

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : ZAIDI AMIRA

Sujet

**CONCEPTION D'ANTENNES MICRORUBANS A DEFAUTS
DANS LE PLAN DE MASSE (DGS)**

Soutenu publiquement, le 23/06/2025, devant le jury composé de :

Mr DJEMAI. A
Mme BELGACEM. N
Mme HASSAINE. N

MCB
MCB
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à mon modèle **Mme. HASSAINE Nawel** Maitre de conférences Classe B. C'est grâce à son soutien et à son expertise dans le domaine des antennes, que j'ai pu préparer ce mémoire qui a pour titre : **Conception d'antennes microrubans à défauts dans le plan de masse(DGS).**

Je voudrais également exprimer mes remerciements et ma gratitude à **Mr DJEMAI Abderezzak**, Maitre de Conférences Classe A à l'Université de Tlemcen pour avoir accepté de présider le comité de discussion de mon mémoire de fin d'études.

Je remercie également **Mme BELGACEM Nassima**, Maitre de conférences Classe B à l'Université de Tlemcen, pour avoir consacré du temps et de l'énergie à évaluer et examiner notre travail de manière approfondie et impartiale.

Je suis heureuse d'exprimer mes plus chaleureux remerciements et ma gratitude à ma famille bien-aimée pour leur soutien dans ce chemin couronné de succès.

DÉDICACES

En ce moment chargé d'émotions, débordant de fierté et de gratitude, j'écris ces mots alors que je porte l'étoile de la réussite. Mon cœur est rempli d'un mélange de joie et de nostalgie, en repensant à chaque instant de fatigue, à chaque larme silencieuse, à chaque prière sincère qui m'a accompagnée tout au long de ce chemin.

Je dédie d'abord mon diplôme à celle dont les prières m'ont enveloppée chaque nuit : à ma chère maman, ce refuge tendre dans mes moments de faiblesse, ce pilier silencieux dans mes instants de doute. Toi qui as veillé, donné, enduré... cette réussite est le fruit de ton amour et de ta patience.

À mon cher père, qui a toujours été ma source de force, et qui m'a appris que rien ne s'obtient sans volonté. Tu as été ce guide discret, ce regard motivant, cet exemple dont je suis fière pour toujours.

À mon époux bien-aimé, qui a supporté mes hauts et mes bas, qui m'a accompagnée à chaque étape de ce parcours exigeant, et qui m'a encouragée quand je doutais de moi-même. Tu as été un partenaire dans cet accomplissement à part entière. Aujourd'hui, tu partages ma joie, comme tu as partagé mes efforts.

À mon frère, toujours présent dans l'ombre, soutenant, encourageant, et sacrifiant sans jamais le dire. Merci pour chaque mot d'encouragement, pour chaque fois où tu as porté ton propre fardeau en silence afin de ne pas m'encombrer.

À ma sœur tendre et précieuse, si proche de mon cœur, qui a su éclairer mes jours sombres par une parole douce, embellir mes journées par son sourire. Tu as été le baume de mes blessures, la lumière de mes instants perdus.

Ce diplôme n'est pas seulement le mien. Il est à vous tous. Vous qui étiez là, en coulisses, bâtissant ce succès dans le silence et la générosité. Je vous offre tout mon amour, ma reconnaissance la plus sincère, chaque battement de fierté et chaque larme de joie.

Du fond du cœur... merci. Je vous aime pour toujours ♥.

RÉSUMÉ

Au cours des dernières décennies, le domaine des télécommunications a connu une croissance exponentielle, entraînant une demande accrue pour des dispositifs compacts et performants. Les antennes microrubans, en raison de leur faible profil, de leur légèreté et de leur facilité d'intégration, sont devenues des composants essentiels dans les systèmes modernes de communication sans fil. Cependant, leurs limites en termes de gain et de bande passante ont incité les chercheurs à développer des techniques qui améliorent leurs performances.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à une technique innovante qui repose sur l'intégration de structures à défauts dans le plan de masse (Defected Ground Structure DGS). Ces structures permettent de manipuler les caractéristiques électromagnétiques des antennes, offrant ainsi des solutions pour la réduction de taille, l'élargissement de la bande passante et le fonctionnement multibande. L'utilisation de logiciels de simulation avancés, comme le CST Microwave Studio, nous a facilité la conception de plusieurs antennes microrubans dédiées à servir divers domaines et standards de télécommunications, par exemple la technologie Wi-Fi, WLAN et PCS. Leur analyse nous a permis d'évaluer les performances de chaque antenne en termes de résonance, de gain et de bande passante. Les résultats obtenus offrent des perspectives prometteuses pour le développement d'antennes compactes et efficaces, répondant aux exigences des applications actuelles et futures.

Mots-clés : Antennes microrubans, structure DGS, miniaturisation, fonctionnement multibande, bande passante, gain, CST Microwave Studio.

ABSTRACT

Over the past few decades, the field of telecommunications has experienced exponential growth, leading to an increased demand for compact and high-performance devices. Microstrip patch antennas, due to their low profile, light weight, and ease of integration, have become essential components in modern wireless communication systems. However, their limitations in terms of gain and bandwidth have prompted researchers to develop techniques to enhance their performances.

In this work, we focus on an innovative technique based on the integration of Defected Ground Structures (DGS) into the ground plane. These structures enable the manipulation of the electromagnetic properties of antennas, offering solutions for size reduction, bandwidth enhancement, and multiband operation. The use of advanced simulation software, such as CST Microwave Studio, has facilitated the design of several microstrip antennas dedicated to various domains and telecommunications standards, such as Wi-Fi, WLAN, and PCS technologies. Through analysis, we evaluated the performance of each antenna in terms of resonance, gain, and bandwidth. The results obtained offer promising prospects for the development of compact and efficient antennas that meet the demands of current and future applications.

Keywords: Microstrip antennas, DGS structure, miniaturization, multiband operation, bandwidth, gain, CST Microwave Studio

ملخص

شهد مجال الاتصالات خلال العقود الأخيرة نمواً متسارعاً، مما أدى إلى زيادة الطلب على أجهزة مدمجة وعالية الأداء. وقد أصبحت الهوائيات المطبوعة (الميكروشرطية)، بفضل حجمها الصغير، وخفة وزنها، وسهولة دمجها، من المكونات الأساسية في أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة. إلا أن محدوديتها من حيث الكسب وعرض النطاق الترددي دفعت الباحثين إلى تطوير تقنيات تهدف إلى تحسين أدائها.

في إطار هذا العمل، نركز على تقنية مبتكرة تعتمد على دمج هياكل معيبة في مستوى التأريض (Defected Ground Structure - DGS). تتيح هذه الهياكل إمكانية التحكم في الخصائص الكهرومغناطيسية للهوائيات، مما يوفر حلاً لتقليل الحجم، وتوسيع عرض النطاق الترددي، وتحقيق التشغيل متعدد النطاقات. وقد ساعدنا استخدام برامج المحاكاة المتقدمة، مثل CST Microwave Studio، على تصميم عدة هوائيات ميكروشرطية مخصصة لخدمة مجالات ومعايير اتصالات مختلفة، مثل تقنيات Wi-Fi، وWLAN، وPCS. وقد مكنتنا عملية التحليل من تقييم أداء كل هوائي من حيث التردد الرنيني، والكسب، وعرض النطاق الترددي. وتشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى آفاق واعدة لتطوير هوائيات مدمجة وفعالة تلبي متطلبات التطبيقات الحالية والمستقبلية.

الكلمات المفتاحية: الهوائيات الميكروشرطية، الهيكل المعيب في مستوى التأريض (DGS)، تصغير الحجم، التشغيل متعدد النطاقات، عرض النطاق الترددي، الكسب، CST Microwave Studio

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	iv
Abstract	v
ملخص	vi
Table des Matières	vii
Liste des Figures	x
Liste des Tableaux	xiii
Listes des abréviations	xiii
Introduction générale	1
CHAPITRE I	3
La technologie des antennes microrubans	3
I.1 Introduction	4
I.2 Historique	4
I.3 Structure de base d'une antenne microruban et différentes formes	4
I.3.1 Plan de masse (Ground plane)	5
I.3.2 Substrat diélectrique	5
I.3.3 Élément rayonnant (Patch)	5
I.4 Fonctionnement des antennes microrubans	6
I.5 Différence entre la ligne microruban et l'antenne microruban	7
I.6 Processus de fabrication des antennes microrubans	8
I.6.1 Choix du substrat diélectrique	8
I.6.2 Conception du modèle de l'antenne	8
I.6.3 Impression de la structure conductrice	8
I.6.4 Perçage et découpe	8
I.6.5 Électrode et connexion à l'alimentation	9
I.6.6 Tests et validation	9
I.6.7 Montage final	9
I.7 Quelques techniques d'alimentation les plus usuelles	9

I.7.1 Alimentation par contact	9
I.7.2 Alimentation sans contact	11
I.7 Techniques d'adaptation d'impédance	12
I.8 Caractéristiques de rayonnement	13
I.8.1 coefficient de réflexion	13
I.8.2 Gain.....	14
I.8.3 Directivité.....	14
I.8.6 Rendement.....	14
I.8.7 Diagramme de rayonnement	15
I.9 Avantages et inconvénients.....	15
I.9.1 Les Avantages	15
I.9.2 Les Inconvénients	16
I.10 Domaines d'application	16
I.11 conclusion	17
Chapitre II.....	18
Antennes microrubans à défauts dans le plan de masse (DGS)	18
II.1 Introduction.....	19
II.2 Concept d'une structure à défaut dans le plan de masse (Defected ground structure DGS).....	19
II.2.1 Evolution du concept de DGS (Defected Ground Structure).....	20
II.3 Définition et Quelques géométries de structures DGS.....	21
II.4 Le DGS dans le contrôle et l'amélioration des propriétés de rayonnement des antennes microrubans.....	23
II.4.1 Application du DGS pour un fonctionnement multibande	24
II.4.2 Application du DGS pour un fonctionnement large bande.....	26
II.4.3 Application du DGS dans la miniaturisation des antennes microrubans.....	29
II.5 conclusion	33
Chapitre III.....	34
Simulation de plusieurs antennes microrubans à structures DGS.....	34
III .1 Introduction	35
III.2 Présentation du logiciel CST	35
III .3 Conception et simulation d'antennes microrubans à structure DGS	37
III.3.1 Antenne microruban miniature avec structure DGS	37

III .3.1.a Structure initiale.....	37
III.3.2 Conception d'un patch rectangulaire miniature et performante à structure DGS en forme de I	45
III .3 .2.b Miniaturisation de l'antenne par l'application d'une structure DGS	50
III .3 .2.c Elargissement de la bande passante de l'antenne initiale par l'application d'une structure DGS	56
III.3.3 Conception d'un patch circulaire à structure DGS en forme d'anneaux.....	58
III.4 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	68

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 Structure d'une antenne microruban5
- Figure I.2 Quelques formes utilisées pour les antennes6
- Figure I.3 Fonctionnement d'une antenne microruban6
- Figure I.4 Alimentation par ligne microruban10
- Figure I.5 Alimentation par une sonde coaxiale10
- Figure I.6 Alimentation par couplage par d'ouverture11
- Figure I.7 Alimentation couplée par proximité12
- Figure I.8 Techniques d'adaptation d'impédances13
- Figure I.9 Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne15
- Figure II.1 Bande d'arrêt d'une structure EBG20
- Figure II.2 Motifs périodiques bidimensionnels/unidimensionnels21
- Figure II.3 Différentes géométries DGS.....23
- Figure II.4 Antenne avec DGS à fentes triangulaires25
- Figure II.5 Antenne avec DGS à fentes carrées25
- Figure II.6 S11 pour DGS triangulaires26
- Figure II.7 S11 pour DGS carrées26
- Figure II.8 Géométrie avant DGS27
- Figure II.9 Géométrie avec DGS rectangulaire27
- Figure II.10 Géométrie avec 3 DGS polygonaux27
- Figure II.11 S11 antenne initiale28
- Figure II.12 S11 avec DGS rectangulaire28
- Figure II.13 S11 avec 3 DGS polygonaux29
- Figure II.14 Antenne proposée avec DGS30
- Figure II.15 S11 sous CST et ADS pour l'antenne sans DGS31
- Figure II.16 S11 avec DGS sous CST32
- Figure II.17 Variation du gain avec DGS32
- Figure III.1 Interface du logiciel CST36
- Figure III.2 Vue de dessus antenne à 5.7 GHz37
- Figure III.3 S11 de l'antenne patch à 5.7 GHz38
- Figure III.4 S11 simulée39

• Figure III.5 Antenne avec une cellule DGS	39
• Figure III.6 S11 pour une cellule DGS	40
• Figure III.7 S11 d'après [32] avec une cellule DGS	41
• Figure III.8 Antenne avec deux cellules DGS	41
• Figure III.9 Simulation CST deux cellules DGS	42
• Figure III.10 S11 deux cellules DGS selon [32]	42
• Figure III.11 Diagramme rayonnement deux cellules DGS	43
• Figure III.12 Diagramme rayonnement antenne initiale	43
• Figure III.13 Diagrammes rayonnement avec/sans DGS	44
• Figure III.14 Géométrie antenne initiale	46
• Figure III.15 Calculateurs dimensions patch et lignes	48
• Figure III.16 S11 antenne initiale	49
• Figure III.17 Diagramme rayonnement antenne initiale	50
• Figure III.18 Géométrie DGS appliquée à l'antenne	50
• Figure III.19 S11 antenne avec DGS	51
• Figure III.20 Étude paramétrique longueur L_d	51
• Figure III.21 S11 après variation géométrique	52
• Figure III.22 Étude paramétrique distance f	52
• Figure III.23 S11 pour $f = 15$ mm	53
• Figure III.24 S11 pour $f = 19$ mm	53
• Figure III.25 Antenne miniaturisée	53
• Figure III.26 S11 après miniaturisation	54
• Figure III.27 Rayonnement gain antenne miniaturisée	54
• Figure III.28 Géométrie antenne miniaturisée	55
• Figure III.29 S11 après miniaturisation	55
• Figure III.30 Rayonnement antenne miniature $f=19$ mm	56
• Figure III.31 Géométrie DGS en forme de I	56
• Figure III.32 S11 pour structure DGS modifiée	57
• Figure III.33 Diagramme de rayonnement à bande élargie	57
• Figure III.34 Géométrie antenne avec/sans encoches	58
• Figure III.35 S11 structure sans encoches	59
• Figure III.36 S11 avec encoches + paramètre y_e	60
• Figure III.37 Rayonnement antenne avec encoches	60

- Figure III.38 Plan de masse avec DGS61
- Figure III.39 Études paramétriques S et gap yy61
- Figure III.40 S11 avec $S = 18.5$ mm et $yy = 17$ mm62
- Figure III.41 Rayonnement 3D aux fréquences multiples63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Fonctionnement d'une antenne microruban	7
Tableau II.1 paramètres de l'antenne avec et sans DGS [27].	29
Tableau III.2 Les dimensions de la cellule DGS	40
Tableau III.3 Les expressions analytiques pour calculer les dimensions du patch rectangulaire	46
Tableau III.4 Les paramètres géométriques de l'antenne initiale	49
Tableau III.5 Les paramètres géométriques des fentes insérées	50

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DGS	Defected Ground Structure
CST	Computer Simulation Technology
ADS	Advanced Design System
HFSS	High Frequency Structure Simulator
EBG	Electromagnetic Band Gap
PBG	Photonic Band Gap
BIP	Bande Interdite Photonique
BIE	Bande Interdite Électromagnétique
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
DBS	Direct Broadcast Satellite
GPS	Global Positioning System
FIT	Finite Integration Technique
EDA	Electronic Design Automation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les années 1970, les antennes microrubans ont connu un essor croissant, bien que leur adoption initiale ait été principalement limitée aux applications militaires. Ce n'est qu'à partir des années 1990 qu'elles ont progressivement trouvé leur place dans le secteur industriel. Cet engouement s'explique par les nombreux avantages qu'offrent ces antennes, notamment une structure mécanique robuste, un design compact, une légèreté appréciable, ainsi qu'une fabrication et une intégration aisées sur des surfaces planes ou courbes.

Néanmoins, les antennes microrubans présentent certaines limitations qui restreignent leurs performances, en particulier une bande passante étroite, un gain relativement faible et une taille souvent équivalente à une demi-longueur d'onde. Pour pallier ces inconvénients, plusieurs techniques ont été développées afin d'optimiser leurs caractéristiques de rayonnement et d'élargir leur champ d'application.

Devenues incontournables dans les systèmes de radiocommunication, les antennes microrubans doivent aujourd'hui répondre à des exigences de compacité et de performance pour s'intégrer dans des dispositifs toujours plus réduits. Afin de miniaturiser ces antennes tout en améliorant leur gain et leur bande passante, plusieurs techniques ont été explorées. Parmi celles-ci, l'intégration de structures à défauts dans le plan de masse (*Defected Ground Structure* DGS) s'est révélée particulièrement efficace. Ce travail s'inscrit dans cette démarche, en proposant la conception d'antennes imprimées compactes et performantes à structure DGS, à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio.

Le manuscrit est divisé en trois chapitres.

Le chapitre I présente un aperçu détaillé des aspects fondamentaux des antennes microrubans. Il commence par un historique qui retrace leur origine et leur évolution depuis leur conception. La structure de base des antennes microrubans et les différentes formes qu'elles peuvent adopter sont ensuite expliquées. Le fonctionnement de ces antennes est abordé, en précisant la distinction entre la ligne microruban et l'antenne microruban. Le processus de fabrication est également décrit, soulignant les étapes clés pour fabriquer ces antennes. Par la suite, quelques techniques d'alimentation les plus courantes sont détaillées,

ainsi que les méthodes utilisées pour l'adaptation d'impédance afin d'assurer des performances optimales.

Les caractéristiques de rayonnement des antennes microrubans sont également abordées, incluant le coefficient de réflexion, l'impédance d'entrée, le gain, la directivité, le rendement et le diagramme de rayonnement. Enfin, les avantages et inconvénients de ce type d'antenne sont discutés, ainsi que leurs principaux domaines d'application.

Le chapitre II est consacré au concept des structures à défauts dans le plan de masse (DGS) et à leur évolution au fil du temps. Il examine les différentes formes de DGS utilisées, telles que l'anneau, la ligne serpentée, le carré, le triangle, ainsi que les configurations en H et en U. Le chapitre met en évidence les diverses applications de ces structures dans l'amélioration des performances des antennes, notamment en termes de fonctionnement multibande et à large bande. Enfin, l'utilisation des structures DGS dans la miniaturisation des antennes microrubans est abordée, en montrant comment elles permettent de réduire la taille des antennes tout en conservant des performances électromagnétiques satisfaisantes.

Le chapitre III commence par une présentation du logiciel CST, outil utilisé pour la simulation des antennes microrubans. Ce chapitre explore ensuite trois structures d'antennes microrubans à structure DGS. La première étant tirée d'une publication récente, elle servira à valider notre utilisation du logiciel CST pour la conception et la simulation de ces antennes. Par la suite, deux autres structures d'antennes microrubans, de forme rectangulaire et circulaire, basée chacune sur un plan de masse DGS, seront conçues et simulées sous CST, mettant en exergue l'effet d'une telle géométrie sur les performances de ces antennes.

CHAPITRE I

LA TECHNOLOGIE DES ANTENNES MICRORUBANS

I.1 Introduction

Les antennes microrubans, également connues sous le nom d'antennes patch, sont des composants essentiels dans le domaine des communications sans fil modernes. Elles sont largement utilisées dans des applications telles que les télécommunications mobiles, les systèmes GPS, les radars et les dispositifs IoT, en raison de leur compacité, de leur légèreté et de leur facilité d'intégration avec des circuits imprimés. Le fonctionnement d'une antenne microruban repose sur la propagation d'ondes électromagnétiques le long du patch rayonnant. Contrairement à une ligne microruban, qui est une ligne de transmission utilisée pour guider les signaux radiofréquences RF, l'antenne microruban est conçue pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Ainsi, bien que les deux partagent une structure similaire, leur fonction diffère : la ligne microruban sert à la transmission du signal, tandis que l'antenne microruban est utilisée pour le rayonnement [1,2].

L'objectif de ce chapitre est de fournir une description générale sur les antennes imprimées et leur historique, ainsi que leurs différentes formes géométriques, leur fonctionnement et leurs caractéristiques de rayonnement. Diverses techniques d'alimentation et les techniques d'adaptation d'impédance de ces antennes seront également dévoilées. Nous parlerons aussi de leurs avantages et inconvénients, et des domaines de leur application.

I.2 Historique

Les antennes microrubans ont été introduites pour la première fois en 1953 aux États-Unis par Georges Deschamps. Par la suite, un brevet relatant leur concept a été déposé par Henri Gutton et Georges Baissinot en 1955. Ce n'est que dans les années 1970 qu'elles ont réellement vu le jour, grâce aux progrès réalisés dans les techniques de photolithographie du cuivre et de l'or sur substrat diélectrique, ainsi qu'aux avancées dans la modélisation, permettant ainsi la fabrication des premiers prototypes [3].

I.3 Structure de base d'une antenne microruban et différentes formes

Comme nous pouvons le voir dans la figure I.1, une antenne microruban est constituée de trois éléments principaux [4].

I.3.1 Plan de masse (Ground plane) : C'est une surface conductrice plane qui sert de référence pour l'antenne.

I.3.2 Substrat diélectrique : C'est un matériau isolant qui sépare le plan de masse de l'élément rayonnant. Il joue un rôle crucial dans les performances de l'antenne.

I.3.3 Élément rayonnant (Patch) : C'est une surface conductrice de forme spécifique, généralement plane, qui rayonne les ondes électromagnétiques.

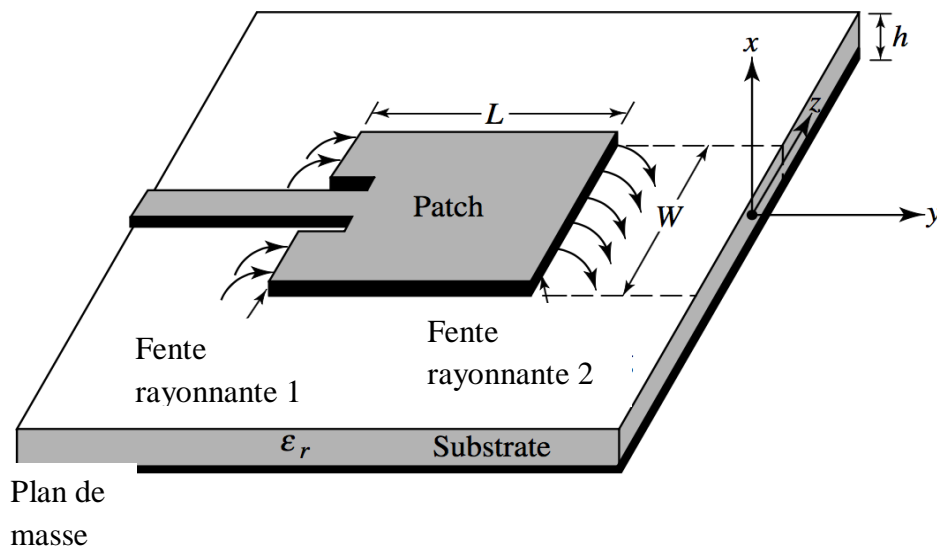


Figure I.1 Structure d'une antenne microruban

Les antennes microrubans peuvent prendre différentes formes :

- **Rectangulaire :** C'est la forme la plus courante, simple à concevoir et à fabriquer. Elle offre de bonnes performances en termes de gain et de directivité.
- **Circulaire :** Cette forme offre une meilleure largeur de bande et une polarisation circulaire, ce qui peut être avantageux dans certaines applications.
- **Triangulaire :** Cette forme peut être utilisée pour améliorer la largeur de la bande passante et la directivité de l'antenne.
- **Elliptique :** Cette forme permet de contrôler la polarisation de l'antenne et d'améliorer son adaptation d'impédance.
- **Autres formes :** Il existe de nombreuses autres formes d'antennes microrubans, telles que les formes en U, en L, en croix, etc. Les formes les plus utilisées sont représentés dans la figure I.2.

