

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب - عين تموشنت
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Département Electronique et Télécommunications.
Faculté : Sciences et technologie.



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : Sciences et Technologies.
Filière : Télécommunications.
Spécialité : Réseaux et Télécommunications.
Thème :

**Conception, modélisation et optimisation des antennes imprimées
reconfigurable pour les systèmes de communication sans fil.**

Soutenu : le 30 / juin/2026

Présenté Par :

MELLE HAMMOUTI Maroua

MELLE HACHMAOUI Abir

Devant le jury composé de :

Mme Ayache Choukria	Professeur	UATBB	Présidente
Mme Boutkhil Malika	MAA	UATBB	Examinatrice
Mme Ferouani Souheyla	Professeur	UATBB	Encadrante
Mme MOHAMMED BELHADJ Khouloud	Docteur	UATBB	Co-Encadrante

Année universitaire 2025/2026

DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail avant tout à **Dieu**,
qui m'a donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce projet.*

Je dédie ce mémoire avec une immense gratitude et un profond respect :

*À mon très cher père **Houcine**,
qui a toujours été un exemple de courage, de sagesse et de générosité.
Merci pour tous les sacrifices consentis, pour votre soutien inconditionnel, vos conseils
précieux et la confiance que vous m'avez toujours accordée.*

*À ma très chère mère **Mounia**,
source infinie de tendresse, d'amour et de patience.
Merci pour toutes vos prières, votre affection, votre soutien moral et tous les efforts que vous
avez fournis pour mon bonheur et ma réussite.
Que Dieu vous protège et vous garde auprès de nous.*

*À mes chers frères,
Sidi Mohamed et mon petit frère **Bilel**,
pour leur présence, leur soutien, leurs encouragements et tous les beaux moments partagés
ensemble.
Je vous souhaite un avenir rempli de réussite et de bonheur.*

*À ma chère binôme **Abir**,
avec qui j'ai partagé ce parcours universitaire, les efforts, les défis ainsi que les moments de
joie et de réussite.
Merci pour ton soutien, ta compréhension, ton sérieux et ta précieuse collaboration tout au
long de ce travail.
Je te souhaite beaucoup de succès et de bonheur dans la suite de ton parcours.*

*À mes très chères amies **Houda** et **Hafssa**,
pour leur amitié sincère, leur soutien moral et leur présence dans les moments difficiles
comme dans les meilleurs moments.
Merci pour tous les souvenirs et les encouragements qui m'ont aidée à avancer.*

*Je dédie également ce travail à toute **ma famille**,
petits et grands, pour leur affection, leurs prières et leur soutien permanent tout au long de
mes études.*

*Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce
mémoire,
je leur adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.*

Maroua.

DÉDICACE

*Tout d'abord, je tiens à remercier **DIEU***

De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Je dédie ce travail à **Ma mère** qui attendait toujours l'origine du jour,*

Que Dieu bénisse Ma mère la plus belle et

la plus merveilleuse de ce que Dieu m'a donné.

*Je le dédie à **Mon cher père**, mon soutien et ma sécurité dans cette vie... vous êtes la force dont je puise mon énergie et l'amour qui ne s'éteint jamais. Merci d'avoir toujours été à mes côtés, je suis très fière de vous et je n'oublierai jamais tout ce que tu as fait pour moi. Je vous aime, papa.*

*À **mes frères**, merci d'avoir toujours été mon soutien et mon appui, d'avoir cru en moi et en mes capacités, et d'avoir été ma sécurité dans la vie. Je vous aime énormément.*

***Ma chère Samira**, ma sœur et ma deuxième maman... tu as toujours été là pour moi comme une mère, tu m'as soutenue dans les moments les plus difficiles et tu m'as offert un amour sincère et inoubliable. Je ne t'oublierai jamais, tu resteras à jamais dans mon cœur.*

*À mon fiancé **Mohamed**, pour son soutien, ses encouragements, sa confiance en moi, ainsi que pour sa patience et son accompagnement à chaque étape.*

*À mes meilleurs amis : **Imane ; Hafssa ; Houda.***

*A la fin, je dédie très chaleureusement ce mémoire à Ma binôme **Maroua**,*

À qui je tiens à exprimer toute ma gratitude pour ces cinq années de complicité

Et de partage, pour tous les moments de joie et de difficulté que nous avons traversés

Ensemble. Ta sincérité et ton affection m'ont amenée à te considérer comme une véritable Sœur. Que notre amitié dure pour toujours.

Abir.

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience, la persévérance et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa volonté et Sa bénédiction, l'aboutissement de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux honorables membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à Madame **Sayah Choukria**, Professeure à l'Université Aïn Témouchent Belhadj Bouchaïb (UATBB), pour avoir accepté de présider ce jury et pour l'intérêt qu'elle porte à notre travail.

Nous remercions également Madame **Boutkhil Malika**, Maître Assistante A à l'Université Aïn Témouchent Belhadj Bouchaïb (UATBB), d'avoir accepté d'examiner ce mémoire. Nous lui sommes reconnaissantes pour le temps consacré à sa lecture ainsi que pour ses remarques et suggestions constructives.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à notre encadrante, Madame **Ferouani Souheyla**, Maître de Conférences A à l'UATBB, ainsi qu'à notre co-encadrante, Madame **Mohammed Belhadj Khouloud**, Docteure à l'UATBB, pour leur encadrement, leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au Département d'Électronique et Télécommunications de l'UATBB pour les moyens matériels et pédagogiques mis à notre disposition durant notre parcours universitaire. Nous remercions chaleureusement l'ensemble des enseignants qui ont participé à notre formation académique et scientifique et qui nous ont transmis leurs connaissances et leur expérience.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers nos camarades et amis pour leur soutien, leur esprit d'entraide et les moments de motivation partagés durant cette période universitaire. Leur présence et leurs encouragements ont été d'un grand réconfort tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, par leur aide, leurs conseils, leurs encouragements ou simplement leur soutien moral.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et de la conception d'une antenne imprimée miniaturisée et reconfigurable en fréquence. À l'aide du logiciel CST Studio Suite, une structure de type patch a été optimisée par l'introduction de fentes et d'encoches, dans le but de réduire ses dimensions tout en maintenant une fréquence de résonance fondamentale de 2.4 GHz. L'intégration de diodes PIN en tant qu'éléments de commutation permet d'assurer une reconfiguration dynamique de l'antenne entre différentes bandes de fréquence, notamment celles utilisées par les standards Wi-Fi, LTE et 5G. Les résultats obtenus mettent en évidence une solution compacte, performante et adaptable, répondant aux exigences croissantes des systèmes de télécommunications modernes.

Mots clé : Antenne à patch rectangulaire, antenne reconfigurable, diode PIN, diagramme de rayonnement, coefficient de réflexion S11, WIFI, LTE, 5G.

Abstract

This thesis focuses on the study and design of a miniaturized and frequency-reconfigurable printed antenna. Using CST Studio Suite software, a patch-type structure was optimized through the introduction of slots and notches in order to reduce its dimensions while maintaining a fundamental resonant frequency of 2.4 GHz. The integration of PIN diodes as switching elements enables dynamic reconfiguration of the antenna across different frequency bands, particularly those used by Wi-Fi, LTE, and 5G standards. The obtained results highlight a compact, efficient, and adaptable solution that meets the growing requirements of modern telecommunication systems.

Keywords : Rectangular patch antenna, reconfigurable antenna, PIN diode, radiation pattern, return loss S11, WIFI, LTE, 5G.

ملخص

تندرج هذه المذكرة في إطار دراسة وتصميم هوائي مطبوع مصغر وقابل لإعادة التشكيل الترددي. باستخدام برنامج CST Studio Suite، تم تحسين بنية من نوع Patch من خلال إدخال شقوق وفتحات بهدف تقليل أبعاد الهوائي مع الحفاظ على تردد الرنين الأساسي عند 2.4 GHz. كما يسمح دمج ثنائيات PIN كعناصر تبديل بتحقيق إعادة تشكيل ديناميكية للهوائي بين نطاقات ترددية مختلفة، خاصة تلك المستخدمة في معايير Wi-Fi و LTE و 5G. وتبرز النتائج المتحصل عليها حلاً مدمجاً وفعالاً وقابلاً للتكيف، يلبي المتطلبات المتزايدة لأنظمة الاتصالات الحديثة.

الكلمات المفتاحية: هوائي مطبوع مستطيل، هوائي قابل لإعادة التشكيل، معامل الانعكاس، مخطط الإشعاع، WIFI, LTE, 5G.

