

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib

Faculté : Sciences et technologie

Département : Electronique et Télécommunications



Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

Conception, modélisation et optimisation des antennes imprimées sélectives pour les systèmes de communication sans fil

Soutenu : le 29/ juin/2026

Présenté Par :

MELLE BELHIA Nour El Houda

MELLE BOUKROLDA Hafssa

Devant le jury composé de :

Mme Ayache Choukria	Professeur	UATBB	Présidente
Mme Boutkhil Malika	MAA	UATBB	Examinatrice
Mme Ferouani Souheyla	Professeur	UATBB	Encadrante
Mme Moussa Fatima Zahra	Docteur	UATBB	Co-Encadrante

Année Universitaire : 2025/2026

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions infiniment Dieu le tout puissant pour la santé, la force et le courage qu'il nous a donnés tout au long de notre parcours.

*Nous adressons nos sincères remerciements de notre chère enseignante et encadrante **professeur Ferouani Souheyla**, pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce travail. Sa disponibilité, sa patience et ses orientations pertinentes ont grandement contribué à la réussite de notre projet. Nous lui exprimons notre profonde gratitude et notre grand respect.*

*Nous remercions sincèrement notre Co-encadrante **Dr Moussa Fatima Zahra**, pour son soutien, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail*

*Nous remercions également les membres du jury, **Professeur Ayache Choukria** et **Madame Boutkhil Malika** de l'université d'Ain Temouchent Belhadj Bouchaib d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Vos remarques constructives et vos suggestions précieuses seront grandement appréciées et contribueront sans nul doute à l'amélioration de ce projet.*

Nous tenons également à remercier tous les professeurs du département d'électronique et de télécommunications de l'université Belhadj Bouchaib pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant nos études. Leur passion et leur dévouement à la recherche nous ont inspirés et motivés à poursuivre nos propres recherches scientifiques.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit par des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été inestimable.

Dédicace

C'est avec gratitude et développement total que je tien à dédié ce modeste travail :

À mon cher papa Said

L'homme de ma vie, mon soutien et ma fierté.

Merci pour tous tes sacrifices, ton amour et tes encouragements.

Que Dieu te protège et te garde toujours à mes côtés.

À ma chère maman Mimouna

La reine de mon cœur aucun mot ne pourra exprimer tout l'amour et la gratitude que je te porte.

Merci d'avoir toujours été ma force, mon refuge et ma lumière dans les moments difficiles.

Que Dieu te garde près de moi et t'accorde une longue vie remplie de bonheur et de santé.

À ma chère sœur Aida

Ma confidente. Mon soutien dans les jours difficiles et ma joie dans les plus beaux moments.

Merci d'être cette personne exceptionnelle qui illumine ma vie par sa présence

Sa tendresse et son amour sincère

À mon cher frère Reda

Ma fierté et celui qui m'a toujours donné du courage et de la force.

Merci d'être toujours présent à mes côtés et de m'encourager dans chaque étape de ma vie

À mes chers frères Mohammed et Boucif

Mes piliers dans la vie

Merci pour votre présence, et tout l'amour que vous m'avez toujours donné

À mes amies Wafaa Nadjette Wissal Meriem Marwa Abir Manar

Merci pour votre amitié sincère, votre soutien et tous les beaux moments partagés ensemble.

Vous avez été une vraie source de joie, de motivation et de bonne énergie tout au long de mon parcours

À ma chère binôme Hafssa

Merci pour ta collaboration, ton soutien tout au long de ce travail. Travailler avec toi a été une belle expérience.

À mes neveux et nièces

Les petits rayons de soleil de la famille, qui apportent joie et bonheur à chaque instant.

Houda

Dédicace

Alhamdoulillah, par amour et gratitude, pour le début comme pour l'aboutissement. Avec tout mon amour, je dédie le fruit de ma réussite, de mon diplôme et de longues années d'efforts consacrés au savoir à :

À moi-même

Pour ma patience, ma force et tous les sacrifices accomplis afin d'arriver jusqu'à cette réussite.

À ma chère mère, que Dieu la protège et la garde

À mon soutien indéfectible et à mon éternelle sécurité.

À cette grande femme qui a toujours souhaité voir mes yeux s'illuminer en un jour comme celui-ci

Merci pour ton amour, tes prières et tes sacrifices inestimables.

À mon frère Mouloud

Merci pour ton soutien constant et pour avoir été à mes côtés à chaque étape.

Ta présence a toujours été pour moi une source de force et un véritable soutien.

À ma chère grand-mère

Que Dieu prolonge sa vie et la protège.

Merci pour tes prières et ta tendresse qui m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours.

À mes frères et sœurs

À ceux dont l'amour dépasse tout autre amour

Merci pour votre présence, votre soutien et votre affection qui m'ont toujours accompagnée.

À tous ceux qui m'ont tendu la main et m'ont soutenue à chaque étape

Je vous exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance.

À mes chères amis Houda Abir Maroua Chaimaa Nada

Merci pour votre présence, votre soutien et votre belle amitié.

À ma chère partenaire Houda

À celle qui a partagé avec moi les difficultés du parcours et la joie de l'arrivée,

Merci pour votre soutien constant et ta présence à chaque étape.

Cette réussite porte une belle part de toi.

Hafssa

Résumé

Ce mémoire présente la conception et l'optimisation d'une antenne imprimée sélective et miniaturisée, destinée aux réseaux de télécommunications mobiles 3G, 4G et 5G. Le travail repose sur le développement d'une antenne patch rectangulaire dont les performances ont été améliorées par l'insertion de fentes et l'intégration de résonateurs DGS (Defected Ground Structure) dans le plan de masse. Les caractérisations électromagnétiques, réalisées à l'aide du logiciel CST, valident un fonctionnement multibande aux fréquences de 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz. L'antenne présente une bonne adaptation d'impédance, une forte isolation entre les bandes et un taux de miniaturisation de 52,82 %. Les gains obtenus sont de 2,34 dBi à 1,83 GHz (3G), 3,89 dBi à 2,64 GHz (4G) et 1,24 dBi à 3,53 GHz (5G). Grâce à sa compacité et à ses capacités de filtrage, cette antenne constitue une solution adaptée aux équipements de communication sans fil de nouvelle génération.

Mots clés : antenne patch, multi bandes, 3G, 4G, 5G, adaptation d'impédance, miniaturisation, DGS, surface sélective en fréquence, CST Studio Suite, communications sans fil.

Abstract

This Master's Thesis presents the design and optimization of a selective and miniaturized printed antenna intended for 3G, 4G, and 5G mobile telecommunication networks. The work is based on the development of a rectangular patch antenna whose performance was enhanced through the introduction of slots and the integration of Defected Ground Structure (DGS) resonators in the ground plane. Electromagnetic simulations carried out using CST Microwave Studio validate a precise multiband operation at 1.83 GHz, 2.64 GHz, and 3.53 GHz. The proposed antenna exhibits good impedance matching, high isolation between the operating bands, and a miniaturization rate of 52.82%. The achieved gains are 2.34 dBi at 1.83 GHz (3G), 3.89 dBi at 2.64 GHz (4G), and 1.24 dBi at 3.53 GHz (5G). Owing to its compact size and filtering capabilities, the proposed antenna represents a promising solution for next-generation wireless communication systems

Keywords: patch antenna, multiband, 3G, 4G, 5G, impedance matching, miniaturization, DGS, frequency selective surface, CST Studio Suite, wireless communications.

ملخص

تناول هذه المذكرة تصميم وتحسين هوائي مطبوع انتقائي ومصغر مخصص لشبكات الاتصالات المتنقلة من الجيل الثالث (G3) والجيل الرابع (G4) والجيل الخامس (G5). يعتمد هذا العمل على تطوير هوائي رقعة مستطيل (Rectangular Patch Antenna)، حيث تم تحسين أدائه من خلال إدراج شقوق ودمج تراكيب الأرضية المعيبة (DGS) في مستوى التأسيس. وقد أكدت المحاكاة الكهرومغناطيسية المنجزة باستخدام برنامج CST Microwave Studio التشغيل متعدد النطاقات عند الترددات 1.83 جيجاهرتز و 2.64 جيجاهرتز و 3.53 جيجاهرتز. ويتميز الهوائي المقترح بمطابقة جيدة للممانعة، وعزل مرتفع بين نطاقات التشغيل، إضافةً إلى نسبة تصغير بلغت 52.82%. كما بلغت قيم الكسب 2.34 dBi عند 1.83 جيجاهرتز (G3)، و 3.89 dBi عند 2.64 جيجاهرتز (G4)، و 1.24 dBi عند 3.53 جيجاهرتز (G5). وبفضل حجمه المدمج وقدراته على الترشيح، يُعد هذا الهوائي حلاً واعداً لتطبيقات وأنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: هوائي رقعة، متعدد الحزم، G3، G4، G5، مطابقة الممانعة، التصغير، البنية الأرضية المعيبة (DGS)، السطح الانتقائي للترددات، CST Studio Suite، الاتصالات اللاسلكية

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	i
Dédicace	ii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des acronymes et abréviation	Erreur ! Signet non défini.
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : État de l’art des Antennes imprimées sélectives	2
I.1 Introduction.....	3
I.2 Description de l’antenne imprimée	3
I.3 Structure d’antenne imprimée.....	4
I.4 Principe de fonctionnement	4
I.5 Différentes formes d’antenne.....	5
I.6 Caractéristiques de l’antenne imprimée	5
I.6.1 Caractéristiques électriques.....	5
I.6.2 Caractéristiques de rayonnement	7
I.7 Les Techniques d’alimentation des antennes imprimées.....	9
I.7.1 Les méthodes d’alimentation avec contact.....	9
I.7.2 Les méthodes d’alimentation sans contact	10
I.8 Les Techniques d’adaptation d’antenne imprimée	12
I.8.1 Adaptation par ligne quart d’onde.....	12
I.8.2 Adaptation par stub	12
I.8.3 Adaptation avec encoches	13
I.9 Miniaturisation des antennes imprimées.....	14
I.9.1 Contraintes liées à la miniaturisation	14
I.9.2 Facteur de miniaturisation	15
I.10 Techniques classiques de miniaturisation.....	15
I.10.1 Modification de la géométrie	15
I.10.2 Utilisation des matériaux.....	18

I.10.3 Composants électroniques.....	19
I.11 Antenne imprimée sélective avec DGS	19
I.11.1 Technique DGS (Defected Ground Structure)	20
I.11.2 Les différentes formes de DGS	20
I.11.3 L'apport de la DGS (Defected Ground Structure)	21
I.11.4 Antennes imprimées multi bande miniature sélectives	22
I.12 Domaine d'application des antennes imprimées.....	22
I.12.1 Troisième génération (3G)	22
I.12.2 Quatrième génération (4G).....	23
I.12.3 Cinquième génération (5G).....	23
I.13 Conclusion	23
Chapitre II: Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélectives destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G	25
II.1 Introduction	26
II.3 Cahier de charge	26
II.4 Conception logicielle de l'antenne patch rectangulaire de base.....	26
II.4.1 Calcul des paramètres de la géométrie rectangulaire.....	26
II.4.1.1 Résultats de simulation.....	28
II.4.2 Adaptation de l'antenne patch rectangulaire à 1.8 GHz	29
II.4.2.1 Résultats de simulation.....	30
II.4.3 Antenne patch rectangulaire miniature	32
II.4.4 Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire.....	34
II.5 Conception de l'antenne patch miniature avec la DGS (Defected Ground Structure).....	35
II.5.1 Cellule DGS Unitaire	35
II.5.2 Insertion des cellules DGS sur le plan de masse de l'antenne patch proposée	37
II.5.3 Optimisation des résultats	38
II.6 Prototypes des antennes simulés.....	42
II.6.1 Prototype de l'antenne patch rectangulaire initiale.....	42
II.6.2 Prototype de l'antenne rectangulaire miniature finale à base de DGS	43
II.6.3 Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale et l'antenne miniature finale avec DGS	44
II.7 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux la littérature	44

II.9 Conclusion	45
Conclusion Générale	46
Références Bibliographiques.....	47

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Présentation d'une antenne imprimée .	4
Figure I.2 : Les différentes formes du patch.	5
Figure I.3 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.	7
Figure I.4 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.	8
Figure I.5 : Alimentation par ligne micro ruban.	9
Figure I.6 : Alimentation par ligne coaxial.	10
Figure I.7: Alimentation par couplage proximité.	11
Figure I.8 : Alimentation couplée par ouverture.	11
Figure I.9 : Adaptation par quart d'onde.	12
Figure I.10 : Modélisation de l'antenne à Adaptation Simple stub.	13
Figure I.11: Patch adapté par encoches de longueur.	13
Figure I.12 : Représentation des types de fentes.	16
Figure I.13: Cartographie du champ dans la cavité d'une antenne micro ruban.	16
Figure I.14 : Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical.	17
Figure I.15 : une fente en forme de méandre.	18
Figure I.16: antenne patch avec des compensant électroniques .	19
Figure I.17: les différentes géométries des structures DGS.	21

Chapitre II :

Figure II.1 : Antenne patch rectangulaire initiale	27
Figure II.2 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne sans adaptation	29
Figure II.3: antenne patch adapté avec encoche	29
Figure II.4: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne adaptée	30
Figure II.5 : Le rapport d'ondes stationnaires (VSWR)	31
Figure II.6 : Diagramme de rayonnement 3D, (a) polaire, (b) 3D de l'antenne patch rectangulaire adaptée	31
Figure II.7 : Distribution du courant de surface de l'antenne patch rectangulaire adaptée	32
Figure II.8 : Antenne patch adaptée avec une fente U	32
Figure II.9 : Paramètres S_{11} obtenu aux dimensions de la fente	33
Figure II.10: Paramétré S_{11} pour les dimensions des paramètres géométriques de la fente du patch	33

Liste des figures

Figure II.11 : Coefficient de réflexion S11 pour les différentes dimensions de W et L du patch	34
Figure II.12: Cellule DGS proposée	36
Figure II.13 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule DGS	36
Figure II.14 : Insertion des cellules DGS sur le plan de masse	37
Figure II.15 : Coefficients de réflexion des cellules DGS	37
Figure II.16: Coefficients de réflexion S11 de l'antenne patch rectangulaire miniature avec la DGS.	38
Figure II.17: Structure du plan de masse avec insertion de l'encoche.	38
Figure II.18: Coefficient de réflexion S11 et trois fréquences de résonance : 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz.	39
Figure II.19: Coefficient de réflexion S11 pour la 3G, 4G et la 5G.	39
Figure II.20: Taux d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne à 1,8 GHz, 2.6GHz et 3.53 GHz.	40
Figure II.21: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 1,83 GHz.	41
Figure II.22: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 2.64 GHz.	41
Figure II.23: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 3.53GHz.	42
Figure II.24: Distribution du courant de surface à 1,83 GHz, 2.64 GHz et 3.53GHz.	42
Figure II.25: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale, (a) vue du face, (b) vue d'arrière.	43
Figure II.26: Prototype de l'antenne miniature proposée (a) vue de face, (b) vue d'arrière.	44
Figure II.27: Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et l'antenne miniature finale : (a) vue de face, (b) vue d'arrière.	44

Liste des tableaux

Tableau II.1: Résume les Paramètres de l'antenne patch rectangulaire-----	28
Tableau II.2: Résume les Dimensions de l'antenne initiale -----	28
Tableau II.3 : Résume les Dimensions et résultats de simulation-----	30
Tableau II.4 : les résultats de simulation avec insertion de la fente U -----	34
Tableau II.5 : Résume les Dimensions de l'antenne patch rectangulaire miniature-----	35
Tableau II 6 : comparaison des résultats avec les travaux de la littérature-----	45

Listes des acronymes et abréviations

3G : Troisième génération de réseaux mobiles

4G : Quatrième génération de réseaux mobiles

5G : Cinquième génération de réseaux mobiles

WLAN: Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio (Taux d'ondes stationnaires)

FSS : Frequency Selective Surface (Surface sélective en fréquence)

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

VHF: Very High Frequency

UHF: Ultra High Frequency

RF: Radio Frequency

BNC: Bayonet Neill-Concelman

TNC : Threaded Neill-Concelman

AEP : Antenne électriquement petite

SER : Section équivalente radar

CST: Computer Simulation Technology

GSM: Global System for Mobile Communications

DGS: Defected Ground Structure

Introduction Générale

Les systèmes de communication sans fil connaissent une évolution rapide et continue, portée par le déploiement des technologies mobiles telles que la 3G, la 4G et, plus récemment, la 5G. Cette dynamique s'accompagne d'exigences matérielles croissantes en termes de débit, de qualité de service, de miniaturisation des équipements et d'efficacité spectrale. Dans ce contexte, les antennes jouent un rôle fondamental en tant qu'interface critique entre les dispositifs électroniques et le milieu de propagation électromagnétique.