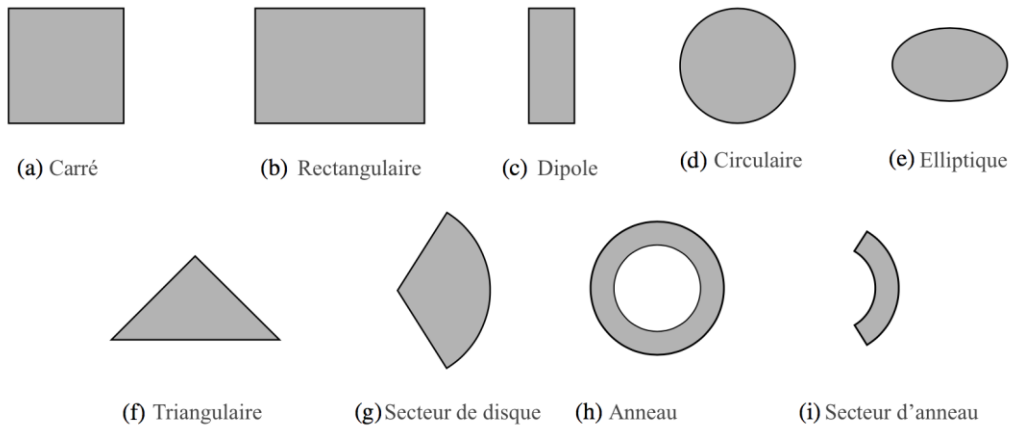


Figure I.2 Quelques formes utilisées pour les antennes

I.4 Fonctionnement des antennes microrubans

Le principe de fonctionnement de l'antenne microruban repose sur la transmission et le rayonnement d'ondes électromagnétiques. Comme le montre la **Figure I.3**, les antennes microrubans fonctionnent en générant des champs électriques et magnétiques au sein du substrat. Ce phénomène permet aux ondes électromagnétiques de se propager dans l'air à une vitesse égale à celle de la lumière (3×10^8 m/s) [6].

Comprendre le champ électromagnétique dans la zone proche de la structure rayonnante est crucial pour saisir le fonctionnement physique de l'antenne imprimée. Ce problème peut être simplifié en modélisant l'antenne comme une cavité résonante, délimitée par deux « murs électriques » horizontaux, correspondant respectivement à l'élément rayonnant et au plan de masse, ainsi que par quatre « murs magnétiques » transversaux à pertes [5]. Ainsi, le modèle de la cavité permet d'expliquer le fonctionnement des antennes imprimées et certaines de leurs caractéristiques, telles que le gain, le rendement et la bande passante. Toutefois, cette approche ne prend pas en compte l'influence des ondes de surface ni du circuit d'alimentation sur le comportement de l'antenne.

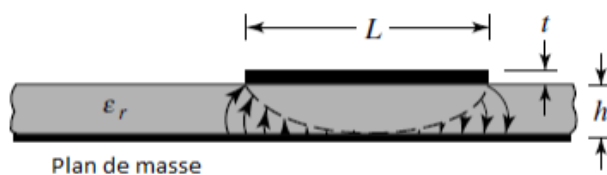


Figure I.3 Fonctionnement d'une antenne microruban

I.5 Différence entre la ligne microruban et l'antenne microruban

La différence entre la ligne microruban et l'antenne microruban réside principalement dans leur fonction et leur conception, bien qu'elles partagent des principes similaires, tels que nous pouvons le voir dans le tableau I.1 [6-8].

	Ligne microruban	Antenne microruban
Fonction	La ligne microruban est principalement utilisée comme un guide de transmission pour acheminer des signaux électromagnétiques dans des circuits micro-ondes. Elle ne sert pas directement à émettre ou recevoir des ondes, mais à transporter des signaux radiofréquences d'un point à un autre, souvent pour connecter des composants dans un circuit.	Contrairement à la ligne microruban, une antenne microruban est conçue pour émettre et recevoir des ondes électromagnétiques. Elle utilise la même structure de base qu'une ligne microruban, mais elle est adaptée pour former un élément rayonnant.
Structure	Elle consiste généralement en une ligne de transmission composée d'une fine bande conductrice (généralement du cuivre) placée sur un substrat diélectrique, avec une plaque de sol métallique sous-jacente qui forme le plan de masse.	Une antenne microruban peut prendre différentes formes (rectangulaire, circulaire, etc.) et est souvent composée d'un conducteur imprimé sur un substrat diélectrique, avec un plan de masse métallique situé en dessous. L'antenne microruban rayonne lorsque l'excitation du signal se fait à travers une ouverture ou une structure qui permet de transformer l'énergie électromagnétique en ondes propagées dans l'espace.

Tableau I.1 Fonctionnement d'une antenne microruban

En résumé, une ligne microruban est un dispositif de transmission de signaux, tandis qu'une antenne microruban est conçue pour émettre ou recevoir ces signaux sous forme d'ondes électromagnétiques. Les deux partagent des principes de conception, mais leur différence de largeur leur donne un fonctionnement différent.

I.6 Processus de fabrication des antennes microrubans

Le processus de fabrication des antennes microrubans implique plusieurs étapes clés, principalement axées sur la création d'une structure conductrice imprimée sur un substrat diélectrique. Voici les principales étapes de ce processus [9].

I.6.1 Choix du substrat diélectrique

Le substrat est le matériau sur lequel l'antenne est fabriquée. Il est choisi en fonction de la permittivité relative (ϵ_r), de la perte diélectrique et de la température de fonctionnement. Les matériaux couramment utilisés sont les plastiques, le Téflon ou les céramiques.

I.6.2 Conception du modèle de l'antenne

Avant la fabrication, une modélisation de l'antenne est réalisée, généralement à l'aide de logiciels de simulation comme CST Microwave Studio ou HFSS. La conception prend en compte des paramètres tels que les dimensions du patch, la forme de l'antenne (rectangulaire, circulaire, etc.), et les techniques d'alimentation.

I.6.3 Impression de la structure conductrice

Une fois la conception validée, l'antenne est réalisée en imprimant la structure conductrice sur le substrat. Ce processus utilise généralement l'une des techniques suivantes :

- **Photolithographie** : Un film photosensible est déposé sur le substrat, puis exposé à la lumière à travers un masque correspondant à la forme de l'antenne. L'excédent de matériau est ensuite enlevé par un processus chimique.
- **Gravure chimique** : Après la photolithographie, le cuivre non protégé par le masque est gravé à l'aide d'une solution chimique, laissant ainsi la forme de l'antenne sur le substrat.
- **Impression directe** : Dans certains cas, des techniques d'impression directe de circuits (comme l'impression 3D ou l'impression à jet d'encre) peuvent être utilisées.

I.6.4 Perçage et découpe

Dans certaines conceptions d'antennes microrubans, il peut être nécessaire de percer des trous ou de découper le substrat pour intégrer des éléments supplémentaires ou pour définir les dimensions spécifiques du patch.

I.6.5 Électrode et connexion à l'alimentation

L'antenne est ensuite équipée d'une connexion d'alimentation. Cela peut inclure des connexions coaxiales ou des lignes microrubans pour assurer une transmission efficace du signal vers et depuis l'antenne. Une alimentation efficace est cruciale pour la performance de l'antenne.

I.6.6 Tests et validation

Une fois l'antenne fabriquée, elle subit des tests pour vérifier ses performances. Les tests peuvent inclure la mesure du gain, de la bande passante, du coefficient de réflexion (S_{11}) et du diagramme de rayonnement à l'aide d'un analyseur de réseau et d'autres équipements spécialisés.

I.6.7 Montage final

Dans certains cas, l'antenne microruban peut être montée dans un boîtier ou intégrée à un circuit plus complexe, en fonction de son utilisation dans des applications spécifiques comme les systèmes de communication ou les radars.

Le processus de fabrication des antennes microrubans repose sur des techniques de fabrication de circuits imprimés classiques, mais avec des spécifications très précises pour garantir une efficacité optimale dans la transmission et la réception des signaux. La miniaturisation des composants et l'optimisation de la conception sont essentielles pour répondre aux exigences des systèmes modernes de communication.

I.7 Quelques techniques d'alimentation les plus usuelles

Les antennes microrubans peuvent être alimentées selon diverses techniques, que l'on peut classer en deux grandes catégories : alimentation par contact et alimentation sans contact (par couplage).

I.7.1 Alimentation par contact

I.7.1.a Alimentation par ligne microruban

L'alimentation de l'antenne microruban peut être réalisée via une ligne microruban. Dans ce cas, le patch de l'antenne est alimenté directement par une ligne de transmission microruban qui est reliée à l'élément rayonnant (voir Figure I.4).

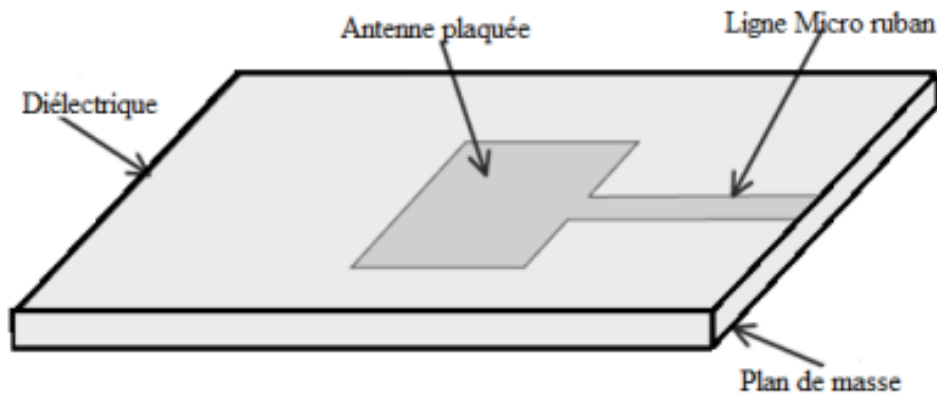


Figure I.4 Alimentation par ligne microruban

Par cette technique, la ligne et l'antenne microruban sont fabriquées sur le même substrat, ce qui simplifie la fabrication, réduit les coûts et permet une intégration plus aisée avec d'autres composants Radiofréquences [10].

I.7.1.b Alimentation par une sonde coaxiale

Cette technique utilise un câble coaxial pour alimenter l'antenne patch, le conducteur central étant relié au patch, tandis que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse, comme le montre la **Figure I.5**.

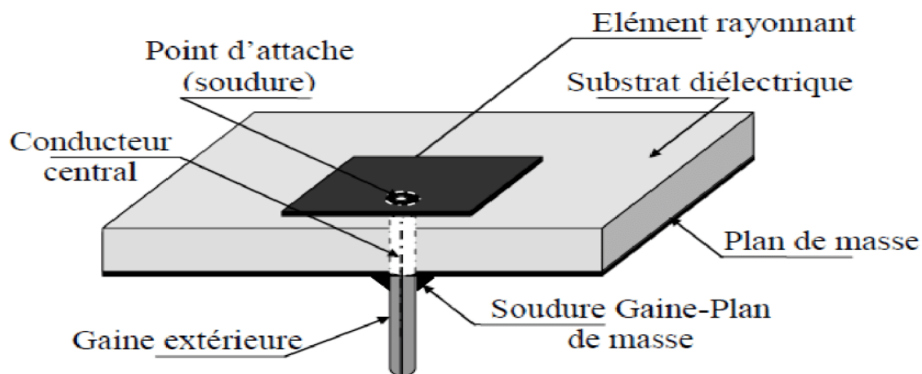


Figure I.5 Alimentation par une sonde coaxiale

Le câble coaxial étant blindé, cette technique réduit les interférences et les rayonnements parasites. Elle permet d'atteindre des bandes passantes plus élevée [11].

I.7.2 Alimentation sans contact

I.7.2.a Alimentation par couplage d'ouverture

Le patch est alimenté par une ouverture insérée dans le plan de masse, avec une ligne de transmission microruban placée de l'autre côté de ce plan, comme illustré dans la Figure I.6.

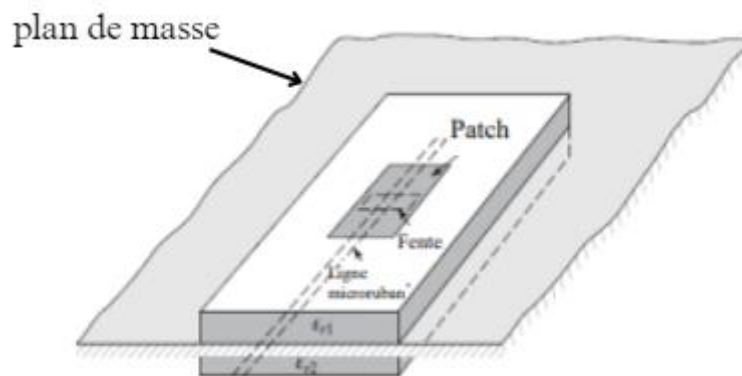


Figure I.6 Alimentation par couplage par d'ouverture

La structure ainsi conçue présente une meilleure isolation entre l'alimentation et le patch, une meilleure adaptation d'impédance et une bande passante plus large. L'inconvénient de cette technique réside dans sa complexité et son coût élevé de fabrication [11].

I.7.2.b Alimentation par couplage de proximité

La bande passante maximale de 13% peut être obtenue grâce à l'alimentation par couplage de proximité, illustré par la Figure I.7. Cette méthode présente l'avantage de réduire le rayonnement parasite et de faciliter le couplage, lequel peut être optimisé en ajustant les dimensions de la ligne. Toutefois, sa mise en œuvre reste particulièrement complexe [11].

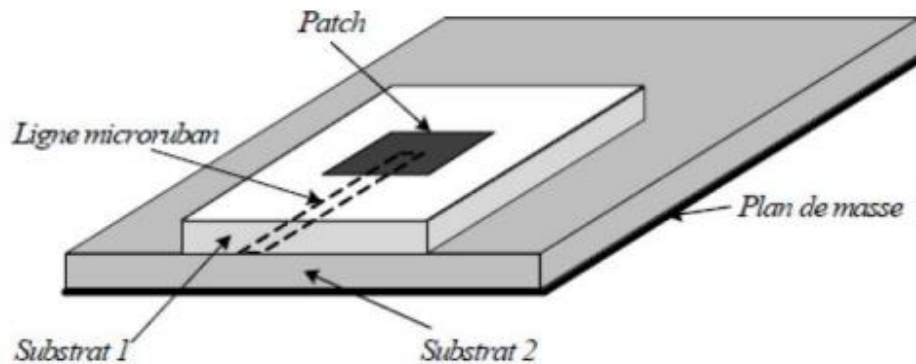


Figure I.7 Alimentation couplée par proximité

I.7 Techniques d'adaptation d'impédance

Nous considérons une antenne patch alimentée par une ligne de transmission caractérisée par une impédance Z_c . L'impédance de l'antenne peut être modélisée par l'impédance complexe [12] :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (I.1)$$

La **partie réelle** R_a représente la dissipation de la puissance rayonnée ainsi que la puissance perdue par effet Joule, donnée par la relation $R_a = R_r + R_p$ où :

- R_r : est la résistance de rayonnement.
- R_p : correspond aux pertes ohmiques et aux pertes dans le substrat diélectrique.

La **partie imaginaire** X_a est associée à la puissance réactive autour de l'antenne. L'impédance de l'antenne dépend à la fois de sa géométrie et du couplage avec la ligne de transmission. L'adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation est réalisée lorsque l'impédance de l'antenne Z_a égale l'impédance caractéristique de la ligne Z_c , soit $Z_a = Z_c$. L'impédance d'entrée de l'antenne doit être aussi proche que possible de 50Ω en partie réelle et nulle en partie imaginaire, ce qui dépend du type d'alimentation [13]. Pour des éléments à géométrie simple sur un substrat mince, l'antenne peut être modélisée comme un circuit résonnant parallèle, caractérisé par son facteur de qualité Q , qui est lié aux pertes par rayonnement (utiles) et par dissipation thermique (nuisibles) [13].

L'objectif de l'encart coupé dans le patch est d'adapter l'impédance de la ligne d'alimentation au patch sans nécessiter d'élément d'adaptation supplémentaire. Cela est réalisé en ajustant correctement la position de l'encart. L'alimentation par ligne microruban peut se faire par connexion directe, avec le point de jonction situé sur l'axe de symétrie de l'élément (Figure I.8.a), ou décalé par rapport à cet axe si cela améliore l'adaptation d'impédance (Figure I.8.b). L'alimentation axiale avec l'insertion d'encoches donne également de bons résultats en termes d'adaptation (Figure I.8.c).

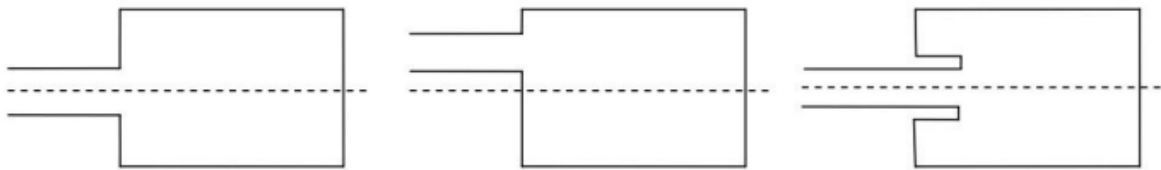


Figure I.8 techniques d'adaptation d'impédances (a) axial (b) décalée (c) axial avec encoche [14]

I.8 Caractéristiques de rayonnement

I.8.1 coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion Γ mesure le rapport entre la puissance du signal réfléchi et celle du signal incident. Il est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et à l'impédance caractéristique Z_c de la ligne de transmission par la relation suivante [15].

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{onde réfléchie}}{\text{onde incidente}} \quad (\text{I.2})$$

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne qui alimente l'antenne (en général $Z_c=50\Omega$)

Z_e : Impédance d'entrée de l'antenne.

I.8.2 Gain

Le gain G d'une antenne, comme la directivité, est le rapport entre la densité de puissance de l'antenne et la densité moyenne d'une source isotrope. La différence réside dans le fait que l'antenne isotrope rayonne uniformément la puissance fournie par l'alimentation P_a et non P_r , Il s'exprime alors par la relation [11] :

$$G = 4\pi r^2 P(\theta, \varphi) / P_a \quad (I.3)$$

Avec :

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

I.8.3 Directivité

La directivité d'une antenne mesure la concentration de son rayonnement dans certaines directions. Selon [6], elle est définie comme le rapport entre la densité de puissance rayonnée par l'antenne dans une direction donnée, $P(\theta, \varphi)$, et la densité de puissance moyenne d'une antenne isotrope.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r / 4\pi r^2} = 4\pi r^2 \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (I.4)$$

$P(\theta, \varphi)$: Densité de puissance par unité de surface rayonnée par l'antenne.

P_r : Puissance totale rayonnée par l'antenne

I.8.6 Rendement

Le rendement correspond au rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Elle est exprimée par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (I.5)$$

R_r : Résistance liée à son rayonnement.

R_p : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

P_r : Puissance totale rayonnée par l'antenne.

P_a : Puissance d'alimentation de l'antenne.

I.8.7 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre la répartition de sa puissance dans l'espace. Contrairement aux antennes omnidirectionnelles, qui émettent uniformément, d'autres antennes concentrent leur puissance dans certaines directions privilégiées. La Figure I.9 montre des diagrammes de rayonnement en 3D, en coordonnées polaires et cartésiennes. En général, une direction maximale de rayonnement capte la majeure partie de la puissance, tandis que des directions secondaires reçoivent le reste. La fonction caractéristique $F(\theta, \phi)$ permet d'analyser cette distribution, définie comme le rapport entre le champ $E(\theta, \phi)$ et sa valeur maximale [14].

$$F(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|}{|E_{\max}|} \quad (I.6)$$

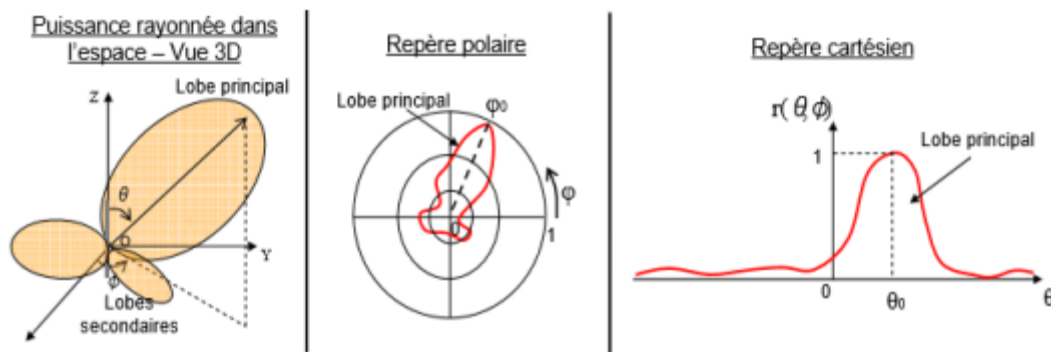


Figure I.9 Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne

I.9 Avantages et inconvénients

Les antennes microrubans existent depuis de nombreuses années et continuent d'exister grâce à certains aspects avantageux. Cependant elles présentent certains inconvénients [16] :

I.9.1 Les Avantages

- * Elles sont légères et discrètes, ce qui les rend adaptées aux applications où la taille et le poids sont des contraintes.
- * Elles sont économiques et faciles à fabriquer par photolithographie, ce qui favorise leur intégration dans des cartes à circuits imprimés.

- * Il existe des techniques qui permettent d'améliorer leurs performances, donc elles peuvent fonctionner sur une large gamme de fréquences avec une bonne efficacité de rayonnement et un gain adéquat.
- * Elles ont une conception simple et compacte, ce qui les rend adaptés aux applications dans un espace limité.

I.9.2 Les Inconvénients

- * Elles ont une capacité de gestion de l'énergie relativement faible par rapport aux autres types d'antennes.
- * Elles sont sensibles aux propriétés diélectriques du matériau du substrat, ce qui peut affecter leurs performances.
- * Elles ont une bande passante d'impédance étroite, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.
- * Elles peuvent subir des pertes importantes dues aux ondes de surface et aux fuites de rayonnement.
- * Elles ont une efficacité de rayonnement limitée par rapport aux autres types d'antennes, ainsi qu'un gain faible.

I.10 Domaines d'application

Les antennes microruban sont largement utilisées grâce à leur compacité, leur légèreté et leur facilité d'intégration. Elles trouvent leur applications dans différents domaines tels que :

- **Communications sans fil** : Utilisées dans les systèmes de télécommunication, y compris les réseaux mobiles et Wi-Fi.
- **Systèmes GPS** : Antennes microrubans pour la réception des signaux satellites.
- **Radars** : Employées dans des radars pour leur faible coût et leur facilité d'intégration.
- **Satellites** : Utilisées dans les antennes embarquées sur des satellites pour diverses applications de communication.
- **Dispositifs portables** : Intégration dans les Smartphones, tablettes, et autres appareils compacts.
- **Systèmes de détection** : Utilisées dans les systèmes de détection et de mesure, comme la télémétrie et les capteurs.

- **Applications militaires** : Employées dans les équipements de communication militaire en raison de leur performance et compacité.

I.11 conclusion

La technologie microruban, et plus particulièrement celle des antennes microrubans, connaît un intérêt croissant de la part des industriels et des professionnels des télécommunications, qu'il s'agisse d'applications terrestres ou spatiales. Une définition précise de l'ensemble des paramètres liés à ces antennes s'avère donc essentielle. Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté des généralités sur les antennes microrubans, en abordant leurs structures géométriques, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs principales caractéristiques. Nous avons ensuite exposé différentes techniques d'alimentation, ainsi que les méthodes d'adaptation d'impédance utilisées pour optimiser leurs performances. Les avantages et les inconvénients de ce type d'antenne ont également été discutés [17]. Enfin, nous avons conclu le chapitre en présentant les principaux domaines d'application des antennes microrubans.

Dans ce qui suit, nous allons parler du concept de la technique d'insertion de défauts au niveau du plan de masse (Defected Ground Structure DGS) et de son impact sur les performances des antennes microrubans.

CHAPITRE II

ANTENNES MICRORUBANS À DÉFAUTS DANS LE PLAN DE MASSE (DGS)

II.1 Introduction

L'évolution constante des systèmes de communication sans fil impose des exigences toujours plus élevées en termes de performances, de compacité et de polyvalence des antennes. Dans ce contexte, les antennes microrubans se sont imposées grâce à leur faible encombrement, leur facilité de fabrication et leur intégration aisée dans les circuits imprimés. Toutefois, ces antennes présentent certaines limitations, notamment une bande passante étroite et un faible gain. Pour surmonter ces contraintes, l'introduction de structures à défaut dans le plan de masse, connues sous le nom de *Defected Ground Structures* (DGS), s'est révélée être une solution innovante et efficace [18].