Table des matières

DÉDICACE	i
DÉDICACE	ii
Remerciement.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	iv
ملخص.....	iv
Table des matières.....	v
La liste des figures.....	vii
La liste des tableaux.....	ix
La liste des abréviations.....	x
Introduction générale.....	2
<i>I ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES</i>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition des antennes imprimées.....	4
I.3 Structure d'une antenne imprimée.....	4
I.4 Principe de fonctionnement.....	5
I.5 Différentes formes d'antenne.....	6
I.6 Caractéristiques de l'antenne imprimée.....	6
I.6.1 Caractéristiques électriques.....	7
I.6.2 Caractéristiques de rayonnement.....	8
I.7 Techniques d'alimentation des antennes imprimée.....	11
I.8 Techniques d'adaptation des antennes imprimées.....	13
I.9 Miniaturisation des antennes imprimées.....	14
I.9.1 Techniques de miniaturisation des antennes.....	15
I.9.2 Contraintes de la miniaturisation des antennes.....	17
I.9.3 Les avantages des antennes miniatures.....	17
I.10 La reconfigurabilité des antennes imprimées.....	18
I.10.1 Définition des antennes reconfigurables.....	18
I.10.2 Techniques de reconfiguration.....	18
I.10.3 Classifications des antennes reconfigurables.....	20
I.10.4 Les avantages et les inconvénients des antennes reconfigurables.....	21
I.11 Applications des antennes imprimées reconfigurables.....	22

I.11.1 La technologie WI-FI.....	22
I.11.2 La technologie 4G	22
I.11.3 La technologie 5G	23
I.12 Conclusion	23
<i>II Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5, 5G et le LTE</i>	
II.1 Introduction	25
II.2 Objectif	25
II.3 Cahier de charge	25
II.4 Conception logicielle de l'antenne patch rectangulaire de base.....	26
II.4.1 Calcul des paramètres de la géométrie rectangulaire.....	26
II.4.2 Résultat de simulation.....	27
II.4.3 Adaptation de l'antenne a 2.4Ghz avec une ligne quart d'onde.....	28
II.4.3.1 Etude paramétrique	29
II.4.3.2 Résultats de simulation.....	29
II.5. Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire	32
II.5.1 Résultats de simulations.....	33
II.5.2 Miniaturisations des dimensions de l'antenne patch	34
II.5.3 Adaptation de l'antenne patch miniaturise par fente et encoche	36
II.6. Antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le wifi 2.4GHz, la 5G (3.5GHz) et le wifi5 (5.2GHz)	39
II.6.1 Résultats de simulations avec les diodes PIN	40
II.6.2 Synthèses des performances de l'antenne pour les trois modes de fonctionnement avec la diode PIN BAR 64.....	47
II.7 Prototypage de l'antenne patch rectangulaire miniature sélective	48
II.7.1 Prototypage de l'antenne rectangulaire initiale	48
II.7.2 Prototypage de l'antenne miniature	49
II.7.3 La comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et Antenne miniature final à base de fente encoche et diode	50
II.8 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux publiés.....	50
II.9 Conclusion	51
Conclusion générale	54

La liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Structure d'antenne imprimée	5
Figure I.2 : Rayonnement d'antenne patch rectangulaire	6
Figure I.3 : Différents types d'éléments rayonnant.....	6
Figure I.4 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion	8
Figure I.5 : Représentation de diagramme de rayonnement de l'antenne.....	9
Figure I.6 : Représentation du lobe principal et des lobes secondaires d'un diagramme de rayonnement	9
Figure I.7 : la polarisation linéaire circulaire et elliptique	11
Figure I. 8 : Alimentation par ligne microruban	11
Figure I.9 : Alimentation par sonde coaxiale	12
Figure I.10 : Alimentation par couplage électromagnétique.....	12
Figure I.11 : Alimentation par ouverture dans le plan de masse.....	13
Figure I.12 : Adaptation par ligne quart d'onde.....	14
Figure I.13 : Adaptation par ligne quart d'onde.....	14
Figure I.14 : Adaptation avec encoches	14
Figure I.15 : Insertion de court-circuit	16
Figure I.16 : Insertion de fentes et/ou création de méandres	16
Figure I.17 : Insertion d'encoches ou de fentes	17
Figure I.18 : Images des diodes PIN commercialisables et son schéma de jonction	19
Figure I. 19 : Symbole et exemples des diodes Varactor commercialement disponibles	19
Figure I.20 : Exemple de commutateur RF-MEMS intégré.....	20
Figure I.21 : La technologie 5G.....	23

Chapitre II

Figure II. 1 : Antenne patch rectangulaire initiale.	26
Figure II. 2 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch rectangulaire de base.....	28
Figure II. 3 : Antenne patch rectangulaire avec ligne quart d'onde.	28
Figure II. 4 : Résultat de simulation avec ligne quart d'onde.....	29
Figure II. 5 : Antenne patch rectangulaire avec encoche.....	29
Figure II. 6 : Résultats de simulation avec encoche.....	30
Figure II. 7 : Résultat de simulation finale avec encoche.....	31
Figure II. 8 : Le rapport d'onde stationnaire (VWSR) de fréquence 2.38.....	31
Figure II. 9 : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch rectangulaire.....	31
Figure II. 10 : La distribution de courant de surface de l'antenne patch rectangulaire.	32
Figure II. 11 : Antenne patch rectangulaire avec fente.....	33
Figure II. 12 : Paramètres S11 obtenu aux dimensions de la fente.....	33
Figure II. 13 : Paramètre S11 pour les dimensions a=33" mm" et b=2" mm" des paramètres géométriques de la fente du patch.	34
Figure II. 14 : Résultats de simulation avec la dégradation de Lp Wp.....	35
Figure II. 15 : Résultat de simulation finale avec Wp =31.7 et Lp=22.7.....	35
Figure II. 16 : Plan de masse avec les paramètres des encoches et fente.....	36
Figure II. 17 : Résultats de plusieurs simulations de l'antenne avec différentes configurations de paramètres (de a à f).	36
Figure II. 18 : Résultat de simulation finale de l'antenne patch miniature adapté à 2.4GHz.....	37
Figure II. 19 : Le rapport d'onde stationnaire (VWSR) de fréquence 2.4.....	38
Figure II. 20 : Diagramme de rayonnement 3D d'antenne.....	38
Figure II. 21 : Diagramme de rayonnement polaire d'antenne.....	38
Figure II. 22 : La distribution de courant de surface de l'antenne patch rectangulaire adapté.....	39

Liste des figures

Figure II. 23 : Antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable avec diode.....	39
Figure II. 24 : Circuit équivalent de la diode PIN, (a) mode ON, (b) mode OFF.....	40
Figure II. 25 : Résultats de simulation avec la diode HSMP 3860.	40
Figure II. 26 : Résultats de simulation avec la MA4AGBLP912.	41
Figure II. 27 : Résultats de simulation du mode 1.	43
Figure II. 28 : Le diagramme de rayonnement en mode M1 à 2.4 GHz.	43
Figure II. 29 : Le diagramme de rayonnement en mode 1 à 3.41GHz.....	44
Figure II. 30 : Le diagramme de rayonnement en mode M1 à 5.20 GHz.	44
Figure II. 31 : Résultats de simulation en mode 2.	45
Figure II. 32 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 2.7 GHz.	45
Figure II. 33 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 3.41 GHz.	45
Figure II. 34 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 5.4 GHz.	46
Figure II. 35 : Résultats de simulation en mode 3.	46
Figure II. 36 : Le diagramme de rayonnement en mode M3 à 3.6 GHz.	47
Figure II. 37 : Le diagramme de rayonnement en mode M3 à la fréquence 5.3 GHz.	47
Figure II. 38 : Prototype de l'antenne initiale proposé, (a)vue de face, (b) vue d'arrière.	49
Figure II. 39 : Prototype de l'antenne miniature proposé (a) vue de face, (b) vue d'arrière.	50
Figure II. 40 : comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et Antenne miniature final à base de fente encoche et diode (a) vue de face : patch ,(b) vue d'arrière.	50

La liste des tableaux

Table II.1 : Equations de calcul des paramètres de l'antenne patch rectangulaire.	26
Table II.2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire.	27
Table II.3 : Dimensions de la ligne quart d'onde.	28
Table II.4 : Dimensions des encoches.....	29
Table II.5 : Les résultats de simulation avec étude paramétrique sur les encoches.	30
Table II.6 : Les résultats de simulation avec insertion de la fente.	34
Table II.7 : Les résultats de simulation avec miniaturisation du L_p et W_p	35
Table II.8 : Les résultats de simulation avec fentes et encoche au plan de masse.	37
Table II.9 : Les valeurs de la diode PIN HSMP-3860 utilisée	40
Table II.10 : Résultats des états de la diode HSMP 3860.	41
Table II.11 : Mode de fonctionnement des diodes MA4AGBLP912.	41
Table II.12 : Les états de la MA4AGBLP912.....	42
Table II.13 : Les valeurs de R L C du PIN BAR 64.	42
Table II.14 : Les modes de fonction de la diode PIN BAR 64.	42
Table II.15 : Synthèses des performances de l'antenne aux mode M1, M2 et M3.....	47
Table II. 16 : comparaison de nos résultats avec les résultats de la littérature.....	50

La liste des abréviations

4G	Fourth Génération
5G	Fifth Génération
GHz	Gigahertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
MHz	Mégahertz
PIN	Positive Intrinsic Négative
PN	Jonction Positive-Négative
RF	Radio Fréquence
RF-MEMS	Radio Frequency Micro-Electro-Mechanical Systems
Wi-Fi	Wireless Fidelity
S11	Coefficient de réflexion
LTE	Long Term Evolution
WLAN	Wireless Local Area Network
EM	Électromagnétique
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Rapport d'onde stationnaire)
BW	Bandwidth (Bande passante)
PIN	Positive Intrinsic Négative
RLC	Résistance – Inductance – Capacité
CST	Computer Simulation Technology

Introduction générale

Introduction générale

Afin de répondre aux exigences des systèmes de communication modernes, ce travail s'appuie sur une approche combinant la miniaturisation et la reconfigurabilité des antennes imprimées. L'étude menée permet d'explorer les différentes techniques utilisées pour améliorer les performances des antennes tout en réduisant leur taille et en assurant leur adaptation à plusieurs bandes de fréquences. Dans cette perspective, notre mémoire est organisé de manière à présenter d'abord les aspects théoriques, puis les étapes de conception et de simulation de l'antenne proposée.