Parmi les différentes technologies existantes, les antennes imprimées (ou antennes patch) se distinguent par leur faible coût de fabrication, leur profil compact, leur facilité d'intégration et leur compatibilité avec les circuits micro-ondes. Toutefois, elles souffrent de certaines limitations physiques, notamment une bande passante intrinsèquement étroite, une sélectivité fréquentielle limitée et une forte sensibilité aux interférences, ce qui constitue un défi majeur pour les applications multi-bandes modernes.

Afin de pallier ces contraintes, l'intégration de structures à défaut de masse (DGS – Defected Ground Structures) dans la conception des antennes imprimées s'impose comme une solution technologique particulièrement innovante. Ces géométries permettent de perturber la distribution des courants de surface pour améliorer significativement la sélectivité fréquentielle, filtrer les bandes indésirables et optimiser l'adaptation globale de l'antenne.

Ce mémoire s'inscrit directement dans cette problématique. Il a pour objectif principal la conception, la modélisation et l'optimisation d'antennes imprimées sélectives et miniaturisées, dédiées aux systèmes de communication cellulaires. L'étude repose sur l'utilisation de solveurs électromagnétiques avancés pour analyser et exalter les performances de l'antenne en matière d'adaptation d'impédance, de gain et de comportement multi-bandes.

Le présent manuscrit s'articule ainsi en plusieurs chapitres : le premier dresse un état de l'art exhaustif sur la technologie des antennes imprimées et les techniques de miniaturisation, tandis que le second est consacré à la conception, à l'analyse et à l'optimisation d'une antenne patch rectangulaire intégrant un réseau de résonateurs DGS ciblant les standards 3G, 4G et 5G.

Chapitre I

État de l'art des

Antennes imprimées sélectives

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

I.1 Introduction

Les antennes imprimées constituent aujourd'hui un élément clé des systèmes de communication modernes grâce à leur faible coût, leur compacité et leur facilité de fabrication en technologie micro ruban. Elles sont omniprésentes dans de nombreux domaines tels que la téléphonie mobile (3G/4G/5G), les communications sans fil (WLAN, Bluetooth), les systèmes radar et satellite, ainsi que les applications médicales et militaires. Cependant, ces antennes présentent des limites inhérentes, notamment une bande passante étroite et des performances contraintes par leur taille.

Ce chapitre d'état de l'art présente les fondements des antennes imprimées : leur structure, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques principales (S_{11} , VSWR, gain, directivité). Il détaille ensuite les techniques essentielles d'alimentation (micro-ruban, sonde, couplage), d'adaptation d'impédance (quart d'onde, stubs, encoches) et de miniaturisation (fentes, court-circuit, matériaux à haute permittivité). Enfin, il introduit les structures à défaut dans le plan de masse (DGS) et les antennes multi-bandes miniatures, illustrant leur rôle dans les communications modernes.

I.2 Description de l'antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'un élément rayonnant métallique déposé sur un substrat diélectrique, avec un plan de masse situé sur la face opposée. L'élément rayonnant, généralement réalisé en cuivre ou en or, possède une faible épaisseur adaptée aux applications hyperfréquences afin de limiter les pertes conductrices [1].

Le substrat diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative et son facteur de pertes, paramètres essentiels qui influencent la fréquence de résonance, la bande passante, l'efficacité et les dimensions de l'antenne. Les matériaux utilisés présentent généralement une permittivité comprise entre 2,2 et 12. Une faible permittivité favorise une meilleure efficacité et une bande passante plus large, tandis qu'une permittivité élevée permet de réduire la taille de l'antenne, au détriment des performances globales [2].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

I.3 Structure d'antenne imprimée

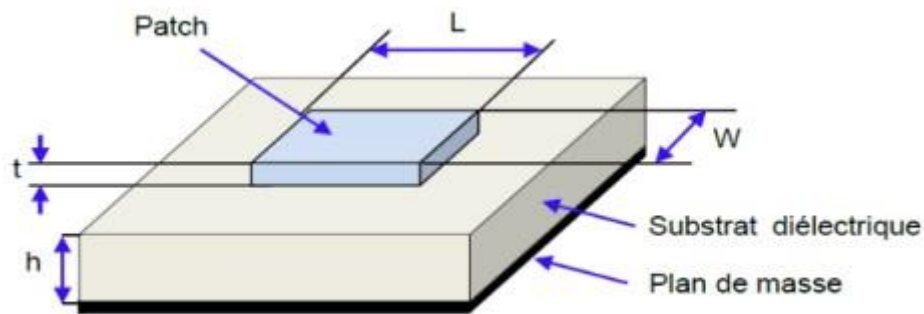


Figure I.1 : Présentation d'une antenne imprimée [3].

L : Longueur du patch, t : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch, h : épaisseur du substrat.

Dans sa structure de base (figure 1), l'antenne imprimée est constituée d'un patch métallique de géométrie arbitraire déposé sur un substrat diélectrique, lui-même placé au-dessus d'un plan de masse métallique.

Afin d'optimiser la puissance rayonnée par l'antenne, plusieurs paramètres doivent être pris en considération :

- La réduction des pertes liées à l'effet Joule.
- L'amélioration de la bande passante de l'antenne.
- La métallisation complète de la face inférieure pour assurer un plan de masse efficace.
- L'alimentation du patch par une ligne de transmission de type micro-ruban, qui permet à la fois la connexion au circuit et l'adaptation d'impédance, tout en minimisant les réflexions [3].

Par ailleurs, la géométrie du patch conducteur peut varier. Cette variation influence directement les modes d'excitation de l'antenne ainsi que les caractéristiques du rayonnement. En pratique, les formes les plus couramment utilisées sont les patches rectangulaires et circulaires, plus rarement des structures annulaires ou triangulaires. Leurs dimensions restent généralement faibles, de l'ordre de $\lambda/2$ à λ , où λ est la longueur d'onde [4].

I.4 Principe de fonctionnement

Après l'excitation de la ligne d'alimentation, l'onde électromagnétique se propage jusqu'au patch rayonnant, provoquant une distribution de charges sur celui-ci et sur le plan de masse. Cette répartition génère des champs électriques principalement confinés dans le substrat,

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

mais s'étendant légèrement au-delà des bords du patch sous forme de champs de frange, qui sont responsables du rayonnement. Le phénomène de rayonnement résulte ainsi de l'interaction entre la propagation de l'onde, la résonance de la structure et ces champs de frange aux extrémités du patch [5].

I.5 Différentes formes d'antenne

Il existe de nombreuses formes d'antennes patch, chacune conçue pour répondre à des caractéristiques spécifiques. Parmi les types les plus courants, on retrouve ceux illustrés à la figure (2). Pour les fréquences en ondes millimétriques, les formes les plus répandues et les plus simples à analyser en termes de mécanismes de rayonnement sont les antennes patch rectangulaires, carrées et circulaires [6][3].

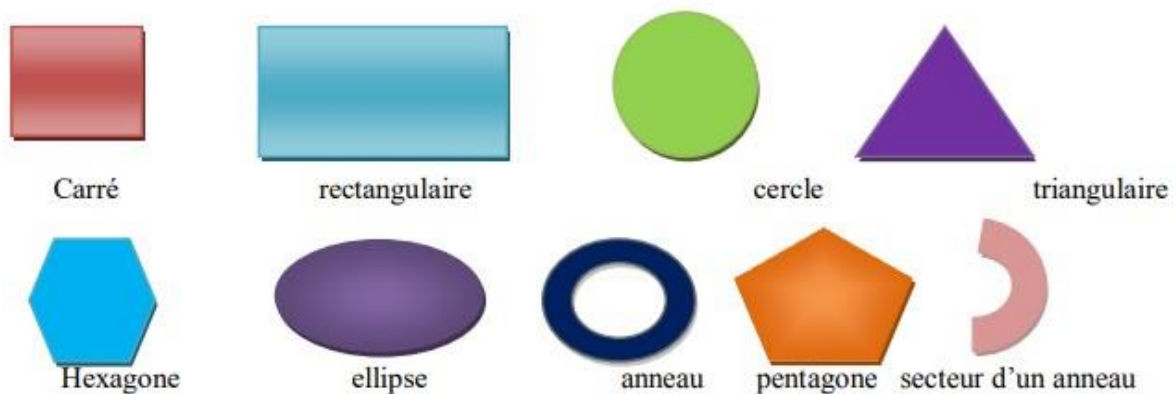


Figure I.2 : Les différentes formes du patch [2].

I.6 Caractéristiques de l'antenne imprimée

La caractérisation d'une antenne repose sur l'étude de plusieurs paramètres qui varient en fonction de la fréquence. La définition de ces paramètres est normalisée par l'IEEE, référence incontournable dans le domaine des télécommunications. De manière générale, ces paramètres se divisent en deux grandes catégories : les caractéristiques électriques et les caractéristiques de rayonnement [7].

I.6.1 Caractéristiques électriques

- Impédance d'entrée

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

L'impédance d'entrée de l'antenne correspond à l'impédance vue par la ligne d'alimentation au point de connexion avec l'antenne. Le dispositif d'adaptation est situé entre la ligne de transmission et l'antenne [8].

Cette impédance est donnée par la relation suivante : $Z_{in} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}$ [8]

Z_0 =impedence caractéristique de la ligne d'alimentation

- **Coefficient de réflexion S_{11}**

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage d'un milieu à un autre, une partie de son énergie est réfléchiée tandis que le reste est transmis. Ce phénomène est caractérisé, dans le cas des antennes, par le coefficient de réflexion S_{11} .

Le coefficient de réflexion S_{11} est défini comme le rapport entre l'onde réfléchiée et l'onde incidente à l'entrée de l'antenne. Il permet d'évaluer la quantité d'énergie non transmise (ou non absorbée) par l'antenne.

Mathématiquement, il s'exprime par : $S_{11} = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0}$ [9]

Où :

Z_e : Représente l'impédance d'entrée de l'antenne.

Z_0 : Correspond à l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation (généralement 50 Ω).

Ce paramètre constitue un critère fondamental pour juger de l'adaptation de l'antenne : plus la valeur de S_{11} est faible (en dB), meilleure est l'adaptation et plus les pertes par réflexion sont réduites [9].

- **Le Taux d'Ondes Stationnaires (VSWR)**

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) est défini à partir du coefficient de réflexion et indique la quantité de puissance réfléchiée par l'antenne.

Il s'exprime par : $VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}$ [10]

Il est toujours ≥ 1 . Une valeur de 1 correspond à une adaptation parfaite (aucune réflexion). Une valeur jusqu'à 2 est acceptable, tandis qu'un $VSWR > 2$ indique une mauvaise adaptation avec une forte réflexion de puissance [10].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

- **La bande passante**

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences dans lequel le transfert d'énergie entre la ligne d'alimentation et l'antenne (ou inversement) est optimal. Elle est généralement définie comme la plage où le coefficient de réflexion S_{11} reste inférieur à -10 dB, ce qui garantit une bonne adaptation et des pertes par réflexion limitées.

Selon leur conception, certaines antennes présentent une bande passante étroite, caractérisant un comportement sélectif, tandis que d'autres offrent une large bande passante, leur permettant de fonctionner sur un intervalle de fréquences plus étendu [11].

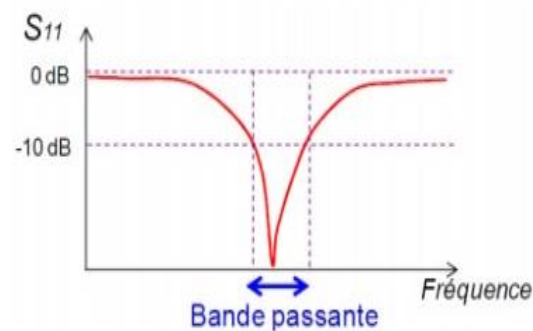


Figure I.3 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion [11].

I.6.2 Caractéristiques de rayonnement

- **Le diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement décrit la variation de la puissance rayonnée par une antenne en fonction des directions dans l'espace. Il permet d'identifier les directions où le rayonnement est maximal.

Ce diagramme peut être représenté en 3D, offrant une meilleure visualisation du lobe principal et des lobes secondaires, ou en 2D, sous forme polaire ou cartésienne [12].

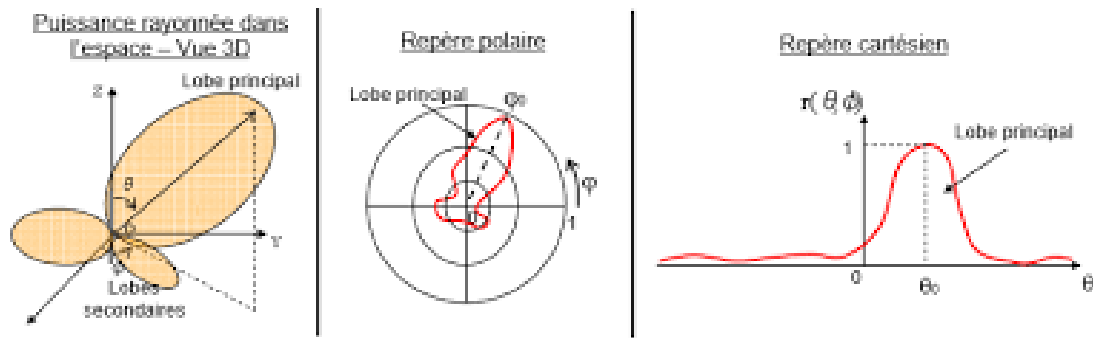


Figure I.4 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [9].

• La Directivité

La directivité d'une antenne représente sa capacité à concentrer la puissance rayonnée dans une direction donnée. Elle est définie comme le rapport entre la densité de puissance maximale dans la direction principale et la densité moyenne de puissance rayonnée dans toutes les directions [13].

$$\text{Elle s'exprime par : } D(\theta, \varphi) \frac{p(\theta, \varphi)}{pr/4\pi} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{pr} \quad [13]$$

• Le Gain

Le gain d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation. Il dépend de la directivité, c'est-à-dire de la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie dans le lobe principal par rapport à une antenne isotrope de référence [14].

$$\text{Il est présenté par l'équation suivante : } G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad [14]$$

$P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction.

P_a : Puissance rayonnée par l'antenne.

Il peut s'exprimer en fonction du rendement et de la directivité :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad [15]$$

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

- **Le rendement**

Le rendement d'une antenne est défini comme le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance fournie à l'antenne :

$$\eta_R = \frac{P_r}{P_a} \quad [16]$$

Il peut également s'exprimer comme le rapport entre le gain et la directivité :

$$\eta_R = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} \quad [17]$$

I.7 Les Techniques d'alimentation des antennes imprimées

L'adaptation de l'antenne à son alimentation est essentielle pour assurer un transfert optimal de l'énergie entre la source et l'antenne. Pour les antennes imprimées, deux principales méthodes d'alimentation existent : l'alimentation avec contact, où le patch est directement excité par le signal RF, et l'alimentation sans contact, où l'énergie est transmise indirectement au patch par couplage électromagnétique [18].

I.7.1 Les méthodes d'alimentation avec contact

- **Alimentation par ligne micro ruban**

Dans cette méthode, le patch est directement relié à une ligne de transmission micro-ruban. L'impédance au bord du patch étant généralement élevée (environ 200 Ω), il est nécessaire d'utiliser un transformateur d'impédance (souvent un quart d'onde) afin d'assurer l'adaptation à une ligne standard de 50 Ω [19].

Cette technique permet de concevoir l'antenne et son réseau d'alimentation sur un même substrat, ce qui réduit le coût de fabrication. Toutefois, les lignes micro-ruban peuvent

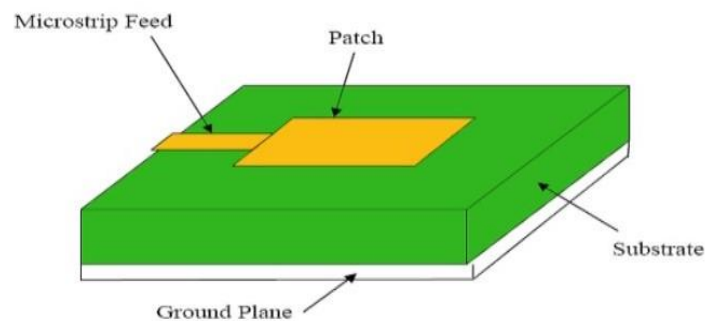


Figure I.5 : Alimentation par ligne micro ruban [21].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

engendrer des rayonnements parasites, susceptibles d'augmenter les lobes secondaires et la polarisation croisée [20].