Dans ce chapitre nous allons décrire le Concept d'une structure à défaut dans le plan de masse (Defected ground structure DGS) et son évolution. Nous allons par la suite détailler quelques formes de structures DGS. Nous parlerons aussi des applications du DGS pour un fonctionnement multibande et large bande, et son application dans la miniaturisation des antennes microrubans.

II.2 Concept d'une structure à défaut dans le plan de masse (Defected ground structure DGS)

La Structure à Défaut dans le Plan de Masse DGS (Defected Ground Structure) désigne une découpe ou un motif gravé sur le plan de masse d'un circuit, introduit volontairement pour perturber le chemin du courant de retour. Bien qu'il soit appelé « défaut », il ne rend pas le plan de masse inefficace, bien au contraire, il modifie ses propriétés électriques. En altérant la répartition du courant blindé, le motif DGS influence les paramètres électromagnétiques du circuit, notamment l'inductance et la capacité, ce qui améliore la résonance et l'efficacité. Cette technique permet aussi un effet d'onde lente, contribuant à la miniaturisation des circuits micro-ondes. La forme de la structure DGS peut être simple ou complexe servant à optimiser les performances, rendant cette méthode utile dans divers composants RF : les filtres, les antennes, les amplificateurs, etc.. [19].

II.2.1 Evolution du concept de DGS (Defected Ground Structure)

Le concept de structures à plan de masse DGS a évolué ces dernières années, principalement à partir des études sur les structures à bande interdite photonique (BIP) en électromagnétisme. Les BIP, utilisées dans les applications électromagnétiques (EM), sont désormais appelées structures à bande interdite électromagnétique BIE (Electromagnetic Band Gap EBG, en anglais) [20]. Il s'agit en réalité de structures périodiques artificielles présentant une propriété inhabituelle, ils empêchent les ondes électromagnétiques de se propager sur une plage de fréquences appelée « bande interdite » et permettent aux ondes électromagnétiques de se propager sur une plage de fréquences appelée « bande passante ». **La figure II.1** illustre la « bande interdite » de transmission causée par une structure EBG.

Les premières études sur les PBG (Photonic Band Gap) remontent à 1987 et portaient sur les fréquences optiques. Cette technologie s'est progressivement popularisée dans les applications micro-ondes et ondes millimétriques. Diverses géométries ont évolué au fil des recherches, et un bref aperçu des structures EBG de base ayant conduit à la réalisation de la DGS est présenté dans ce qui suit.

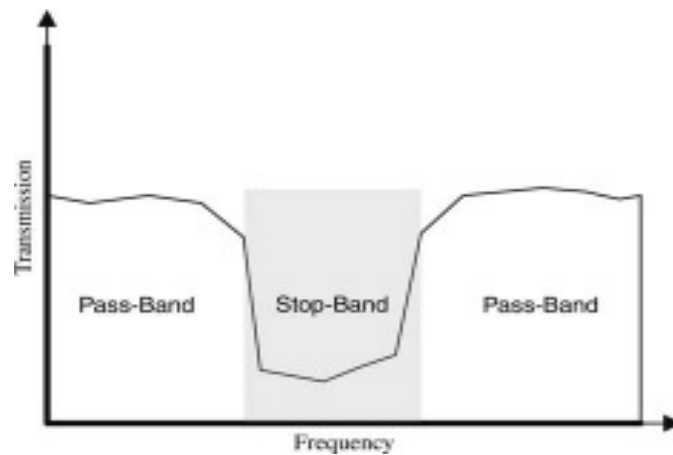


Figure II.1 Diagramme représentatif illustrant une bande d'arrêt dans les caractéristiques de transmission d'une structure EBG typique [21]

Une structure EBG plane 2D [21], illustrée à la **figure II.2(a)**, est en fait un motif répétitif de cellules unitaires circulaires gravées sur le plan de masse d'une ligne de transmission microruban. Une variante simplifiée unidimensionnelle (1D) de la structure est illustrée dans la **figure II.2(b)**.

En conséquence, une structure DGS peut être considérée comme une cellule EBG, ou une structure EBG ayant un nombre réduit de cellules, utilisées pour modifier la réponse fréquentielle et les performances des circuits micro-ondes.

Les géométries des structures DGS incluent des formes simples telles que l'haltère rectangulaire, l'haltère circulaire, la spirale, le « U », le « V », le « H », la croix, les anneaux concentriques, etc. Différentes structures complexes, telles que les résonateurs à anneaux fendus ou les fractales, ont également été étudiés [23]. La figure II.3 présente quelques formes DGS à cellules unitaires simples et complexes. Elles sont utilisées pour implémenter des filtres, supprimer les ondes de surface indésirables, contrôler les harmoniques dans les antennes microrubans, les circuits micro-ondes compacts et autres applications micro-ondes. Différentes géométries ont été explorées afin d'améliorer les performances en termes de bandes passantes et d'arrêt, de compacité et de simplicité de conception.

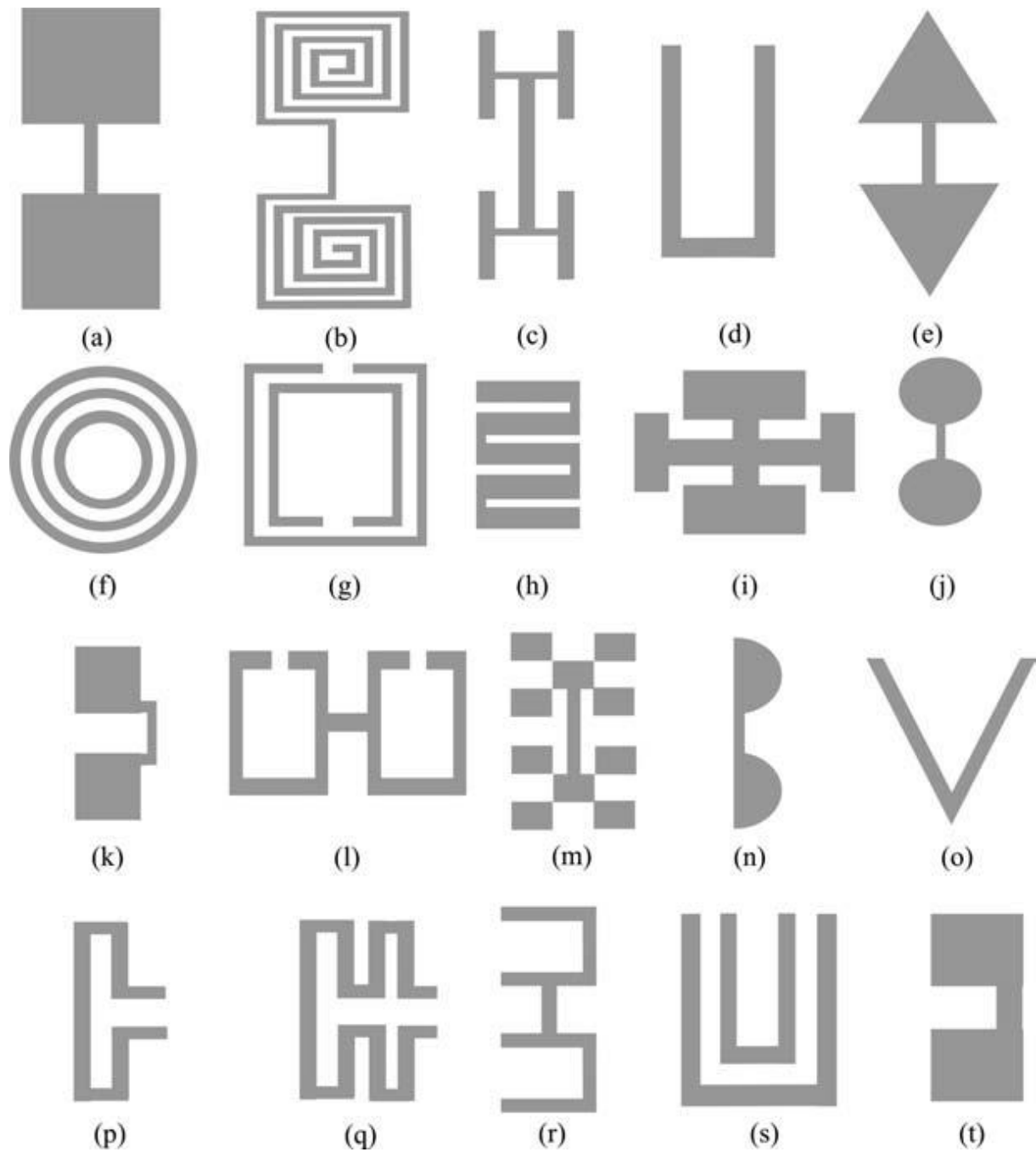


Figure II.3 Différentes géométries DGS.

II.4 Le DGS dans le contrôle et l'amélioration des propriétés de rayonnement des antennes microrubans

Les structures DGS ont initialement été appliquées aux antennes microrubans en 1999 [24]. A cette époque, elles étaient considérées comme des matériaux PBG ou EBG ayant des caractéristiques à bande interdite.

De nos jours, de telles structures sont appliquées pour obtenir de nouvelles performances des antennes microrubans. L'antenne microruban, comme il a été présenté au premier chapitre, est un résonateur limité par deux plans métalliques horizontaux, constitués par le patch lui-même et le plan de masse. Par conséquent, l'introduction d'un défaut dans le plan de masse, en dessous du patch va perturber les champs électromagnétiques, modifiant leur profil et leur orientation. Ceci pourrait être utilisé dans l'amélioration des propriétés du patch microruban.

II.4.1 Application du DGS pour un fonctionnement multibande

Les structures à défauts dans le plan de masse (DGS) sont largement utilisées pour concevoir des antennes microruban multibande, offrant des performances améliorées en termes de bande passante et de suppression des harmoniques. Cette approche permet de répondre aux exigences des systèmes de communication sans fil modernes, tels que le WLAN, le WiMax et le GPS, en intégrant des fonctionnalités multibande dans une conception compacte et efficace. L'article [25] présente la conception d'une antenne patch rectangulaire avec deux structures DGS différentes. L'antenne rectangulaire est portée par un substrat diélectrique de type FR4 de constante diélectrique égale à 4.3 et de hauteur 1.6 mm. Initialement, les dimensions de l'antenne sont déterminées de façon à ce qu'elle ait une résonance à la fréquence 2,8 GHz. La première configuration consiste à insérer des fentes de forme triangulaire au niveau du plan de masse (figure II.4). La seconde configuration présente un plan de masse avec des fentes de forme carrée, telle que le montre la figure II.5. Ces structures antennaires sont destinées à servir des applications multibande dans divers domaines (WLAN, WiMax et DBS).

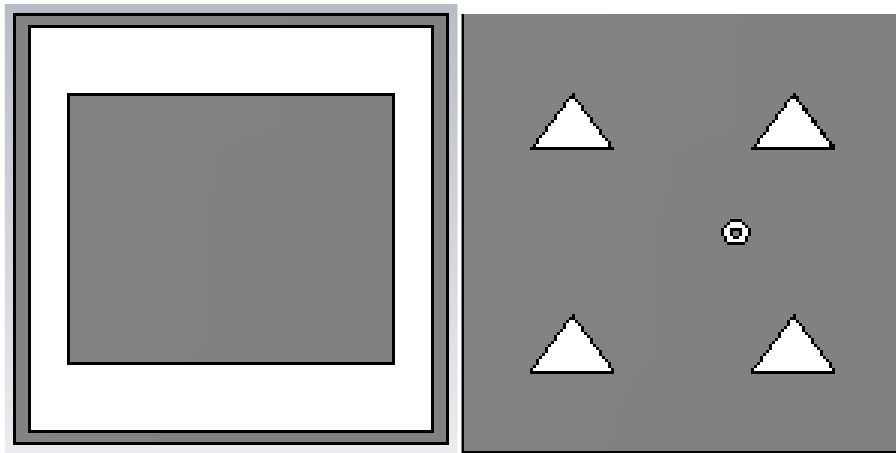


Figure II.4 Vue face et arrière de l'antenne avec structure DGS à fentes triangulaires

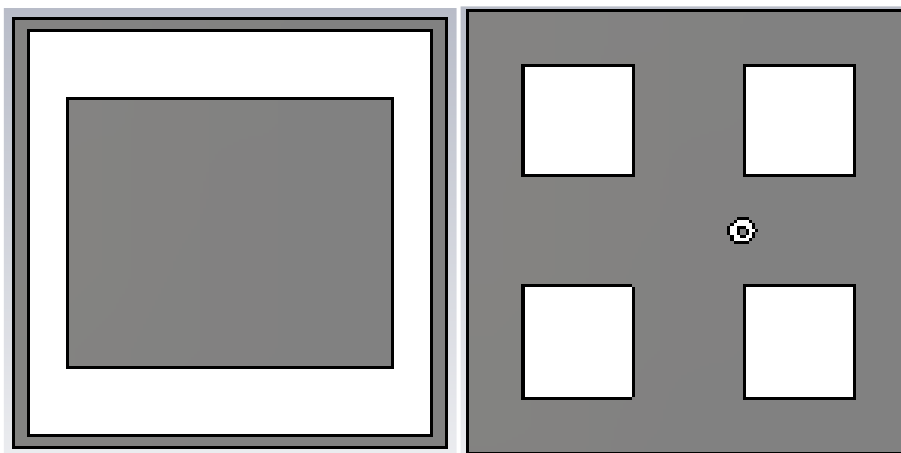


Figure II.5 Vue face et arrière de l'antenne avec structure DGS à fentes carré

La réponse fréquentielle du coefficient de réflexion de la configuration à fentes triangulaires est présentée dans la figure II.6. Le caractère multibande de l'antenne, causé par l'application du DGS, apparait clairement dans cette figure. L'antenne résonne dans la bande de surveillance aéroportuaire de fréquence centrale 2,876 GHz. Elle peut également servir les standards WLAN et WiMax à la fréquence 5.6 GHz, ainsi que le standard DBS (Direct Broadcast Satellite) à la fréquence 11.6 GHz.

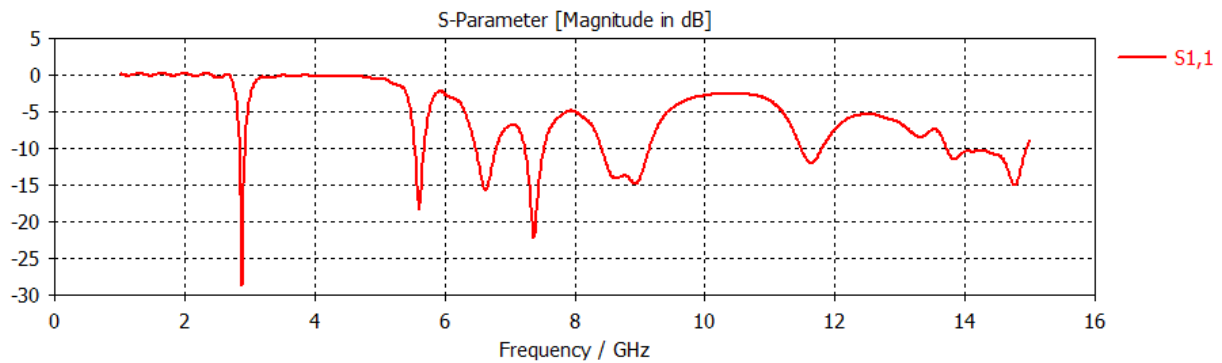


Figure II.6 Coefficient de réflexion simulée d'une antenne patch rectangulaire avec DGS à fentes triangulaires

Le coefficient de réflexion de la structure DGS à fentes carrées est également présenté par les auteurs de l'article, il est illustré par la figure II.7. Nous constatons là aussi un fonctionnement multibande de l'antenne. Elle présente un très bon niveau d'adaptation aux fréquences 2.97 GHz pour les applications de la bande S, 5.92 GHz pour les applications WLAN et WiMax et 11.29 GHz pour les applications DBS.

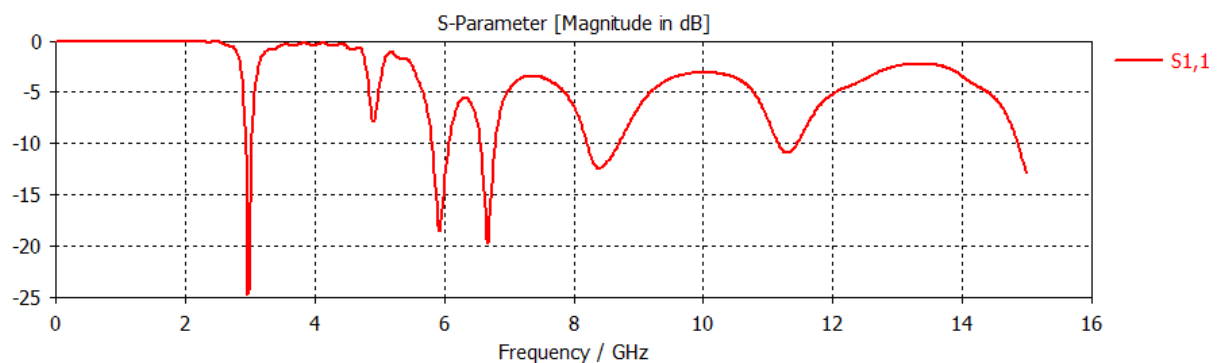


Figure II.7 Coefficient simulée d'une antenne patch rectangulaire avec DGS à fentes carrées

L'introduction de défauts au niveau du plan de masse a impliqué un fonctionnement multibande avec des caractéristiques de rayonnement et d'adaptation très intéressantes.

II.4.2 Application du DGS pour un fonctionnement large bande

L'antenne patch microruban est largement utilisée en raison de sa structure simple et de son faible coût de fabrication. Toutefois, l'un de ses inconvénients majeurs demeure sa bande passante étroite, ce qui peut restreindre son emploi dans certaines applications. Pour pallier cette limitation, une étude complémentaire sur l'intégration de structures DGS a été menée par les auteurs de la référence [26]. L'antenne proposée est conçue pour résonner à la fréquence 3.5 GHz. Elle est déposée sur un substrat de type FR-4 de permittivité diélectrique 4.4 et de hauteur 1.6 mm (figure II.8). Deux conceptions d'antennes microrubans

rectangulaires à structure DGS sont étudiées : la première intègre une fente rectangulaire au niveau du plan de masse (figure II.9), tandis que la seconde est dotée de trois fentes en forme de polygone (figure II.10).

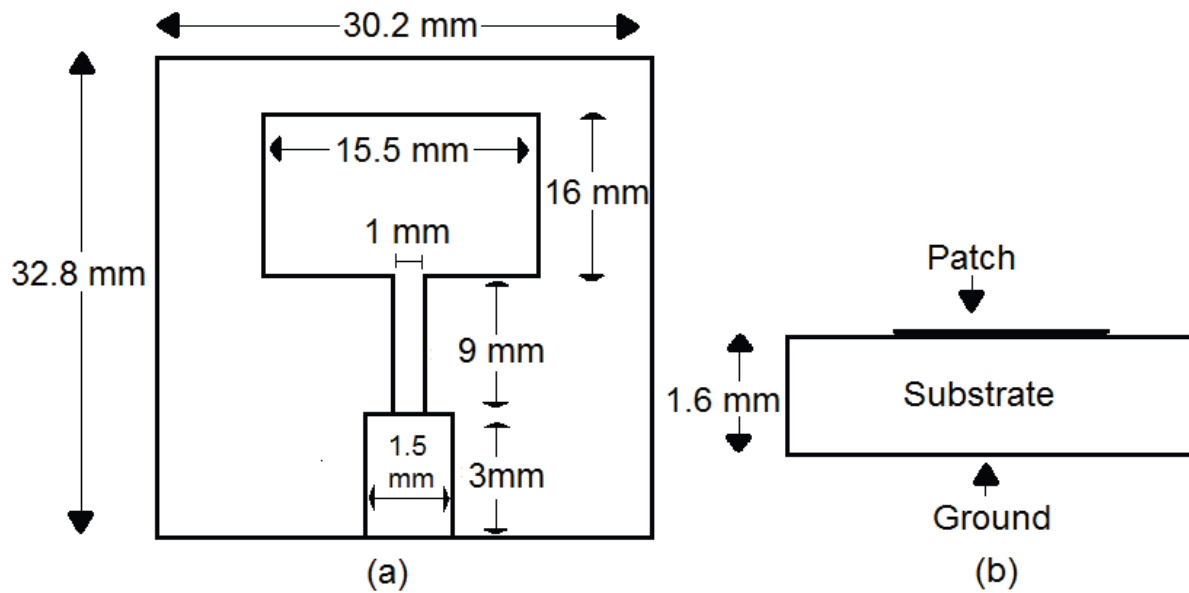


Figure II.8 géométrie de l'antenne avant DGS.

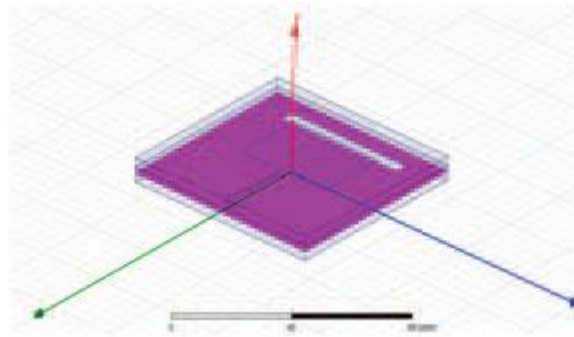


Figure II.9 Géométrie de l'antenne avec DGS rectangulaire dans HFSS

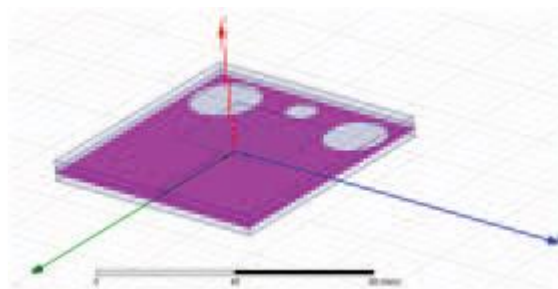


Figure II.10 Géométrie de l'antenne avec 3 polygones DGS dans HFSS

La simulation sous HFSS de l'antenne initiale à plan de masse total a permis de visualiser la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Ce dernier est représenté par la figure II.11. Une bande passante mesurée à -10 dB de 87 MHz est obtenue autour de la résonance 3.5 GHz.

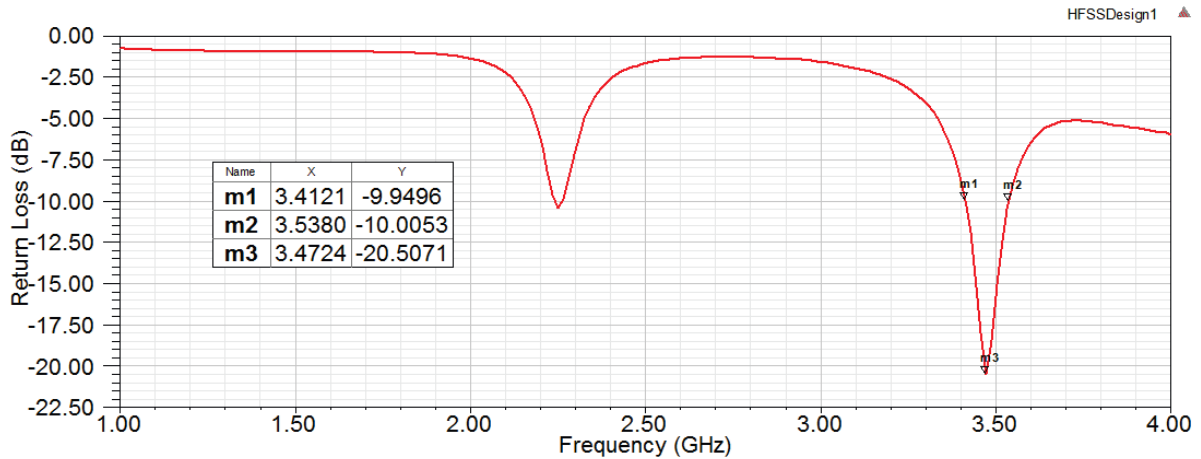


Figure II.11 Coefficient de réflexion de l'antenne initial

Les coefficients de réflexion des deux structures DGS sont représentés respectivement par les figure II.12 et II.13.

