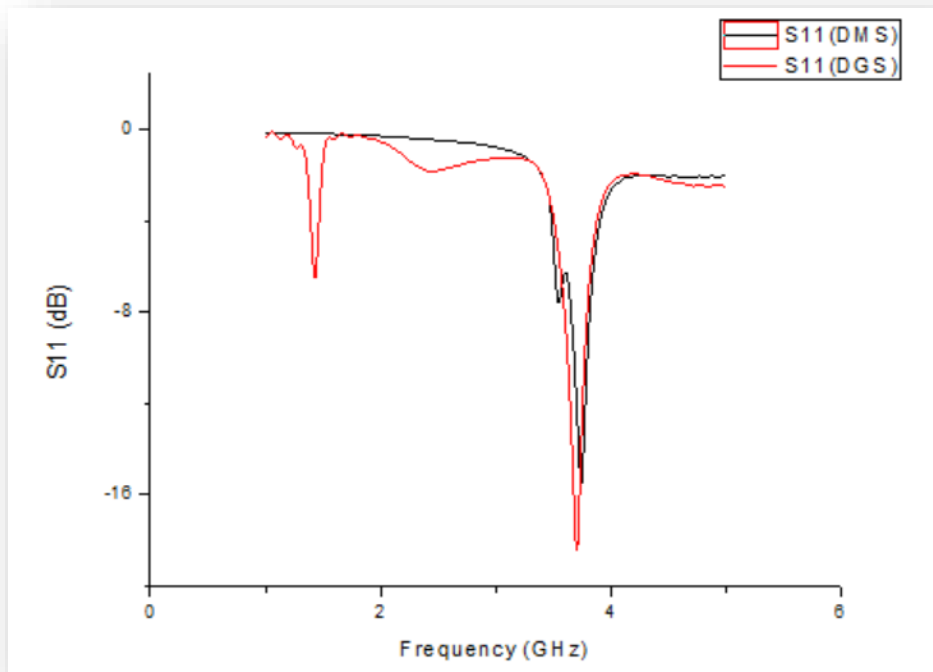


Figure.III. 20. Comparaison entre le S11 de la DGS et la DMS.

La Figure (III.20) illustre une comparaison des résultats des S-paramètres entre l'antenne avec DGS et l'antenne avec DMS. Nous pouvons constater que le coefficient de réflexion S11 est pratiquement identique sur toute la bande passante, avec une légère amélioration où S11 atteint -18 dB, pour l'antenne avec DGS .

III.6.3. Les résultats définitifs obtenus

Dans cette phase finale, nous avons combiné les deux techniques de miniaturisation pour améliorer les performances de l'antenne, notamment en termes de gain et de coefficient de réflexion S11 (figure III.21). Nous avons ainsi atteint notre objectif de miniaturisation souhaité.

Amélioration du gain d'antenne avec les techniques DGS et DMS

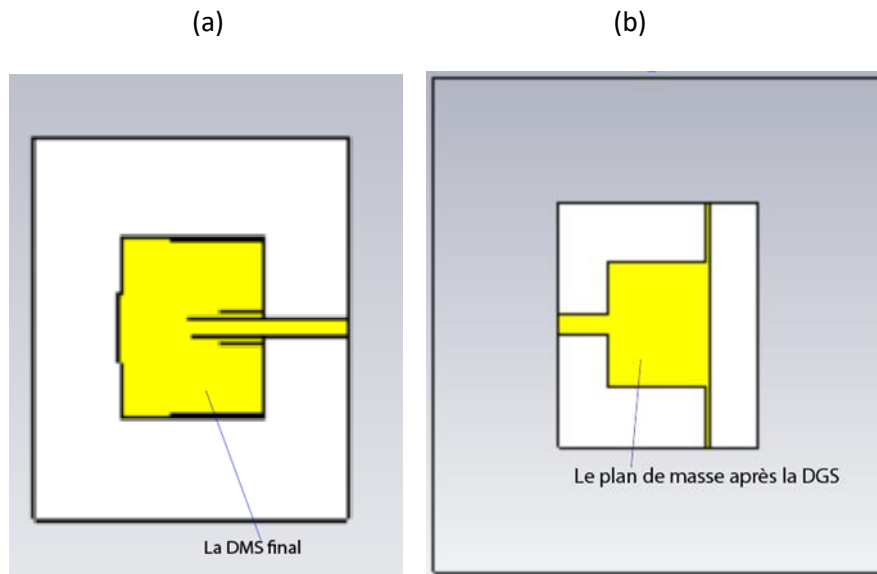


Figure.III. 21. L'antenne patch final (a) vue de face (b) vue d'arrière.