- **Alimentation par sonde coaxiale**

L'alimentation par sonde coaxiale consiste à utiliser un câble coaxial (généralement $50\ \Omega$) dont le conducteur central traverse le substrat pour être connecté au patch, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse.

Le point d'alimentation doit être choisi de manière à obtenir une impédance d'entrée d'environ $50\ \Omega$ pour assurer une bonne adaptation. Différents types de connecteurs (N, TNC, BNC) sont utilisés selon la gamme de fréquences (VHF, UHF, micro-ondes) [20].

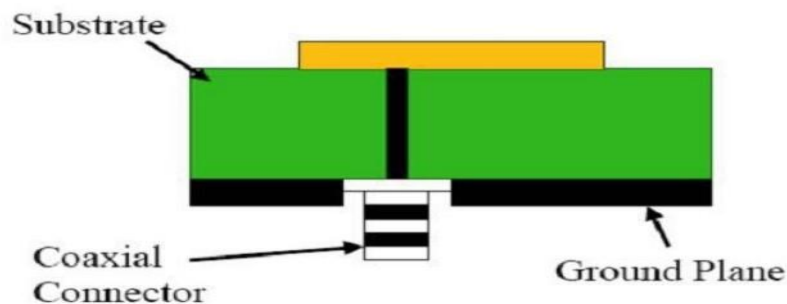


Figure I.6 : Alimentation par ligne coaxial [21].

I.7.2 Les méthodes d'alimentation sans contact

- **Alimentation par Couplage de proximité**

Cette technique repose sur un couplage électromagnétique entre une ligne micro-ruban et le patch, sans connexion directe. Une ligne ouverte peut être placée sous le patch ou à proximité de son bord afin de créer une excitation par champ de frange [18].

L'absence de soudure améliore la fiabilité mécanique et réduit certaines pertes, tout en offrant de meilleures performances en termes de bande passante [20].

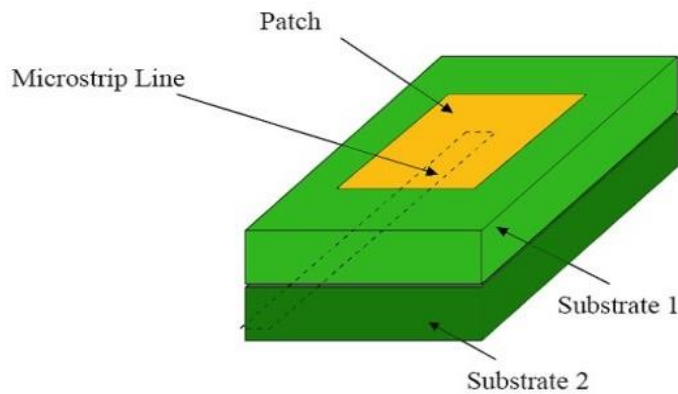


Figure I.7: Alimentation par couplage proximité [21].

- **Alimentation couplée par ouverture**

Dans cette méthode, une ligne de transmission est placée d'un côté du plan de masse, tandis que le patch se trouve de l'autre côté. Le couplage s'effectue à travers une fente (ou ouverture) réalisée dans le plan de masse [18].

Cette technique permet de réduire les rayonnements parasites des lignes d'alimentation et d'obtenir une large bande passante (supérieure à 10 %, voire plus de 30 % avec des structures empilées). La fente agit également comme un résonateur, contribuant à l'élargissement de la bande [22].

De plus, l'absence de contact direct réduit les pertes d'énergie et améliore les performances globales de l'antenne [20].

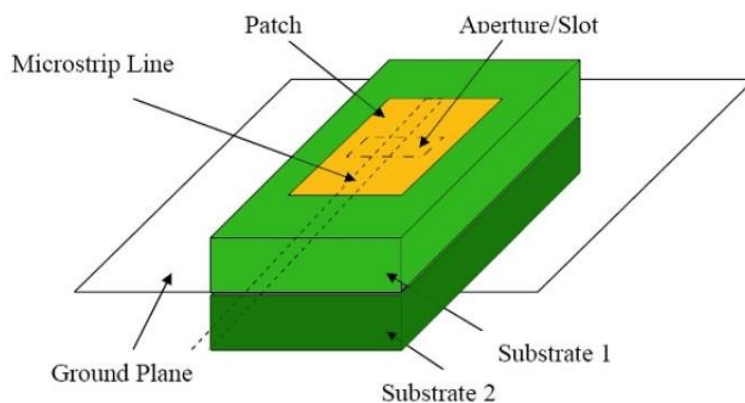


Figure I.8 : Alimentation couplée par ouverture [21].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

I.8 Les Techniques d'adaptation d'antenne imprimée

Chaque système qui convertit de l'énergie sur une ligne de transmission nécessite une adaptation. En effet, la ligne modifie l'impédance de la charge et la transforme en une autre valeur du côté de la source. Ainsi, l'impédance « vue » par la source dépend à la fois de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [23].

I.8.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la conception des circuits hyperfréquences, on cherche généralement à réaliser une adaptation. Cela consiste à transformer l'impédance obtenue en sortie du circuit pour la ramener vers une autre valeur, le plus souvent égale à l'impédance caractéristique (typiquement 50Ω) [24].

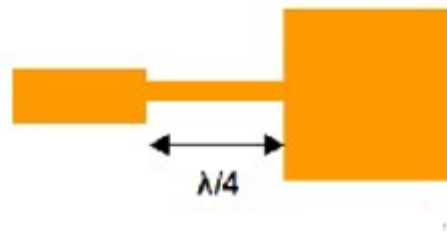


Figure I.9 : Adaptation par quart d'onde [9].

I.8.2 Adaptation par stub

Une autre méthode pour adapter une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Il peut être soit en circuit ouvert (open stub), ou en court-circuit (short stub), et on choisit généralement la solution la plus compacte. Le principe peut s'exprimer en impédance, mais il est souvent plus simple de travailler directement en admittance, car cela facilite le calcul des éléments en parallèle. Un stub est en fait un morceau de ligne de transmission de longueur s , connecté en dérivation sur la ligne principale à une distance d de la charge [25].

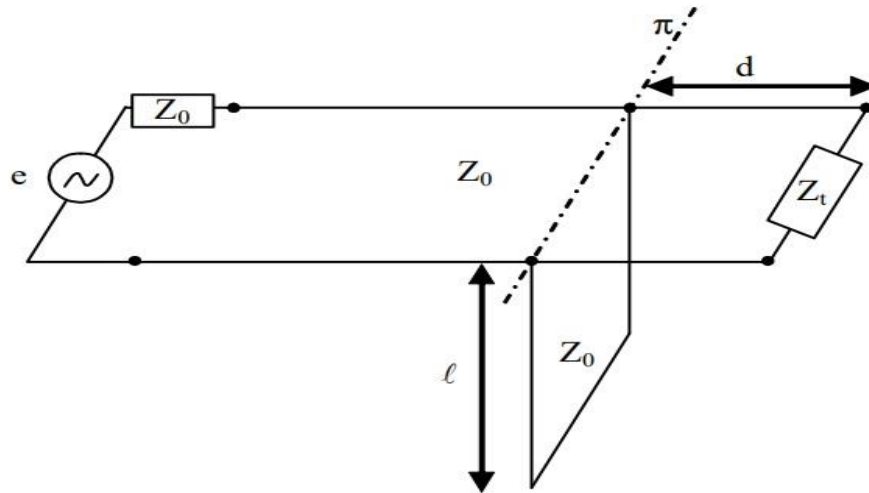


Figure I.10 : Modélisation de l'antenne à Adaptation Simple stub [9].

I.8.3 Adaptation avec encoches

L'adaptation des antennes patch par encoches constitue une technique simple et efficace pour optimiser l'impédance d'entrée, particulièrement en alimentation par ligne micro-ruban. Les encoches, généralement rectangulaires ou en U pratiquées aux bords du patch, modifient la géométrie rayonnante et excitent des modes supplémentaires, permettant d'ajuster la résistance et la réactance pour une adaptation à 50Ω [26].

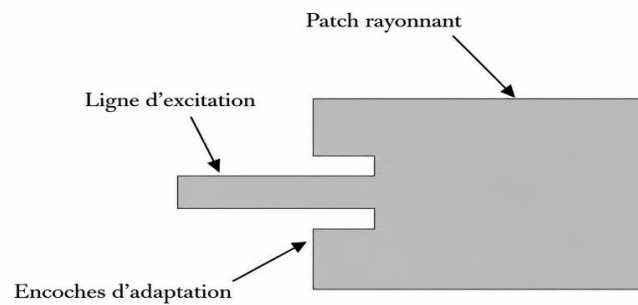


Figure I.12: Patch adapté par encoches de longueur [23].

I.9 Miniaturisation des antennes imprimées

La miniaturisation des systèmes électroniques a fortement contribué à l'essor des terminaux mobiles modernes. Toutefois, cette évolution reste limitée dans le cas des antennes en raison de contraintes physiques fondamentales liées à la longueur d'onde. En particulier, les travaux de Wheeler ont montré que les antennes électriquement petites (AEP) doivent satisfaire la condition :

$$K a \leq 1$$

Avec :

- a le rayon de la sphère minimale qui englobe l'antenne, communément appelée sphère de CHU
- K est le nombre d'onde dans le milieu de propagation [27].

Cela impose une limite sur leurs dimensions. Par ailleurs, certaines antennes miniatures résultent de contraintes physiques conduisant à des structures à profil bas (Low Profile). Cependant, la réduction des dimensions d'une antenne ne peut être réalisée sans dégradation de ses caractéristiques électromagnétiques [9]. Ainsi, la conception d'antennes miniaturisées repose sur un compromis intrinsèque entre compacité géométrique et maintien des performances, notamment en termes de bande passante, de gain et d'efficacité [28].

I.9.1 Contraintes liées à la miniaturisation

La miniaturisation des antennes imprimées entraîne plusieurs contraintes importantes qui affectent directement leurs performances électromagnétiques [28].

- **Réduction de la taille vs performances**

La réduction de la taille des antennes imprimées permet une meilleure intégration dans les dispositifs électroniques, mais elle impacte directement leurs performances. En effet, la miniaturisation entraîne généralement une baisse de l'efficacité de rayonnement, une réduction de la bande passante et une diminution du gain. Elle complique également l'adaptation d'impédance et augmente les pertes dans le substrat. Ainsi, il existe un compromis fondamental entre compacité et performances électromagnétiques [29].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

- **Effet sur l'efficacité et la bande passante**

La réduction des dimensions des antennes imprimées influence directement leurs performances, en particulier l'efficacité de rayonnement et la bande passante. Lorsque la taille de l'antenne diminue, les pertes dans le substrat et les conducteurs deviennent plus importantes, ce qui entraîne une baisse de l'efficacité. Parallèlement, la bande passante se réduit, rendant l'antenne plus sensible aux variations de fréquence et moins adaptée aux applications nécessitant un fonctionnement large bande. Ainsi, la miniaturisation implique un compromis entre compacité et performances électromagnétiques [30].

I.9.2 Facteur de miniaturisation

En pratique, le facteur de miniaturisation peut être évalué de deux façons principales.

La première consiste à concevoir une antenne compacte dont les performances électromagnétiques se rapprochent le plus possible de celles d'une antenne de référence, puis à établir un rapport entre les dimensions des deux antennes [31].

La seconde approche consiste à réaliser une antenne compacte ayant les mêmes dimensions maximales que l'antenne de référence, puis à comparer les fréquences obtenues, soit pour un niveau d'adaptation donné, soit pour un niveau de gain spécifié dans une direction donnée [32].

I.10 Techniques classiques de miniaturisation

Dans cette section, nous présenterons les différentes techniques de miniaturisation recensées dans la littérature, tout en analysant l'impact de chacune d'elles sur les performances de l'antenne [33].

I.10.1 Modification de la géométrie

Cette technique de miniaturisation est aujourd'hui la plus largement utilisée et s'applique à une grande variété de formes d'antennes. Dans ce paragraphe, nous présentons différentes structures d'antennes miniaturisées basées sur la modification de leur géométrie [32].

- **Insertion de fentes**

L'une des techniques utilisées pour augmenter la longueur électrique du trajet des courants consiste à intégrer des fentes dans la structure rayonnante. Cette approche permet non seulement de contraindre les courants à contourner ces fentes, prolongeant ainsi leur parcours et abaissant

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

la fréquence de résonance, mais aussi de générer des effets capacitifs et inductifs qui influencent l'impédance d'entrée de l'antenne [34].

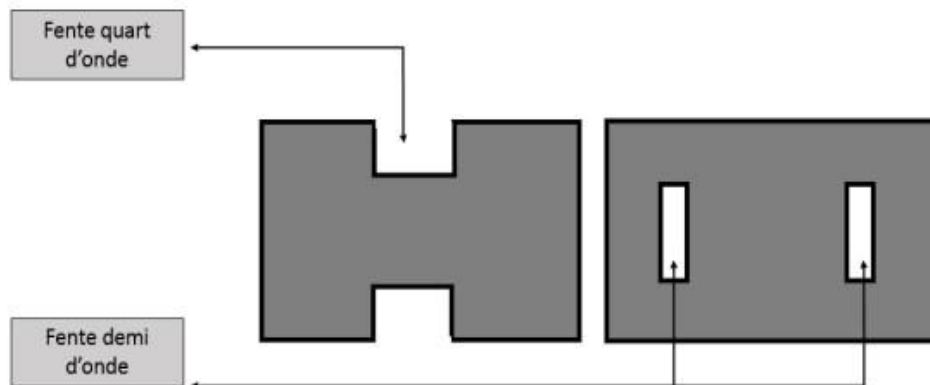


Figure I.15 : Représentation des types de fentes [34].

Figure I.16 : Représentation des types de fentes [34].

- **Ajout de court-circuit**

Une des méthodes les plus utilisées dans le domaine des antennes imprimées consiste à ajouter un ou plusieurs court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse. En étudiant la distribution du champ électrique du premier mode résonant, appelé mode fondamental, TM_{10} , dans la cavité virtuelle formée par des parois électriques et magnétiques, on peut mieux comprendre le fonctionnement de cette technique [35].

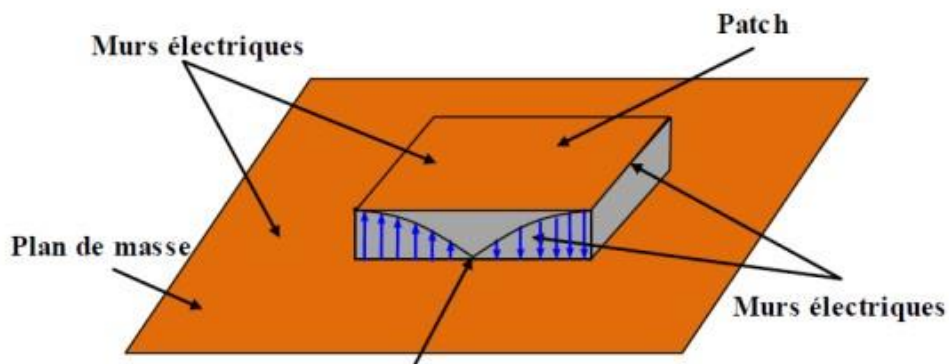


Figure I.18: Cartographie du champ dans la cavité d'une antenne micro ruban [32].

Figure I.19 : Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical [36]. **Figure I.20:** Cartographie du champ dans la cavité d'une antenne micro ruban [32].

- **Repliement et courbure**

Cette technique est également utilisée pour la miniaturisation des antennes. Elle consiste à modifier la forme de l'élément rayonnant ou à le replier sur lui-même. Cette opération permet de réduire l'encombrement physique par rapport à une structure non repliée. Elle est particulièrement appliquée aux antennes de type dipôle [36].

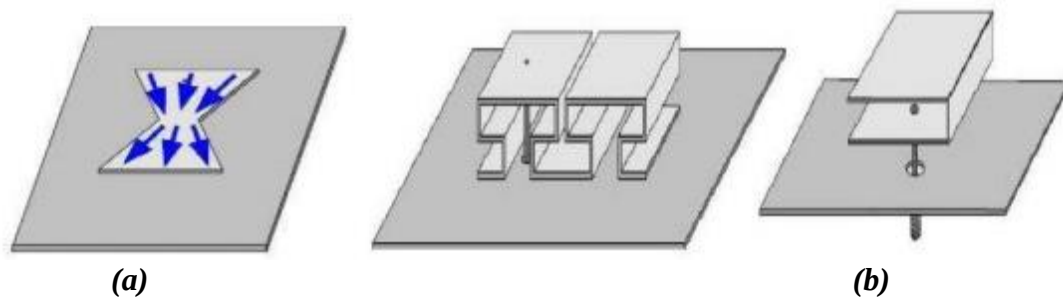


Figure I.21 : Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical [36].