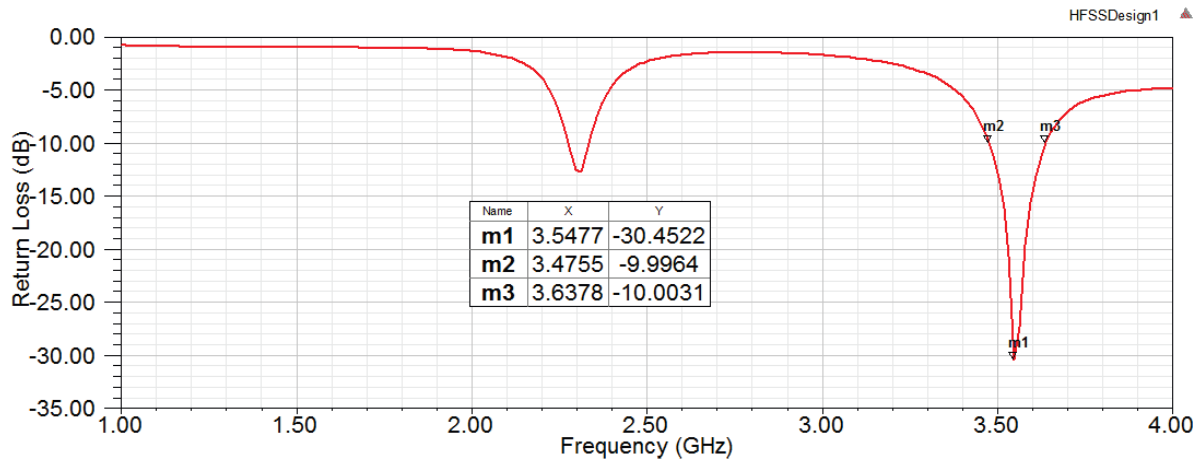


Figure II.12 Coefficient de réflexion de l'antenne avec DGS rectangulaire

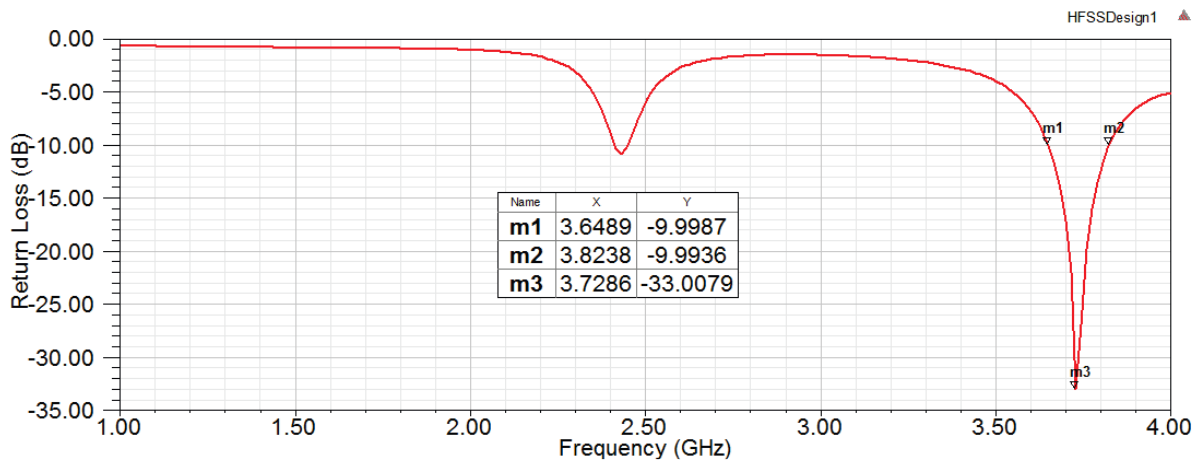


Figure II.13 Coefficient de réflexion de l'antenne avec 3 DGS polygonaux

Les simulations effectuées révèlent une amélioration notable de la bande passante ainsi que de l'efficacité de rayonnement et du taux d'adaptation suite à l'introduction de la structure DGS. Le tableau II.1 présente une synthèse des paramètres des trois configurations d'antennes.

N°	Paramètres	MSA simple	MSA avec DGS rectangulaire	MSA avec DGS de forme de polygone
1	Bande passante	87 MHz	165 MHz	174.8 MHz
2	Coefficient de réflexion	-21 dB	-31 dB	-33 dB
3	Fréquence de résonance	3.5 GHz	3.51 GHz	3.7 GHz
4	Efficacité de l'antenne	5 (3.33 GHz)	14.5 (3.44 GHz)	15.8 (3.26 GHz)

Tableau II.1 paramètres de l'antenne avec et sans DGS [27].

Ces deux antennes ont été conçues pour fonctionner dans la bande de fréquence du WiMax et peuvent également être utilisées pour des applications industrielles, militaires et cellulaires.

II.4.3 Application du DGS dans la miniaturisation des antennes microrubans

Le concept de structures à défaut dans le plan de masse (DGS) a été introduit afin d'améliorer les performances de divers dispositifs micro-ondes. Ainsi, la DGS est intégrée dans les antennes microrubans pour ses nombreux avantages, notamment la réduction de la taille de l'antenne et la diminution du couplage mutuel dans les réseaux d'antennes.

Dans [28], l'utilisation d'une structure DGS a permis de miniaturiser une antenne patch microruban en abaissant sa fréquence de résonance de 10 GHz à 3,5 GHz, sans modifier les dimensions physiques de l'antenne d'origine. La Figure II.14.a illustre la configuration de l'antenne patch rectangulaire conçu pour avoir une première résonance à la fréquence 10 GHz. Celle-ci est déposée sur un substrat diélectrique de type FR-4 de hauteur 1.6 mm. La structure DGS insérée sur le plan de masse métallique de l'antenne est telle que le montre la figure II.14.b. Celle-ci se compose de six anneaux concentriques intégrant une fente de forme rectangulaire. La fréquence de résonance peut être ajustée en modifiant les dimensions des anneaux ou celles de la fente rectangulaire. Les paramètres géométriques sont soigneusement définis afin d'assurer une séparation optimale entre la fente et les anneaux internes et externes.

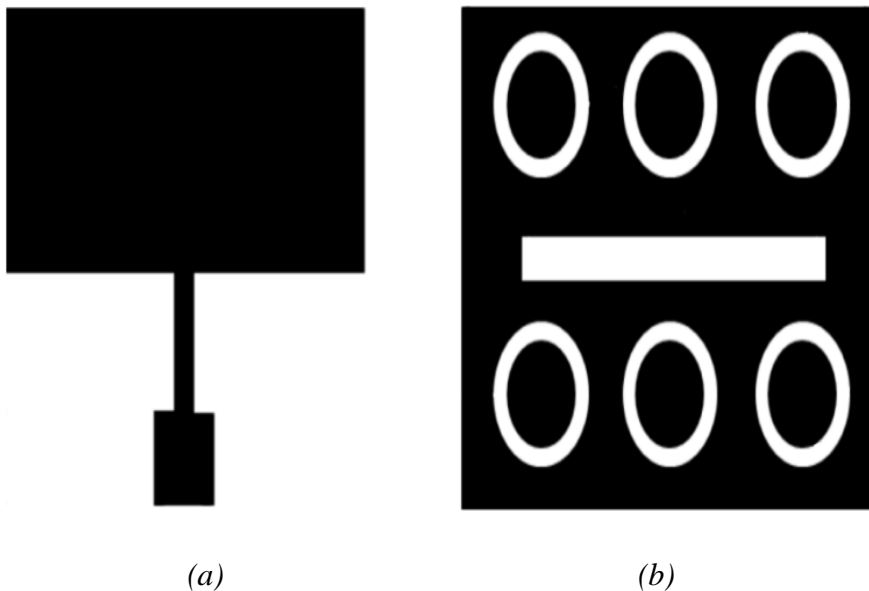


Figure II.14 L'antenne proposée: (a) l'élément rayonnant, (b) structure DGS proposée

Les coefficients de réflexion obtenus par simulation de l'antenne initiale avec plan de masse total sous CST et ADS sont représentés par la figure II.15. La figure montre une bonne adaptation d'impédance à la fréquence 10 GHz avec un léger décalage pour le résultat obtenu par ADS et cela à cause de la différence entre les méthodes numériques utilisées par les deux logiciels de conception électromagnétique.

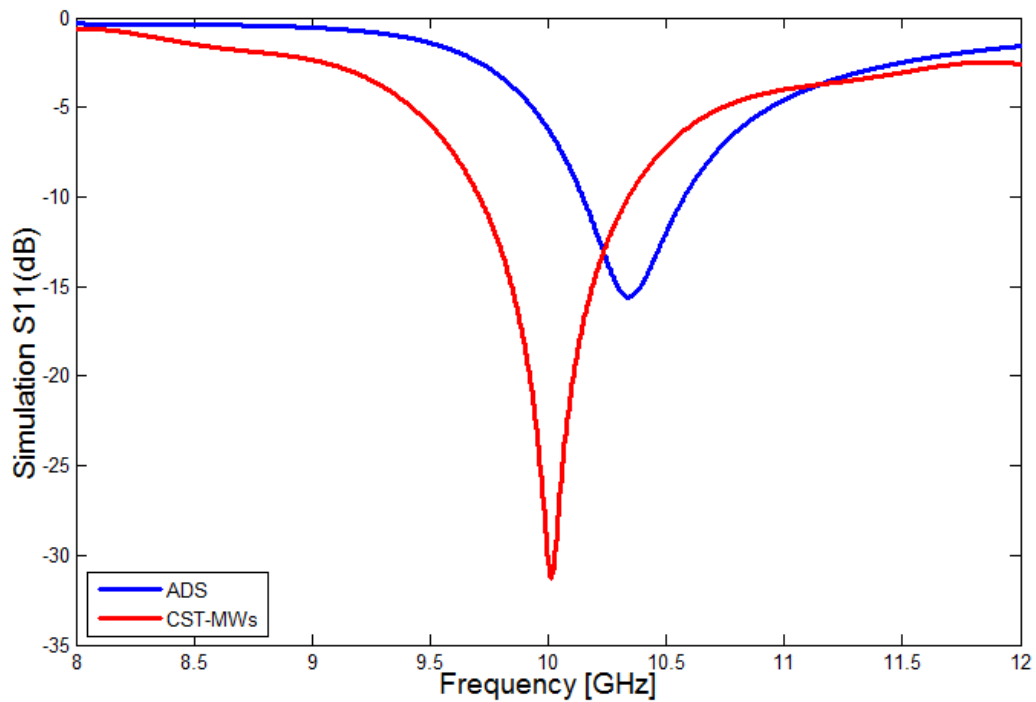


Figure II.15 Simulation du paramètre S11 pour l'antenne sans DGS sous CST et ADS

L'application de la structure DGS a mené vers le coefficient de réflexion représenté par la figure II.16. Comme nous pouvons le constater, une résonance à la fréquence 3.5 GHz est observée avec une bande passante de 400 MHz autour de cette fréquence. L'insertion des défauts DGS au plan de masse a permis de décaler la résonance vers des fréquences plus petites. L'objectif de la miniaturisation est ainsi atteint.

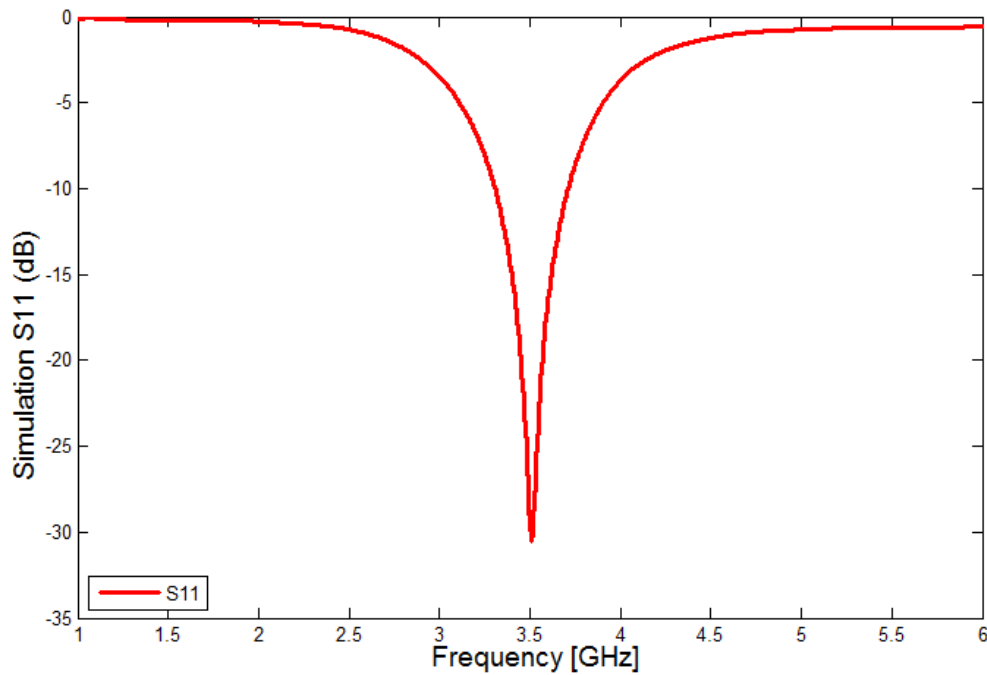


Figure I.16 Coefficient de réflexion de l'antenne avec DGS sous CST

Par ailleurs, la variation du gain de l'antenne en fonction de la fréquence, présenté dans la Figure II.16, révèle un gain maximal de 2,26 dB à la fréquence de résonance 3.5 GHz. L'antenne conçue possède des caractéristiques très satisfaisantes en termes de gain et de bande passante, en plus de sa miniaturisation grâce à l'introduction de la structure DGS dans le plan de masse.

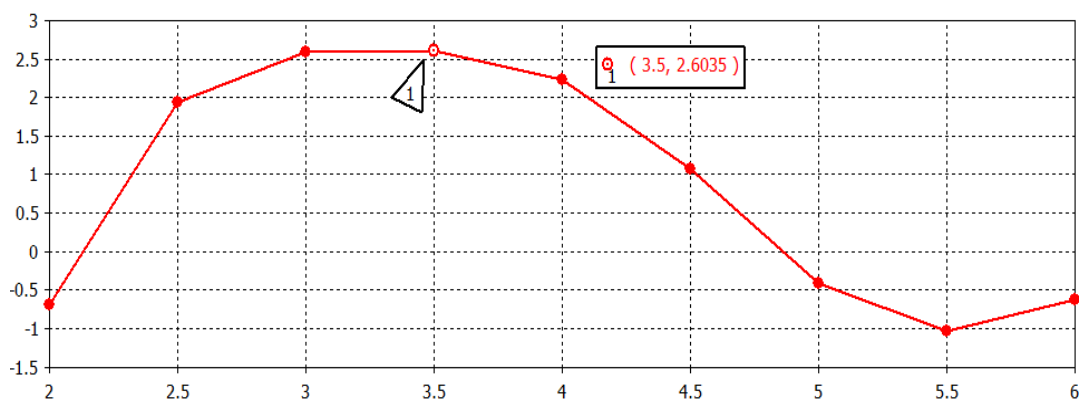


Figure II.17 Variation du gain en fonction de la fréquence de l'antenne avec DGS

II.5 conclusion

L'intégration des structures à défaut dans le plan de masse (DGS) constitue une avancée significative dans la conception des antennes microrubans. En modifiant localement les propriétés électromagnétiques du plan de masse, les DGS permettent d'améliorer notablement les performances des antennes, en particulier en termes de bande passante, de réponse en fréquence et de taille. Les différentes formes géométriques étudiées — telles que les structures en anneau, en ligne serpentine, carrée, triangulaire, en H ou en U — offrent une flexibilité de conception précieuse pour répondre aux exigences spécifiques des applications modernes.

Ce chapitre a mis en évidence la polyvalence des DGS dans divers domaines d'application : du fonctionnement multibande à l'élargissement de la bande passante, en passant par la miniaturisation des antennes. Ces avantages font des DGS une solution efficace et accessible pour surmonter les limitations inhérentes aux antennes microrubans conventionnelles, tout en répondant aux défis croissants des systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

CHAPITRE III

**SIMULATION DE PLUSIEURS
ANTENNES MICRORUBANS À
STRUCTURES DGS**

III.1 Introduction

La miniaturisation des antennes microrubans et l'amélioration de leurs performances sont essentielles dans les systèmes modernes de communication sans fil. Les antennes microrubans, en raison de leur faible coût et de leur facilité d'intégration, sont largement utilisées. Cependant, leur taille et leurs performances peuvent être limitées par des facteurs tels que la bande passante restreinte et la pureté de la polarisation. Pour surmonter ces limitations, des structures appelées **Defected Ground Structures (DGS)** ont été introduites. Ces défauts intentionnels dans le plan de masse des circuits imprimés modifient la distribution du courant et les caractéristiques d'impédance, permettant ainsi d'améliorer la bande passante et de réduire les interférences entre éléments d'antenne. L'application des structures DGS est devenue une technique populaire pour la conception d'antennes microrubans miniaturisées et performantes [29].

Ce chapitre explore la conception et la simulation d'antennes microrubans intégrant une structure DGS (Defected Ground Structure) pour améliorer leurs performances. Nous débuterons ce chapitre par une présentation du logiciel de simulation électromagnétique CST Studio Suite, outil essentiel pour cette démarche. Ensuite, nous appliquerons les techniques abordées précédemment pour concevoir et simuler trois antennes microrubans à structure DGS.

La première structure, proposée par la littérature, va nous permettre d'apprendre à maîtriser l'outil de simulation CST et de valider nos résultats.

Par la suite, deux configurations d'antennes microrubans à structure DGS seront présentées. Nous montrons à travers ces structures l'impact du DGS sur le comportement de l'antenne.

III.2 Présentation du logiciel CST

Le simulateur CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio est basé sur la méthode des intégrales finies FIT (Finite Integration Technique) développée par Weiland en 1977 [29]. Il permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence tels que les antennes, les filtres ...etc. Cet outil est très avantageux en termes de temps de calcul. Il offre une interface CAO puissante et entièrement paramétrique pour la construction et la modification de modèles de simulation.

Les outils d'importation et d'exportation permettent d'importer des modèles à partir d'une large gamme de logiciels de CAO et d'automatisation de la conception électronique (EDA). Le lien bidirectionnel entièrement paramétrique vers SOLIDWORKS signifie que les modifications de conception effectuées dans CST Studio peuvent être réimportées directement dans le projet SOLIDWORKS EMC, et inversement. Une fois le projet créé, nous pouvons accéder à l'interface de l'utilisateur du CST [30]. L'interface de CST Studio Suite est conviviale et structurée, offrant un accès intuitif aux outils de modélisation, de simulation et d'analyse électromagnétique, comme illustré dans la figure III.1

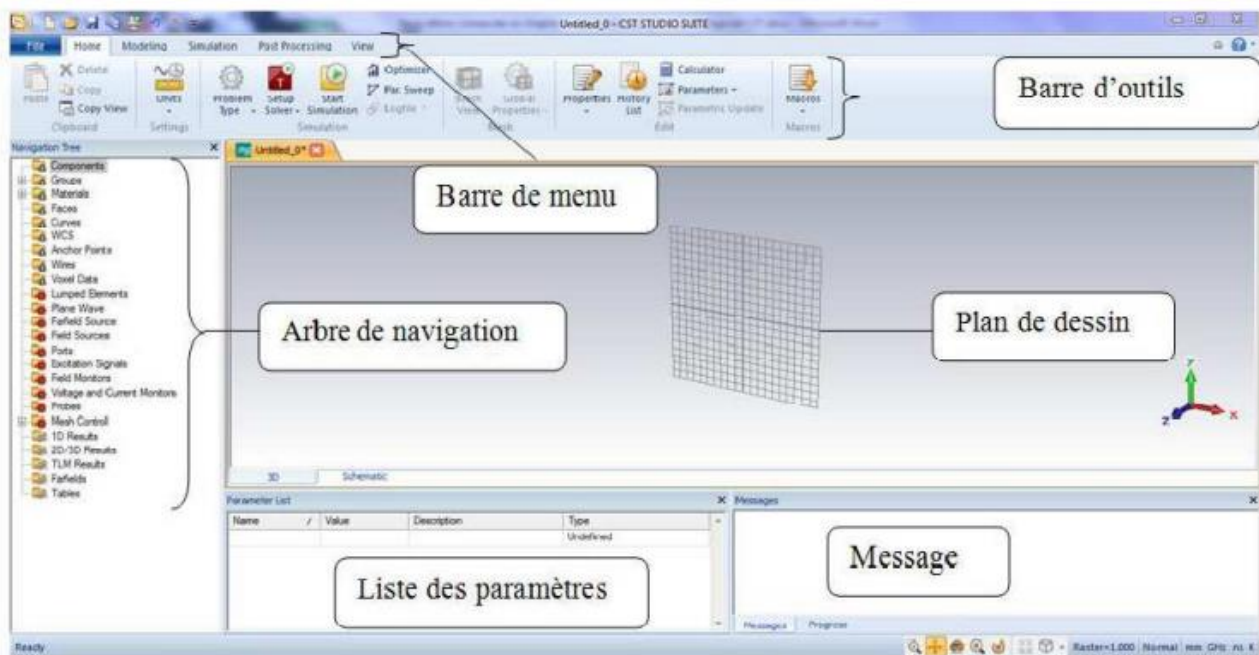


Figure III.1 Interface du logiciel CST

En haut de l'interface, nous pouvons observer la barre d'outils, qui regroupe des raccourcis de la barre de menu. À gauche de l'interface se trouve l'arbre de navigation qui permet d'accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation. Le corps de l'interface contient le plan de travail avec une structure en 3D.

À la partie inférieure de l'interface, nous trouvons : la liste des paramètres où se trouvent les variables utilisées lors de la simulation, ainsi qu'un message qui indique si chaque étape est réalisée avec succès. En cas d'échecs, un message d'erreur s'affichera.

III .3 Conception et simulation d'antennes microrubans à structure DGS

III.3.1 Antenne microruban miniature avec structure DGS

La première antenne que nous présentons ici est proposée par l'article [32]. Il s'agit d'une antenne patch microruban alimentée par une ligne microruban avec encoches pour assurer l'adaptation d'impédance, elle est destinée à fonctionner à la fréquence 5.7 GHz. Une structure à défaut dans le plan de masse (Defected ground structure DGS) est introduite afin d'atteindre l'objectif de miniaturisation de l'antenne.

III.3.1.a Structure initiale

L'antenne patch microruban proposée est illustrée par la figure III.2. Pour une meilleure adaptation d'impédance, une fente en U et deux découpes ont été réalisées sur le patch. Un substrat de type FR4 est utilisé pour cette conception en raison de son faible coût et de sa facilité de fabrication. L'épaisseur de ce substrat est de 1,6 mm, sa constante diélectrique est de 4,4 et sa tangente de perte est égale à 0,021. L'autre face de ce substrat diélectrique est entièrement recouverte d'une couche métallique qui forme le plan de masse.

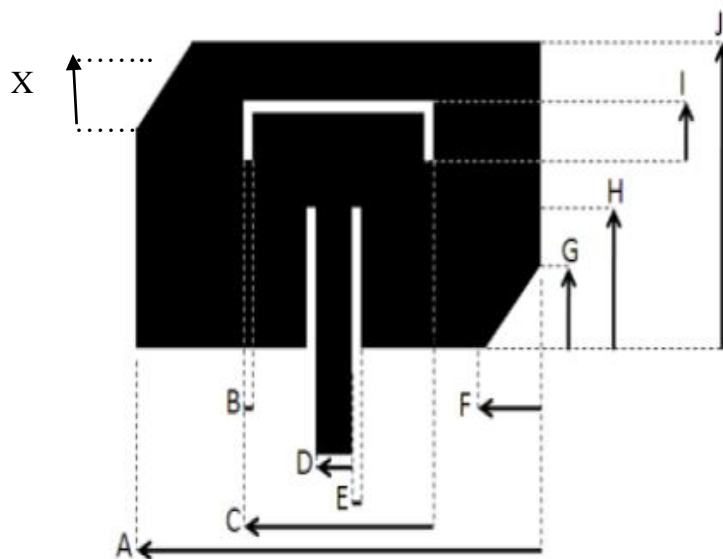


Figure III.2 Vue de dessus de l'antenne patch résonnant à 5,7 GHz [32]

L'ensemble des dimensions de cette structure, telles que présentées par l'article, se résumant dans le tableau III.1

Paramètres	Dimensions (mm)
A	13
B	0.2
C	6.6
D	2
E	0.3
F	2
G	2
H	3
I	3
J	12
X	3

Tableau III.1 Les différents paramètres géométriques de la structure initiale [32]

Les résultats de l'article ont été obtenus par le logiciel CST. La variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence est représentée par la **Figure III.3**. Nous remarquons une résonance autour de 5.7 GHz avec un niveau du coefficient S_{11} à -52.09 dB.