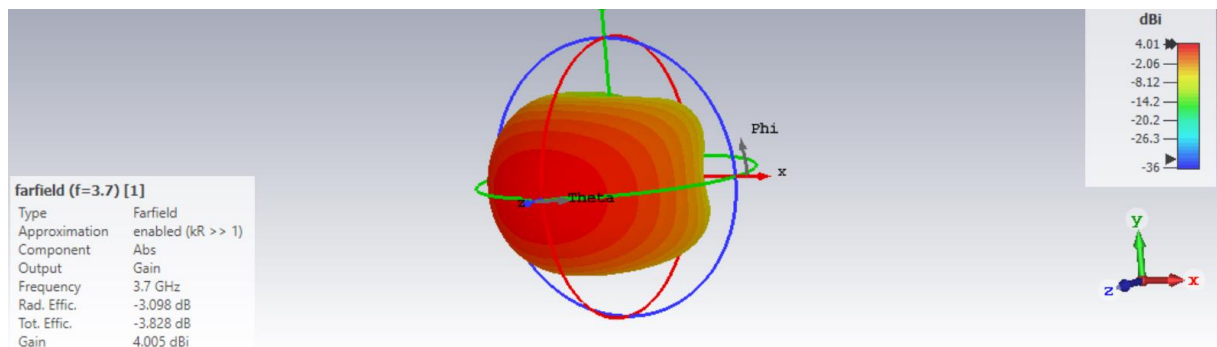


Figure.III. 22. Le Gain de d'antenne patch final.

Nous avons observé une amélioration significative du gain, passant de 2.727 dBi avant la miniaturisation à 4.005 dBi (figure III.22).

Bande passante d'antenne DGS/DMS

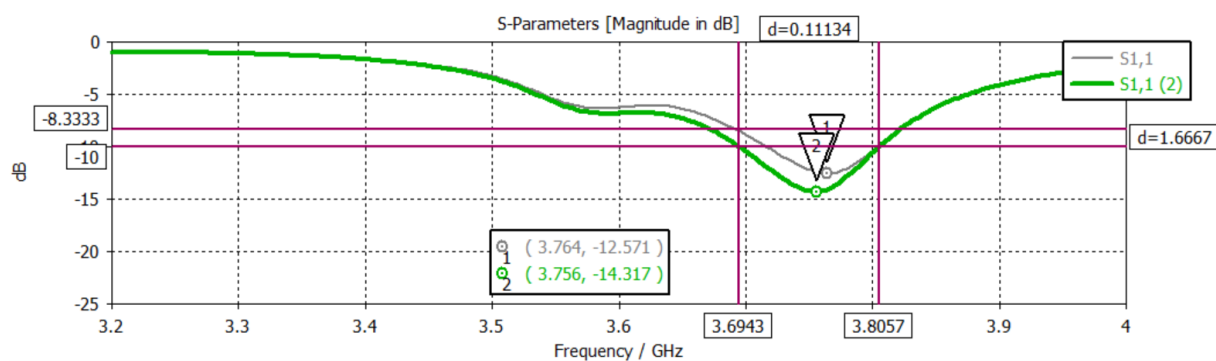


Figure.III. 23. Le S11 et bande passante de patch final.

En termes de coefficient de réflexion, l'antenne présente une adaptation dans la bande de fréquences allant de [3.69 -3.8] GHz. Cependant, en termes de gain, elle présente une amélioration par rapport aux antennes patch avec DGS et Patch avec DMS.