Figure I.22 : Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical [36].

- **Méandres**

Les antennes méandres permettent de réduire la taille physique tout en conservant la longueur électrique, en repliant l'élément rayonnant. Cette technique, utilisée en filaire et en micro-ruban, peut adopter diverses formes géométriques. Toutefois, elle peut entraîner une augmentation des pertes ohmiques et une diminution de l'efficacité de rayonnement [37].

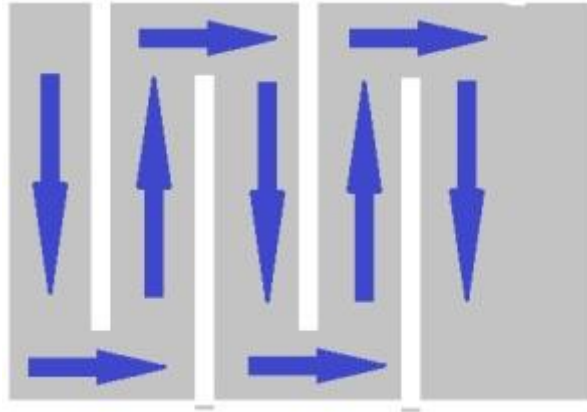


Figure I.24 : une fente en forme de méandre [37].

Figure I.25: antenne patch avec des compensant électroniques [34]. **Figure I.26 :** une fente en forme de méandre [37].

I.10.2 Utilisation des

matériaux

Les antennes imprimées sont des antennes largement utilisées grâce à leur facilité de conception, d'intégration et de leur faible coût. Ces antennes font souvent l'objet de réduction de taille électrique par l'utilisation de matériaux, parmi eux on trouve :

- **Matériaux diélectriques**

Pour réduire la taille d'une antenne, il est possible d'agir sur les propriétés diélectriques du substrat utilisé. Plusieurs études ont montré que l'utilisation de matériaux à forte permittivité relative (ϵ_r), généralement comprise entre 10 et 20, permet de diminuer les dimensions de l'antenne sans modifier sa géométrie.

En effet, lorsque la permittivité du substrat est élevée, les lignes de champ électromagnétique se concentrent davantage à l'intérieur du matériau, sous l'antenne. Ce phénomène réduit la longueur d'onde guidée (λ_g), permettant de concevoir des antennes plus compactes tout en conservant des performances proches [37].

- **Matériaux magnétiques**

Dans la littérature, les matériaux magnétiques naturels sont rarement utilisés, car leur perméabilité relative (μ_r) est généralement faible et leurs pertes magnétiques sont importantes aux fréquences micro-ondes. Leur principal avantage réside toutefois dans la possibilité d'utiliser des épaisseurs plus grandes, ce qui améliore l'efficacité de l'interaction entre l'onde et la matière. En pratique, ces matériaux peuvent être employés sous forme de surfaces, de

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

volumes de quelques centimètres cubes, ou encore intégrés dans des structures comme des cavités [32].

- **Matériaux magnéto-diélectriques**

L'utilisation de matériaux magnéto-diélectriques, caractérisés par une permittivité et une perméabilité supérieures à 1, constitue une solution efficace pour miniaturiser les antennes sans dégrader la bande passante. En effet, ces matériaux permettent de réduire les dimensions des antennes imprimées, puisque leur taille est inversement proportionnelle à l'indice de réfraction du substrat [38].

I.10.3 Composants électroniques

Pour réduire la taille de l'antenne et améliorer son adaptation, il est possible d'intégrer des composants discrets tels que des résistances, des condensateurs ou des inductances, parfois réalisés sous forme de diodes. Cependant, l'ajout de ces éléments introduit des pertes supplémentaires, ce qui peut entraîner une diminution de l'efficacité globale de l'antenne [34].

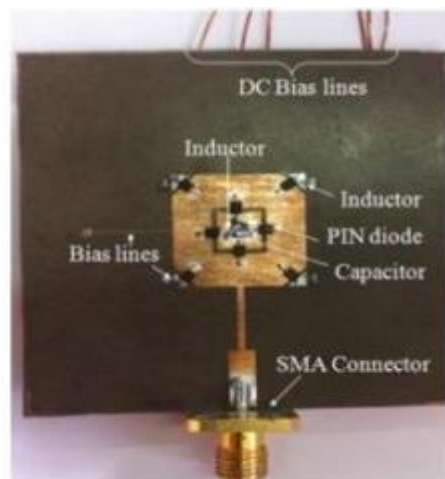


Figure I.27: antenne patch avec des composants électroniques [34].

I.11

Antenne

imprimée sélective avec DGS

Figure I.28: antenne patch avec des composants électroniques [34].

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

Une antenne imprimée sélective avec DGS (*Defected Ground Structure* - Structure à Défaut de Masse) est un dispositif rayonnant compact dont le plan de masse a été intentionnellement altéré par la gravure de motifs géométriques spécifiques. Cette modification physique vise à intégrer directement des fonctions de filtrage (sélectivité) à l'antenne, lui permettant de rayonner sur des bandes de fréquences précises tout en rejetant fortement les fréquences parasites environnantes [39].

I.11.1 Technique DGS (Defected Ground Structure)

La structure à défaut dans le plan de masse (DGS) consiste à réaliser une découpe ou une fente dans le plan de masse de l'antenne. Cette modification perturbe la circulation du courant et change les propriétés électriques de la structure. Grâce à cette technique, il est possible d'améliorer la résonance, l'adaptation d'impédance et les performances de l'antenne. La DGS permet également d'améliorer la sélectivité en fréquence en favorisant certaines bandes de fréquences et en atténuant les fréquences indésirables. Elle contribue aussi à réduire la taille de l'antenne grâce à l'effet d'onde lente. C'est une méthode simple et efficace, largement utilisée dans les antennes et les circuits micro-ondes [40].

I.11.2 Les différentes formes de DGS

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

Les structures DGS (Defected Ground Structure) peuvent être réalisées sous différents motifs géométriques afin d'obtenir des caractéristiques électromagnétiques spécifiques. Chaque forme perturbe différemment la distribution du courant dans le plan de masse, ce qui influence la fréquence de résonance, la bande passante, l'adaptation d'impédance et la sélectivité fréquentielle. Parmi les motifs les plus couramment utilisés figurent les formes en H, en U, en I, en T, rectangulaire, circulaire et en haltère (dumbbell) et anneaux. Le choix du motif dépend des performances recherchées et des contraintes de conception de l'antenne [41].

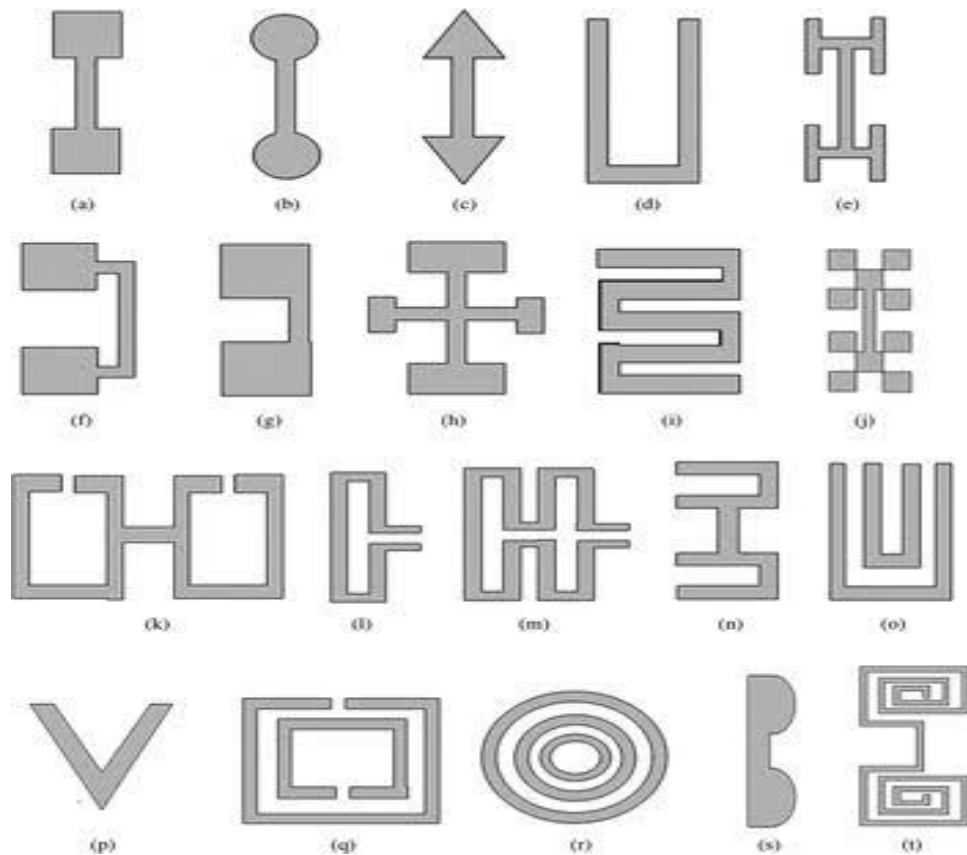


Figure I.30: les différentes géométries des structures DGS [41] .

Figure I.31: les différentes géométries des structures DGS [41] .

I.11.3 L'apport de la DGS (Defected Ground Structure)

Au lieu de garder le plan de masse parfaitement plein et continu, on y grave des « défauts » (des fentes, des trous en forme de U, de cercles, de croix, etc.).

Physiquement, ces gravures agissent comme des obstacles. Elles perturbent et dévient les lignes de courant de surface. D'un point de vue électrique, chaque trou ajoute une inductance (L_s) et une capacité (C_s) supplémentaires à la structure, créant ainsi un circuit résonnant LC équivalent directement dans le plan de masse. Le circuit LC créé par les fentes génère ce que l'on appelle

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

des « bandes interdites » (Band-gaps). L'antenne acquiert la capacité de se comporter à la fois comme un élément rayonnant et comme un filtre passe-bande ou coupe-bande très performant [42].

I.11.4 Antennes imprimées multi bande miniature sélectives

Par définition, une antenne multi-bande est une antenne capable de fonctionner sur deux ou plusieurs bandes de fréquences, tout en offrant des performances relativement similaires dans chacune d'elles. Le fonctionnement sur une bande donnée implique généralement une adaptation acceptable sur l'ensemble des fréquences de cette bande. Cette adaptation est considérée comme « raisonnable » lorsque le coefficient de réflexion, ou le rapport d'ondes stationnaires (TOS), à l'entrée de l'antenne reste inférieur à une valeur prédéfinie.

L'un des principaux avantages des antennes multi-bandes réside dans la possibilité d'utiliser des éléments rayonnants distincts pour chaque bande de fréquences. Cela permet de modifier facilement la zone de couverture d'une bande spécifique sans affecter les autres. En pratique, cette flexibilité est obtenue en ajustant ou en remplaçant l'élément rayonnant associé à la bande concernée [3].

I.12 Domaine d'application des antennes imprimées

Les antennes patch sont très utilisées grâce à leurs bonnes performances, leur simplicité et leur faible coût. Leurs applications s'étendent des télécommunications sans fil modernes (réseaux mobiles 3G, 4G, 5G, WLAN, satellite) aux domaines militaire (aéronautique, radars) et médical (imagerie, télémédecine). Leur grande facilité d'intégration et de fabrication justifie également leur adoption massive dans les applications commerciales [22],[43]. Dans notre travail nous allons concevoir une antenne patch miniature destinées aux applications 3G, 4G et la 5G. Nous allons donner un bref aperçu sur ces trois générations dans la section suivante :

I.12.1 Troisième génération (3G)

La troisième génération de réseaux mobiles (3G), apparue au début des années 2000, a marqué une évolution importante en introduisant des débits de données plus élevés. Elle a permis aux opérateurs de proposer des services multimédias avancés, tels que les appels vidéo, la navigation Internet mobile et une meilleure qualité audio. Grâce à ces améliorations, les réseaux mobiles ont évolué vers des plateformes capables de supporter des appareils multimédias portables comme les smartphones, les ordinateurs, les tablettes et les consoles de

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

jeux. Par ailleurs, la 3G offre un niveau de sécurité renforcé grâce à des mécanismes d'authentification des utilisateurs et de chiffrement des communications [44].

I.12.2 Quatrième génération (4G)

La quatrième génération (4G), introduite à la fin des années 2000, a apporté des améliorations significatives en termes de débit, de capacité et de performance globale du réseau. La technologie dominante de la 4G est le LTE (Long Term Evolution), qui offre des débits théoriques allant jusqu'à 150-300 Mbit/s en descendant [45]. L'objectif principal de la 4G est de fournir des services à haut débit, de haute qualité, et sécurisés pour la voix, les données, le multimédia et les applications IP, tout en optimisant l'utilisation du spectre radio [46].

I.12.3 Cinquième génération (5G)

La cinquième génération (5G), introduite dans les années 2020, constitue l'évolution la plus récente des réseaux de communication sans fil. Elle est actuellement en cours de déploiement à l'échelle mondiale afin de répondre à la demande croissante en connectivité. La 5G offre des performances supérieures, notamment en termes de très haut débit (jusqu'à 20 Gbit/s), de faible latence (< 1 ms) et de fiabilité accrue des communications [47].

Elle fonctionne sur différentes bandes de fréquences, y compris les fréquences inférieures à 6 GHz pour la couverture étendue ainsi que les ondes millimétriques (24-40 GHz) pour les débits ultra-élevés. Toutefois, ces fréquences élevées présentent une portée limitée et une faible capacité de pénétration des obstacles. Ainsi, le déploiement de la 5G nécessite l'installation de stations de base à des distances rapprochées, souvent espacées de quelques centaines de mètres, afin d'assurer une couverture efficace [48].

I.13 Conclusion

Ce chapitre a exposé les principes fondamentaux des antennes imprimées : leur conception, leurs principales caractéristiques électriques (S_{11} , VSWR, bande passante) ainsi que leurs paramètres de rayonnement (gain, directivité). Il a également abordé les techniques d'alimentation et d'adaptation nécessaires pour assurer un bon transfert d'énergie. Les différentes méthodes de miniaturisation ont été analysées, mettant en évidence le compromis entre la réduction de taille et les performances de l'antenne. Enfin, les techniques de sélectivité, notamment les structures à défaut dans le plan de masse (DGS), ont été introduites comme solution efficace pour améliorer les performances et concevoir des antennes multi-bandes

Chapitre I : État de l'art des Antennes imprimées sélectives

adaptées aux systèmes modernes (3G, 4G, 5G). Ces bases théoriques préparent efficacement la conception d'antennes imprimées sélectives optimisé.

Chapitre II

Conception et simulation d'une antenne
patch rectangulaire sélective destinée
aux systèmes de communication sans fil
3G, 4G et 5G

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

II.1 Introduction

Dans le contexte de l'évolution des télécommunications mobiles vers les standards 3G, 4G et 5G, les antennes doivent satisfaire à des exigences de plus en plus contraignantes en termes de compacité, de multi bandes et d'adaptation d'impédance. Les antennes patch rectangulaires miniatures constituent une solution prometteuse grâce à leur simplicité de réalisation et leur intégration facile dans les systèmes portables.

II.2 Objectif

Dans ce travail, nous proposons une antenne patch rectangulaire miniature à haute sélectivité multi-bandes. Pour répondre aux besoins des standards de communication actuels sans nécessiter de filtres externes encombrants, cette antenne intègre une structure DGS (Defected Ground Structure) au niveau de son plan de masse.

L'objectif de cette intégration est double : miniaturiser l'antenne par un effet d'onde lente, et lui conférer un caractère strictement sélectif. En effet, contrairement à une antenne à large bande qui capterait l'ensemble du bruit électromagnétique, notre structure est conçue pour résonner exclusivement sur les trois bandes utiles (3G, 4G et 5G) tout en rejetant fortement les fréquences intermédiaires indésirables. Les performances sont analysées à travers les paramètres de réflexion, mettant en évidence une adaptation parfaite autour de 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz, et une isolation hors-bande (réjection) garantie par la structure DGS.