Notre mémoire est divisé en deux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique des antennes imprimées, en présentant leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques principales ainsi que les différentes techniques d'alimentation et d'adaptation. Nous y abordons également les techniques de miniaturisation et le concept des antennes reconfigurables, ainsi que leurs applications dans les systèmes de communication modernes tels que le Wi-Fi, la 4G et la 5G.

Le second chapitre porte sur la conception et la simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature et reconfigurable en fréquence sous l'environnement CST Studio Suite. Il présente les différentes étapes de conception, d'optimisation et de miniaturisation de l'antenne, ainsi que l'intégration des diodes PIN afin d'assurer la reconfigurabilité fréquentielle pour les applications Wi-Fi, LTE et 5G. Enfin, les résultats de simulation obtenus sont analysés et discutés afin d'évaluer les performances de l'antenne proposée.

Chapitre I

ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

I.1 Introduction

Avec l'évolution rapide des systèmes de télécommunications sans fil, les antennes jouent un rôle central dans l'amélioration des performances et de la compacité des dispositifs modernes. Parmi les solutions les plus utilisées, les antennes imprimées se distinguent par leur faible coût, leur simplicité de fabrication et leur intégration aisée dans les circuits électroniques.

Dans ce contexte, ce chapitre s'intéresse à l'étude des antennes imprimées en présentant leurs principes de base, leurs caractéristiques essentielles ainsi que les différentes techniques d'alimentation et d'adaptation. Les techniques de miniaturisation sont abordées en premier lieu, afin de montrer comment réduire l'encombrement des antennes tout en maintenant des performances satisfaisantes, ce qui est crucial pour les appareils modernes compacts.

Viennent ensuite les antennes reconfigurables, qui constituent une solution innovante permettant d'ajuster dynamiquement les performances de l'antenne en fonction des besoins du système. Enfin, les domaines d'application, notamment dans les technologies de communication modernes telles que le Wi-Fi, la 4G et la 5G, sont présentés afin de souligner l'importance de ces antennes dans les systèmes actuels et futurs.

I.2 Définition des antennes imprimées

Une antenne imprimée, également appelée antenne microruban (microstrip), est constituée d'un élément rayonnant métallique, appelé *patch*, placé sur une face d'un substrat diélectrique, tandis qu'un plan de masse est disposé sur l'autre face. Le *patch* est généralement réalisé à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or, en raison de leur excellente conductivité électrique. Il peut adopter différentes formes géométriques, comme le carré, le cercle ou le triangle, mais les formes simples sont souvent privilégiées afin de faciliter l'analyse et la conception. Par ailleurs, le *patch* rayonnant ainsi que les lignes d'alimentation sont généralement obtenus par photogravure sur le substrat diélectrique[1].

I.3 Structure d'une antenne imprimée

La structure de base d'une antenne imprimée est composée de trois éléments essentiels, à savoir : le plan de masse, le substrat diélectrique et le *patch*, comme le montre le schéma de la figure I.1.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

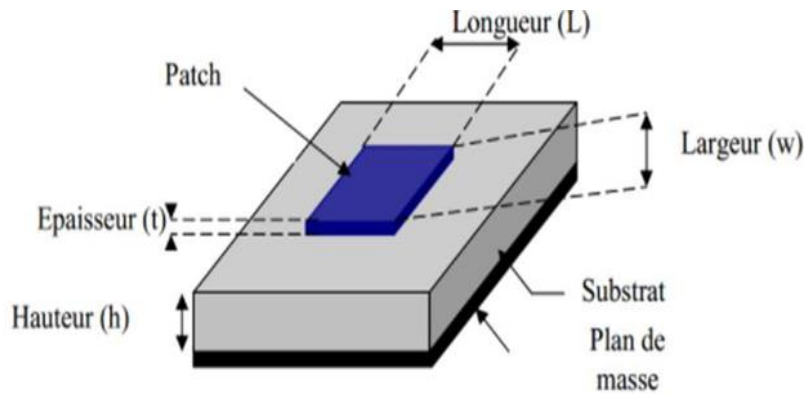


Figure I.1 : Structure d'antenne imprimée[2].

a) Plan de masse

Le plan de masse est une surface conductrice, généralement en cuivre, située sur la face inférieure du substrat. Il joue un rôle essentiel dans le rayonnement de la partie supérieure de l'antenne. Une réduction de la taille du plan de masse entraîne une modification des caractéristiques et des performances de l'antenne[3].

b) Substrat

Le substrat est défini par plusieurs paramètres, notamment sa permittivité relative ϵ_r , son épaisseur h ainsi que son facteur de perte. Afin d'assurer un bon fonctionnement de l'antenne, le substrat doit satisfaire certaines conditions[4]:

- conserver sa forme initiale ;
- présenter une bonne stabilité thermique lors des opérations de soudure et face aux conditions environnementales ;
- garantir une uniformité de la permittivité relative et de l'épaisseur sur de grandes surfaces ;
- offrir une bonne résistance aux agents chimiques ;
- avoir une faible rugosité de surface.

c) Patch

Le patch est une fine couche métallique rayonnante pouvant adopter différentes formes géométriques. Il est généralement réalisé à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or[5].

I.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une antenne microruban repose sur la propagation d'une onde électromagnétique générée par une source radiofréquence. Cette onde se propage entre la ligne d'alimentation et le plan de masse jusqu'au patch, qui agit comme un élément résonant. Sous l'effet de cette excitation, des charges électriques apparaissent sur le patch ainsi que sur le plan de masse[6].

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

L'antenne peut alors être assimilée à une cavité résonante fonctionnant à des fréquences bien définies. Les champs électromagnétiques, notamment au niveau des bords du patch, s'étendent vers l'extérieur et sont à l'origine du rayonnement électromagnétique[7], comme montré dans la figure I.2.

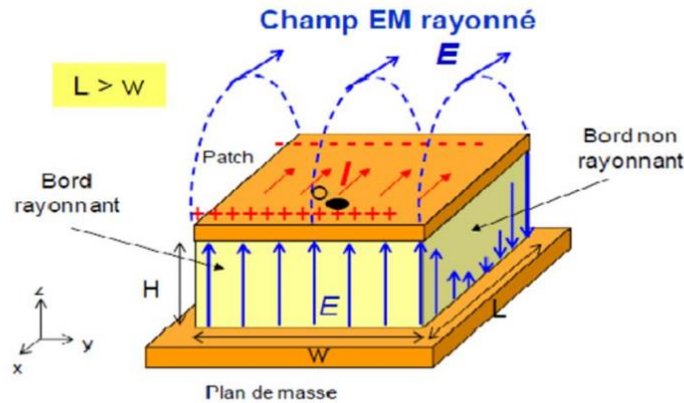


Figure I.2 : Rayonnement d'antenne patch rectangulaire[7].

I.5 Différentes formes d'antenne

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme le montre sur la Figure I.3 :

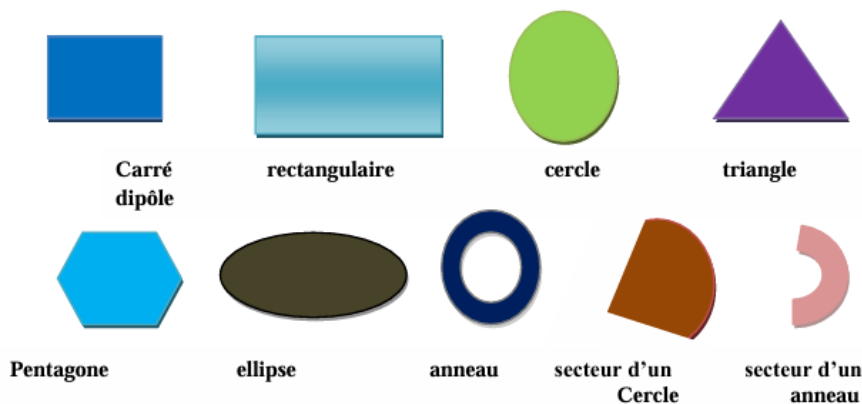


Figure I.3 : Différents types d'éléments rayonnant[1].

Nous avons choisi dans notre travail de calculer les paramètres et de simuler des antennes patch de type rectangulaire.

I.6 Caractéristiques de l'antenne imprimée

Les caractéristiques des antennes peuvent être classées en deux grandes catégories : les caractéristiques électriques, telles que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et la bande passante, et les caractéristiques de rayonnement, telles que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité et la polarisation de l'antenne[8].