Courant de surface :

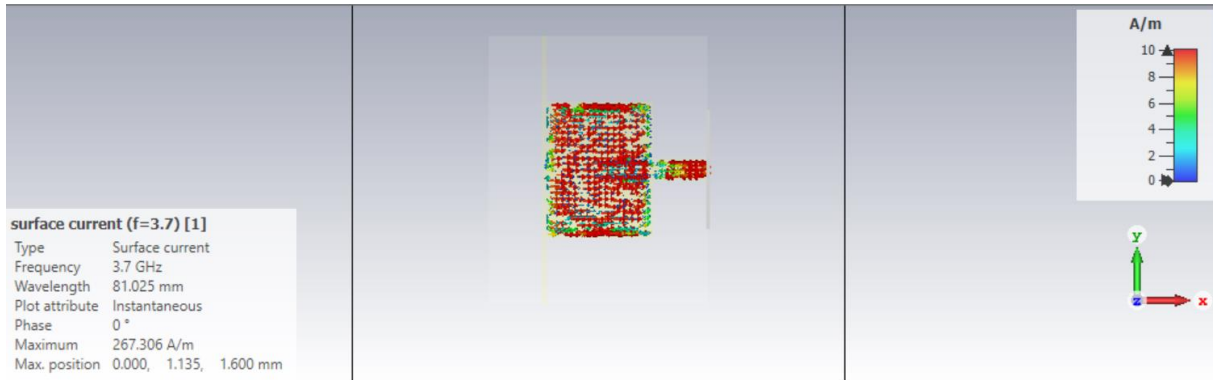


Figure.III. 24.Le courant de surface du patch final.

La Figure (III.24) illustre la distribution du courant sur toute la surface du patch ainsi qu'à l'extrémité de la ligne d'adaptation.

III.7 Analyse des dimensions des encoches par une étude paramétrique

III.7.1. l'étude paramétrique sur a1 et b1 dans la DMS :

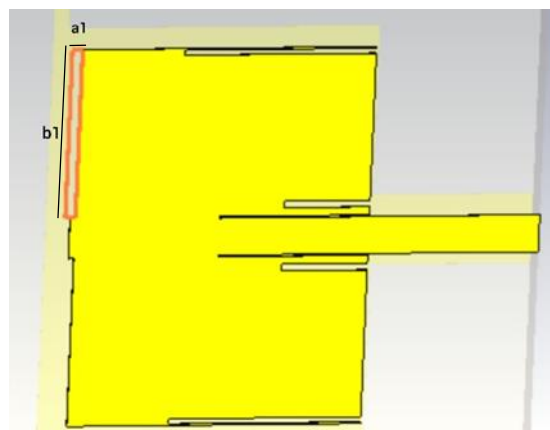


Figure.III. 25. Les dimensions des encoches utilisées dans la technique de DMS.

Cette phase porte sur l'étude de l'impact de différents paramètres sur le coefficient de réflexion S11. Une analyse paramétrique a été réalisée afin de comprendre les effets des différents paramètres et d'optimiser leur valeur pour parvenir à une structure finale efficace.

Etude paramétrique sur a1

Nous pouvons observer que lorsque nous augmentons la valeur de a1, l'antenne perd la fréquence de rayonnement de 3,7 GHz (voir Figure III.25).

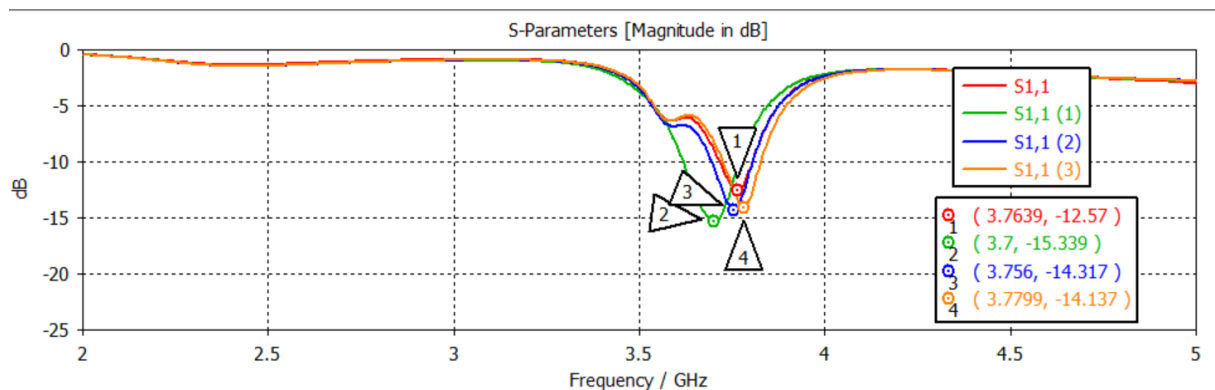


Figure.III. 26. Comparaison entre S11 après l'étude paramétrique sur a1.