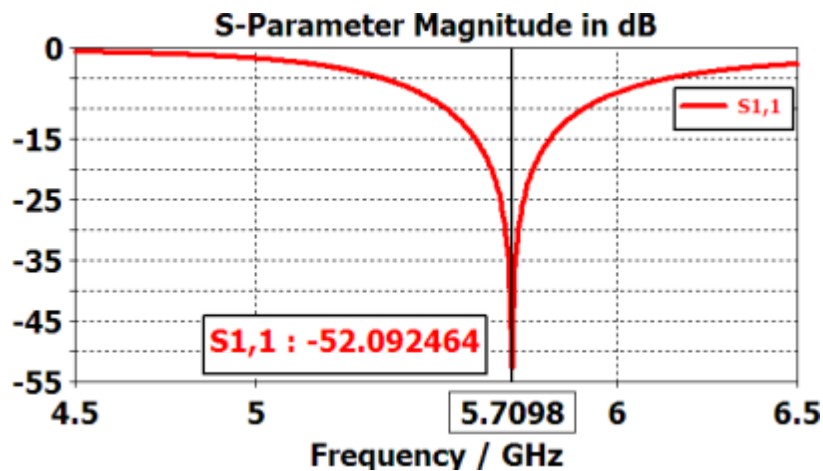


Figure III.3 Coefficient de réflexion simulée de l'antenne patch résonnant à 5,7 GHz [32]

Nous avons simulé cette même structure sous environnement CST Microwave Studio. Ceci nous a permis d'obtenir le coefficient de réflexion qui est illustré par la **Figure III.4**.

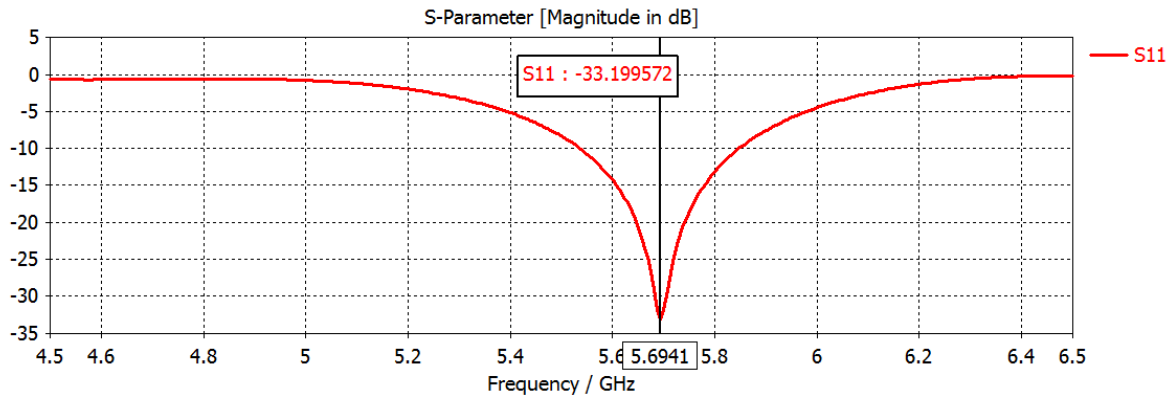


Figure III.4 Coefficient de réflexion obtenu après simulation

D'après cette courbe, nous avons une résonance à 5.69 GHz avec un coefficient de réflexion S₁₁ à -33.19 dB. Ce résultat est très comparable avec celui présenté par la référence.

III.3.1.b Antenne microruban avec structure DGS

Dans cette partie, l'insertion d'une structure DGS au niveau du plan de masse dans le but de miniaturiser l'antenne est réalisée. Ceci va se faire en deux étapes, à savoir, l'introduction d'une seule cellule DGS dans un premier temps. Une deuxième cellule sera introduite par la suite, afin de constater l'effet de ces défauts dans le plan de masse sur le comportement de l'antenne.

- **Une seule cellule**

La forme de cellule qui a été découpée dans le plan de masse est illustrée par **la figure III.5**.

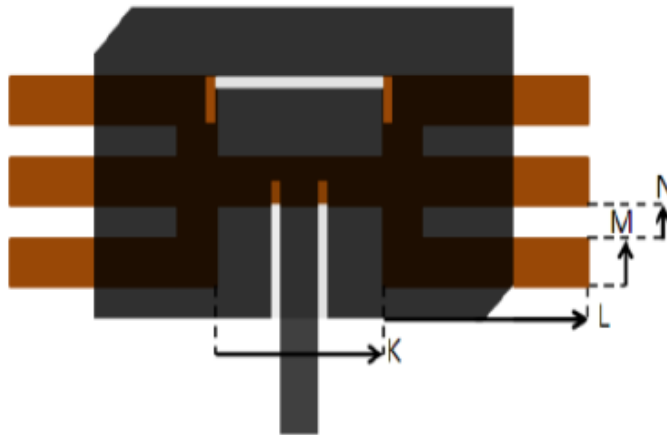


Figure III.5 Antenne patch microruban avec structure DGS à une seule cellule

Les dimensions de la cellule DGS sont présentées dans le tableau suivant.

<i>Paramètres</i>	<i>Dimension (mm)</i>
N	0.5
M	0.7
L	4
K	11.5

Tableau III.2 Les dimensions de la cellule DGS

En l'absence du DGS, nous avons vu dans le paragraphe précédent que la fréquence de résonance de l'antenne patch microruban était de 5,7 GHz. Avec l'introduction d'une structure DGS à une cellule, le résultat de la simulation, en l'occurrence, le coefficient de réflexion est présenté par la figure III.6. Nous constatons que la fréquence de résonance a été significativement influencée par la présence du DGS et qu'elle a été décalée à environ 3,39 GHz avec un niveau du paramètre S_{11} de -21.22 dB.

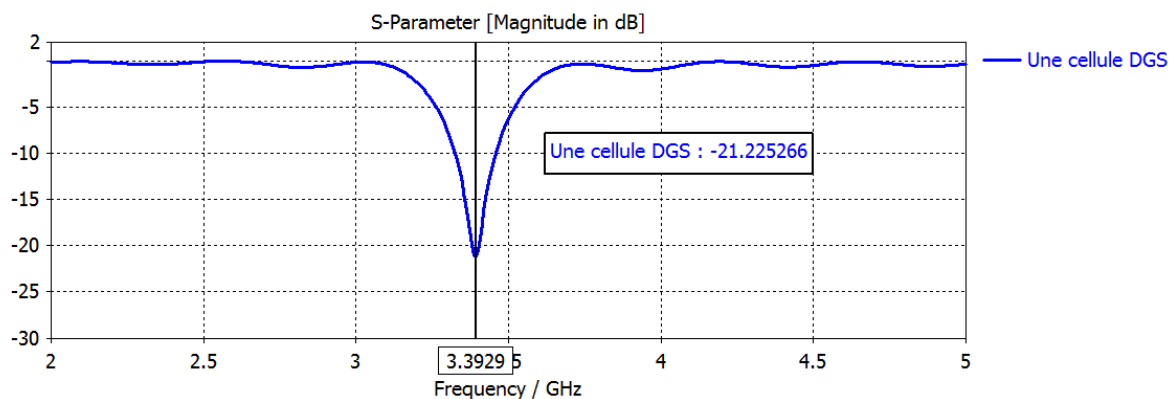


Figure III.6 Résultat de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne avec une cellule DGS.

La Figure III.7 montre les résultats de simulation obtenus par les auteurs de l'article [32]. L'antenne résonne à la fréquence 3.38 GHz avec un S_{11} de -25.75 dB. Ces résultats sont très comparables à ceux que nous avons obtenus.

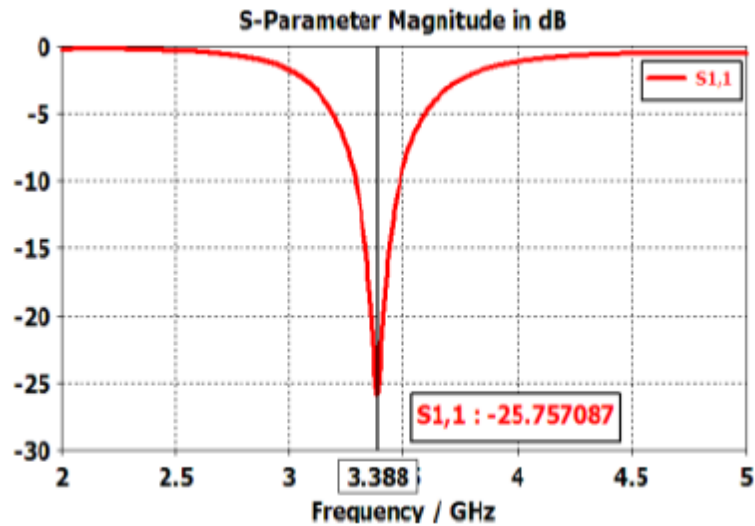


Figure III.7 Coefficient de réflexion de l'antenne avec une cellule DGS présenté par l'article [32]

- **DGS à deux cellules**

Nous introduisons maintenant une deuxième cellule DGS dans l'antenne proposée, plus précisément dans son plan de masse, comme l'indique la Figure III .8.

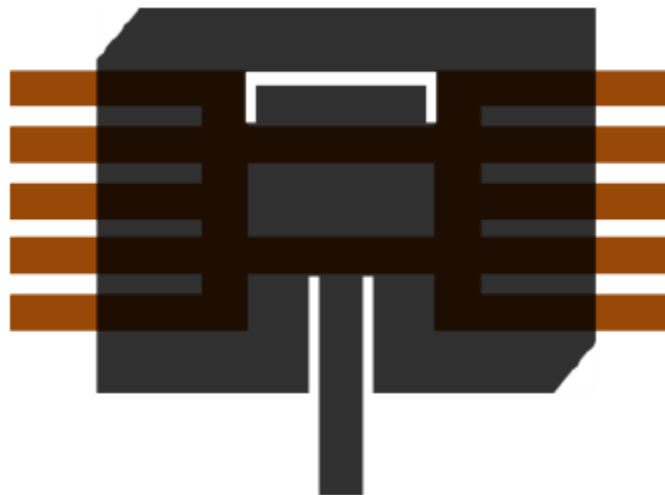


Figure III.8 Antenne patch microruban à deux cellules DGS

Avec deux cellules DGS, le résultat de la simulation du coefficient de réflexion présenté à la figure III.9, montre que la fréquence de résonance a été décalée davantage vers une fréquence de 2.99 GHz avec un niveau du paramètre S_{11} à -29.1 dB.

Le résultat présenté par l'article, illustré par la figure III.10, montre un résultat similaire avec une résonance à la fréquence 3 GHz et un niveau du coefficient de réflexion S_{11} de -21.77 dB.

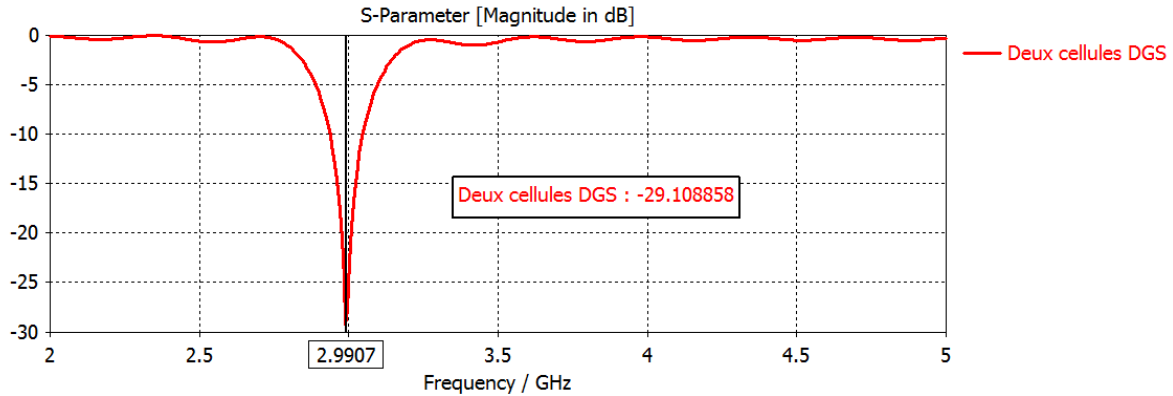


Figure III.9 Résultat de simulation sous CST de l'antenne avec deux cellules DGS

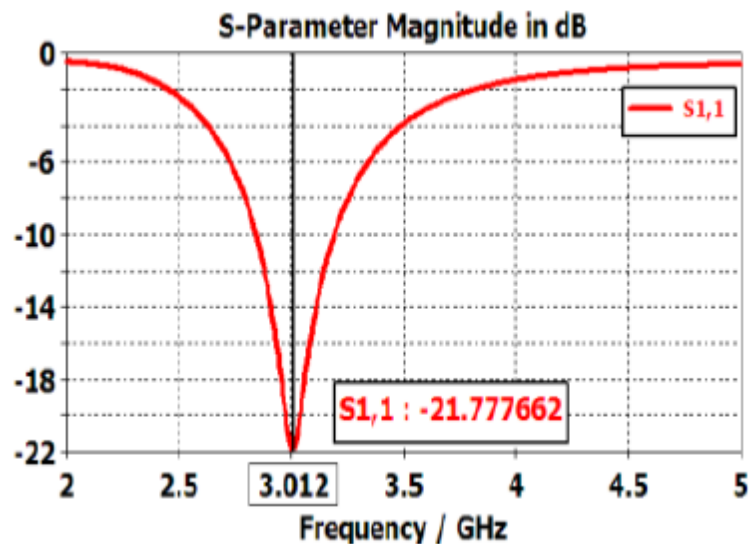


Figure III.10 Coefficient de réflexion de l'antenne avec deux cellules DGS, présenté par la référence [32]

Ce décalage vers des fréquences plus petites que celle de l'antenne initiale nous permet d'affirmer que l'objectif de la miniaturisation de l'antenne a été assuré. Nous avons ainsi conçu une antenne patch microruban avec DGS qui résonne à une fréquence égale à 3 GHz, alors qu'elle possède des dimensions qui sont censés la faire résonner à 5.7 GHz.

A partir de la Figure III.11 dans laquelle est illustré le diagramme de rayonnement de l'antenne avec deux cellules DGS, nous pouvons constater un gain maximal de 3.87 dB à la résonance 3 GHz.

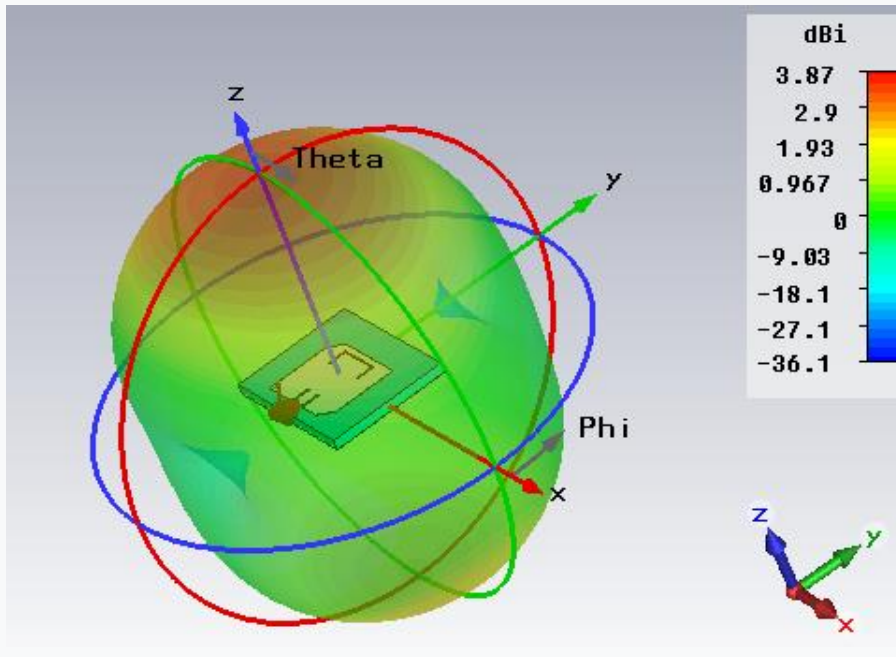


Figure III.11 Diagramme de rayonnement de l'antenne avec deux cellules DGS

La Figure III.12 illustre le diagramme de rayonnement de l'antenne initiale à la fréquence 5.7 GHz qui montre un gain maximal de 6.35 dB. La dégradation du gain est une conséquence de la miniaturisation, cependant les performances de l'antenne finale restent très satisfaisantes.

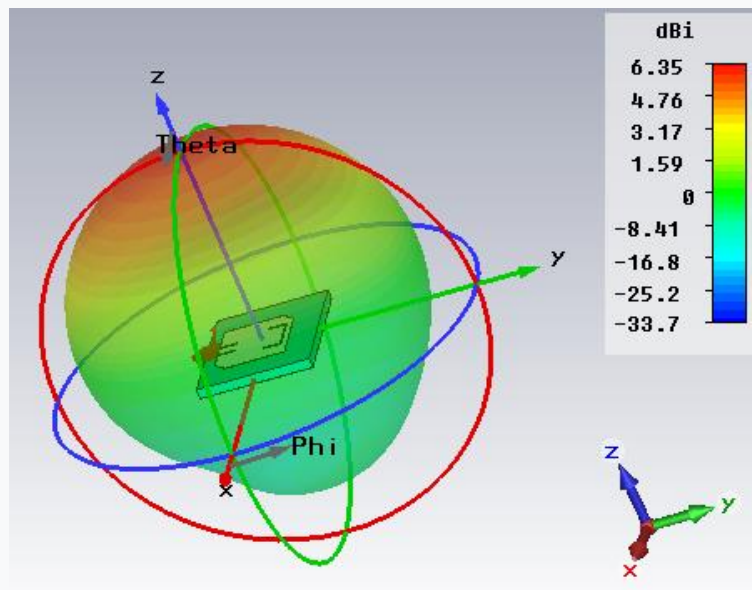
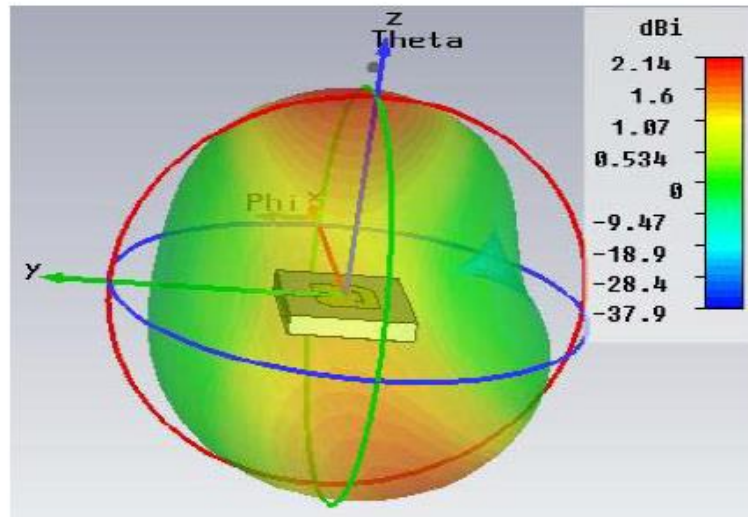
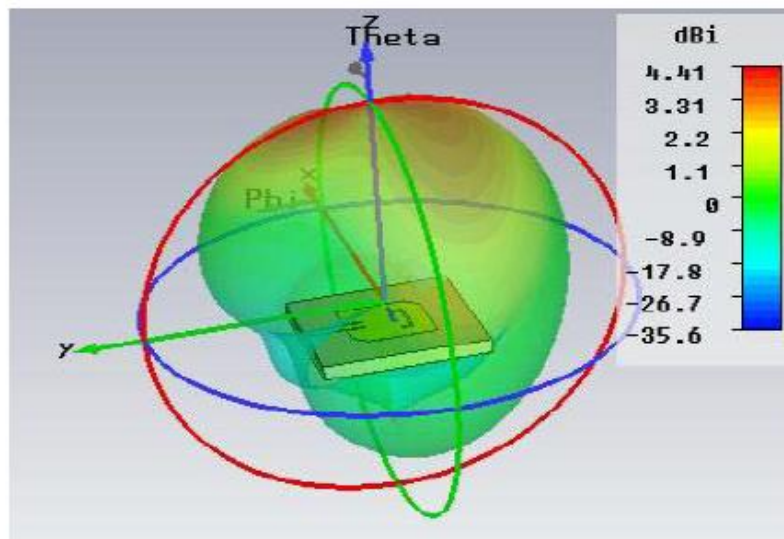


Figure III.12 Diagramme de rayonnement de l'antenne initiale

Les figures III .13 *a et b* montre les diagrammes de rayonnements de l'antenne avec et sans structure DGS respectivement, obtenus et présentés par les auteurs de l'article [32]. Les gains maximaux sont de 2.14 dB et 4.41 dB pour les deux configurations respectives. Là aussi, une dégradation du gain est constatée, causée par la miniaturisation de l'antenne.



(a)



(b)

Figure III .13 Diagrammes de rayonnement de l'antenne (a) avec les deux cellules DGS (b) sans DGS [32]

Cette première configuration nous a permis de confronter les résultats de nos simulations avec ceux présentés dans la littérature, afin de valider notre utilisation du logiciel.

Les résultats obtenus restent très comparables ce qui nous a encouragé à aller vers la simulation de nos propres configurations.

III.3.2 Conception d'un patch rectangulaire miniature et performante à structure DGS en forme de I

Dans cette partie, nous nous intéressons à une antenne microruban de forme rectangulaire destinée à servir le standard WLAN à 5.4 GHz. Cette étude est scindée en deux parties. En premier lieu, nous allons montrer l'impact d'une structure DGS sur la miniaturisation de l'antenne. Par la suite, nous allons établir l'effet du DGS sur l'élargissement de la bande passante de l'antenne.

III.3.2.a Structure initiale

La première étape de la conception consiste à déterminer les dimensions d'une antenne rectangulaire fonctionnant à la fréquence 5.4 GHz grâce aux formules mentionnées dans le tableau III.3 [17]. Nous avons choisi d'alimenter cette antenne par une ligne microruban adaptée à 50 Ohm. L'adaptation d'impédance entre cette ligne et l'antenne est assurée par une ligne quart d'onde.

Le patch et son alimentation sont déposés sur un substrat diélectrique de type FR4, de permittivité relative $\epsilon_r = 3.38$ avec une constante de perte $\tan\delta = 0.0025$ et une épaisseur $h=1.524$ mm. La géométrie de l'antenne et sa structure conçue dans l'éditeur CST Microwave Studio est présentée dans la **Figure III.14**.