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

I.6.1 Caractéristiques électriques

a) Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme l'impédance mesurée à l'interface entre l'antenne et sa ligne d'alimentation. Elle traduit la manière dont l'antenne se comporte vis-à-vis du signal appliqué. Cette grandeur peut être déterminée à partir de l'expression suivante: $Z_{in} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}$

où Z_0 désigne l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation[9].

b) Le coefficient de réflexion

Le paramètre S_{11} , appelé coefficient de réflexion, indique la proportion de puissance renvoyée par l'antenne par rapport à la puissance incidente. Il joue un rôle essentiel dans l'étude de l'adaptation, puisqu'il permet d'apprécier la qualité de l'accord entre l'antenne et la ligne. En pratique, pour assurer un fonctionnement satisfaisant, la valeur de S_{11} doit être inférieure ou égale à -10 dB[1].

c) Le taux d'onde stationnaire (TOS)

Le Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), ou taux d'onde stationnaire, également appelé rapport d'ondes stationnaires (ROS), est un paramètre directement lié au coefficient de réflexion. Il permet d'évaluer le niveau de puissance réfléchi par l'antenne et, par conséquent, la qualité de l'adaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation.

Le VSWR s'exprime à partir du coefficient S_{11} selon la relation suivante: $VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}$

Cette grandeur constitue un indicateur important : plus sa valeur est proche de 1, meilleure est l'adaptation d'impédance[10].

d) Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences pour lequel son fonctionnement reste satisfaisant selon un critère donné, généralement basé sur le coefficient de réflexion. Elle est définie comme la plage de fréquences dans laquelle la valeur de S_{11} demeure inférieure à un seuil déterminé, comme montré dans la figure I.4.

En pratique, on considère le plus souvent que l'antenne est correctement adaptée lorsque $S_{11} \leq -10$ dB, et parfois -15 dB selon le niveau d'exigence requis. La bande passante est donc généralement déterminée à partir de la courbe du coefficient de réflexion, en identifiant l'intervalle fréquentiel où cette condition est respectée[11].

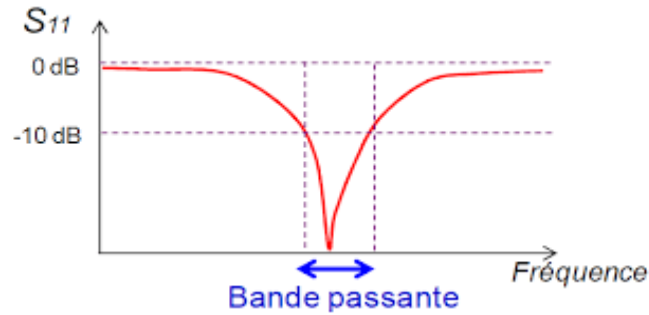


Figure I.4 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion[12].

I.6.2 Caractéristiques de rayonnement

a) Diagramme de rayonnement

Les antennes ne rayonnent généralement pas de manière parfaitement omnidirectionnelle ; elles privilégient certaines directions pour l'émission ou la réception. Le diagramme de rayonnement permet de visualiser la répartition spatiale de la puissance émise par l'antenne. Il met en évidence les directions (θ_0, φ_0) pour lesquelles la puissance rayonnée atteint sa valeur maximale[13].

Il convient de souligner que cette représentation est pertinente lorsque l'onde considérée est de nature sphérique. Dans ce diagramme, on représente la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, dont la valeur est comprise entre 0 et 1 selon la direction d'observation.

En pratique, le diagramme de rayonnement est généralement tracé dans le plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) ainsi que dans le plan vertical ($\varphi = \text{constante}$), ou encore dans les plans E et H, comme montré dans la figure I.5.

La fonction normalisée de rayonnement s'écrit[9] :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0(\theta_0, \varphi_0)}$$

où:

- $p(\theta, \varphi)$ représente la puissance rayonnée dans une direction donnée ;
- $p_0(\theta_0, \varphi_0)$ correspond à la puissance rayonnée maximale.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

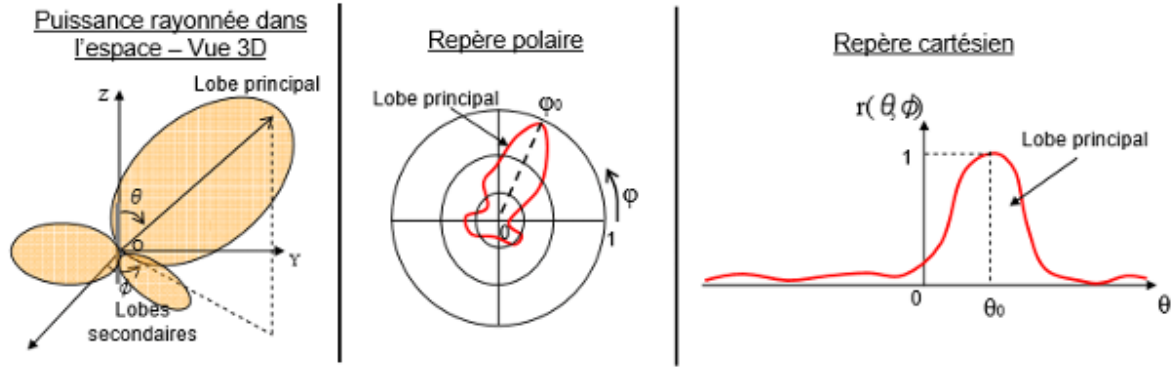


Figure I.5 : Représentation de diagramme de rayonnement de l'antenne[12].

b) Angle d'ouverture

Si l'on considère G_m comme le gain maximal d'une antenne dans un plan donné, la largeur d'ouverture (ou largeur de faisceau) dans ce plan correspond à l'angle formé entre les deux directions pour lesquelles le gain chute à la moitié de sa valeur maximale (figure I.6), soit au niveau -3 dB ($G_m/2$) [5].

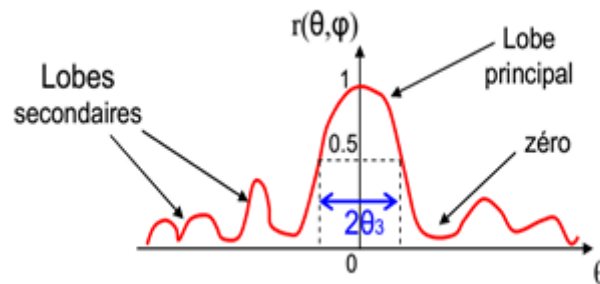


Figure I.6 : Représentation du lobe principal et des lobes secondaires d'un diagramme de rayonnement[12].

c) La directivité

La directivité caractérise la capacité d'une antenne à concentrer son rayonnement dans des directions particulières de l'espace. Dans une direction (θ, φ) , elle est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance qu'émettrait une source isotrope par unité d'angle solide. Elle s'exprime par : $D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r}$

$$P_r = \iint 4\pi P(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$\text{Avec} \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) , la directivité devient [11]:

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

$$D(\theta_0, \varphi_0) = \frac{4\pi P(\theta_0, \varphi_0)}{P_r}$$

d) Le gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction donnée correspond au rapport entre la puissance rayonnée dans cette direction et celle qu'émettrait une antenne isotrope idéale (sans pertes) alimentée par la même puissance.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A}$$

En pratique, on considère généralement le gain maximal, c'est-à-dire dans la direction (θ_0, φ_0) :

$$G(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A}$$

Cette grandeur traduit l'aptitude de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique[9].

e) Le rendement

Le rendement η d'une antenne exprime sa capacité à convertir la puissance électrique fournie P_A en puissance effectivement rayonnée P_R . Il est défini comme le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance d'alimentation :

$$P_r = \eta P_A$$

Le rendement tient compte des pertes présentes dans le réseau d'alimentation et dans les éléments rayonnants. Il établit également le lien entre le gain et la directivité :

$$G = \eta D$$

Ainsi, le gain dépend à la fois de la directivité et du rendement de l'antenne[14].

f) La polarisation

La polarisation d'une antenne est définie par la forme de la trajectoire suivie par le champ électrique $\mathbf{E}$ de l'onde électromagnétique qu'elle rayonne ou capte principalement. Elle caractérise donc l'orientation et l'évolution du champ électrique dans le temps en un point donné de l'espace.

Selon la forme de cette trajectoire (figure I.7), la polarisation peut être:

- Linéaire:** lorsque le champ électrique conserve une direction fixe;
- Circulaire:** lorsque l'extrémité du vecteur champ électrique décrit un cercle;
- Elliptique:** dans le cas le plus général, lorsque la trajectoire forme une ellipse[15].

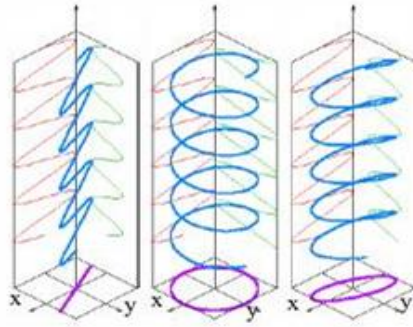


Figure I.7 : la polarisation linéaire circulaire et elliptique[16].