Le Gain final de l'antenne après optimisation

Après optimisation, nous constatons que le gain de l'antenne est resté inchangé, comme le montre la Figure III.27.

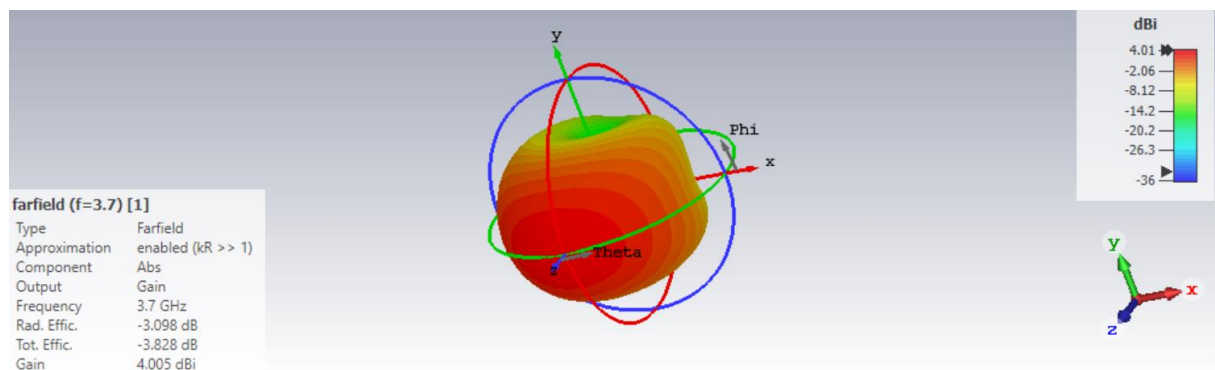


Figure.III. 27. Le gain après l'étude paramétrique sur a1.

Analyse des variations de b1 à travers une étude paramétrique

Nous observons dans la figure III. 27 que la fréquence de résonance varie en fonction du paramètre b1.

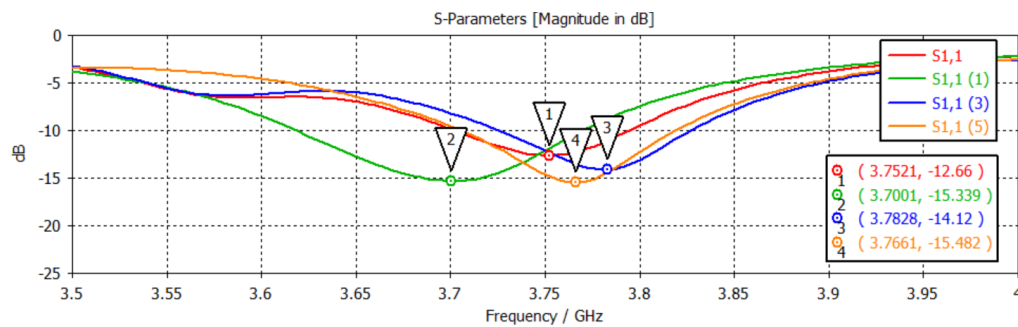


Figure.III. 28. Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur b1.

Gain final d'antenne après l'optimisation :

La Figure III.29 illustre une amélioration significative de la valeur du gain suite à l'étude paramétrique du paramètre b1.

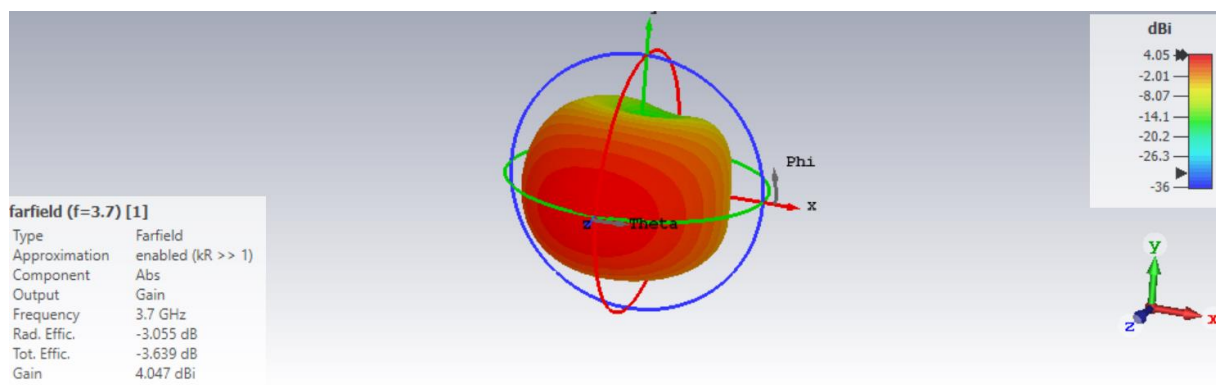


Figure.III. 29. Le gain après l'étude paramétrique sur b1.