II.3 Cahier de charge

Dans ce travail nous avons utilisé le cahier de charge ci-dessous :

- Fréquence de résonance $f_r = 1.8$ GHz. Cette fréquence correspond à la bande fondamentale la plus basse de notre cahier des charges (standards 3G / 4G LTE).
- Substrat FR-4 (épaisseur $h=1,6$ mm, permittivité $\epsilon_r = 4.4$).
- La forme de l'antenne patch : rectangulaire.
- Alimentation par ligne micro ruban 50 Ohms.

II.4 Conception logicielle de l'antenne patch rectangulaire de base

II.4.1 Calcul des paramètres de la géométrie rectangulaire

L'antenne proposée est une antenne micro-ruban de type rectangulaire (figure II.1), alimentée par une ligne micro-ruban (ligne simple) de 50Ω , réalisée sur un substrat FR4 de permittivité relative $\epsilon_r = 4,4$ et d'épaisseur $h = 1,6$ mm, et conçue pour fonctionner à la fréquence de 1,8 GHz, dont les paramètres géométriques sont représentés dans **la figure1**.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

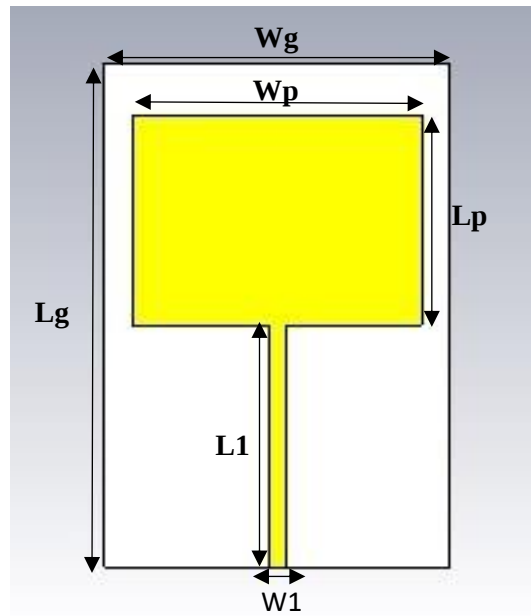


Figure II.2 : Antenne patch rectangulaire initiale
Les paramètres de calculs de cette antenne sont donnés sur **le tableau 1** :

Paramètre d'antenne	Les Equations	Légende
La largeur de patch (Wp)	$Wp = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$	Fr : fréquence de résonance ϵ_r : permittivité du substrat h : l'épaisseur du substrat
Fréquence de résonance (fr)	$fr = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$	
La longueur de patch (Lp) La longueur effective du patch (Leff)	$Lp = L_{eff} - 2\Delta L$ $L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot fr \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}$	
Constant diélectrique (ϵ_{eff})	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{Wp} \right]^{\frac{1}{2}}$	
L'extension	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{Wp}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{Wp}{h} + 0.8 \right)}$	

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

La longueur de Substrat et plan de masse(Lg)	$Lg = L1 + Lp + 6 \times h$	
La largeur de Substrat et plan de masse(Wg)	$Wg = Wp + 6 \times h$	
La longueur de la ligne simple(L1)	$L1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$	

Tableau II.1: Résume les Paramètres de l'antenne patch rectangulaire

Tel que :

ϵ_{eff} : Permittivité effective du substrat.

h : l'épaisseur du substrat.

Fr : fréquence de résonance.

Le tableau 2 montre les valeurs des paramètres d'antenne initiale calculés à partir des équations du tableau 1 :

Paramètres	Dimensions (mm)
Wp	50.71
Lp	39.58
ϵ_{eff}	4.1158
ΔL	0.7419
Lg	94.66
Wg	60.31
L1	45.48
Leff	41.3608

Tableau II.2: Résume les Dimensions de l'antenne initiale

II.4.1.1 Résultats de simulation

a. Coefficient de réflexion S [1,1]

Nous représentons le coefficient de réflexion S11 (Figure II.2). Ce paramètre permet d'évaluer le niveau d'adaptation de l'antenne ainsi que sa bande passante autour de la fréquence de résonance de l'antenne proposée.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

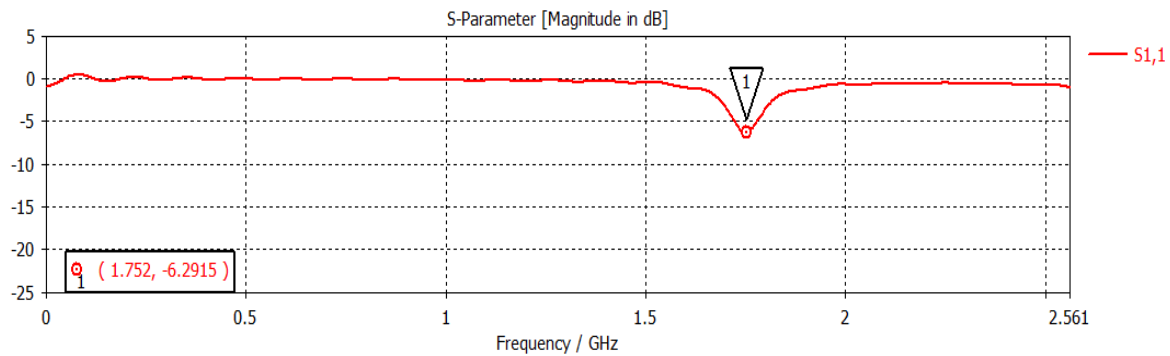


Figure II.4 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne sans adaptation

Nous avons obtenu un coefficient de réflexion de $-6,29$ dB à la fréquence 1,75 GHz, ce qui montre une mauvaise adaptation de l'antenne à la fréquence désirée de 1,8 GHz. Nous allons donc utiliser des techniques d'adaptation afin d'assurer une meilleure résonance de cette antenne à 1,8 GHz.

II.4.2 Adaptation de l'antenne patch rectangulaire à 1.8 GHz

Nous allons introduire des encoches au niveau du patch comme illustré à la figure II. 3, une étude paramétrique sur les paramètres a et b des encoches a été effectuée pour assurer l'adaptation de l'antenne à la fréquence de 1,8 GHz tout en garantissant un coefficient de réflexion S11 inférieur à -10 dB :

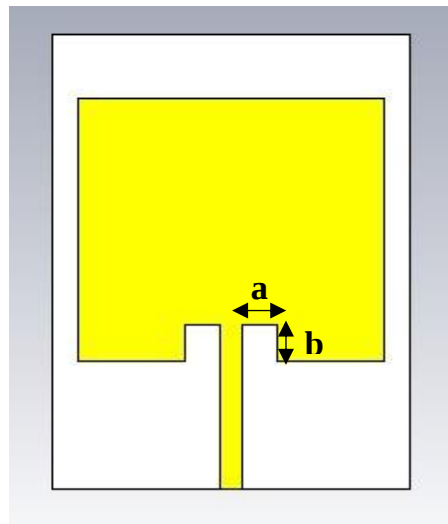


Figure II.6: antenne patch adapté avec encoche

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

II.4.2.1 Résultats de simulation

a. Coefficient de réflexion S [1,1]

Les résultats montrent que Le coefficient de réflexion S_{11} (Figure II. 4) permet d'évaluer l'adaptation de l'antenne et sa bande passante :

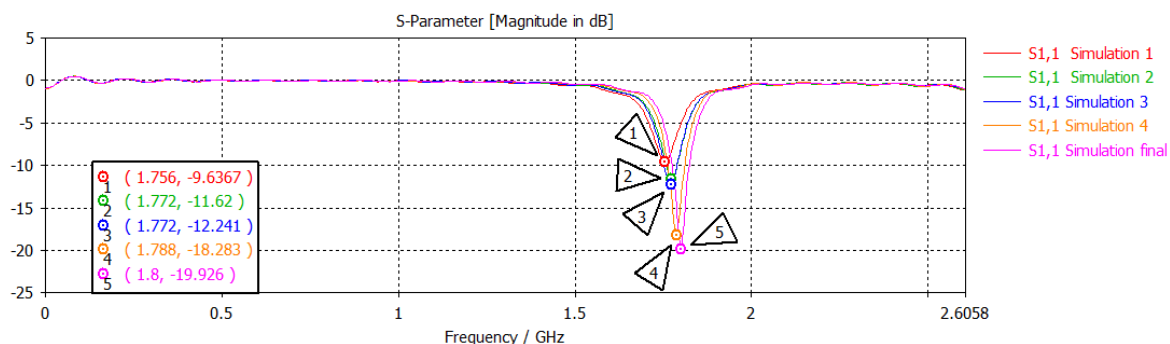


Figure II.9: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne adaptée

Figure II.10 : Diagramme de rayonnement 3D, (a) polaire, (b) 3D de l'antenne patch rectangulaire adaptée

Figure II.11: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne adaptée

Le tableau 3 présente l'étude paramétrique et les résultats de simulations obtenues

	Les dimensions des encoches		Résultats de la simulation	
	a	b	La fréquence (GHz)	S11 (dB)
Simulation 1	4.97	1	1.75	-9.63
Simulation 2	5.47	3	1.77	-11.62
Simulation 3	4.97	3	1.77	-12.24
Simulation 4	5.27	5.5	1.78	-18.28
Simulation finale	4.47	6	1.8	-19.92

Tableau II.3 : Résumé les Dimensions et résultats de simulation

Nous avons obtenu un paramètre S_{11} optimal de $-19,92$ dB à $1,8$ GHz. L'antenne est adaptée aux applications 3G.

b. VSWR

La Figure II.5 présente les résultats de la simulation du VSWR pour l'antenne optimisée. Ce graphe permet de vérifier la résonance de l'antenne à la fréquence de travail cible :

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

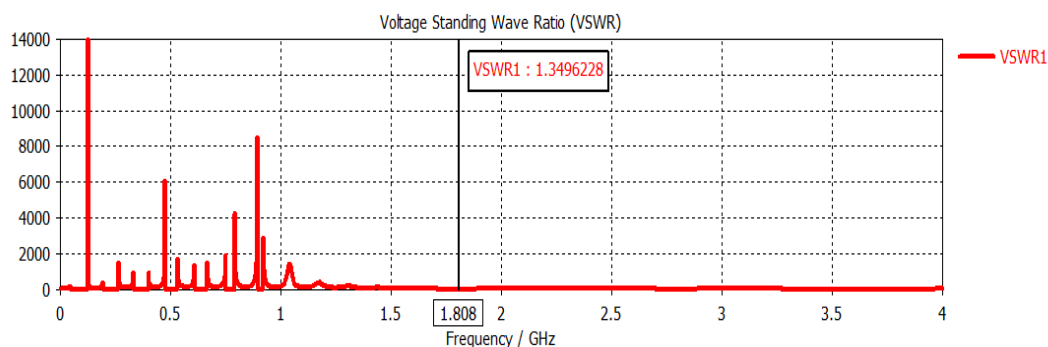


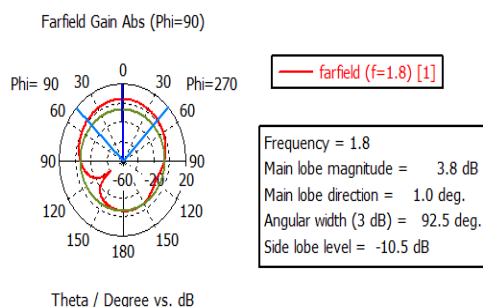
Figure II.12 : Le rapport d'ondes stationnaires (VSWR)

Le VSWR est de 1,34 à la fréquence 1,8 GHz. L'antenne est bien adaptée.

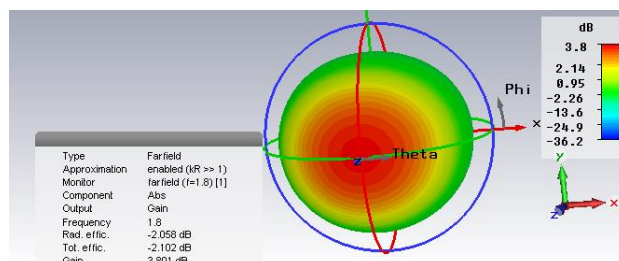
c. Diagramme de rayonnement

Le logiciel CST permet de visualiser les diagrammes de rayonnement tridimensionnels de l'antenne. Cette représentation fournit des informations importantes sur le gain et la directivité de l'antenne. Elle offre également la possibilité d'observer le rayonnement dans un plan polaire, ce qui permet d'estimer l'angle d'ouverture.

Les Figures (II.6) présentent respectivement les diagrammes de rayonnement 3D et polaire de l'antenne adaptée.



(a)



(b)

Figure II.13 : Diagramme de rayonnement 3D, (a) polaire, (b) 3D de l'antenne patch rectangulaire adaptée. Nous avons obtenues un gain de 3.8 dB à la fréquence 1.8GHz.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

d. Distribution de courant

La figure II.7 met en évidence la distribution du courant de surface sur l'ensemble de l'interface de l'antenne patch rectangulaire proposée, ce qui permet d'analyser les zones de forte concentration de courant et leur influence sur le fonctionnement de l'antenne.

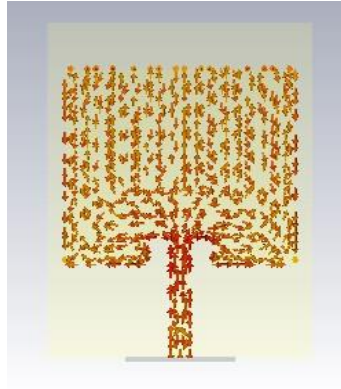


Figure II.16 : Distribution du courant de surface de l'antenne patch rectangulaire adaptée

II.4.3 Antenne patch rectangulaire miniature

La figure II.8 représente un patch rectangulaire dans lequel une fente de type U est introduite au niveau du plan rayonnant pour la miniaturisation de l'antenne. Cette fente constitue une modification géométrique du patch permettant d'agir sur ses caractéristiques électromagnétiques, notamment la fréquence de résonance. En effet, l'introduction de la fente augmente la longueur électrique du patch, ce qui entraîne une diminution de la fréquence de résonance.

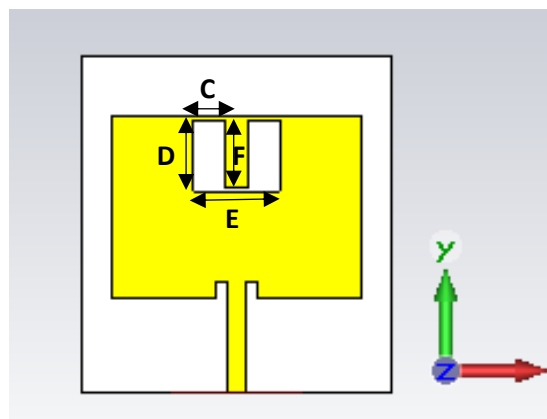


Figure II.19 : Antenne patch adaptée avec une fente U

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

Dans la figure II.9, nous présentons les résultats de simulation du paramètre S_{11} obtenus après l'introduction de la fente U sur le patch, dans le cadre de l'étude de la miniaturisation de l'antenne.