Paramètre d'antenne	Equation
Largeur efficace de l'antenne w	$w = \frac{1}{2F_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Constante diélectrique effective ϵ_{eff}	$\epsilon_{\text{eff}}(W) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}$
L'extension de la longueur (ΔL)	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$

Longueur réelle (L)	$L = \frac{1}{2F_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}} - 2\Delta L$
-------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------

Tableau III.3 Les expressions analytiques pour calculer les dimensions du patch rectangulaire

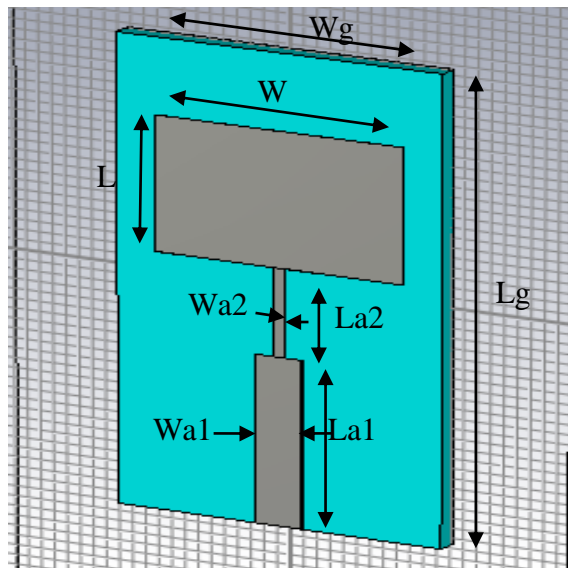
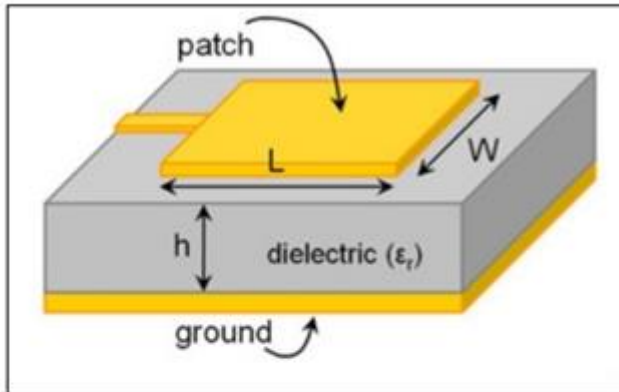


Figure III.14 Géométrie de l'antenne initiale

Nous avons eu recours à un calculateur en ligne « Microstrip Rectangle Patch Antenna Calculator » qui nous a permis de déterminer l'impédance caractéristique de la ligne quart d'onde assurant l'adaptation d'impédance (Figure II.15.a). Un autre calculateur en ligne « Microstrip Line Calculator », nous a aidé à établir les dimensions de la ligne demi onde d'alimentation correspondant à une impédance Z_0 de 50Ω , notamment sa longueur $La1$ et sa largeur $Wa1$, ainsi que les dimensions de la ligne quart d'onde $La2$ et $wa2$ (figure III.15.b et c).

Microstrip Rectangle Patch Antenna Calculator



Substrate Parameters	
Dielectric Constant(ϵ_r):	3,38
Dielectric Height (h):	1,524 mm

Resonant frequency	Physical Parameters
f_r : 5,4 GHz	Length (L): 13,612575972249024 mm
	Width (W): 18,707914457541325 mm

Input impedance	Characteristic impedance of the quarterwave line
Z_{in} : 218,499620396625 Ω	Z_{0T} : 104,5226340073347 Ω

(a)

Based on Hammerstadt – Jensen Calculations

W (Line width):	<input type="text" value="3.5"/>	unit	mm (millimètr)
h (substrate high):	<input type="text" value="1,524"/>	unit	mm (millimètr)
substrate permittivity:	<input type="text" value="3,38"/>		
t (metallization thickness):	<input type="text" value="18"/>	unit	μ m (micromètr)
Frequency (GHz):	<input type="text" value="5,4"/>	unit	GHz (GigaHert)
Electrical length (degrees):	<input type="text" value="180"/>		

Comput

Results :

Characteristic impedance (Ohm):	<input type="text" value="50,053047239170695"/>	effectiv permittivity:	<input type="text" value="2,673854150347183"/>
Physical length (meters):	<input type="text" value="0,01698222651992223"/>		

(b)

Based on Hammerstad – Jensen Calculations

W (Line width): unit: mm (millimètre) ▼

h (substrate high): unit: mm (millimètre) ▼

substrate permittivity:

t (metalization thickness): unit: µm (micromètre) ▼

Frequency (GHz): unit: GHz (GigaHertz) ▼

Electrical length (degrees):

Comput

Results :

Characteristic impedance (Ohm): effectiv permittivity:

Physical length (meter):

(c)

Figure III.15 Calculateurs en ligne (a) Dimensions du patch rectangulaire et impédance caractéristique de la ligne quart d'onde (b) Dimensions de la ligne à 50 Ω (c) Dimensions de la ligne quart d'onde

Le **tableau III. 4** présente un récapitulatif de l'ensemble des paramètres géométriques de la structure initiale.

<i>Paramètres</i>	<i>Symbole</i>	<i>Dimension (mm)</i>
Longueur du substrat	L_g	47.2
Largueur du substrat	W_g	24.4
Longueur du patch	L	13.61
Largueur du patch	W	18.70
Longueur de la ligne demi onde	$La1$	16.98
Largueur de la ligne demi onde	$Wa1$	3.5
Longueur de la ligne quart onde	$La2$	8.88
Largueur de la ligne quart onde	$Wa2$	0.78
Hauteur du substrat	H	1.524

Tableau III.4 Les paramètres géométriques de l'antenne initiale

La figure qui suit montre le résultat de simulation de la structure initiale, à savoir la représentation du coefficient de réflexion sur un intervalle de fréquences comprises entre 0 et 7 GHz.

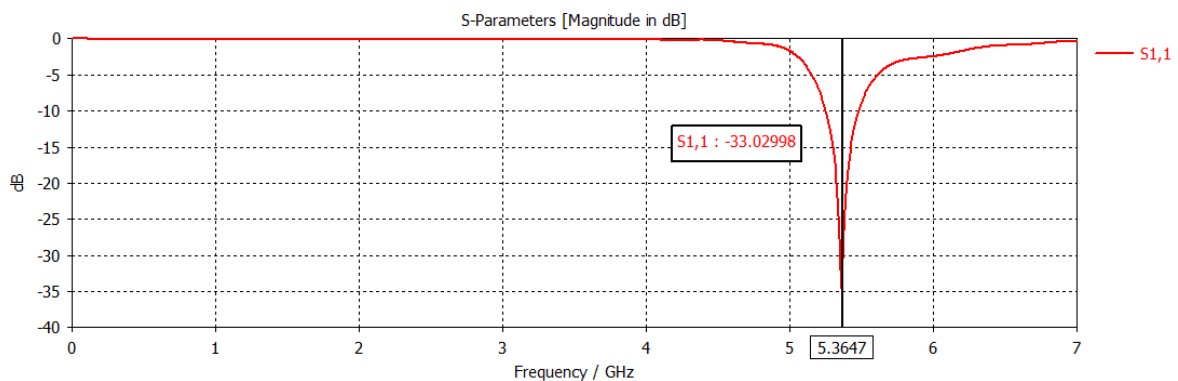


Figure III.16 Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne initiale

Nous avons obtenu une résonance à la fréquence 5.36 GHz, avec un niveau du coefficient de réflexion de -33.02 dB. La bande passante, mesurée à -10 dB, est de 238 MHz.

Le rayonnement en 3D de cette antenne est illustré par la figure III.17. Un gain maximal de 6.99 dB est réalisé.

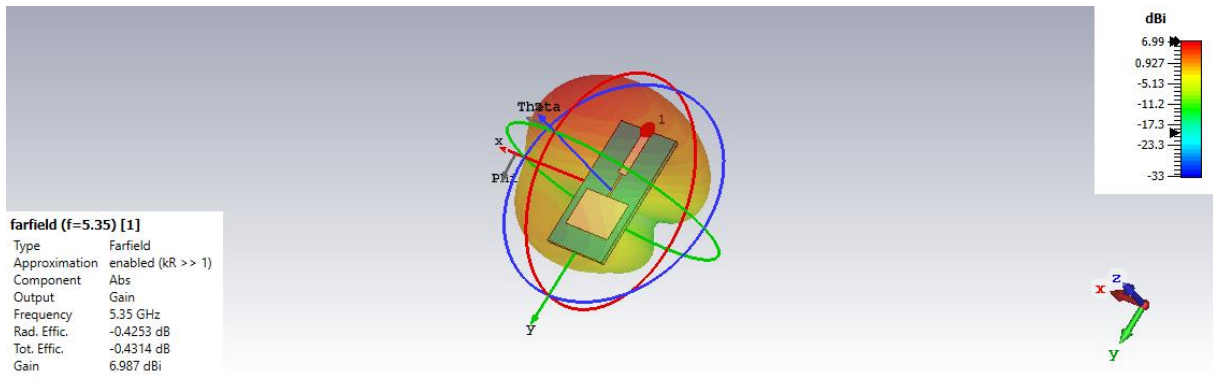


Figure III.17 Diagramme de rayonnement de l'antenne initiale

III .3 .2.b Miniaturisation de l'antenne par l'application d'une structure DGS

L'étape qui suit consiste à insérer une structure DGS au niveau du plan de masse de la structure initialement conçue. Il s'agit de graver une fente en forme de 'I' au niveau du plan de masse métallique, comme illustré par la figure III.18.a et b.

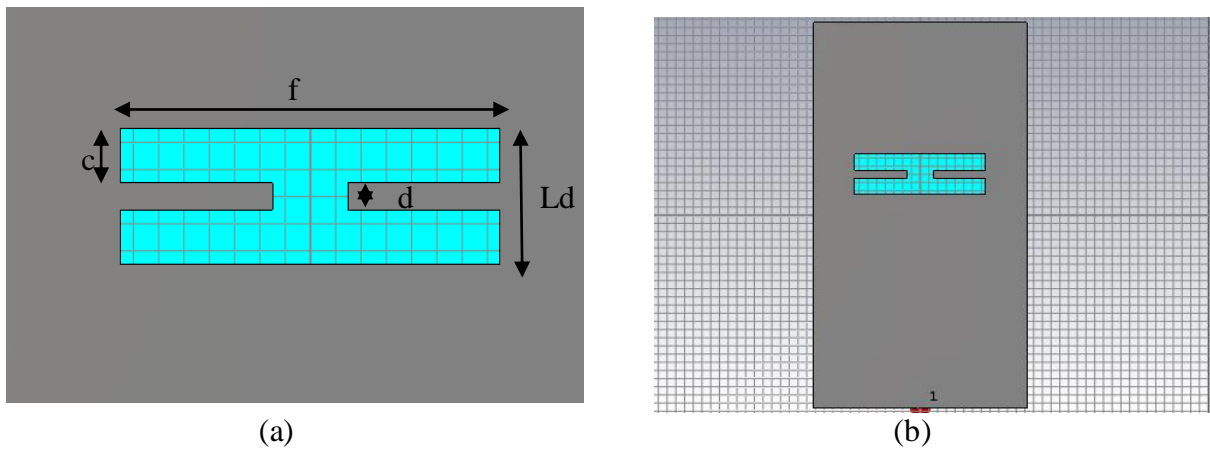


Figure III.18 Géométrie de la structure DGS appliquée à l'antenne rectangulaire

Les paramètres géométriques initiaux des fentes insérées pour former la lettre 'I' dans le plan de masse sont présentés par le Tableau III.5.

Paramètres	Dimension (mm)
F	15
Ld	10
C	2
D	3

Tableau III.5 Les paramètres géométriques des fentes insérées

La simulation de cette structure sous environnement CST Microwave Studio nous a permis d'obtenir le coefficient de réflexion illustré par la **Figure III.19**.

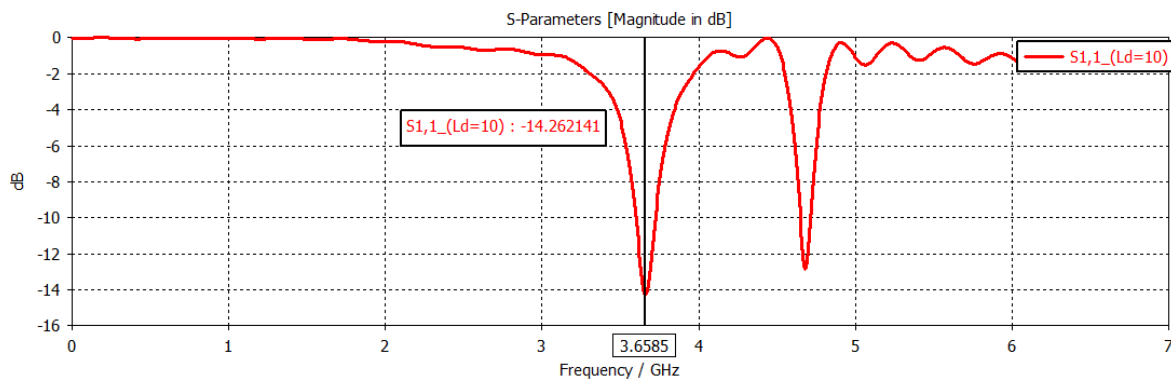


Figure III.19 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne avec DGS

D'après cette courbe, nous avons une résonance à 3.65 GHz avec un coefficient de réflexion S11 à -14.26 dB. Nous allons procéder à une étude paramétrique sur le paramètre de longueur Ld, en le faisant varier de 4 mm à 10 mm en avançant avec un pas de 1mm. Les autres paramètres restent inchangés. Les résultats obtenus après simulation sont illustrés par la **Figure III.20**.

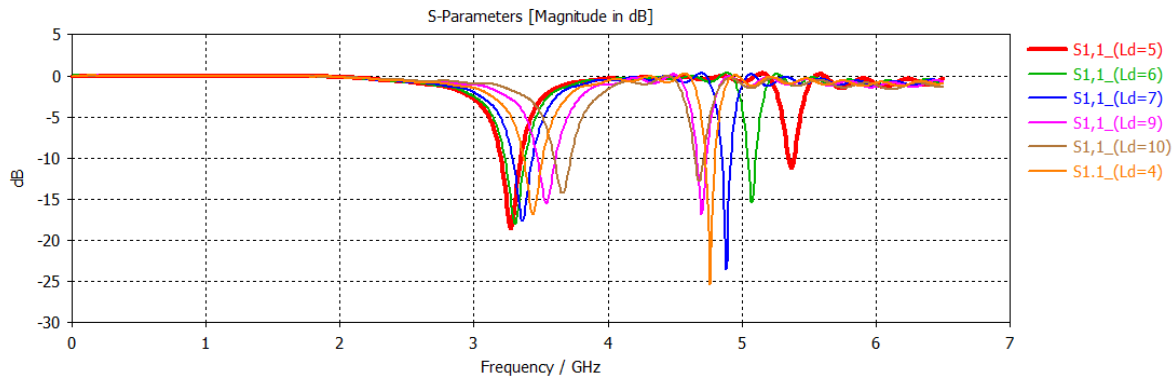


Figure III.20 Etude paramétrique sur la longueur Ld.

Le meilleur compromis entre adaptation d'impédance et décalage de la fréquence de résonance est réalisé pour la valeur Ld = 5 mm. Dans ce cas, une résonance autour de la fréquence 3.28 GHz avec un coefficient de -18.30 dB sont obtenus, tel que le montre la figure III.21.

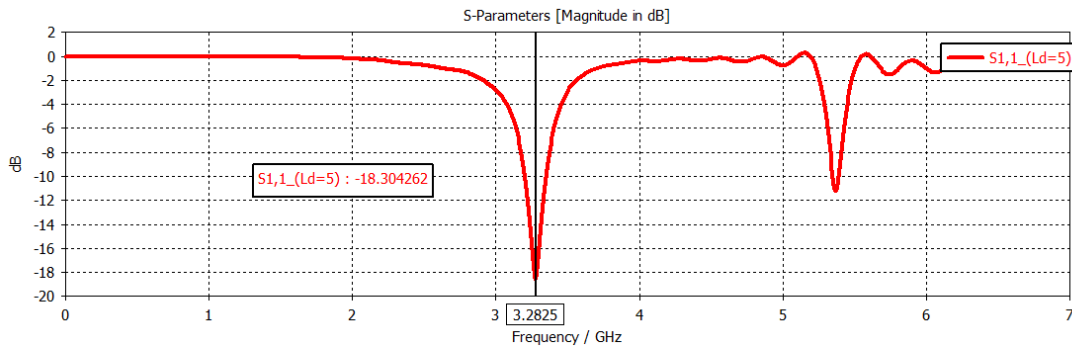


Figure III.21 Coefficient de réflexion après changement des paramètres géométriques

Nous fixons à présent le paramètre L_d à 5 mm et nous allons procéder à une étude paramétrique sur le paramètre de largeur f pour des valeurs allant de 15 à 19 mm. Les résultats obtenus après simulation sont illustrés par la Figure III.22.

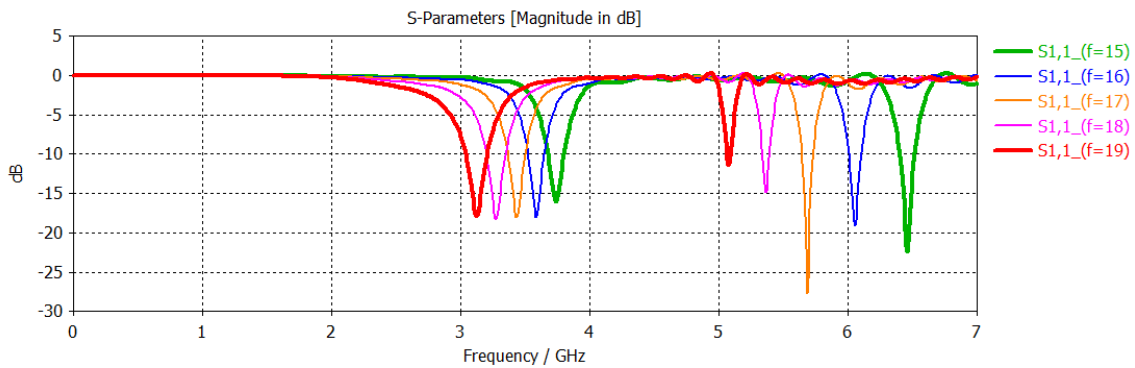


Figure III.22 Etude paramétrique sur la distance f

D'après cette étude, nous pouvons constater que lorsque le paramètre f augmente, le décalage de la première résonance s'accroît vers la gauche. Ce décalage exprime que l'antenne résonne à une fréquence plus petite que celle qu'elle devrait avoir avec ses dimensions, l'objectif de miniaturisation est alors atteint. Nous savons cependant que plus la taille de l'antenne est réduite et plus ses performances se détériorent. Il faut donc faire un compromis entre taille et performances.

Nous considérons les deux cas où $f = 15$ mm et $f = 19$ mm. Pour chacun de ces cas, nous allons miniaturiser l'antenne afin de revenir vers la fréquence du standard désiré WLAN 5.4 GHz. Des résonances aux fréquences 3.84 et 3.12 GHz sont obtenus pour ces deux cas de figure, avec des niveaux du paramètre S_{11} de -16.33 dB et -17.76 dB respectivement (Figure III.23 et II.24).

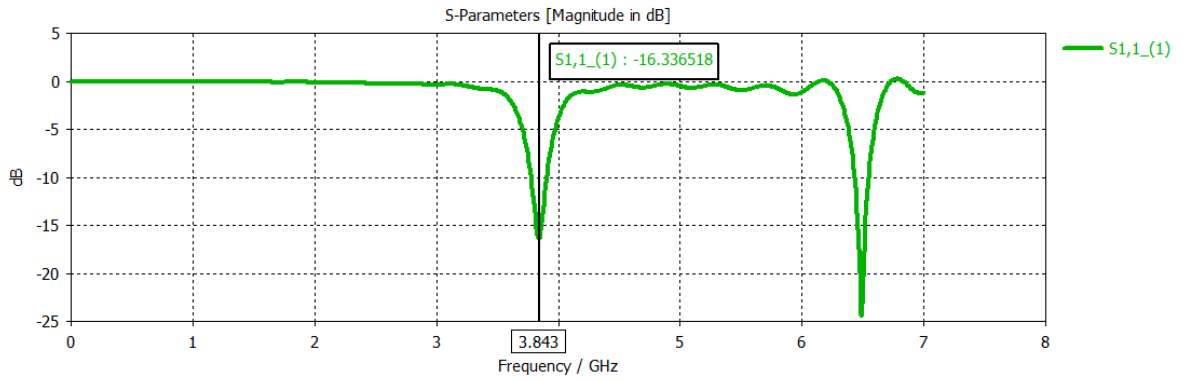


Figure III.23 Coefficient de réflexion de l'antenne avec DGS pour $f = 15$ mm

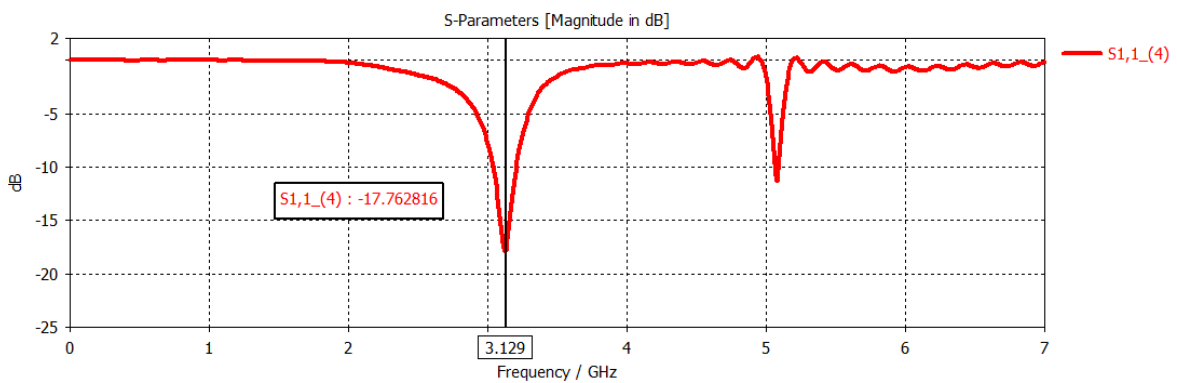


Figure III.24 Coefficient de réflexion de l'antenne avec DGS pour $f = 19$ mm

❖ Miniaturisation de l'antenne patch, cas où $f = 15$ mm

Nous allons réduire l'antenne en diminuant ses dimensions afin de revenir à la fréquence de départ, qui est 5.4 GHz. Les valeurs de la largeur et la longueur du patch qui nous ont permis d'atteindre cet objectif sont $W = 6$ mm et $L = 5.5$ mm. La figure suivante montre la géométrie de l'antenne après réduction de sa taille.

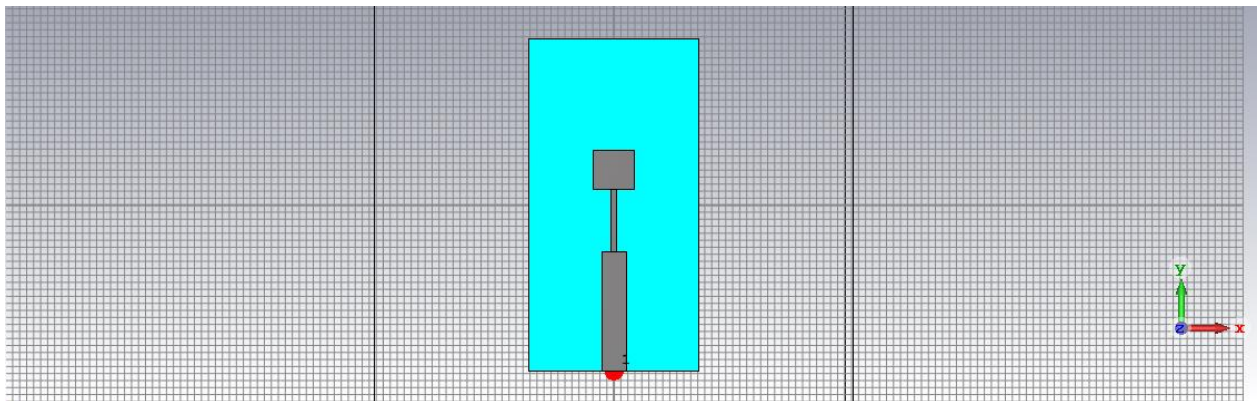


Figure III.25 Géométrie de l'antenne après miniaturisation

La longueur du patch est passée de 13.61 mm à 5.5 mm, soit un taux de réduction égal à 59.59%. La simulation de cette structure après la réduction de la taille de l'antenne a permis de visualiser la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, illustré par la **Figure III.26**. D'après cette représentation, une bande passante de 397.32 MHz est obtenue autour de la fréquence de résonance 5.4 GHz, avec un niveau de S_{11} de -16.32 dB. Nous remarquons également l'apparition d'une seconde résonance à la fréquence 6.9 GHz avec un coefficient de réflexion de -13.9 dB.