III.7.2. Etude paramétrique en DGS

Influence du X1

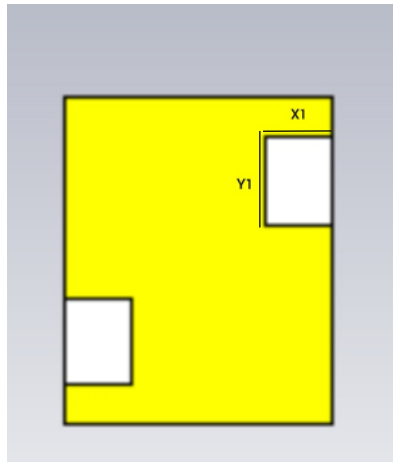


Figure.III. 30. Les dimensions des encoches appliquées dans la méthode DGS.

Coefficient de réflexion S11 :

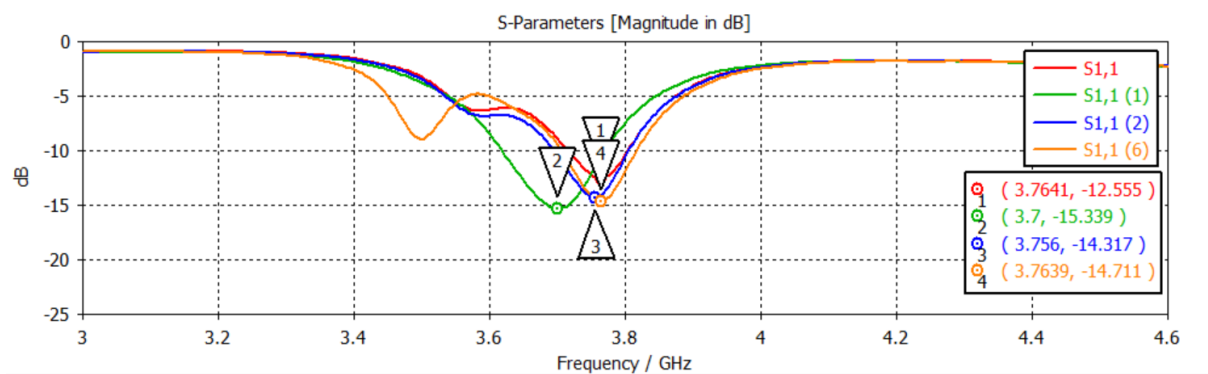


Figure.III. 31. Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur X1.

Optimisation du gain de l'antenne en ajustant les dimensions du DGS.

Une amélioration du gain est observée lors de l'application de modifications dans les dimensions des encoches utilisées dans la méthode DGS (figure III.32) .

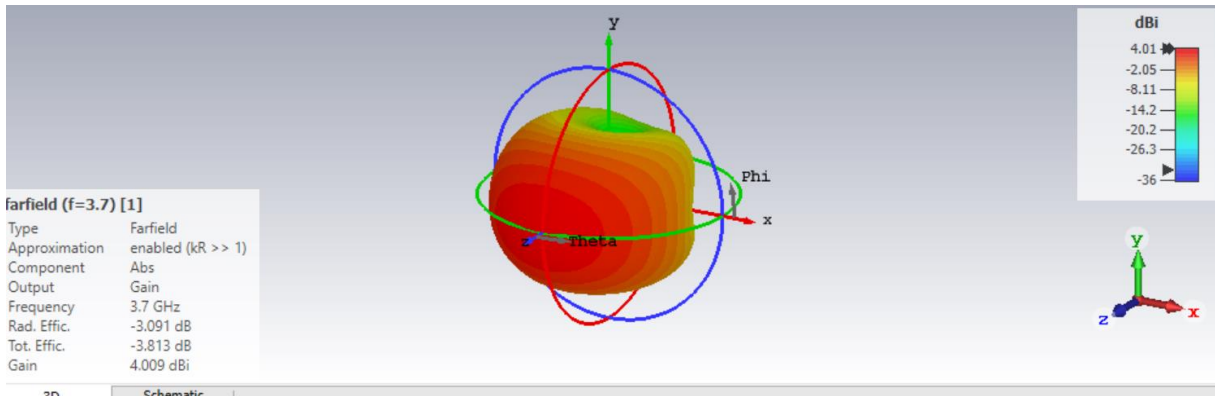


Figure.III. 32. Le gain obtenu après l'étude paramétrique sur X1.