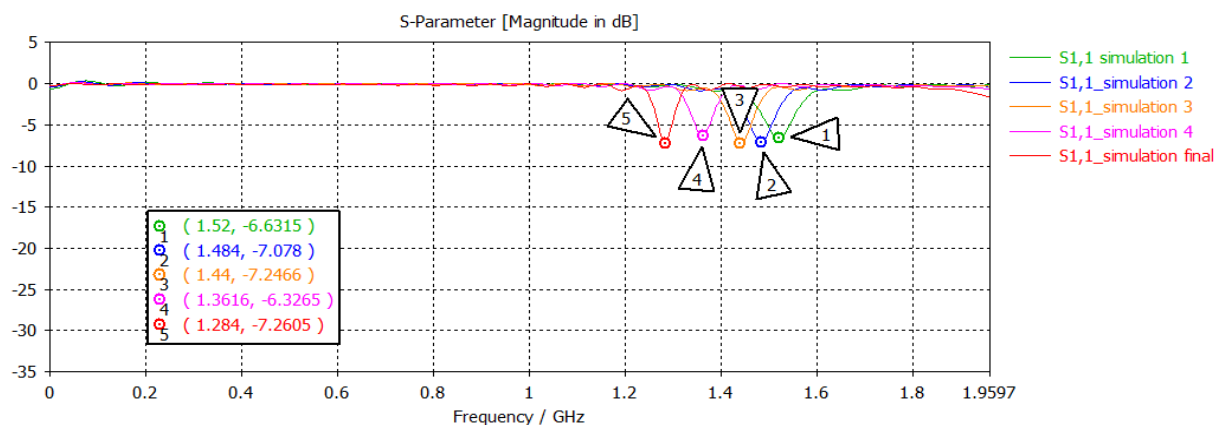


Figure II.22 : Paramètres S_{11} obtenu aux dimensions de la fente

La figure 10 Montre que la fréquence de résonance diminue de 1.8 GHz à 1.28 GHz :

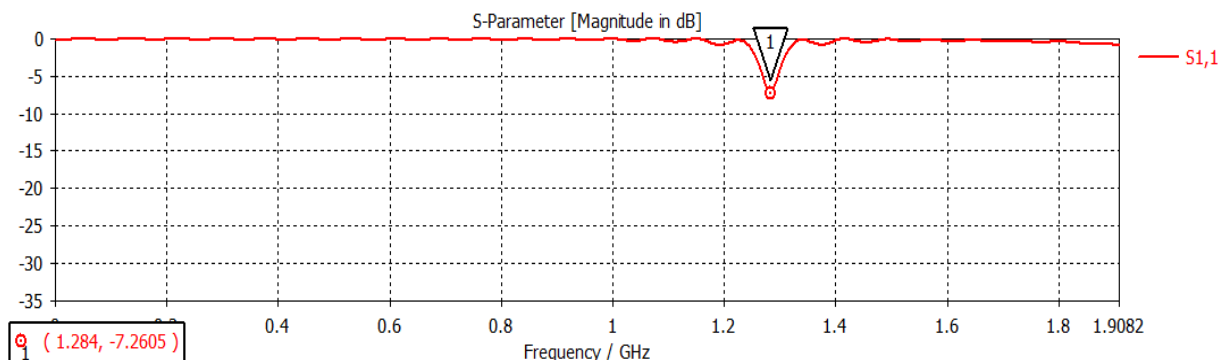


Figure II.23: Paramétré S_{11} pour les dimensions des paramètres géométriques de la fente du patch

Figure II.24: Paramétré S_{11} pour les dimensions des paramètres géométriques de la fente du patch

Nous allons résumer les résultats sur le tableau 4 :

	Les dimensions de fente (mm)				Résultats de la simulation	
	C	D	E	F	La fréquence (GHz)	S11 (dB)
Simulation 1	1	13	-16	11	1.52	-6.63

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

Simulation 2	4	13	-16	12	1.48	-7.07
Simulation 3	5	15	-16	14	1.44	-7.24
Simulation 4	5	15	-16	16	1.36	-6.32
Simulation final	5.3	19	-16	18	1.28	-7.26

Tableau II.4 : les résultats de simulation avec insertion de la fente U

II.4.4 Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire

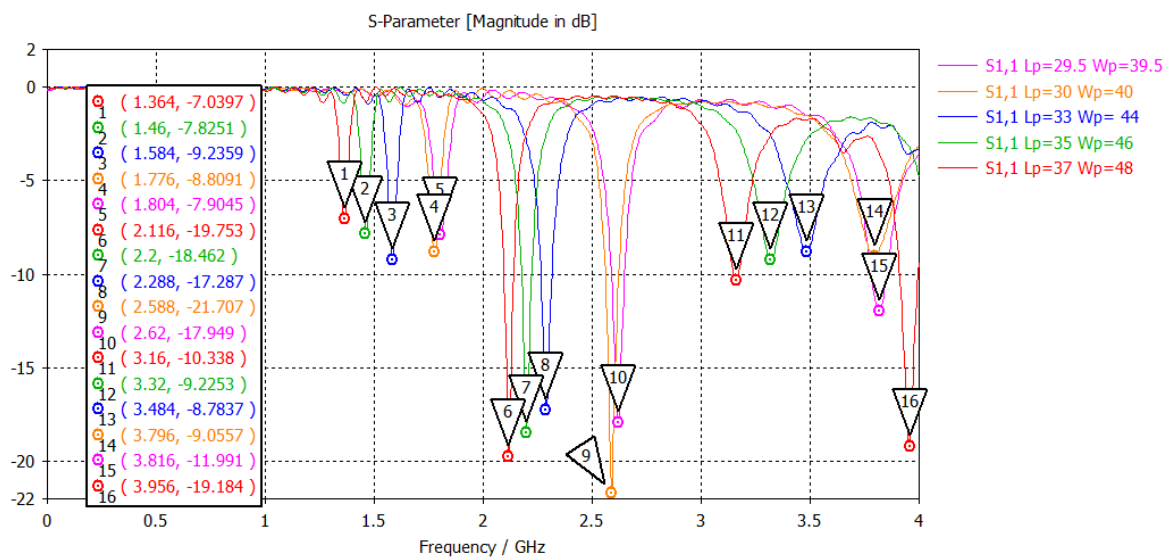


Figure II.26 : Coefficient de réflexion S11 pour les différentes dimensions de W et L du patch

Figure II.27 : Coefficient de réflexion S11 pour les différentes dimensions de W et L du patch

L'insertion de la fente U a permis de décaler la fréquence de résonance vers 1,28 GHz, nous allons miniaturiser les dimensions L_p et W_p (figure II.11) pour compenser l'effet de la fente, recentrer précisément la résonance sur la fréquence cible de 1.8 GHz et assurer à la fois une réduction des dimensions de l'antenne et une adaptation d'impédance optimale. Nous allons présenter les résultats des différents paramètres S11 obtenus pour atteindre une bonne miniaturisation. Le tableau 5 montre les dimensions de l'antenne rectangulaire miniature

Les dimensions (mm)		Résultats de la simulation	
Wp	Lp	La fréquence (GHz)	S11 (dB)

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

Simulation 1	48	37	1.36, 2.11, 3.14, 3.59	-7.03, -19.57, -10.33, -19.38
Simulation 2	46	35	1.46, 2.2, 3.32	-7.82, -18.46, -9.22
Simulation 3	44	33	1.58, 2.28, 3.48	-9.23, -17.28, -8.78
Simulation 4	40	30	1.77, 2.58, 3.79	-8.80, -21.70, -9.05
Simulation final	39.5	29.5	1.80, 2.62, 3.81	-7.90, -17.94, -11.99

Tableau II.5 : Résumé les Dimensions de l'antenne patch rectangulaire miniature

Conformément à la théorie des antennes imprimées, la diminution de la taille du patch entraîne un glissement global des modes de résonance vers les hautes fréquences à 1,8 GHz, 2.62 GHz et 3.81 GHz mais l'adaptation reste insuffisante notamment sur la bande 3G où le S11 est à -7.9 dB. Nous allons donc intégrer les cellules DGS au niveau du plan de masse pour adaptées nos fréquences cibles et assurer une haute sélectivité interbandes en agissant comme un filtre intégré.

II.5 Conception de l'antenne patch miniature avec la DGS (Defected Ground Structure)

II.5.1 Cellule DGS Unitaire

Dans ce travail, nous nous concentrons sur la simulation d'une cellule DGS unitaire (Defected Ground Structure) en forme d'anneau modélisée sur un substrat diélectrique de type FR-4, caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r=4,3$ et une épaisseur $h=1,5\text{mm}$ (figure II.11). Le choix géométrique de notre résonateur en anneau circulaire s'inspire directement des travaux menés sur les Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS - *Frequency Selective Surfaces*)[49]. Dans la littérature, les cellules FSS en anneau sont largement reconnues pour leurs excellentes propriétés de résonance et leur efficacité en tant que filtres coupe-bande[50]S. Notre démarche scientifique a consisté à transposer ce concept bidimensionnel classiquement utilisé en espace libre pour le filtrage spatial des ondes vers une application planaire intégrée. En gravant ce motif d'anneau FSS directement dans le cuivre, il change de fonction et devient une structure DGS (Defected Ground Structure). Cette transposition nous permet d'exploiter la forte résonance intrinsèque de l'anneau pour perturber localement les courants de retour de l'antenne, créant ainsi le comportement multi-bandes et la miniaturisation recherchés.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

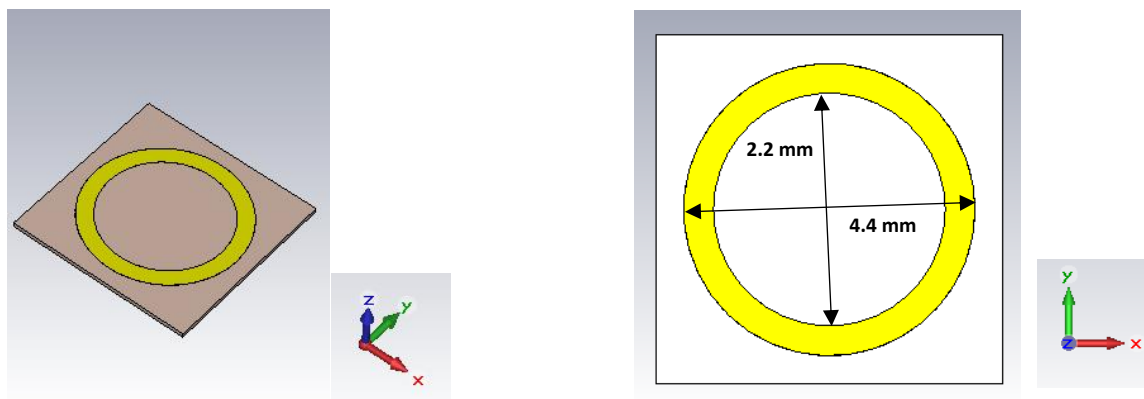


Figure II.29: Cellule DGS proposée

Avant d'intégrer le réseau complet sous l'antenne, il est indispensable de caractériser le comportement électromagnétique de ce motif DGS unitaire afin de valider sa fréquence de résonance propre. La caractérisation de cette cellule DGS unitaire est effectuée à l'aide des paramètres de diffusion S_{11} (coefficient de réflexion) et S_{21} (coefficient de transmission).

a. Coefficient de réflexion et de transmission

La figure II.12 met en évidence le comportement fréquentiel de la cellule DGS à travers ses paramètres S . Les résultats obtenus mettent en évidence un comportement de filtre coupe-bande très net autour de la fréquence cible de 1,8 GHz. En effet, à cette fréquence précise, on observe une atténuation marquée du signal (S_{21} chute à environ -40 dB) couplée à une réflexion quasi totale (S_{11} remonte vers 0 dB). En dehors de cette étroite bande interdite, la transmission demeure significative. Cette transition abrupte atteste des excellentes capacités de réjection de la géométrie proposée. Elle valide ainsi son aptitude à perturber efficacement la distribution des courants de surface lorsqu'elle sera intégrée au plan de masse de l'antenne.

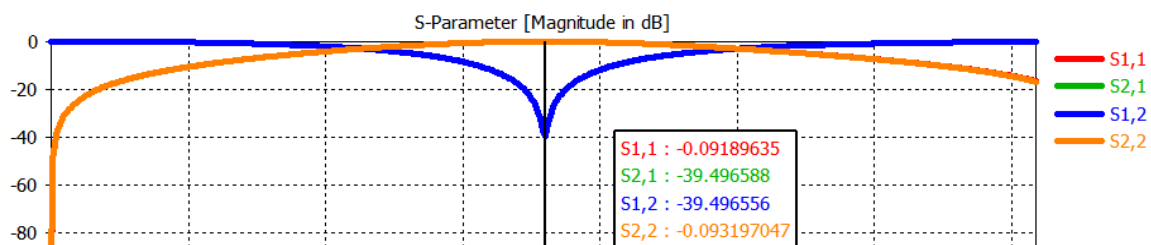


Figure II.30 : Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule DGS

Figure II.31 : Coefficients de réflexion des cellules DGS **Figure II.32 :** Coefficients de réflexion et de transmission de la cellule DGS

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

II.5.2 Insertion des cellules DGS sur le plan de masse de l'antenne patch proposée

La Figure II.14 illustre l'intégration des cellules DGS dans le plan de masse de l'antenne proposée, selon une disposition en diagonale. L'objectif de cette architecture n'est pas de focaliser l'onde, mais bien d'optimiser la perturbation des courants de surface. En effet, cet alignement diagonal intercepte les différentes lignes de courant du patch, ce qui maximise l'allongement du trajet électrique (contribuant ainsi à la miniaturisation) et favorise l'excitation de multiples modes de résonance pour obtenir le comportement multi-bandes recherché.

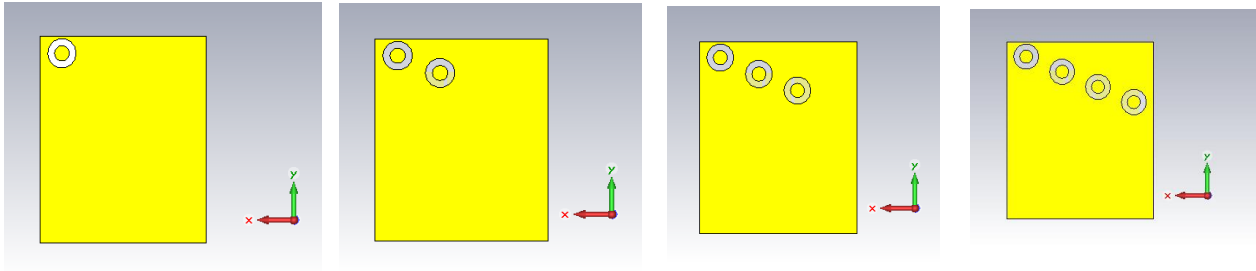


Figure II.33 : Insertion des cellules DGS sur le plan de masse

a. Résultats de simulation

Nous allons présenter dans la figure II.15 le coefficient de réflexion S_{11} pour les différentes cellules insérées :

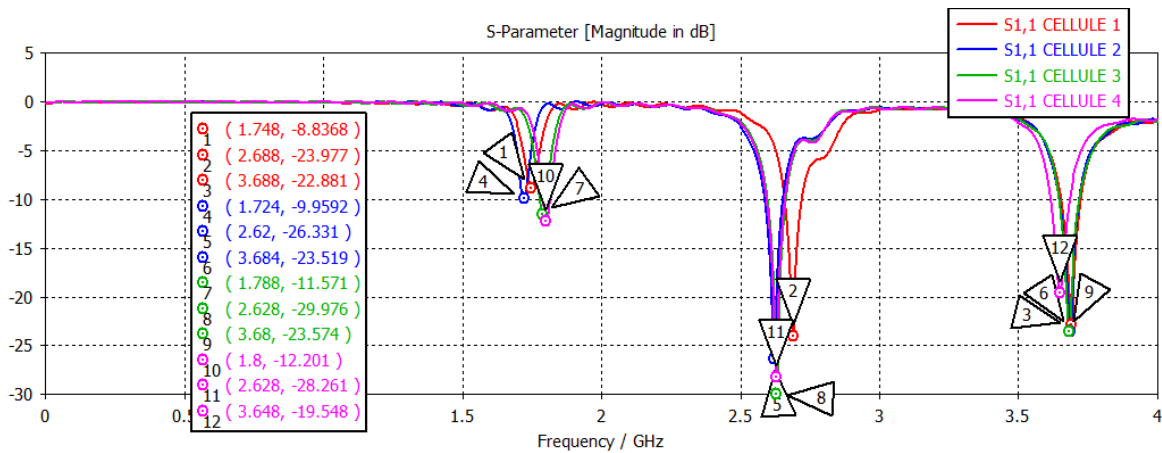


Figure II.34 : Coefficients de réflexion des cellules DGS

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

Les performances globales de l'antenne finale sont illustrées sur la Figure II.16:

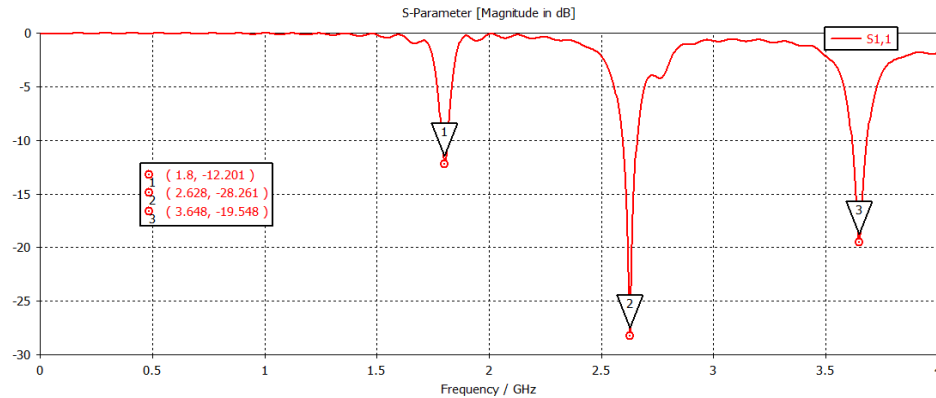


Figure II.36: Coefficients de réflexion S11 de l'antenne patch rectangulaire miniature avec la DGS.