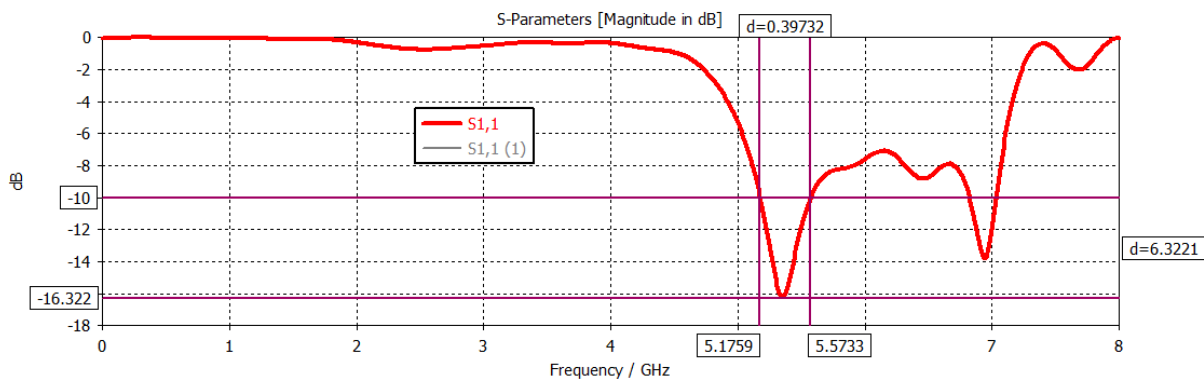


Figure III.26 Le coefficient de réflexion après miniaturisation de l'antenne

A partir de la **Figure III.27** dans laquelle est illustré le diagramme de rayonnement de l'antenne miniature, nous pouvons constater un gain maximal de 4.67 dB. Nous remarquons une nette diminution du gain de l'antenne, en comparaison avec l'antenne initiale.

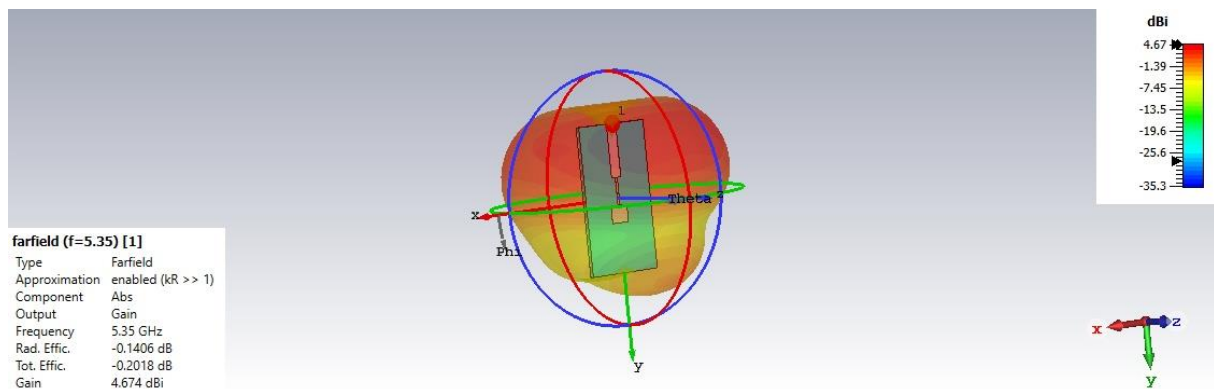


Figure III.27 Diagramme de rayonnement du gain de l'antenne miniaturisée ($f = 15\text{mm}$)

❖ Miniaturisation de l'antenne patch, cas où $f = 19\text{ mm}$

Nous procédons de la même manière, en réduisant les dimensions de l'antenne afin de revenir à la fréquence 5.4 GHz (Figure III.28). Les dimensions qui nous ont permis

d'atteindre cet objectif sont $W = 3$ mm et $L = 4$ mm. Soit un taux de réduction de longueur égal à 70.61%.

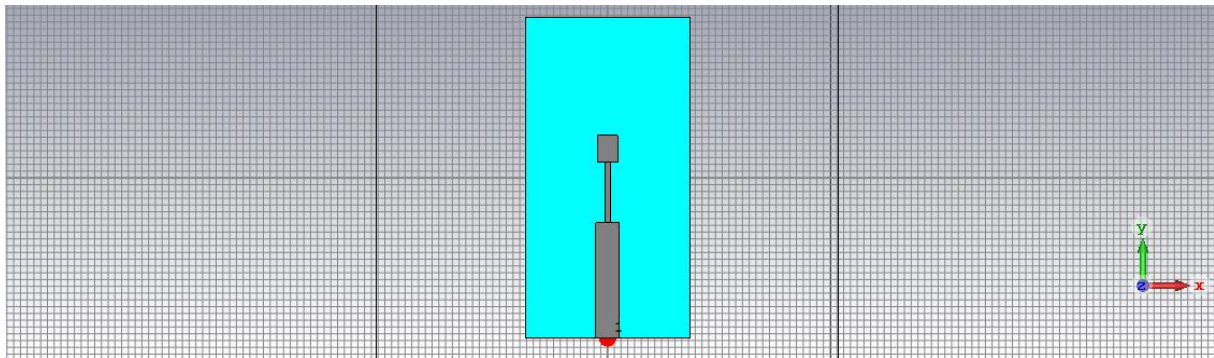


Figure III.28 Géométrie de l'antenne après sa miniaturisation.

La simulation de cette structure sous environnement CST Microwave Studio nous a permis d'obtenir la variation fréquentielle du coefficient de réflexion, illustrée par la **Figure III.29**.

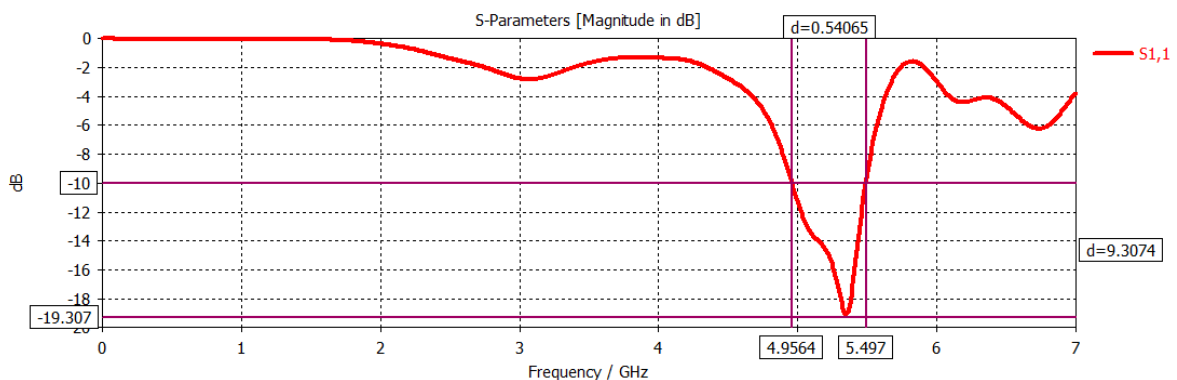
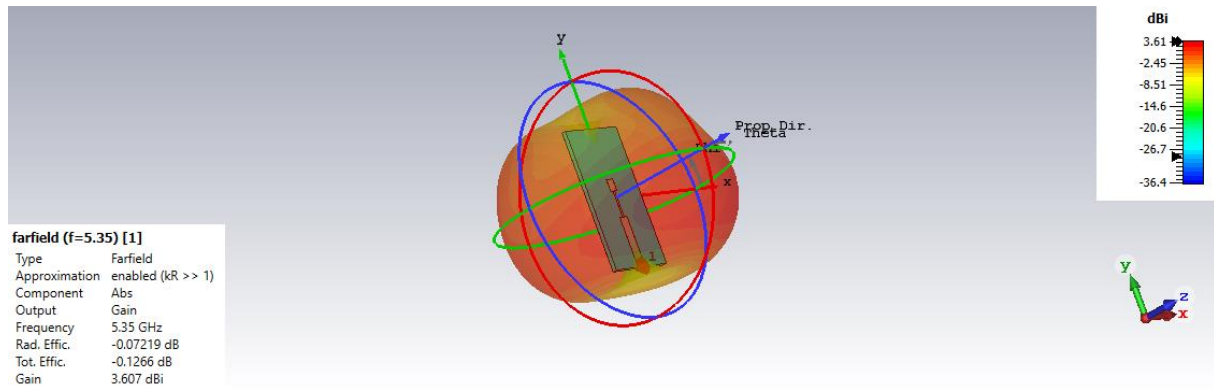


Figure III.29 le coefficient de réflexion après la miniaturisation d'antenne.

Nous avons obtenu une adaptation à la fréquence 5.34 GHz, avec un taux du coefficient de réflexion de -19.30 dB. La bande passante, mesurée à -10 dB, s'étend de 4.95 à 5.49 GHz, soit une bande passante de 540 MHz.

La figure III.30 montre le Diagramme de rayonnement de l'antenne à la fréquence 5.4 GHz après la réduction de sa taille. Un gain maximal de 3.61 dB est réalisé. Il est vrai que lorsque le taux de miniaturisation augmente le gain de l'antenne diminue inévitablement. Cependant les performances obtenues pour les deux cas étudiés restent très intéressantes en termes de gain et de bande passante.



La Figure III.30 Diagramme de rayonnement de l'antenne miniature pour $f = 19$ mm

L'introduction d'une forme DGS au niveau du plan de masse a eu pour conséquence de réduire les dimensions de l'antenne, tout en maintenant un gain très acceptable et une bande passante très intéressante. La modification des dimensions de la forme DGS interagit directement sur le comportement de l'antenne et sur son taux de miniaturisation.

III .3 .2.c Elargissement de la bande passante de l'antenne initiale par l'application d'une structure DGS

Ici, nous avons gardé la forme de la fente DGS insérée au niveau du plan de masse. Nous nous sommes contenté de modifier certains de ses paramètres géométrique, à savoir, les paramètres $L_d = 17$ mm, $f = 10$ mm et $C = 5$ mm (Figure III.31).

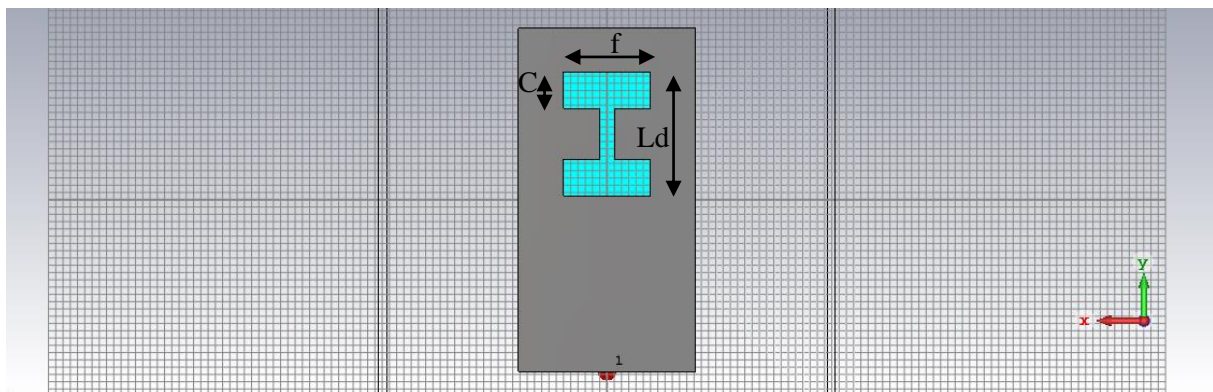


Figure III.31 Géométrie de la structure DGS en forme de I

La Figure III.32 représente les résultats de simulation du coefficient de réflexion, obtenus sous CST après les changements apportés sur les dimensions de la structure DGS.

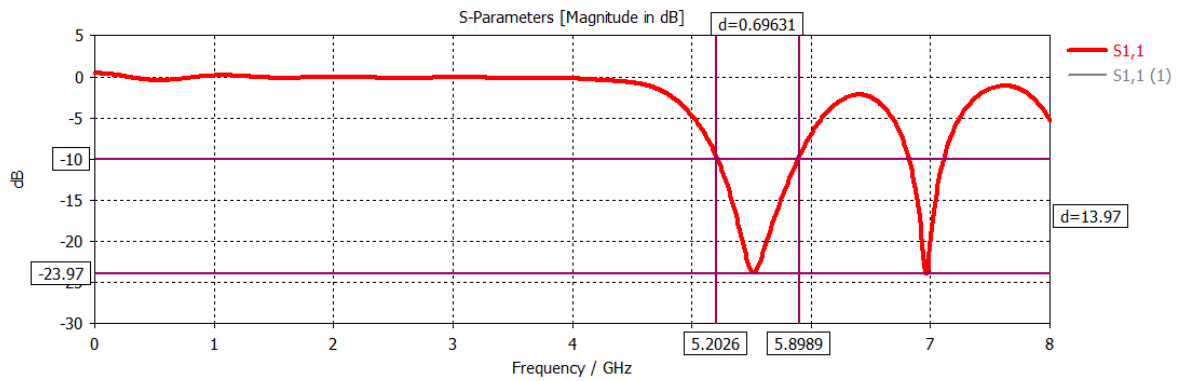


Figure III.32 Coefficient de réflexion pour les nouveaux paramètres géométriques de la structure DGS

Nous avons obtenu une adaptation à la fréquence 5.37 GHz, avec un coefficient de réflexion de -23.97 dB, avec une bande passante très intéressante de 696 Mhz, en comparaison avec la bande passante de la structure initiale, qui était de 238 Mhz. Nous pouvons constater que la présence du DGS a permis une nette amélioration la bande passante.

Le logiciel CST nous permet également de visualiser le rayonnement de notre antenne. Une représentation en 3D est illustrée par la Figure III.33. Nous constatons un gain maximal égal à 6.42 dB.

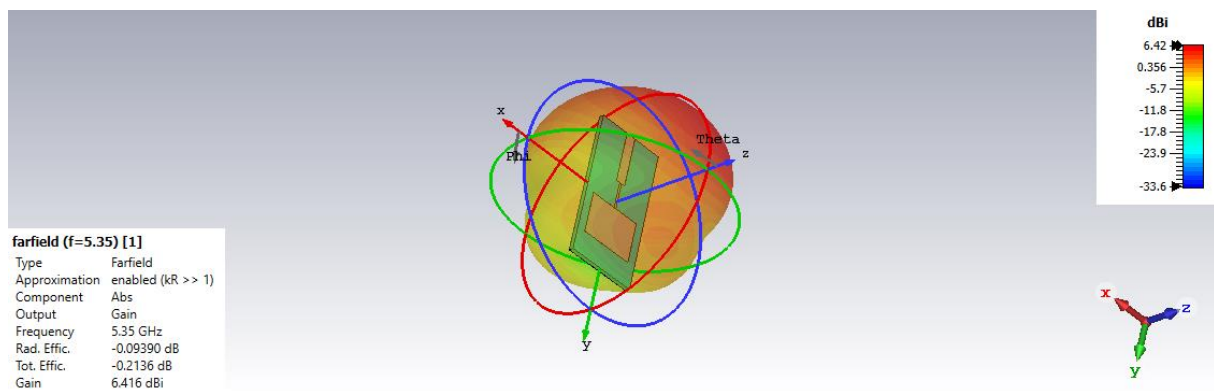


Figure III.33 Diagramme de rayonnement de l'antenne à bande passante élargie

L'objectif de cette étude était de démontré l'impact de la présence d'une structure DGS non pas sur la miniaturisation de l'antenne, comme c'était le cas dans le paragraphe précédent, mais plutôt sur l'élargissement de la bande passante. Nous avons réussi à améliorer la bande passante de façon assez conséquente, tout en gardant le gain de l'antenne relativement stable, si nous comparons ces performances avec l'antenne initialement conçue.

III.3.3 Conception d'un patch circulaire à structure DGS en forme d'anneaux

Nous nous intéressons à présent à une autre forme de patch microruban. Il s'agit d'une antenne microruban de forme circulaire destinée à servir le standard Wi-Fi 2.4 GHz. Nous explorons par cette étude l'effet d'une structure DGS en forme d'anneaux au niveau du plan de masse sur le comportement multibande de l'antenne microruban.

III.3.3.a Structure initiale

La structure initiale est une antenne patch circulaire déposée sur un substrat diélectrique de type FR-4, d'épaisseur $h = 1.6 \text{ mm}$, ayant une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$. Le diamètre de l'antenne est $r = 17.75 \text{ mm}$, il a été déterminé à partir des équations (III.1) et (III.2), de façon à obtenir une résonance à la fréquence $f_r = 2.4 \text{ GHz}$ pour servir le standard Wi-Fi.

$$r = \frac{F}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left(\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right) \right] \quad (\text{III.1})$$

$$F = \frac{8.791 \cdot 10^9}{f_r (\text{en HZ})} \quad (\text{III.2})$$

L'antenne est alimentée par une ligne microruban à 50 Ohms de longueur $l_a = 17 \text{ mm}$ et de largeur $W_a = 3 \text{ mm}$, telle que le présente la figure III.34.a. Nous avons été contraints par la suite d'insérer des encoches (Figure III.34.b) pour assurer l'adaptation d'impédance.

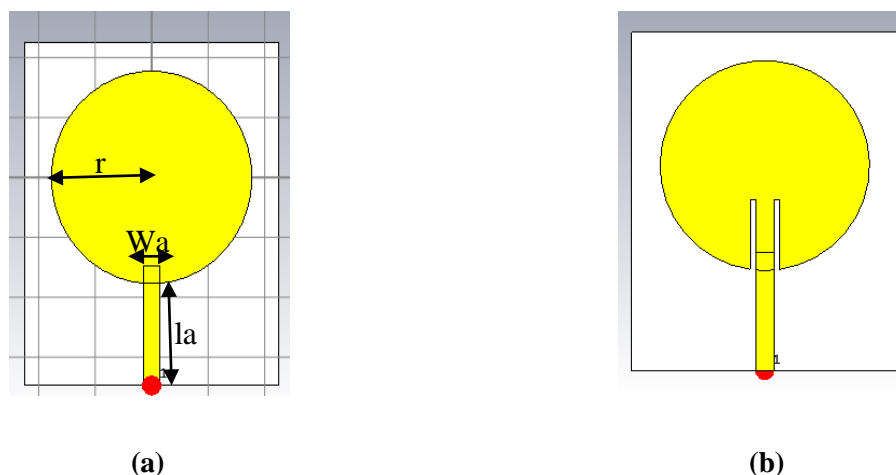


Figure III.34 Géométrie de l'antenne initiale (a) Antenne sans des encoches (b) Antenne avec encoches

La simulation de la structure initiale sans encoches sous CST a donné lieu au coefficient de réflexion représenté par la **figure III.35**. Une résonance à la fréquence 2.26 GHz avec un niveau du paramètre S_{11} de -6.05 dB sont obtenus.

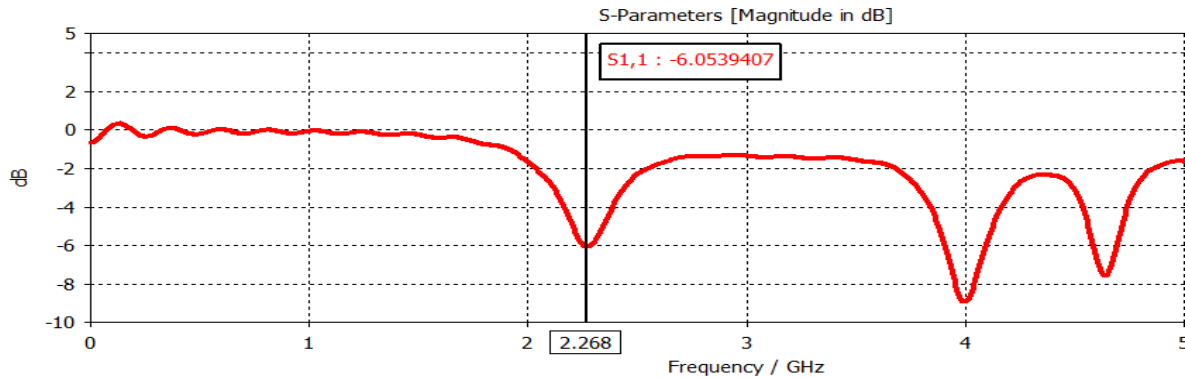
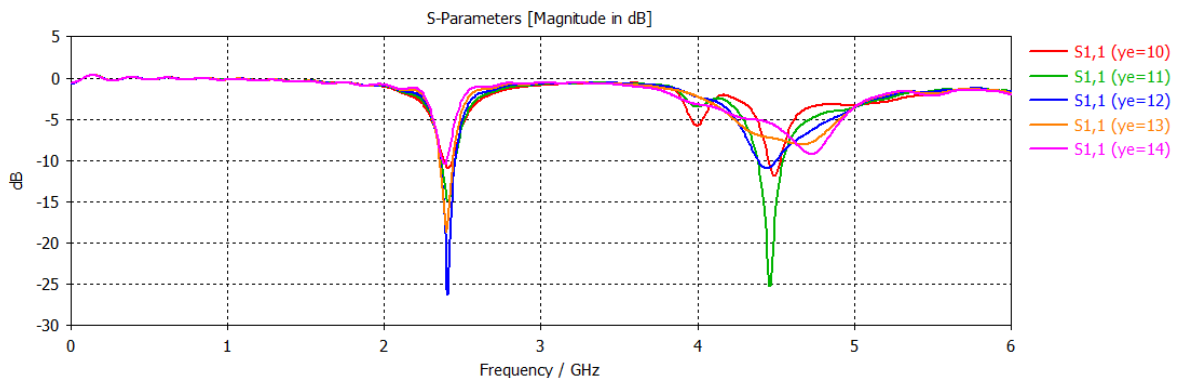


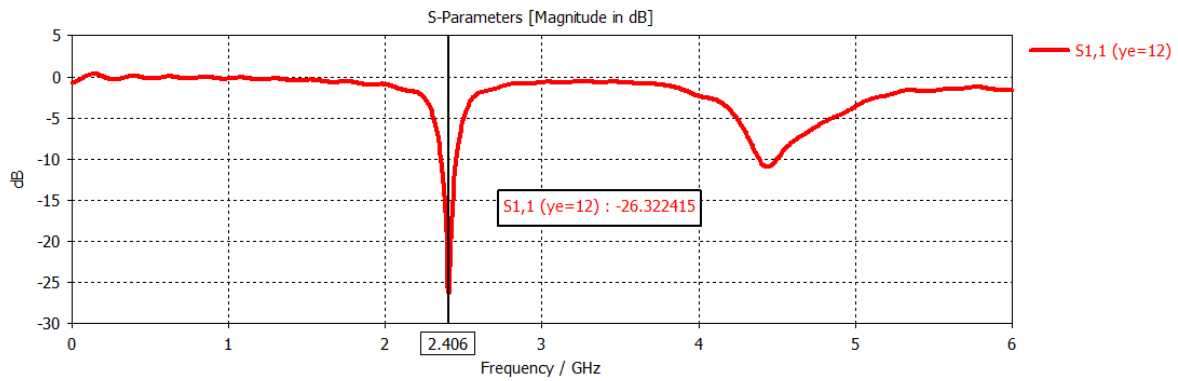
Figure III.35 Coefficient de réflexion de la structure initiale sans des encoches

Le niveau d'adaptation à la résonance étant très bas, nous avons appliqué une des techniques d'adaptation d'impédance, qui consiste à insérer des encoches de longueur y_e et de largeur x_e . Une étude paramétrique par rapport à la longueur y_e est entamée. Des valeurs de 10 mm à 14 mm avec un pas de 1 mm sont prises en considération. La valeur de x_e est maintenue à 1 mm.

Les résultats de cette étude sont représentés dans la figure III.36.a. Nous pouvons constater que la meilleure adaptation est obtenue pour une valeur de $y_e = 12$ mm. La variation fréquentielle du coefficient de réflexion correspondant à cette valeur est illustrée dans la figure III.36.b. L'antenne résonne à la fréquence 2.4GHz avec un S_{11} égal à -26.32dB.



(a)



(b)

Figure III.36 Coefficient de réflexion de la structure à encoches (a) Etude paramétrique sur la longueur des encoches y_e (b) Résultat ayant la meilleure adaptation

La figure III.37 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne en 3D. Un gain maximal de 2 dB est réalisé.