I.7 Techniques d'alimentation des antennes imprimées

Une antenne patch peut être alimentée par différentes techniques, généralement classées en deux catégories : avec contact et sans contact. Dans la première catégorie, l'alimentation se fait de manière directe à l'aide d'une connexion physique, telle qu'une ligne microruban ou un câble coaxial. Dans la seconde catégorie, dite sans contact, l'excitation de l'antenne est réalisée par couplage, soit par fente, soit par proximité. Ces méthodes permettent d'assurer le transfert de la puissance RF entre la ligne microruban et l'élément rayonnant de façon indirecte[5].

a) Alimentation par ligne microruban

Dans cette technique, une ligne microruban (généralement d'impédance 50Ω) est directement reliée au bord du patch rayonnant. La longueur de cette ligne conductrice est généralement inférieure à celle du patch. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être réalisée sur le même substrat, offrant ainsi une structure entièrement planaire[17]. Elle se distingue également par sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût de fabrication, comme représenté sur la figure I.8. Au cours de ce travail, nous avons utilisé ce type d'alimentation pour concevoir notre antenne patch reconfigurable[18].

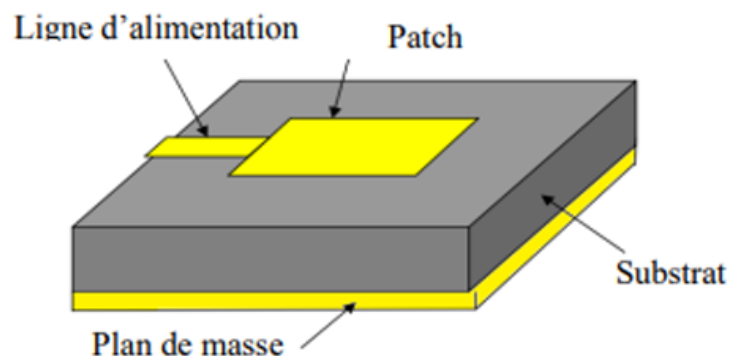


Figure I. 8 :Alimentation par ligne microruban[19].

b) Alimentation par sonde coaxiale

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

L'alimentation par câble coaxial est largement utilisée dans les antennes micro-ondes en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de la facilité d'adaptation d'impédance qu'elle offre[20]. Le câble coaxial est constitué de deux conducteurs : un conducteur externe et un conducteur interne. Le conducteur externe est connecté au plan de masse, tandis que le conducteur interne est relié directement au patch rayonnant, comme présenté sur la figure I.9.

Cependant, cette technique présente certains inconvénients, notamment une bande passante relativement étroite ainsi qu'une modélisation plus complexe, en particulier lorsque des substrats épais sont utilisés[21].

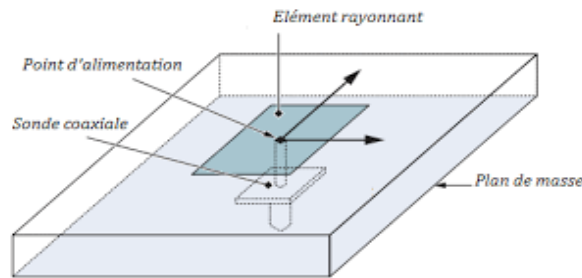


Figure I.9 :Alimentation par sonde coaxiale[22].

c) Alimentation par couplage électromagnétique

Dans cette technique, l'antenne est constituée de deux substrats diélectriques, avec une ligne d'alimentation placée entre les deux[20]. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur. L'excitation du patch s'effectue alors par couplage électromagnétique, sans contact direct, comme visible sur la figure I.10.

Cette méthode présente l'avantage d'améliorer la bande passante de l'antenne, mais elle reste relativement complexe à concevoir et à réaliser[23].

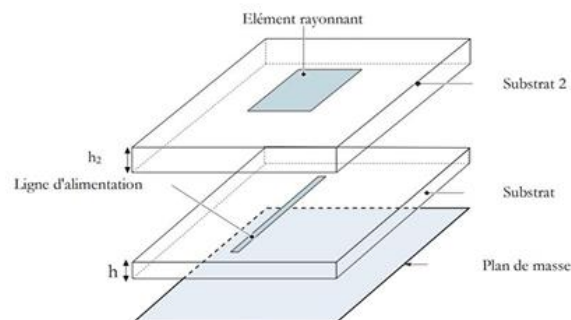


Figure I.10 :Alimentation par couplage électromagnétique[22].

d) Alimentation par ouverture dans le plan de masse

Cette technique d'alimentation, bien que plus complexe à mettre en œuvre, se caractérise par une bande passante relativement étroite. Elle présente toutefois l'avantage de générer de faibles rayonnements parasites. La structure, illustrée dans la figure I.11, repose sur deux substrats

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

diélectriques de permittivités différentes, séparés par un plan de masse comportant une ouverture[24]. La ligne de transmission est placée sur le substrat inférieur (à permittivité élevée), tandis que le patch rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (à permittivité plus faible). L'alimentation du patch s'effectue alors à travers l'ouverture réalisée dans le plan de masse. L'adaptation d'impédance est obtenue en ajustant les dimensions de la fente et/ou celles de la ligne de transmission[21].

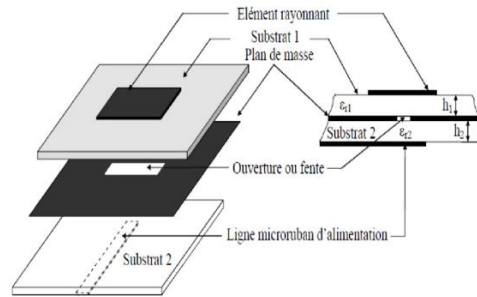


Figure I.11 :Alimentation par ouverture dans le plan de masse[25].

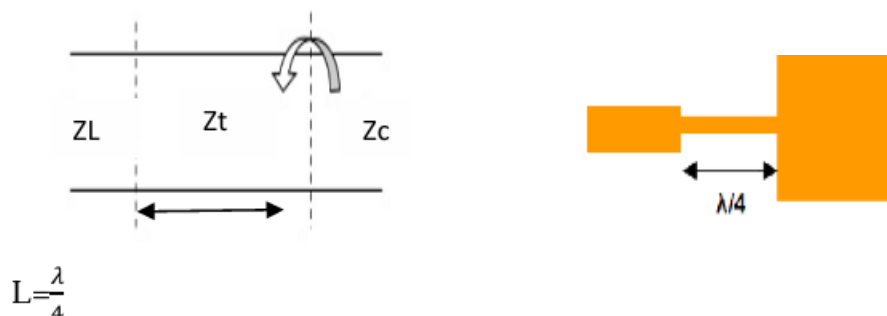
I.8 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Pour qu'une ligne de transmission transfère correctement l'énergie, il est nécessaire d'adapter l'impédance. L'impédance vue par la source dépend de la charge, de la longueur de la ligne et de son impédance caractéristique. Une bonne adaptation assure un transfert optimal de puissance et réduit les pertes[26].

a) Adaptation par ligne quart d'onde

Dans les circuits hyperfréquences, l'adaptation d'impédance est une étape essentielle pour assurer un transfert efficace de puissance. Parmi les méthodes utilisées, la ligne quart d'onde permet de transformer une impédance donnée en une autre, généralement égale à l'impédance caractéristique de la ligne. Cette technique consiste à insérer une ligne de longueur égale à $\lambda/4$, ce qui permet d'obtenir une adaptation optimale entre la charge et la source, tout en réduisant les réflexions et les pertes, comme représenté sur la figure I. 12.

Dans notre travail, nous avons utilisé cette méthode d'adaptation afin d'améliorer l'adaptation du circuit et d'optimiser ses performances globales[1,17].



CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Figure I.12 :Adaptation par ligne quart d'onde[1,17].

b) Adaptation par stub

Une autre méthode pour adapter une charge consiste à utiliser un stub, qui peut être en circuit ouvert ou en court-circuit[27]. On choisit généralement la solution la plus compacte. Il est plus facile de raisonner en admittance pour additionner les impédances en parallèle. Un stub est un tronçon de ligne branché en dérivation sur la ligne principale, à une certaine distance de la charge[1,17], comme observé sur la figure I.13.

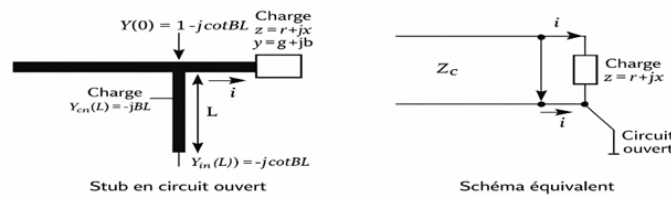


Figure I.13 :Adaptation par ligne quart d'onde[1,17].

c) Adaptation avec encoches

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches ; il suffit de modifier la géométrie du patch, comme observé sur la figure I. 14. Dans notre travail, nous avons utilisé cette technique pour améliorer l'adaptation de l'antenne[1,17].

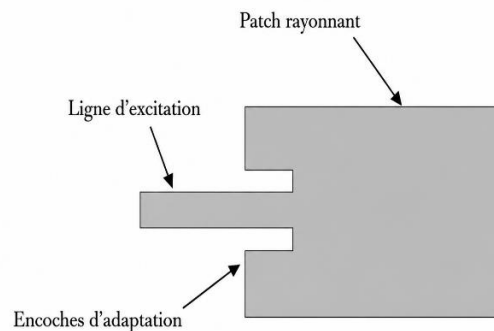


Figure I.14 :Adaptation avec encoches[1,17].