La figure II.16 montre que l'intégration complète des quatre cellules DGS génère trois bandes de résonance profondes, situées à 1,8 GHz, 2,62 GHz et 3,64 GHz. Ces fréquences ciblant précisément les standards 3G, 4G et sub-6 GHz (5G), associées à une forte réjection inter-bandes, valident le caractère sélectif et l'excellente efficacité de l'antenne pour des applications multi-bandes.

II.5.3 Optimisation des résultats

Nous allons insérer une encoche sur le côté inférieur du plan de masse (figure I.17) afin d'ajuster la fréquence de la 5G à 3,5 GHz.

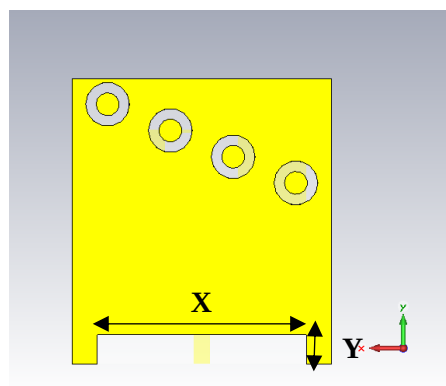


Figure II.38: Structure du plan de masse avec insertion de l'encoche.

a. Coefficient de réflexion S11

La figure II.18 montre les coefficient de réflexion obtenu:

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

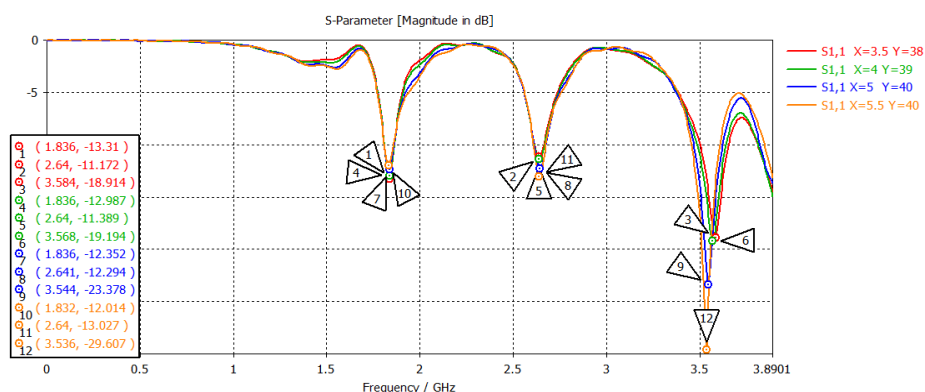


Figure II.40: Coefficient de réflexion S11 et trois fréquences de résonance : 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz.

Le tableau II.6 résume les dimensions de la fente (X et Y) et les résultats de simulation:

	Les dimensions de la fente		Résultats de la simulation					
	X	Y	F1	S11	F2	S11	F3	S11
Simulation 1	3.5	38	1.83	-13.32	2.64	-11.17	3.58	-18.91
Simulation 2	4	39	1.83	-12.98	2.64	-11.38	3.56	-19.19
Simulation 3	5	40	1.83	-12.35	2.64	-12.29	3.54	-23.37
Simulation Final	5.5	40	1.83	-12.01	2.64	-13.02	3.53	-29.60

Tableau II.6 : Les dimensions de la fente (X, Y) et les résultats de simulation

La figure II.19 présente les résultats finaux obtenue:

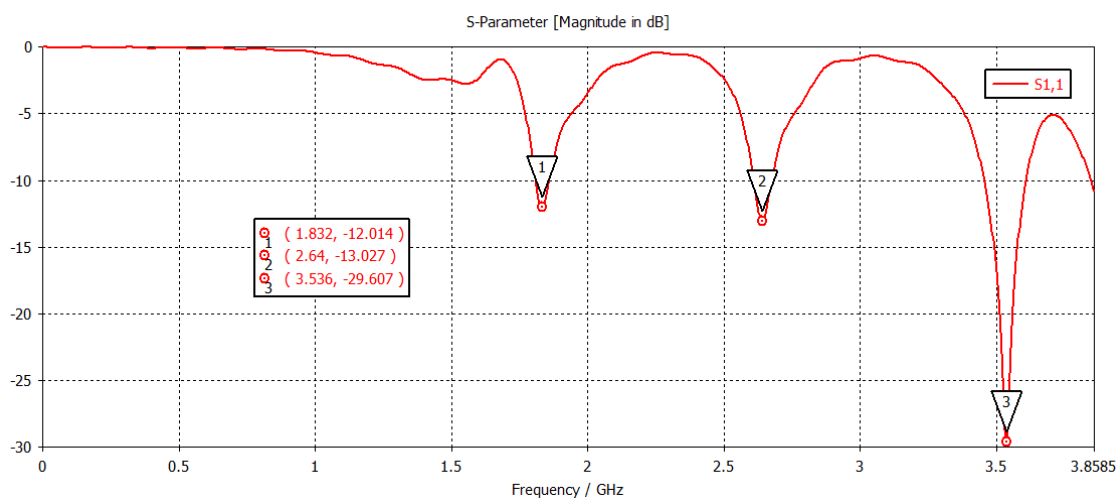


Figure II.41: Coefficient de réflexion S11 pour la 3G, 4G et la 5G.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

La figure II.19 illustre les performances finales de l'antenne après l'ajustement précis de la troisième bande vers la fréquence cible de 3,53 GHz. Il est important de souligner que cette optimisation n'altère pas les modes inférieurs, tout en préservant les résonances à 1,83 GHz et 2,64 GHz. L'adaptation d'impédance s'avère optimale sur l'ensemble des bandes utiles, avec des coefficients de réflexion respectifs de -12 dB, -13 dB et -29,6 dB

b. VSWR

La figure II.20 présente le taux d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne finale. Il est de 1,67068 à 1,8 GHz, de 1,57775 à 2,64 GHz et de 1,08286 à 3,53 GHz. Comme observé, ces valeurs sont inférieures à 2, ce qui traduit une très bonne adaptation de l'antenne.

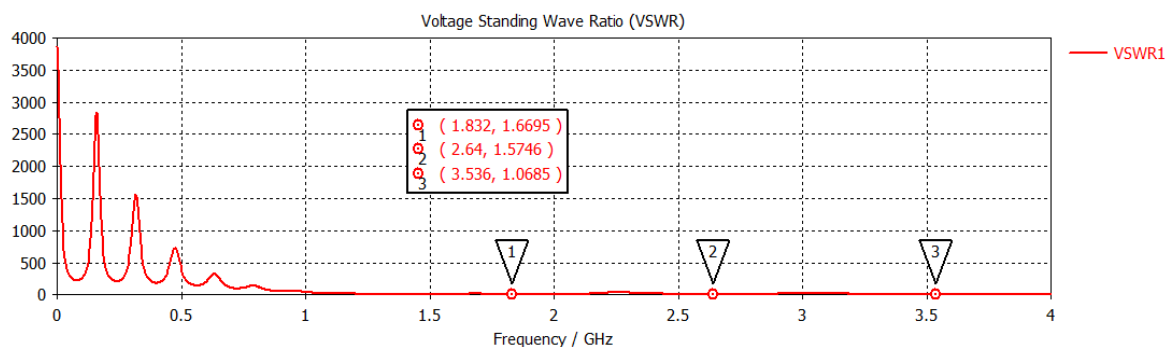
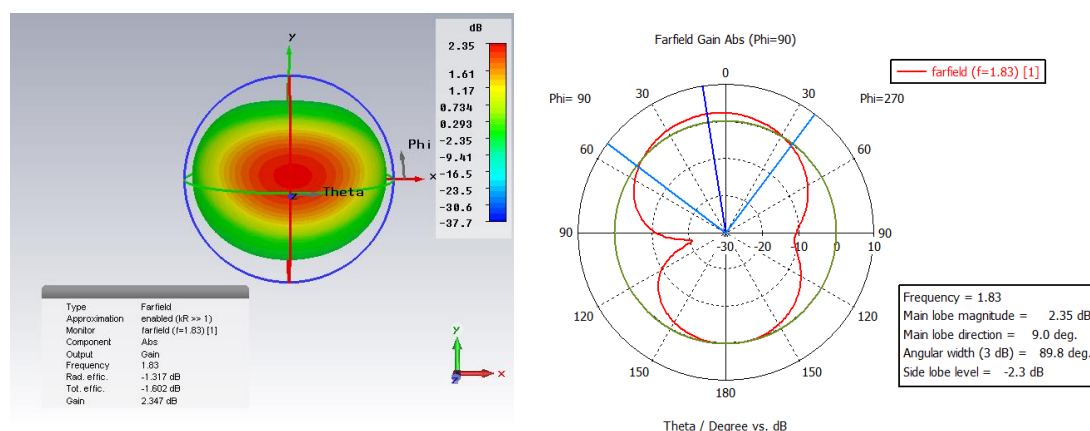


Figure II.42: Taux d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne à 1,8 GHz, 2.6GHz et 3.53 GHz.

c. Le diagramme de rayonnement

Les figures II.21, II.22 et II.23 illustrent les diagrammes de rayonnement polaires en 2D et en 3D de l'antenne finale proposée, aux fréquences de résonance de 1,8 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz, mettant en évidence le gain obtenu pour chacune de ces fréquences :



Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

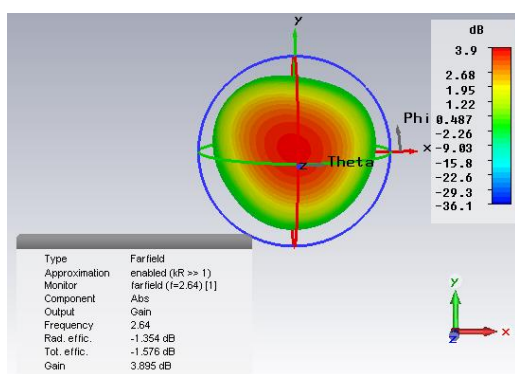
(a)

(b)

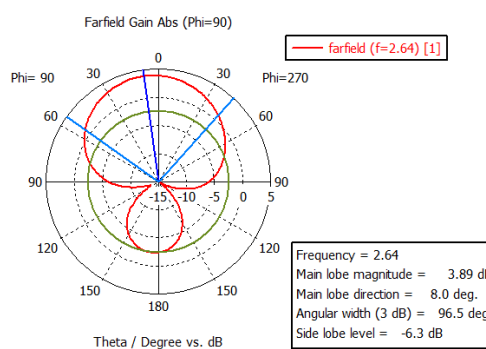
Figure II.43: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 1,83 GHz.

Figure II.44: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 1,83 GHz.

- La figure II.21 présente le diagramme de rayonnement 3D et polaire à la fréquence de 1,83 GHz, où le gain obtenu est de 2,347 dB ce qui témoigne des bonnes performances de rayonnement de l'antenne.



(a)



(b)

Figure II.46: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 2.64 GHz.

Figure II.47: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 2.64 GHz.

- La figure II.22 présente le diagramme de rayonnement 3D et polaire à la fréquence de 2.64 GHz et met en évidence un gain de 3.895 dBi, ce qui témoigne des bonnes performances de rayonnement de l'antenne.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

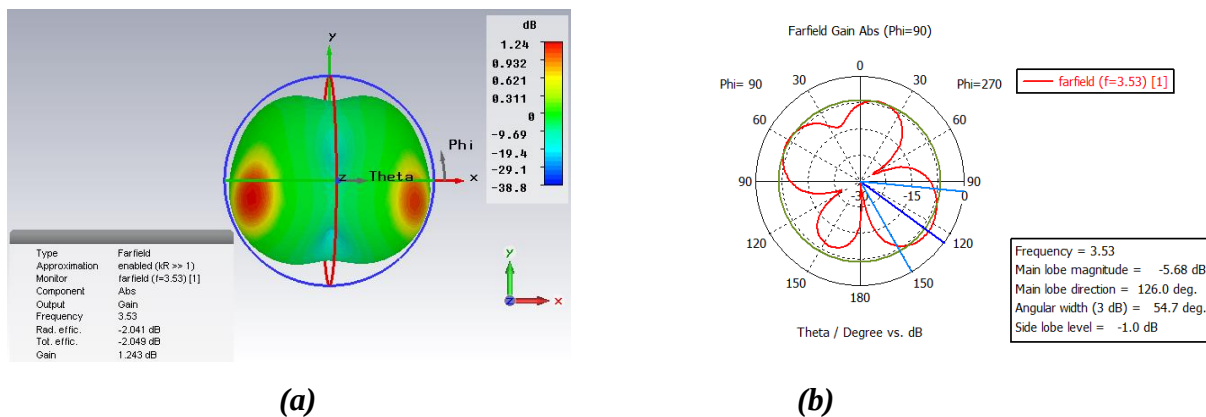


Figure II.48: Diagramme de rayonnement, (a) 3D et (b) polaire, de l'antenne patch miniature à 3.53GHz.

- La figure II.23 montre le diagramme de rayonnement 3D et polaire à 3.53 GHz et met en évidence un gain de 1.24 dB, confirmant un rayonnement positif et des performances satisfaisantes de l'antenne.

d. Distribution de courant

LA figure II.24 présente la distribution du courant de surface de l'antenne aux fréquences de 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz. Dans les trois figures de la distribution du courant, il apparaît que le courant est principalement concentré sur l'ensemble des surfaces du patch rectangulaire. Cette répartition du courant met évidence les zones actives de rayonnement et confirme le bon fonctionnement de l'antenne à chacune des fréquences étudiées

Figure II.50: Distribution du courant de surface à 1,83 GHz, 2.64 GHz et 3.53GHz.

II.6 Prototypes des antennes simulées

II.6.1 Prototype de l'antenne patch rectangulaire initiale

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

Le prototype de l'antenne patch rectangulaire initiale simulée à la fréquence de **1.8 GHz**, est illustré à la figure II.25 :

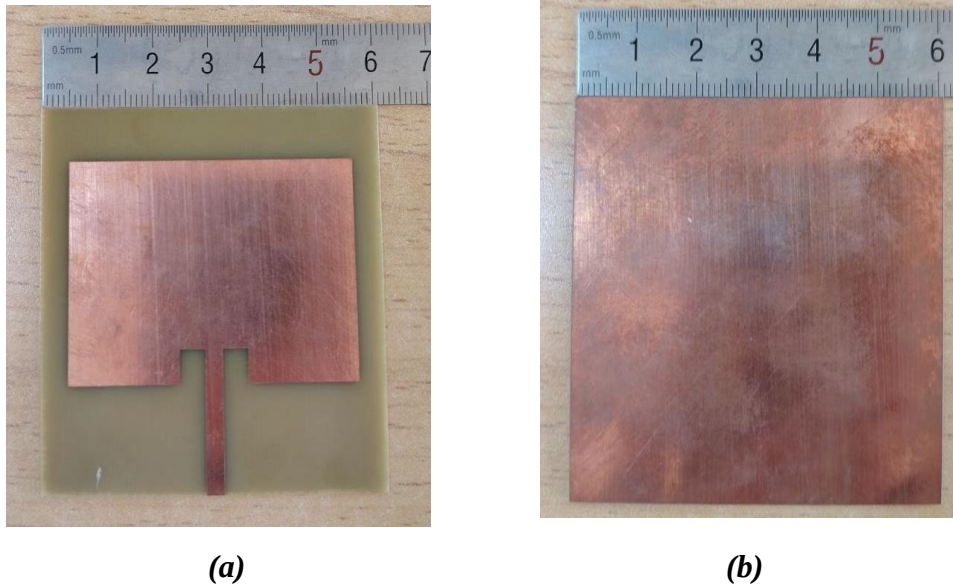
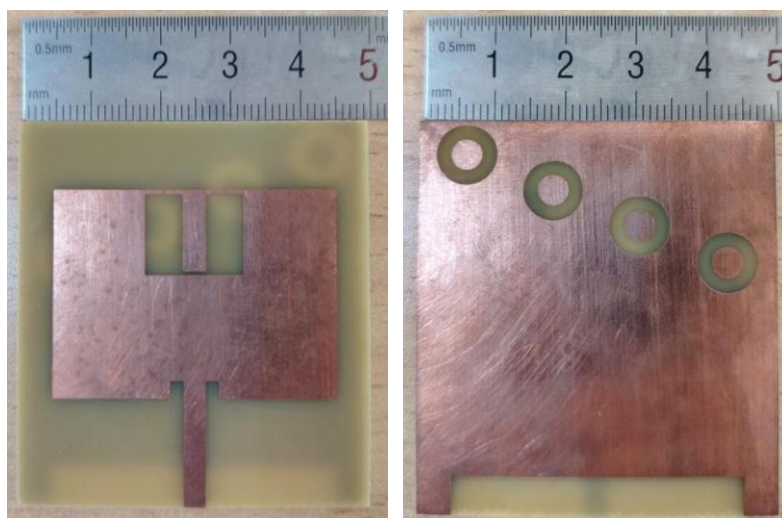


Figure II.53: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale, (a) vue du face, (b) vue d'arrière.