Influence du Y1 sur le coefficient de réflexion S11 et le Gain

Les figures III.33 et III.34 présentent le coefficient de réflexion S11 et le Gain, obtenus, nous observons une modification de la bande passante et une diminution du gain dans la fréquence 3.7GHz.

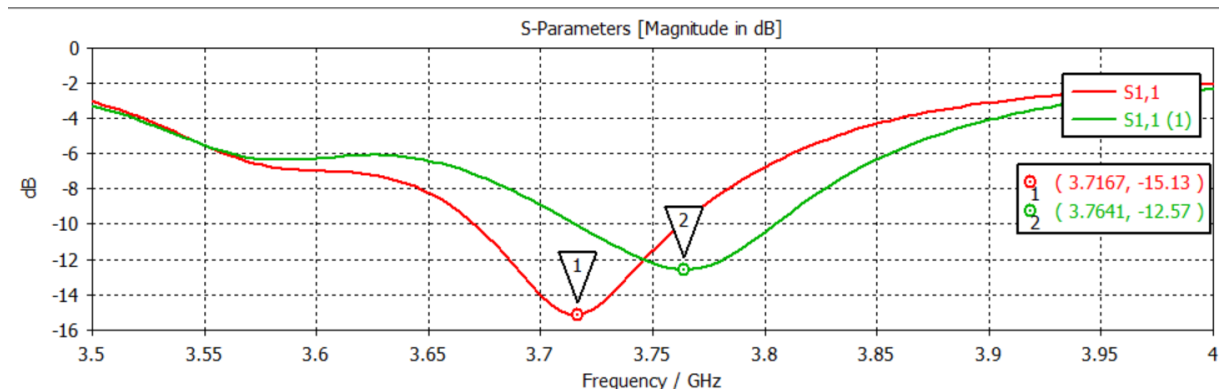


Figure.III. 33.Comparaison du S11 après l'étude paramétrique sur Y1.

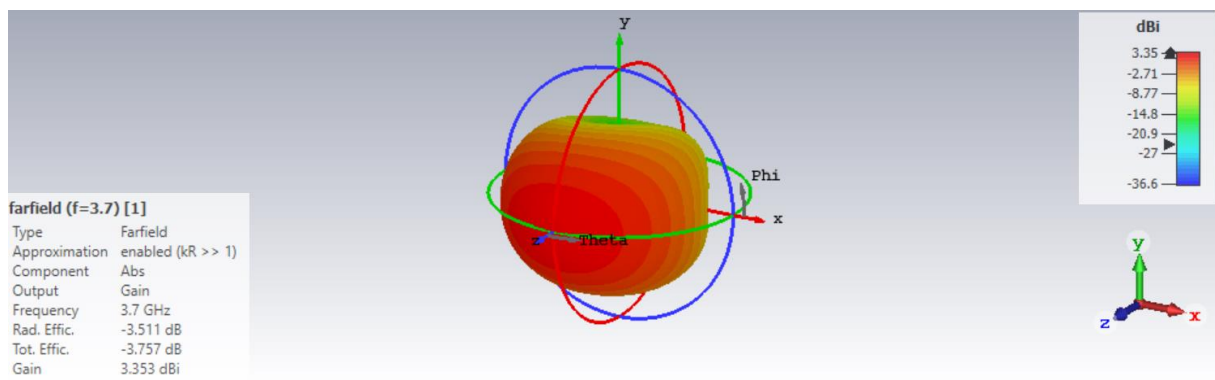


Figure.III. 34.Le gain après l'étude paramétrique sur Y1.

III.8.Conclusion

Dans le cadre de notre projet de conception d'une antenne rectangulaire miniaturisée, accordée à la fréquence 5G (3,7 GHz), nous avons utilisé des techniques de conception et d'optimisation basées sur une étude paramétrique réalisée avec le logiciel CST. Notre objectif principal était d'obtenir une adaptation optimale de l'antenne pour cette fréquence spécifique.