I.9 Miniaturisation des antennes imprimées

La miniaturisation consiste à réduire la taille des objets. Dans le domaine de l'électronique, elle vise à concevoir des composants plus petits tout en conservant leur fonction principale. Pour les antennes, cette approche permet de diminuer leur encombrement et de faciliter leur

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

intégration dans les systèmes modernes. Généralement, on trouve deux types de miniaturisation, électrique et physique. Physiquement, la taille d'une antenne ne peut pas être réduite indéfiniment, car son fonctionnement est directement lié à la longueur d'onde du signal qu'elle rayonne [20]. Cependant, plus l'antenne est petite, plus ses performances peuvent se dégrader, notamment au niveau de l'adaptation. Toutefois, cette évolution reste limitée dans le cas des antennes en raison de contraintes physiques fondamentales liées à la longueur d'onde. En particulier, les travaux de Wheeler ont montré que les antennes électriquement petites (AEP) doivent satisfaire la condition :

$$K a \leq 1$$

Avec :

- a le rayon de la sphère minimale qui englobe l'antenne, communément appelée sphère de CHU
- K est le nombre d'onde dans le milieu de propagation [28].

I.9.1 Techniques de miniaturisation des antennes

Les techniques de miniaturisation désignent l'ensemble des méthodes et procédés permettant de réduire les dimensions des dispositifs, composants ou systèmes, tout en conservant, voire en améliorant, leurs performances et leurs fonctionnalités.

L'objectif principal est de concevoir des structures plus compactes et plus efficaces, offrant plusieurs avantages tels que la portabilité, la réduction des coûts, l'optimisation de la consommation énergétique et l'amélioration des performances globales.

Ce concept est largement utilisé dans différents domaines, notamment l'électronique, l'industrie, la médecine ainsi que les nanotechnologies. Ces techniques sont les suivants[22] :

a) Insertion de court-circuit

En se basant sur l'analogie dipôle/monopôle, il est possible d'ajouter une plaque de court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse, dans une zone où le champ électrique est nul pour le mode fondamental de l'antenne patch[17]. Cette structure, appelée antenne imprimée quart d'onde, est présentée sur la figure I.15 et possède une résonance quart d'onde.

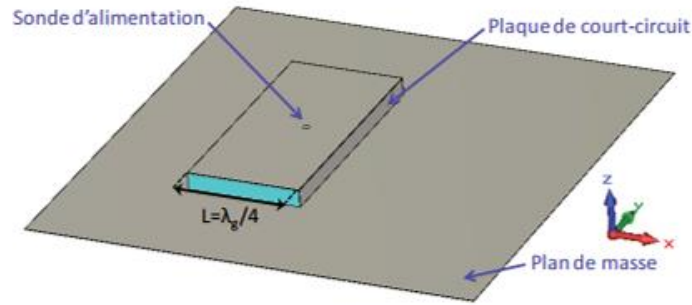


Figure I.15 : Insertion de court-circuit.

b) Modification de la géométrie

La dernière catégorie de techniques concerne la modification de la structure de l'antenne, en utilisant notamment des fentes, le repliement de la géométrie, ou encore des formes fractales ou arbitraires.

b.1) Insertion de fentes et/ou création de méandres

La figure I.16 illustre l'augmentation de la longueur électrique de l'élément[29]. Les flèches bleues représentent le trajet du courant surfacique, et les fentes réalisées sur l'élément rayonnant créent des effets capacitifs et inductifs, modifiant ainsi l'impédance d'entrée de l'antenne.

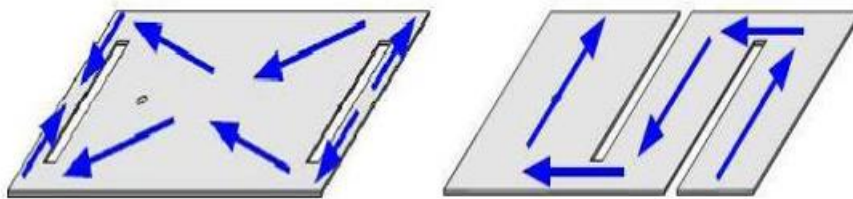


Figure I.16 : Insertion de fentes et/ou création de méandres.

b.2) Insertion d'encoches

L'insertion d'encoches ou de fentes dans une antenne patch classique est une technique couramment utilisée. Elle permet d'augmenter la longueur électrique de l'élément rayonnant en allongeant le trajet des courants surfaciques sur sa surface, comme illustré dans la figure I.17.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

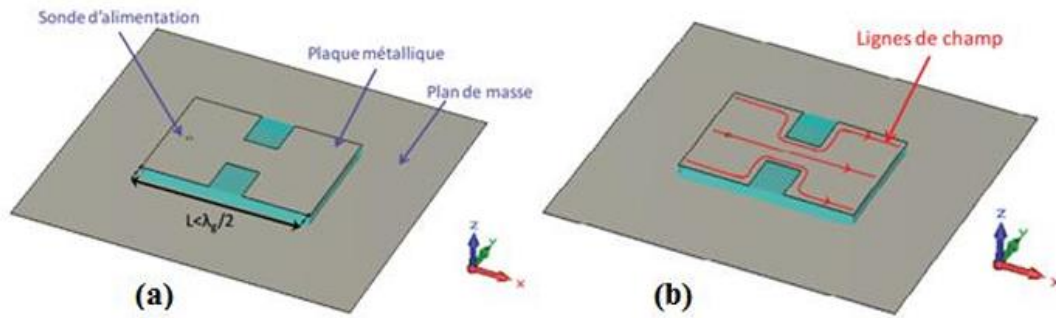


Figure I.17 : Insertion d'encoches ou de fentes.

I.9.2 Contraintes de la miniaturisation des antennes

- **Compromis taille / performances** : la réduction des dimensions d'une antenne entraîne souvent un compromis entre compacité, bande passante et efficacité de rayonnement, difficiles à optimiser simultanément[30].
- **Dégradation des performances antennaires** : la miniaturisation peut affecter certains paramètres clés, tels que le gain, l'efficacité de rayonnement et la largeur de bande, ce qui peut limiter les performances globales[30].
- **Complexité de conception** : l'utilisation de techniques de miniaturisation, telles que les fentes, les structures en méandres ou les géométries fractales, rend la conception plus complexe et délicate à optimiser[31].
- **Pertes liées aux matériaux** : l'emploi de substrats à forte permittivité peut contribuer à réduire la taille, mais engendre souvent des pertes supplémentaires, diminuant ainsi l'efficacité de l'antenne[31].
- **Difficulté de fabrication** : les structures miniaturisées nécessitent une grande précision de fabrication, ce qui peut compliquer la réalisation pratique et augmenter les coûts[30].
- **Complexité structurelle** : certaines solutions de miniaturisation, comme les substrats multicouches, augmentent la complexité globale de la structure de l'antenne et rendent son intégration plus difficile[31].

I.9.3 Les avantages des antennes miniatures

La miniaturisation présentent plusieurs avantages [28]:

- **Optimisation spatiale** : Elle permet de concevoir des dispositifs beaucoup moins volumineux, favorisant un encombrement minimal.
- **Mobilité et intégration accrue** : La petite taille facilite le déplacement des appareils et leur insertion discrète dans des structures complexes ou des systèmes embarqués.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

- **Légèreté structurelle** : On assiste à une baisse significative de la masse globale des composants, rendant le matériel plus maniable.
- **Économie de ressources** : Le processus limite la quantité de matières premières nécessaires, ce qui conduit mécaniquement à une diminution des coûts de production.
- **Efficacité énergétique** : Les microsystèmes consomment généralement moins d'électricité, prolongeant ainsi l'autonomie des batteries.
- **Polyvalence et performance** : Elle ouvre la voie à des outils "tout-en-un" qui regroupent plusieurs fonctionnalités dans un format réduit, sans sacrifier l'efficacité.

I.10 La reconfigurabilité des antennes imprimées

I.10.1 Définition des antennes reconfigurables

Le concept d'antenne reconfigurable a été proposé pour la première fois par Mitola en 1999[30]. Ce type d'antenne est considéré comme intelligent, car il peut s'adapter automatiquement et en temps réel aux conditions de son environnement[32]. Avec le développement des systèmes de communication sans fil, ces antennes sont devenues très importantes grâce à leur grande capacité d'adaptation[33].

Une antenne est dite reconfigurable lorsqu'elle est capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement, comme la fréquence, la polarisation ou encore le diagramme de rayonnement, même après sa fabrication. Cette adaptation se fait en fonction des besoins de l'application[34]. Pour cela, plusieurs méthodes sont utilisées, notamment l'intégration de composants électroniques comme les diodes PIN, les RF-MEMS et les varactors [35], l'utilisation de matériaux optiques, ou encore des changements mécaniques dans la structure de l'antenne[36].