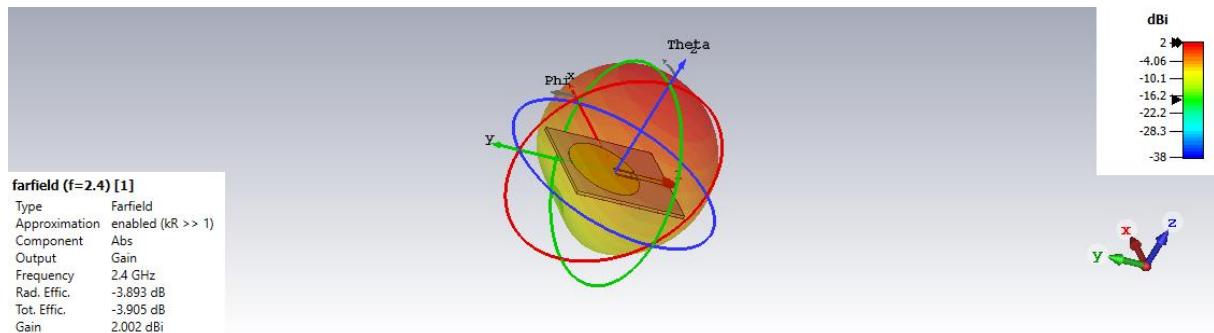


Figure III.37 Diagramme de rayonnement de l'antenne initiale avec encoches

III .3.3.b Antenne Circulaire avec structure DGS en forme d'anneaux

Dans cette structure nous avons inséré deux fentes en forme d'anneaux circulaires au niveau du plan de masse pour obtenir une structure DGS. Le plus grand des anneaux possède un rayon extérieur S et une épaisseur égale à 0.5 mm. Le paramètre yy représente l'espace ou le gap qui existe entre les deux anneaux, comme le montre la figure III.38.

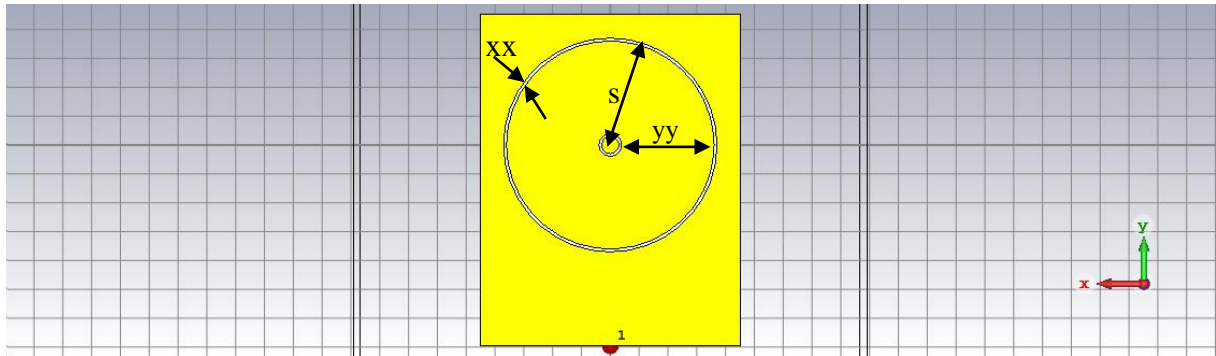


Figure III.38 Géométrie du plan de masse avec structure DGS

Les figures III.39.a et III.39.b illustrent deux études paramétriques effectuées pour plusieurs valeurs du rayon S et du gap yy respectivement. Ces figures montrent l'apparition de plusieurs résonances, causées par l'application de la structure DGS dans le plan de masse, donnant à l'antenne un caractère multibande.

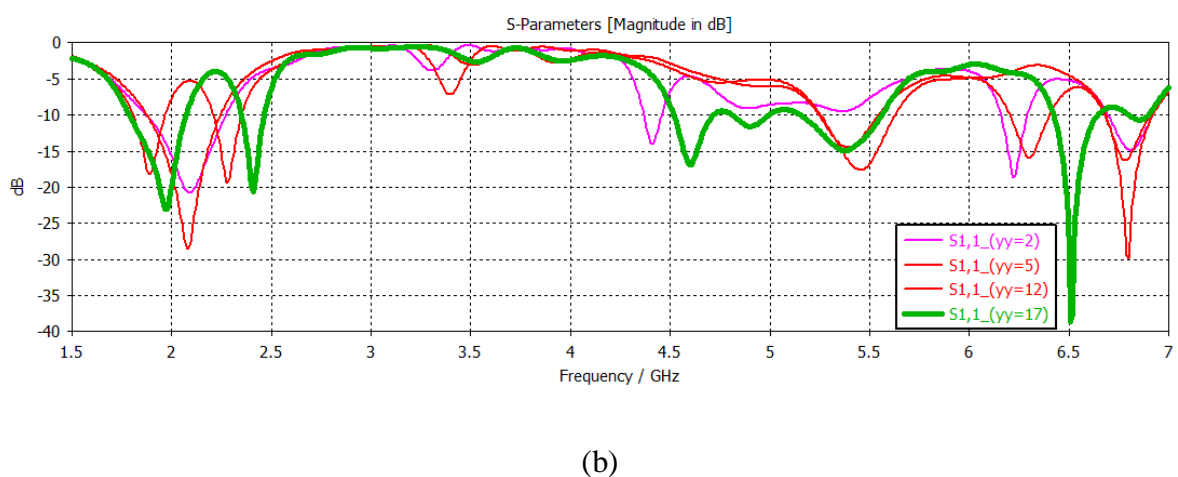
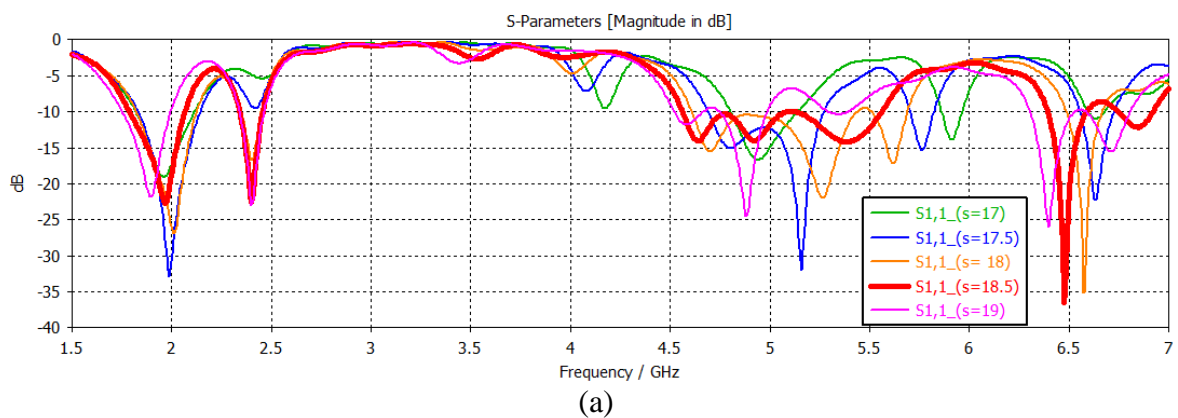


Figure III.39 Résultats de l'étude paramétrique (a) sur le rayon S (b) sur le gap yy

Ces figures montrent que la variation de ces paramètres peut modifier les valeurs des fréquences de résonance, ainsi que le taux d'adaptation d'impédance à chaque résonance. Avoir un caractère multibande est intéressant, dans le sens où l'antenne pourrait servir plusieurs applications en même temps, encore faut il avoir des résonances qui correspondent à des standards existants.

Nous avons choisi les valeurs $S = 18.5$ mm et $yy = 17$ mm, pour lesquels la variation du coefficient de réflexion est telle que le montre la figure III.39. Cette structure aura des résonances aux fréquences 1.95 GHz, 2.4 GHz, 4.6 GHz, 4.9 GHz, 5.4 GHz 6.5 GHz et 6.8 GHz avec des niveaux du coefficient de réflexion de -22.6 dB, -22.5 dB, -13.72 dB, -13.7 dB, -14.1 dB, -36.5 dB et -12.2 dB respectivement.

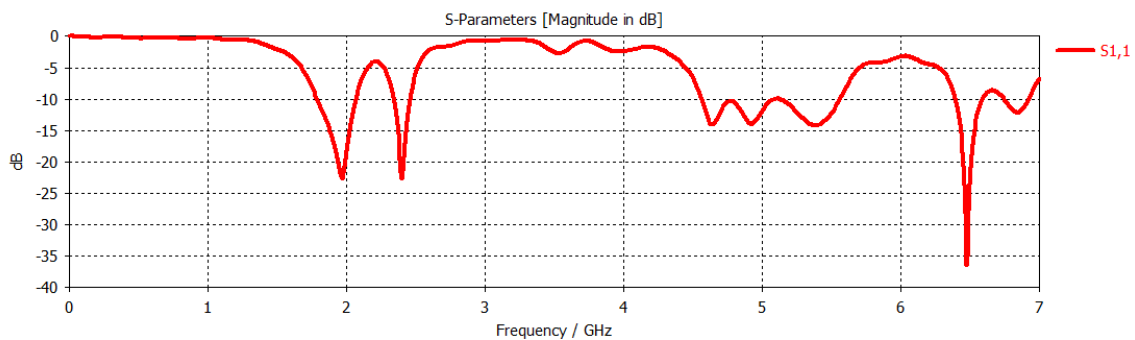
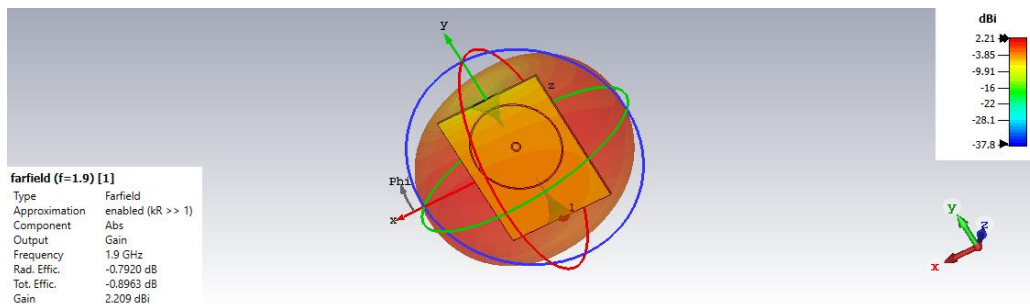


Figure III.40 Coefficient de réflexion de la structure avec DGS avec $S = 18.5$ mm et $yy = 17$ mm

Cette antenne pourrait principalement servir le standard mobile PCS1900, le Wi-Fi 2.4 GHz et le standard WLAN 5.4 GHz. Les bandes passantes autour de ces trois résonances sont de 294 MHz, 113 MHz et 407 MHz respectivement.

La figure III.41 illustre les diagrammes de rayonnement de l'antenne avec structure DGS aux fréquences 1.9 GHz, 2.4 GHz et 5.4 GHz. Les gains maximaux pour chaque cas sont de 2.21 dB, 2.69dB et 1.82dB.



(a)

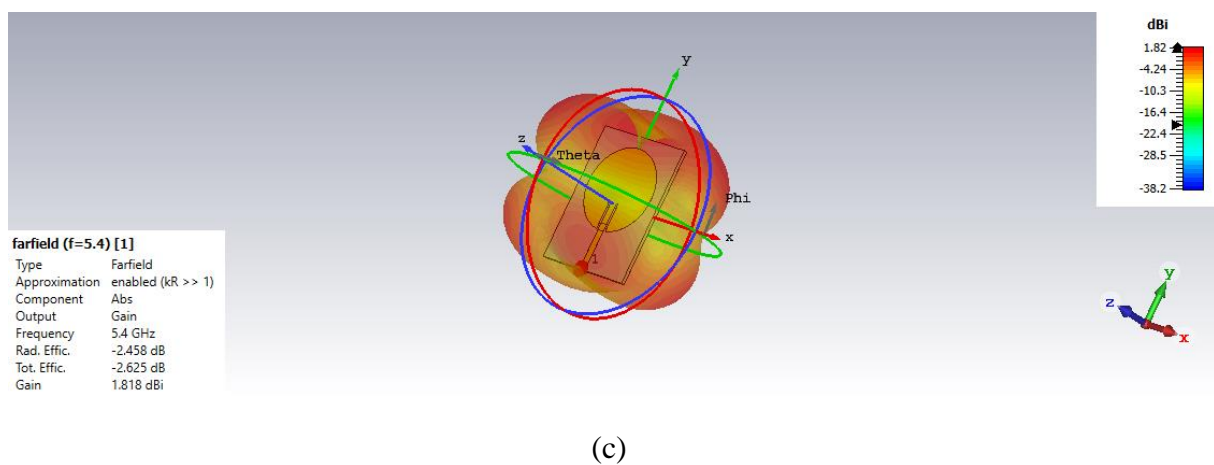
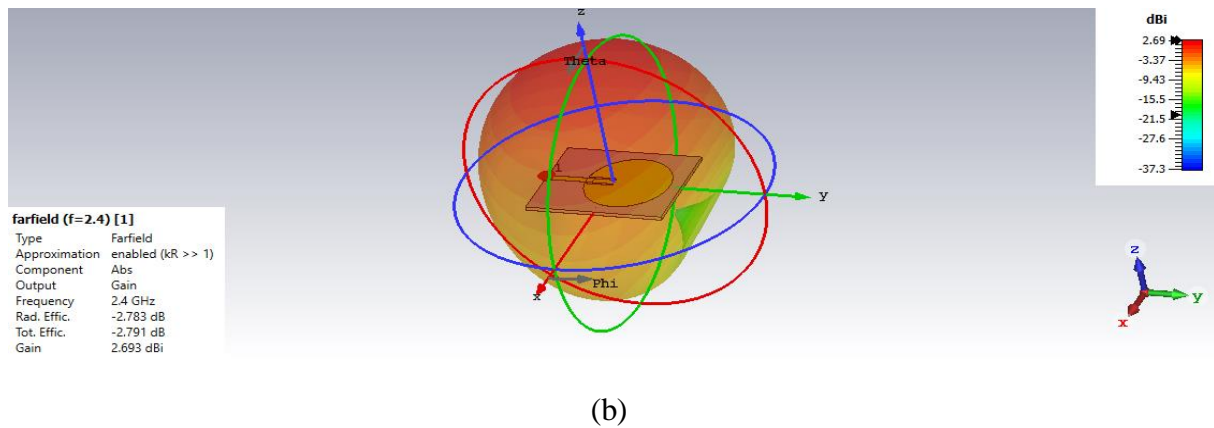


Figure III.41 Rayonnement en 3D de l'antenne avec DGS aux fréquences (a) 1.9 GHz (b) 2.4 GHz et (c) 5.4 GHz

Dans cette étude, nous avons pu constater l'impact de l'insertion d'une structure DGS sur le fonctionnement multibande d'une antenne microruban de forme circulaire. L'antenne conçue pourrait être exploitée pour servir les standards PCS, Wi-Fi et WLAN avec des bandes passantes très intéressantes et des gains acceptables.

III.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception et à la simulation d'antennes microrubans miniaturisées intégrant une structure DGS (Defected Ground Structure), dans le but d'améliorer leurs performances. Nous avons tout d'abord présenté le logiciel de simulation électromagnétique CST Studio Suite, un outil indispensable à cette étude. Par la suite, les techniques précédemment abordées ont été mises en œuvre pour concevoir et simuler trois types d'antennes microrubans, chacune ayant une géométrie différente et intégrant une structure DGS. Ces antennes sont destinées à répondre à divers standards de communication,

notamment les normes Wi-Fi, WLAN et PCS. Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide de CST Microwave Studio.

La première antenne étudiée s'inspire d'un modèle issu de la littérature. Cette approche nous a permis de comparer nos résultats de simulation avec ceux publiés dans l'article de référence. La concordance observée entre les deux ensembles de résultats a validé notre maîtrise de l'outil de simulation, nous ouvrant ainsi la voie vers la conception de nouvelles antennes.

L'étude des deux autres structures nous a permis de démontrer l'impact de l'insertion de défauts dans le plan de masse sur les caractéristiques et les performances de l'antenne. Des structures DGS en forme de lettre "I" et en anneaux ont été implémentées. Grâce à ces techniques, nous avons pu atteindre une miniaturisation significative de l'antenne, avec des taux de réduction intéressants, tout en élargissant la bande passante et en obtenant un fonctionnement multibande, sans compromettre les performances en gain, restées tout à fait acceptables.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des antennes, tout en nous familiarisant avec l'utilisation et la maîtrise du logiciel CST Microwave Studio. Cet outil nous a servi à concevoir et à analyser le comportement radiofréquence d'une antenne microruban miniature et performante.

Références

- [1] M. Ayad, K. Saoudi, T. E. A. Alharbi, M. S. Alzaidi, M. Benziane, S. Mouassa, et S. M. Ghoneim, "Design and Study of a Microstrip Patch Antenna for GPS Application," *Telecommunication Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 1145–1151, août 2022. doi: 10.18280/ts.390406.
- [2] M. Karahan, M. Inal, A. Dilmen, F. Lacinkaya, A. N. Akay, et C. Kasnakoglu, "Microstrip Patch Antenna Design at 10 GHz for X Band Applications," *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 384–393, 2024. doi: 10.59324/ejtas.2024.2(1).33.
- [3] G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas," *Proc. of Third Symp. on USAF Antenna Research and Development Program*, 18–22 oct. 1953.
- [4] D. M. Pozar et D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, IEEE Press, 1995.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4e éd., John Wiley & Sons, 2016.
- [6] C. R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, Wiley-IEEE Press, 2001.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4e éd., Wiley, 2012.
- [8] J. R. James et P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [9] C. Luxey, R. Staraj, G. Kossivas et A. Papernik, "Procédure de conception d'un patch rectangulaire," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. E3310, 10 mai 2007.
- [10] M. A. Saadi et C. Şeker, "Overview on Feeding Techniques of Microstrip Patch Antenna," *Journal of Millimeterwave Communication, Optimization and Modelling*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, juin 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.jomcom.org/index.php/1/article/view/37>.
- [11] M. Tareq et R. Ahmed, "Design and Performance Analysis of Coaxial Probe-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna (RMPA) for IEEE 802.11p Standard," *IUBAT Journal of Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://iubat.edu/design-and-performance-analysis-of-coaxial-probe-fed-rectangular-microstrip-patch-antenna-rmpa-for-ieee-802-11p-standard/>.
- [12] S. Sharma, C. C. Tripathi et R. Rishi, "Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 28, pp. 1–16, 2017.
- [13] T. J. Cui, D. Smith, et R. Liu, Éd., *Metamaterials*, Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-0573-4.
- [14] J. R. James et P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [15] S. Toukali et K. Yaalaoui, "Mémoire de fin d'étude: Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées," Université de Bordj Bou-Arredj, Algérie, 2021.

- [16] "Microstrip Patch Antenna," GeeksforGeeks. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.geeksforgeeks.org/microstrip-patch-antenna/>.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3e éd., Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2005.
- [18] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian, et T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 1, pp. 86–93, jan. 2001. doi: 10.1109/22.910866.
- [19] A. K. Ashwini, M. V. Kartikeyan et A. Patnaik, "Defected ground structure in the perspective of microstrip antennas: A review," *Fréquence*, vol. 64, no. 1, pp. 86–91, jan. 2010.
- [20] F. Yang et Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, Cambridge University Press, 2009.
- [21] Y. Qian, D. Sievenpiper, K. Fujimoto, G. Tangonan, et T. Itoh, "A uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 403–405, nov. 2000. doi: 10.1109/75.887958.
- [22] C. S. Kim, J. S. Park, D. Ahn, et J. B. Lim, "A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 131–133, avr. 2000.
- [23] A. Bellal et A. Benterki, "Les fractals et leur géométrie," Mémoire de Master 2 en mathématiques, Université Dr. Yahia Fares de Médéa, Algérie, 2011.
- [24] Y. Horri et M. Tsutsumi, "Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 9, pp. 13–15, jan. 1999.
- [25] "2017 2nd IEEE International Conference On Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT)," 19–20 mai 2017, Inde.
- [26] V. M. Belekar, P. Mukherji et M. Pote, "Compact defected ground structure microstrip patch antenna for Wi-Fi applications," *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 13, no. 1, pp. 53–60, 2020.
- [27] R. Er-rebyiy, J. Zbitou, A. Tajmouati, M. Latrach, A. Errkik et L. El Abdellaoui, "Design and analysis of a microstrip patch antenna for wireless communication applications," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–7, 2019.
- [28] F. Chetouah, *Thèse de Doctorat: Conception et optimisation d'antennes micro-ondes pour applications sans fil*, Université de Tlemcen, Algérie, 2018.
- [29] D. O. Sakle et M. P. Deshmukh, "Compact defected ground structure microstrip patch antenna for Wi-Fi applications," *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 13, no. 1, pp. 53–60, 2020.

- [30] Dassault Systèmes, *SIMULIA CST Studio Suite*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>.
- [31] T. Weiland, "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields," *AEÜ – International Journal of Electronics and Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 116–120, 1977.
- [32] H. Elftouh, N. A. Touhami, M. Aghoutane, S. El Amrani, A. Tazon et M. Boussouis, "Design and analysis of a microstrip patch antenna for wireless communication systems," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–7, 2019.
- [33] D. O. Sakle et M. P. Deshmukh, "Compact defected ground structure microstrip patch antenna for Wi-Fi applications," *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 17, no. 4, pp. 183–187, nov. 2024. doi: [10.14513/actatechjaur.00759](https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00759).

Conclusion générale

Le domaine des télécommunications a connu une croissance exponentielle au cours des dernières décennies, entraînant une demande accrue pour des dispositifs de communication plus compacts et plus performants. Dans ce contexte, l'antenne, élément clé de tout système de communication, se doit d'être à la fois efficace et miniaturisée. Les antennes microrubans, bien que présentant des avantages indéniables en termes de compacité et de facilité d'intégration, souffrent de limitations en termes de bande passante, de gain et de taille. Pour répondre à ces défis, l'intégration de structures à défaut dans le plan de masse (DGS) s'est révélée être une solution efficace. Ces structures permettent d'améliorer les performances des antennes, notamment en élargissant la bande passante, en générant de nouvelles résonances et en réduisant la taille de l'antenne.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le logiciel CST Microwave Studio pour concevoir et simuler des antennes microrubans performantes destinées à des applications telles que le Wi-Fi, WLAN et PCS. Ce travail a permis d'explorer en profondeur la conception et la simulation d'antennes microrubans à structures DGS, en réponse aux défis posés par la miniaturisation ou l'amélioration des performances des dispositifs de communication modernes.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé les bases théoriques des antennes microrubans, en retraçant leur évolution depuis les années 1970 jusqu'à leur adoption dans des applications industrielles. Nous avons détaillé leur structure de base, comprenant le plan de masse, le substrat diélectrique et l'élément rayonnant, ainsi que leur fonctionnement et les techniques d'alimentation couramment utilisées. Les caractéristiques de rayonnement, telles que le coefficient de réflexion, le gain, la directivité et le diagramme de rayonnement, ont été analysées pour comprendre les performances de ces antennes.

La seconde partie de ce mémoire a introduit le concept des structures à défauts dans le plan de masse (DGS), une technique innovante pour améliorer les performances des antennes microrubans. Nous avons exploré différentes géométries de DGS, telles que les formes en anneau, en H, en U et en ligne serpentée, et leur impact sur le fonctionnement multibande, large bande et sur la miniaturisation des antennes. L'application de structures DGS s'est avérée

efficace pour élargir la bande passante, et réduire la taille des antennes, répondant ainsi aux exigences des systèmes de communication modernes.

Dans le troisième chapitre, nous avons utilisé le logiciel CST Microwave Studio pour concevoir et simuler trois structures d'antennes microrubans de géométries différentes à structures DGS comme la forme en I ou en anneaux. Chaque conception a permis d'étudier l'impact des différentes géométries de DGS sur les performances de l'antenne, notamment en termes de réduction de taille, d'élargissement de la bande passante et de fonctionnement multibande. Les résultats ont montré que l'intégration de DGS permet de miniaturiser efficacement les antennes tout en maintenant des performances satisfaisantes. Des taux de miniaturisation dépassant les 70% ont été atteints, tout en améliorant la bande passante et en assurant un fonctionnement multibande, le tout sans dégradation significative du gain, resté à un niveau satisfaisant.

En conclusion, cette étude démontre que les structures DGS constituent une approche prometteuse pour la conception d'antennes microrubans miniatures et performantes. Les simulations réalisées sous CST Microwave Studio ont validé l'efficacité de cette technique, ouvrant la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications, notamment pour les applications nécessitant des antennes compactes, multibandes et à haut rendement.