Nous avons constaté que les antennes planaires étaient particulièrement efficaces pour couvrir l'ensemble de la bande passante Sub 6 GHz, offrant de bonnes caractéristiques de rayonnement. Grâce à notre étude, les résultats obtenus ont été globalement satisfaisants, répondant aux critères prévus pour cette conception. Cela confirme la pertinence des antennes planaires dans notre projet et renforce notre confiance dans leur capacité à fournir des performances optimales dans les applications liées à la 5G.

CONCLUSION GENERALE

Ces dernières années, nous avons observé une croissance significative de la recherche académique et industrielle dans le domaine de la technologie 5G. L'objectif principal de ces travaux était de proposer des antennes miniaturisées répondant aux exigences du standard 5G.

Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur la conception et la réalisation d'une antenne microruban de forme rectangulaire alimentée par une ligne, capable de rayonner dans la bande Sub 6G. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé le logiciel CST MWS Studio, qui nous a permis de simuler et d'analyser cette antenne de manière rapide et précise en utilisant la méthode d'intégration finie.

Le premier chapitre a abordé les besoins des systèmes de communication, en mettant en évidence les différentes visions et applications du nouveau standard 5G et 6G, ainsi que leurs avantages et leurs défis. Dans le deuxième chapitre, nous avons discuté des différentes méthodes de miniaturisation et examiné les antennes, en nous concentrant sur leur rayonnement, et nous avons étudié des topologies d'antennes simples miniatures. Pour cela, nous avons exploré l'utilisation de certaines techniques de miniaturisation.

Dans la dernière partie, qui se base sur la théorie des antennes, nous avons défini les paramètres d'ingénierie initiaux de l'antenne imprimée. Nous avons choisi d'utiliser le substrat FR-4 et avons apporté des modifications au plan de masse et au patch, en effectuant une étude paramétrique sur quelques dimensions afin d'adapter l'antenne à la fréquence souhaitée. Pour confirmer nos résultats, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel, et les résultats obtenus ont démontré une bonne concordance en termes de coefficient de réflexion S_{11} .

Étant donné l'importance de la bande de fréquence Sub 6G dans les communications sans fil avancées, il est crucial et fascinant de poursuivre dans cette direction. Cela nécessite une réflexion approfondie sur les perspectives futures afin d'améliorer davantage les caractéristiques telles que la bande passante, le gain et le diagramme de rayonnement de ce type d'antenne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D.MARWA B.ASMA « Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G », juillet 2019, Université 8Mai 1945 – Guelma
- [2] Jean Pierre-DAMIANO « De la 5G à la 6G : contexte et enjeux », 30 novembre 2020, IESF
- [3] Introduction to Microstrip Antennas David R. Jackson Dept. of ECE University of Houston
- [4] Dupage Policy Journal Tuesday, June 13, 2023 By Brent Zell Oct 6, 2017.
- [5] Antenne de radiofréquence du connecteur 2.4G 1.6dBi de la correction IPEX de FPC (wifibtmodule.com)
- [6] Dupage Policy Journal Tuesday, June 13, 2023 By Brent Zell Oct 6, 2017
- [7] Antennes extérieures - Bing
- [8] M.Mimouna ,S.Bahria « Systèmes d’antennes intelligentes de la 5ième génération de téléphonie mobile » MASTER ACADEMIQUE 2019 /2020.
- [9] B.Asma,T.Louiza « Simulation d’un réseau d’antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio », MASTER, 25/06/2018, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [10] Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems 2015;Page 861-898.
- [11] https://www.researchgate.net/figure/Microcell-Architecture-With-UE-Camping-On-Macrocell_fig1_305148023 consulté le Jun 2016.
- [12] A.M.Miyim,M.Ismail,R.Nordine “Fast handover for microcell discovery in wireless network” univ.Duste.Nigeria.
- [13] B.Sadou,A.Dehiya, « Etude de modalisation pour les réseaux mobiles 5G et 6G de nouvelles générations», Master, univ.jijel
- [14] Meenal G. Kachhavy et al International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.3, March- 2014, page 1084-1806.
- [15] International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 04 Issue: 09 | Sep -2017 Page 1110.