I.10.2 Techniques de reconfiguration

Il existe plusieurs techniques de reconfiguration, ainsi que différents moyens pour les mettre en œuvre de manière efficace et peu coûteuse.

a) Diode PIN

Une diode PIN est un dispositif semi-conducteur constitué de deux régions dopées, l'une de type P et l'autre de type N, séparées par une zone intrinsèque (non dopée), comme illustré sur la figure I.18. Ce type de diode est largement utilisé comme interrupteur dans les applications à haute fréquence. Lorsqu'elle est polarisée en direct, son impédance devient faible, ce qui permet au courant de circuler ; elle fonctionne alors comme un circuit fermé (état ON). À l'inverse, lorsqu'elle est polarisée en inverse, son impédance devient très élevée, avec une conductance négligeable, empêchant le passage du courant ; elle se comporte donc comme un circuit ouvert (état OFF)[32].

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Dans le cadre de ce travail, nous avons adopté la technique des diodes PIN pour la reconfiguration de l'antenne patch imprimé.

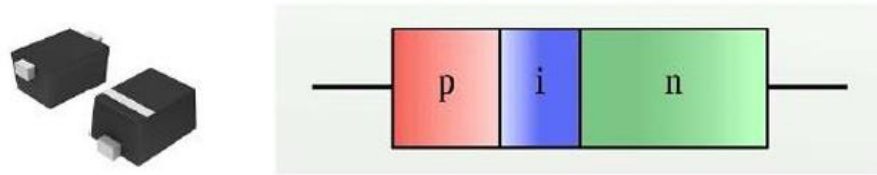


Figure I.18 : Images des diodes PIN commercialisables et son schéma de jonction[12].

b) Diode Varicap

Une diode varactor, également appelée varicap, est un composant semi-conducteur basé sur une jonction PN [28]. Elle fonctionne comme un condensateur dont la capacité peut être ajustée en appliquant une tension de polarisation inverse à ses bornes, comme illustré sur la figure I.19. Ainsi, elle permet une variation continue de la capacité, contrairement à la diode PIN, qui provoque plutôt des changements discrets dans les caractéristiques de l'antenne[12].

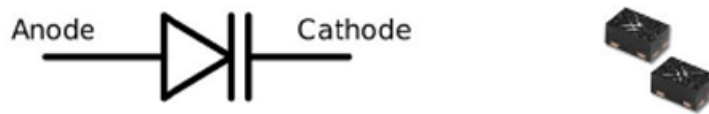


Figure I. 19 : Symbole et exemples des diodes Varactor commercialement disponibles[12].

d) Les RF-MEMS

Les antennes reconfigurables utilisant des commutateurs MEMS suscitent un grand intérêt en recherche. Ces dispositifs, comme visible sur la figure I.20, fonctionnent grâce à un mouvement mécanique permettant d'établir ou de couper le signal RF (circuit fermé ou ouvert). Ils peuvent être réalisés en différentes configurations (série ou shunt) et selon divers modes d'actionnement (électrostatique, thermique ou magnétique). Utilisés dans les systèmes radar, les communications satellitaires et les stations de base, ces commutateurs offrent une bonne capacité de puissance et une longue durée de vie[12].

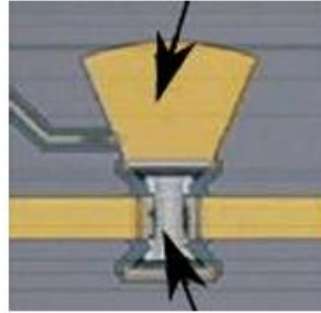


Figure I.20 :Exemple de commutateur RF-MEMS intégré[12].

e) Matériaux intelligents

Les matériaux dits intelligents, adaptatifs ou reconfigurables permettent de modifier leurs propriétés électriques (permittivité, perméabilité, conductivité) sous l'effet d'un champ externe. Ils constituent ainsi une solution efficace pour rendre les antennes réglables et plus flexibles[37].

Ces matériaux peuvent être utilisés comme substrat ou sous forme de couches minces, remplaçant certains commutateurs électroniques. Ils offrent des avantages tels que la légèreté et une bonne intégration, mais nécessitent parfois des circuits de commande complexes, des tensions élevées ou des dispositifs spécifiques. De plus, leur temps de réponse peut être lent et les pertes ne sont pas négligeables. Parmi les matériaux les plus utilisés, on trouve les cristaux liquides, ainsi que les matériaux magnétiques et ferroélectriques[38].

I.10.3 Classifications des antennes reconfigurables

Quelle que soit la technique de reconfigurabilité utilisée, les antennes reconfigurables peuvent être classées selon la fonctionnalité qu'elles modifient : reconfigurabilité fréquentielle, spatiale (du diagramme de rayonnement) ou de polarisation.

a) Antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence permettent d'adapter la ou les fréquences de fonctionnement en fonction des besoins du système. Cette adaptation peut se faire de manière discrète, par commutation, ou de manière continue. Dans le cas de la commutation, l'antenne passe d'une bande de fréquence à une autre prédéfinie à l'aide de composants de commande, comme les diodes PIN. À l'inverse, la reconfiguration continue utilise des composants variables, tels que les diodes varicap, permettant de modifier progressivement les fréquences de résonance[39]. Pour illustrer ce principe, on peut prendre l'exemple du Wi-Fi fonctionnant autour de 2,4 GHz (norme 802.11b). Cette bande contient plusieurs canaux appartenant à la bande ISM. Une antenne reconfigurable doit donc être capable de couvrir tous ces canaux,

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

souvent en utilisant la commutation. Il est également important que la bande passante soit suffisante pour couvrir chaque canal et que l'antenne puisse passer facilement d'un canal à un autre, grâce à son agilité fréquentielle[40].

b) Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

La reconfigurabilité du diagramme de rayonnement permet à l'antenne de modifier la façon dont elle émet les ondes, sans changer sa fréquence de fonctionnement. L'objectif est de concentrer le signal vers les directions utiles et de réduire son émission vers les zones sujettes aux interférences, améliorant ainsi la qualité de la communication et les performances globales du système[16].

Grâce à cette reconfiguration, l'antenne peut ajuster la direction du rayonnement, sa forme ainsi que son gain afin de mieux cibler certaines directions. Dans la plupart des cas, des réseaux d'antennes sont utilisés pour réaliser cette reconfigurabilité, car ils offrent un contrôle plus précis de la direction du signal[41].

c) Antennes reconfigurables en polarisation

La reconfiguration en polarisation consiste à modifier le type de polarisation de l'antenne, qu'elle soit horizontale, verticale ou circulaire (gauche ou droite). Ce mécanisme améliore la fiabilité du système, le rend plus résistant aux interférences et offre une plus grande flexibilité. Pour éviter de modifier d'autres paramètres, comme la fréquence ou le diagramme de rayonnement, on agit sur la phase et le sens du courant d'alimentation. En pratique, la polarisation est ajustée en changeant l'orientation du champ électrique (champ E), sans affecter la fréquence de fonctionnement ni la forme du diagramme de rayonnement[42].

I.10.4 Les avantages et les inconvénients des antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables présentent plusieurs avantages [43] ainsi que quelques limites[38] :

a)Avantages :

- **Grande flexibilité** : possibilité de changer la fréquence selon les besoins (multi-bandes).
- **Meilleure utilisation du spectre** : réduction des interférences et amélioration des performances.
- **Adaptation en temps réel** : ajustement automatique selon l'environnement et les conditions du réseau.
- **Réduction des coûts** : une seule antenne peut remplacer plusieurs antennes fixes.
- **Amélioration des performances** : optimisation du gain et de la direction du signal.
- **Compatibilité avec les technologies modernes** : adaptée à la 5G, à l'IoT et aux systèmes avancés.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

b) Inconvénients :

- **Conception complexe** : nécessite des technologies avancées.
- **Coût élevé** : dû aux composants actifs et aux procédés de fabrication.
- **Consommation d'énergie supplémentaire** : liée aux circuits de commande.
- **Fiabilité réduite** : présence de composants électroniques sensibles.
- **Performances parfois limitées** : inférieures aux antennes fixes dans certains cas.
- **Temps de reconfiguration** : peut être relativement lent.
- **Commande complexe** : nécessite des systèmes de contrôle sophistiqués.

I.11 Applications des antennes imprimées reconfigurables

Le développement des antennes multifonctionnelles représente aujourd'hui un défi majeur dans les systèmes de communication modernes. Grâce à leur structure compacte et à leur faible coût de production, elles constituent des solutions efficaces pour les technologies avancées, notamment les systèmes radar, l'Internet des objets (IoT) [44], les communications satellitaires, les réseaux sans fil (le Wi-Fi) et les réseaux mobiles (4G / 5G). Nous allons définir les applications utilisées dans notre travail.

I.11.1 La technologie WI-FI

Le Wi-Fi est un réseau local sans fil basé sur la norme IEEE 802.11, permettant la connexion de différents dispositifs via les ondes radio. Cette technologie a été développée et diffusée à l'échelle mondiale par l'organisme Wireless Ethernet Compatibility Alliance, afin de garantir l'interopérabilité entre les équipements[45].