Figure II.54: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale, (a) vue du face, (b) vue d'arrière.

II.6.2 Prototype de l'antenne rectangulaire miniature finale à base de DGS

L'antenne miniature finale proposée, reposant sur l'intégration de cellules DGS a été réalisée. Le prototype est présenté par la figure II.26 :



Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

(a)

(b)

Figure II.56: Prototypé de l'antenne miniature proposée (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

Figure II.58: Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et l'antenne miniature finale : (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

II.6.3 Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale et l'antenne miniature finale avec DGS

Dans la figure II.27, nous allons présenter une comparaison entre les dimensions de l'antenne patch rectangulaire initiale et miniature :

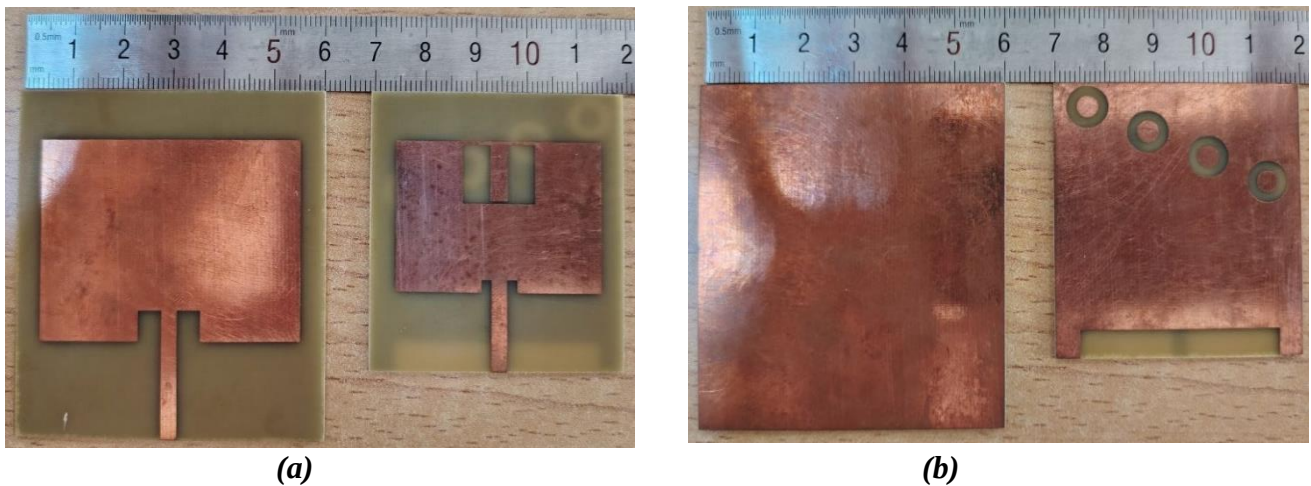


Figure II.59: Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et l'antenne miniature finale : (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

Figure II.60: Comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et l'antenne miniature finale : (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

Le taux de miniaturisation obtenue est de **52.82%** .

II.7 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux la littérature

Références	Fréquence de résonance [GHz]	Dimensions de substrat (W×L) [mm × mm]	Bande passante [MHz]	Gain [dB]
[51]	2.6	34 × 42	900	8.21

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire sélective destinée aux systèmes de communication sans fil 3G, 4G et 5G

[52]	1.8, 3.5 & 5.4	60×50	140, 180 & 200	2.34, 5.2, 1.42
[53]	3.597	65.68×39.4	101.5	2.93
Travail propose	1.8, 2.6 & 3.5	39.5×29.5	50 , 70 & 150	2,35,3.9 & 1.24

Tableau II 6 : comparaison des résultats avec les travaux de la littérature

II.8 Enjeux et défis technologiques

La pertinence de ce sujet réside dans la complexité des exigences technologiques actuelles. En effet, concevoir une antenne multi-bandes miniaturisée ne se résume pas à une simple réduction d'échelle. Le défi scientifique majeur de cette étude a consisté à briser les limites théoriques classiques qui lient la taille d'une antenne à sa fréquence de fonctionnement. Il a fallu aborder et maîtriser des concepts avancés de perturbation des courants de surface via l'implémentation de structures à défaut de masse (DGS). La difficulté a reposé sur le dimensionnement ultraprécis de ces résonateurs pour forcer la création des bandes 1,8 GHz, 2,6 GHz et 3,5 GHz, tout en garantissant un filtrage rigoureux (sélectivité) entre elles. Ce document retrace l'ensemble des étapes analytiques et numériques qui ont permis de résoudre cette équation complexe.

II.9 Conclusion

En conclusion, cette étude valide la conception d'une antenne patch rectangulaire hautement miniaturisée. L'apport majeur de ce travail réside dans l'intégration d'une géométrie DGS au sein du plan de masse, transformant la structure de base en un dispositif multi-bandes opérant à 1,8 GHz, 2,6 GHz et 3,5 GHz. Outre une adaptation d'impédance optimale sur les standards cellulaires 3G, 4G et 5G, cette technique de perturbation du plan de masse confère à l'antenne une haute sélectivité fréquentielle et une forte isolation interbandes. Ces caractéristiques radiatives et dimensionnelles prouvent la viabilité de l'antenne proposée pour une intégration dans les futurs équipements des réseaux mobiles.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié, conçu et optimisé une antenne imprimée sélective destinée aux systèmes de communication sans fil modernes. L'objectif principal était d'améliorer les performances d'une antenne patch rectangulaire tout en assurant un fonctionnement multi-bande adapté aux technologies 3G, 4G et 5G.

Dans un premier temps, l'étude bibliographique a permis de comprendre les principes fondamentaux des antennes imprimées, leurs principales caractéristiques, ainsi que les différentes techniques d'alimentation, d'adaptation et de miniaturisation. L'introduction des surfaces sélectives en fréquence (FSS) a également mis en évidence leur rôle clé dans l'amélioration de la sélectivité et des performances électromagnétiques.

Dans un second temps, une antenne patch rectangulaire a été conçue et simulée, puis progressivement améliorée à travers plusieurs étapes : adaptation par encoches, miniaturisation par insertion d'une fente en U, et intégration des résonateurs DGS au niveau du plan de masse. Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative des performances, notamment en termes de coefficient de réflexion (S_{11}), de VSWR et de comportement multi-bande.

L'antenne finale présente trois bandes de résonance autour de 1,83 GHz, 2,64 GHz et 3,53 GHz, correspondant respectivement aux applications 3G, 4G et 5G. L'intégration de la technique DGS a permis d'améliorer la sélectivité fréquentielle et de réduire les interférences, tout en maintenant une bonne adaptation d'impédance.

Bien que ce travail se soit concentré sur la conception et l'optimisation numérique, la principale perspective à court terme réside dans le prototypage de la structure. La réalisation de mesures expérimentales, notamment à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) et en chambre anéchoïque, constituera l'étape finale pour valider nos résultats. L'étude des écarts entre théorie et pratique permettra d'affiner notre compréhension des phénomènes parasites liés aux procédés de gravure du substrat FR-4 et aux imperfections de mesure.

Références Bibliographiques

- [1] GUERROUI Mohammadi, “Conception d’une nouvelle antenne pour une application GPR Soutenue,” *Thèse*, no. Université 8 Mai 1945 Guelma, p. 110, 2022.
- [2] Gherbi Djihene, “Etude Et Conception D’Une Antenne Reconfigurable En Utilisant Des Composants Actifs,” *Mémoire*, no. Université 8 Mai 1945 Guelma, p. 2013, 2023.
- [3] T. NARIMENE and M. AMIRA, “Conception d’une Nouvelle Antenne Multi-Bandes à Polarisation Circulaire,” *Mémoire*, no. Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [4] O. M. Amin and K. Yassine, “Étude Et Simulation D’Antennes Imprimées À Commande De Phase,” *Mémoire*, 2019.
- [5] B. F. CHIEB, R. KAWTHER, and M. YOUNES, “Conception et Simulation d’Antenne imprimée WiFi,” *Mémoire*, no. Université Belhadj Bouchaib d’Ain-Temouchen, 2024.
- [6] K. M. Ouargla, “Etude et Conception d ’ une Antenne Patch Monopole à faisceau reconfigurable à base de surfaces sélectives en fréquence,” *Mémoire*, pp. 2019–2020, 2020.
- [7] LAHEG Cherifa, “Etude Et Conception D’une Antenne MIMO Reconfigurable,” *Mémoire*, no. Université 8Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [8] H. CHORFI, “CONCEPTION D’UN NOUVEAU SYSTÈME D’ANTENNE RÉSEAU CONFORME EN ONDE MILLIMÉTRIQUE,” *Mémoire*, no. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE, 2022.
- [9] M. B. Khouloud and M. F. Zahra, “Antenne patch pentagone miniature pour des applications en ISM,” *Mémoire*, no. Universite Belhadj Bouchaib d’Ain-Temouchent, 2020.
- [10] K. NADIA and T. N. EL HANA, “Réseaux d’antennes patch pour les applications RFID,” *Mémoire*, 2020.
- [11] W. M. S. Yakoub and M. K. B. Bochra, “Conception d’un réseau d’antennes patch pour les applications satellitaires en bande C,” *Mémoire*, 2021.
- [12] C. Sabrina and Benziane Amel, “Etude et conception d’une antenne reconfigurable pour application wifi,” *Mémoire*, no. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [13] T. Hadj, “Etude et Conception d’une Antenne 5G pour Géolocalisation des

- voitures,” *Mémoire*, 2025.
- [14] M. Abubakar Siddik, M. Mahabub Hossain, M. Dulal Haque, M. Omar Faruque, and C. Author, “Design and Radiation Characterization of Rectangular Microstrip Patch Antenna for Millimeter-wave Communication,” *Am. J. Eng. Res. (AJER)*, vol. 8, no. 1, pp. 273–281, 2019.
- [15] A. S. Ahmed and BELBACHIR Djamel Eddine, “Etude et conception d’antennes intelligentes reconfigurables large bande pour les systèmes de communication Radio Cognitive.,” *M*, no. Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2022.
- [16] Z. Sarra and S. R. Rania, “Influence du substrat sur les performances des antennes imprimées,” *Mémoire*, 2019.
- [17] B. Somia, “Contribution à l’étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication,” *Mémoire*, 2012.
- [18] S. Samia, “Etude et caracterisation d’antennes imprimees pour systeme ultra-large bande,” *Mémoire*, no. Biskra, 2015.
- [19] AISSAOUI Kaouther, “Conception et modélisation d’un réseau d’antennes imprimé multi bandes à l’aide d’un simulateur électromagnétique 3D,” *Mémoire*, no. Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [20] B. Manel and B. N. Elhouda, “Etude et simulation d’antenne patch micro ruban omnidirectionnelle,” *Mémoire*, 2023.
- [21] N. T. P. Van, “THE INVESTIGATION OF NON-CONTACT VITAL SIGNS DETECTION MICROWAVE THEORETICAL MODELS AND SMART SENSING SYSTEMS,” *Mémoire*, no. Massey University, New Zealand, 2019.
- [22] I. Singh, “Micro strip Patch Antenna and its Applications,” *Ijarcce*, vol. 12, 2023.
- [23] K. N. el Houda, “Conception et réalisation d’une antenne bi-bande pour des Applications GPR,” *Mémoire*, 2022.
- [24] M. B. Khouloud, “Conception, optimisation et réalisation de nouvelles antennes micro ruban intelligentes miniatures reconfigurables pour les réseaux mobiles,” *Thèse Dr.*, no. Universite Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib, 2025.
- [25] H. K. R. HANANE, “Conception et réalisation des antennes fractales imprimées à gain élevé pour les applications satellitaires,” *Mémoire*, no. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2024.

- [26] H. Kaissa and B. Amira, "Influence des différents paramètres physique d'une antenne patch rectangulaire sur son rayonnement," *Mémoire*, no. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [27] L. Huitema, "Conception d'antennes miniatures à base de matériaux innovants pour systèmes de communications mobiles," 2011.
- [28] John D. Kraus, "Optical Ring-Coupler Simulation using CST MICROWAVE STUDIO ®," 1988.
- [29] Blanis and consrantine A, "ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN," *Livre*, no. Hoboken, new jersey ,USA, 2016.
- [30] R. Garg, "Microstrip Antenna Design Handbook," 2000.
- [31] M. Abir and Fareh Hanene, "Etudes des performances des antennes miniature large bande," 2017.
- [32] S. Imane and S. N. Ikram, "Miniaturisation d'une Antenne Micro-ruban par l'utilisation des Méta-matériaux," *Mémoire*, 2020.
- [33] B. Ghouti and B. Ikram, "Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE," no. université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2019.
- [34] O. Ahmed. and B. Said., "La miniaturisation d'antenne imprimée par l'ajout de fente," *Mémoire*, 2020.
- [35] GUEBGOUB Nassima, "Contribution à l'étude des techniques de miniaturisation des antennes. Application aux réseaux sans fil et Ultra Large Bande," *Thèse Dr.*, no. Université 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [36] B. Abdellatif, "Conception et Réalisation d'Antennes Miniatures Isotropes dans les Bandes C et ISM," *thèse Dr.*, 2014.
- [37] S. S. El Kadri, "Contribution à l'étude d'antennes miniatures reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs," *Thèse Dr.*, no. universté de grenoble, 2011.
- [38] M. F. Zahra, "Étude et conception des antennes miniatures à base des métamatériaux pour les standards de télécommunications mobiles et de la nouvelle génération 5G," *Thèse Dr.*, 2024.
- [39] M. BERMATI Abdellatif and M. B. Amor, "Effet des irrégularités dans le plan de masse sur les performances d ' une antenne microbande," *Mémoire*, 2017.
- [40] Z. AMIRA, "CONCEPTION D'ANTENNES MICRORUBANS A DEFAULTS DANS LE PLAN DE MASSE (DGS)," *Mémoire*, 2025.
- [41] D. Safa and M. Saida, "Analyse et conception des filtres passe-bande

- microruban pour les applications ULB,” *Mémoire*, 2018.
- [42] M. Elhadi and H. Akram, “Etude et Simulation d’une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande,” *Mémoire*, 2018.
- [43] M.Meriem and B.Siham, “Etude et simulation d’une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz,” *Mémoire*, 2017.
- [44] L. hamina Ismail, “ingénierie d’un réseau mobile 3G 3G+,” *Mémoire*, pp. 306–312, 2024.
- [45] H. Saber, “Etude d ’ une antenne cylindrique : modélisation et simulation simulation,” *Mémoire*, no. Université Mohamed Khider de Biskra.
- [46] M. Meraj, I. Mir, and S. Kumar, “Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G,” *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 2045–2551, 2015, [Online]. Available: www.ijcsit.com
- [47] S. Hossain, “5G Wireless Communication Systems,” *article*, vol. 151, no. 10, pp. 1–6, 2017.
- [48] A. Nihal and D. Khadidja, “Conception et Optimisation d’une antenne patch basée sur la technologie SIW,” *Mémoire*, no. Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2025.
- [49] E. B. Tchikaya, “Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique de Changement d’Echelle (SCT),” *Thèse Dr. Univ. Toulouse*, pp. 1–156, 2010.
- [50] Mme. BELMESSAOUD Djaouda, “ETUDE DE NOUVELLES ANTENNES PLANAIRES EN TENANT COMPTE DES SURFACES SELECTIVES EN FREQUENCE,” *Thèse Dr.*, no. Université Mohamed Boudiaf-M’sila, 2020.
- [51] E. A. Kadir, S. M. Shamsuddin, E. Supriyanto, T. A. Rahman, S. K. A. Rahim, and S. L. Rosa, “Multi bands antenna for wireless communication and mobile system,” *article*, 2014.
- [52] A. S. Elkorany *et al.*, “Implementation of a Miniaturized Planar Tri-Band Microstrip Patch Antenna for Wireless Sensors in Mobile Applications,” 2022, doi: 10.3390/s22020667.
- [53] Y. Belhadef, F. Z. Moussa, and S. Ferouani, “Design of a Miniature Dual-Band Patch Antenna Based on Meta-Materials for 5G and Wi-Fi Applications †,” 2022.