- [16] R Khutey, G Rana, V Dewangan, A Tiwari International Journal of Electrical and Electronics Research Vol. 3, Issue 2, pp: 584, Month: April - June 2015.
- [17] Jean Pierre-DAMIANO « De la 5G à la 6G : contexte et enjeux », 30 novembre 2020, IESF
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Possible-capabilities-of-6G-in-comparison-with-5G_tbl1_339370534 consulté le Feb 2020
- [19] International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 04 Issue: 09 | Sep -2017 Page 1111.
- [20] R Khutey, G Rana, V Dewangan, A Tiwari International Journal of Electrical and Electronics Research Vol. 3, Issue 2, pp: (583-585), Month: April - June 2015, page 584.
- [21] C.D.ALWIS, A.KALLA , QUOC-VIET .P , P.KUMAR, all , Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research, VOLUME 2, 2021, Page 845.
- [22] K.R. Carver And J. W. Mink « Microstrip Antenna technology » IEEE Trans. Antennas Propagat, Vol AP-29, PP2-24, JAN 1981
- [23] François Grange « Matériaux composites pour antenne miniature intégrée » , Université Rennes 1, 2010. Français.
- [24] F. Z. Marouf « Conception D'antennes Pifa Bi-Bande » Mémoire De Master II Université De Tlemcen. 2009.
- [25] J. Dauvignac, N. Fortino, S. Tourette, G. Kassivas, P. Ciais « Miniaturisation Des Antennes UWB Planaires » Université De Nice-Sophia Antipolis. 25 OCT 2006.
- [26] Anna Niang. Antennes miniatures et structures électromagnétiques à circuits non-Foster. Matériaux. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français
- [27] A. Chami « Miniaturisation Et Intégration D'antennes Imprimées Pour Systèmes ULB Pulsés » Université Nice Sophia Antipolis. France. 2011.
- [28] P. Bihouix, B. Guillebon « Quel Futur Pour Les Métaux ? Raréfaction Des Métaux : Un Nouveau Défi Pour La Société » EDP Sciences. 2010.

- [29] T. Arab « Etude Des Matériaux Composites (Titanate Oxyde) : Application Pour Réalisation Des Substrats D'antenne Miniatures » Magister, Faculté de Technologie. Université de Setif-1 UFAS. 04 NOV 2014.
- [30] D.NAIMA ,C.DOUNYAZED , Application de la technique de miniaturisation dans la conception des systèmes microstrip à GSD, 2019 /2020 pages 22-27.
- [31] R. Kiran Chand," Radiation Analysis and Design of Pyramidal Horn Antenna" , International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ,Vol. 2 Issue 10, October – 2013 p32
- [32] Anna Niang. Antennes miniatures et structures électromagnétiques à circuits non-Foster. Matériaux. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français.
- [33] C. Hamid « Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi. Mai 2012.
- [34] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, Inc., Norwood, 2001.
- [35] ADIL KAMIL" conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz -10.6 GHz) "Mémoire présenté pour l'obtention du grade du Maitre en sciences (M.Sc) 2011.
- [36] A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Diriges» Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse.
- [37] F. Roudet, S. Tedjini, and V. Tan-Phu, "Design of compact size excitation device for antenna pattern using fractal architectures," in Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE,2005, pp. 223-226 vol. 1B.
- [38] C. Insik, and L. Bomson, "Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antenna," IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp., vol. 2, 852–855, 2002
- [39] Amiya B. Sahoo, Ayush Biswal, Chandan K. Sahu, Jogesh C. Dash, B. B. Mangaraj, "Design of multi-band rectangular patch antennas using defected ground structure (DGS)", 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 19-20 May 2017.

[40] R. Er-rebyiy, J. Zbitou, A. Tajmouati, M. Latrach, A. Errkik, L. El Abdellaoui, "A new design of a miniature microstrip patch antenna using Defected Ground Structure DGS", International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco, 19-20 April 2017.

[41] A.Tarek « Etude des matériaux composites (Titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures»mémoire magister 2014 université Sétif p8

[42] A.Mahfoud, B.Ferielle « etude et conception d'une antenne millimetrique multiservice pour application 5g »Mémoire de master, Université SAAD DAHLEB BLIDA ,2021, p 38-39

[43] Adil Kamil « conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz) », thèse de pour l'obtention du grade du Maitre ès sciences Université du Québec, 2011.