Le Wi-Fi utilise principalement deux bandes de fréquences : 2,4 GHz et 5 GHz. La bande 2,4 GHz offre une couverture étendue mais présente un débit limité et une sensibilité plus importante aux interférences. À l'inverse, la bande 5 GHz permet des vitesses de transmission plus élevées et une meilleure stabilité, tout en offrant une portée plus réduite[46].

I.11.2 La technologie 4G

La 4G a marqué une évolution majeure en augmentant considérablement les débits de transmission, permettant ainsi l'apparition de services tels que le streaming vidéo en haute définition et des applications gourmandes en bande passante. Elle utilise des bandes de fréquences comprises approximativement entre 700 MHz et 2,7 GHz, avec des canaux pouvant atteindre 20 MHz selon la norme LTE[38].

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

I.11.3 La technologie 5G

Introduite au cours des années 2020, la 5G représente la nouvelle génération de réseaux mobiles[47]. Elle répond aux besoins croissants en connectivité en offrant des débits très élevés, une latence extrêmement faible et une fiabilité renforcée. La 5G exploite des bandes inférieures à 6 GHz ainsi que des fréquences millimétriques. Cependant, l'utilisation de ces hautes fréquences entraîne une réduction de la portée et une faible pénétration des obstacles, ce qui nécessite un déploiement dense de stations de base pour assurer une couverture efficace [48]comme montre dans la figure I.21.

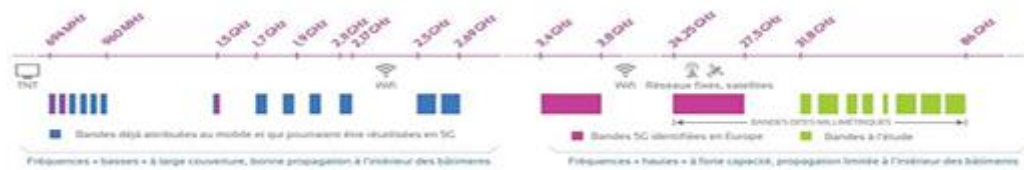


Figure I.21 :La technologie 5G[16].

I.12 Conclusion

En résumé, ce chapitre a permis de présenter les concepts fondamentaux des antennes imprimées ainsi que les principaux facteurs influençant leurs performances.

L'étude des techniques d'alimentation et d'adaptation a souligné leur rôle essentiel dans l'optimisation du fonctionnement des antennes.

Malgré les contraintes liées à la miniaturisation, ces antennes restent au cœur des innovations technologiques et constituent un axe de recherche prometteur. Par ailleurs, les antennes reconfigurables ont été identifiées comme une solution efficace pour répondre aux exigences des systèmes de communication actuels, grâce à leur capacité d'adaptation aux différents besoins et aux applications futures.

Chapitre II

Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5, 5G et le LTE

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

II.1 Introduction

L'évolution constante des réseaux de communication sans fil, tels que le LTE, la 5G et le Wi-Fi, impose aux systèmes d'antennes une flexibilité accrue afin de gérer une multitude de standards au sein d'un même dispositif. Les antennes reconfigurables en fréquence constituent une solution clé à ce défi, car elles permettent de réduire l'encombrement matériel tout en optimisant les performances de transmission.

Ce chapitre détaille le processus complet de conception et de validation numérique d'une antenne patch rectangulaire miniature sous l'environnement CST Studio Suite. L'approche adoptée repose sur l'intégration de diodes PIN, dont la commutation électronique permet de modifier le chemin électrique des courants de surface et, par conséquent, de basculer entre différents modes de résonance.

II.2 Objectif

L'objectif de ce travail consiste à concevoir, modéliser et optimiser une antenne imprimée reconfigurable destinée aux systèmes de communication sans fil modernes. Il s'agit de développer une structure capable de modifier dynamiquement ses caractéristiques électromagnétiques, notamment la fréquence de résonance, grâce à l'intégration de composants actifs tels que des diodes PIN. L'étude vise également à assurer une bonne adaptation d'impédance, une bande passante suffisante et un gain adéquat, tout en garantissant une structure compacte adaptée aux dispositifs mobiles. La modélisation et l'optimisation sous CST permettront d'analyser les performances de l'antenne et d'améliorer son fonctionnement dans différentes bandes telles que le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE.

II.3 Cahier de charge

Nous avons utilisé le cahier des charges défini ci-dessous afin de concevoir notre antenne sous le logiciel CST Microwave Studio :

Fréquence de résonance : $f_r = 2.4$ GHz.

Substrat FR-4 : (épaisseur 1,6 mm, permittivité 4,4).

La forme de l'antenne patch : rectangulaire.

Alimentation de l'antenne patch rectangulaire : ligne quart d'onde.

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

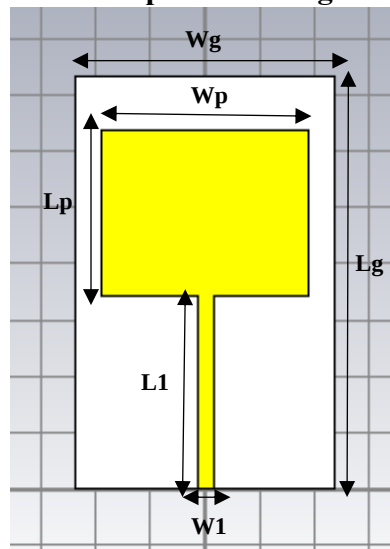


Figure II. 1 : Antenne patch rectangulaire initiale.

II.4.1 Calcul des paramètres de la géométrie rectangulaire

L'antenne proposée est une antenne patch de forme rectangulaire, alimentée par une ligne simple adaptée à une impédance de 50Ω . Elle est réalisée sur un substrat de type FR-4, caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$ et une épaisseur $h = 1.6$ mm. Cette antenne est conçue pour fonctionner autour de la fréquence de résonance $F_r = 2.4$ GHz. Les paramètres géométriques du patch rectangulaire sont présentés dans la figure 1 et les équations de calculs sont présentés sur le tableau II.1 ci-dessous [49]:

Table II.1 : Equations de calcul des paramètres de l'antenne patch rectangulaire.

Paramètres de d'antenne patch rectangulaire		Equations
Equations		
Patch	La largeur	$W_p = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
	La fréquence de résonance	$F_r = \frac{c}{2 L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	Constant diélectrique	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-\frac{1}{2}}$
	La longueur	$L_p = L_{eff} - 2\Delta L$

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

	L'extention de la longueur (ΔL)	$\frac{\Delta L}{h}$ $= 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{Wp}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{Wp}{h} + 0.8)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$Lg = Lp + 2h + L1$
	La largeur	$Wg = Wp + 6h$
La longueur de la ligne	Simple	$L1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}}$

Les dimensions de l'antenne patch rectangulaire de base avec ligne simple sont résumées sur le tableau II.2 :

Table II.2 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire.

Les paramètres	Les valeurs (mm)
Wp	38.03
ϵ_{eff}	4.08
L_{eff}	30.9
ΔL	0.738
Lp	29.4
Lg	90.76
Wg	47.63
L1	34.3
W1	3

II.4.2 Résultat de simulation

Chapitre II : Conception et simulation d’une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Nous allons représenter dans la figure II.2 le coefficient de réflexion S11, qui va nous permettre de visualiser le niveau d’adaptation et la bande passante à la fréquence de résonnance 2.4 GHz :

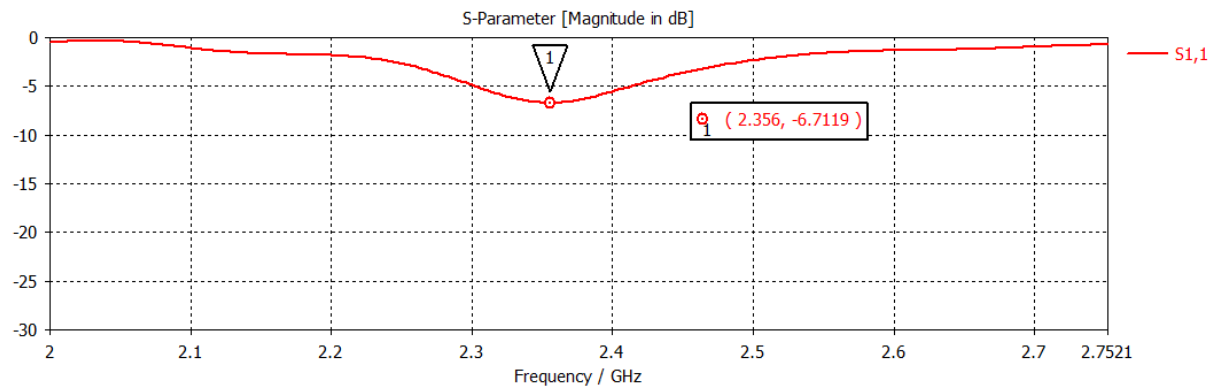


Figure II. 2 : Coefficient de réflexion S11 de l’antenne patch rectangulaire de base.

Nous avons obtenu une fréquence, 2.35GHz avec un S11 de -6.7119dB. Nous allons donc utiliser des techniques d’adaptation afin d’adapter cette antenne à la fréquence2.4 GHz. Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous.

II.4.3 Adaptation de l’antenne a 2.4Ghz avec une ligne quart d’onde

La figure 3 montre l’usage d’une ligne d’alimentation quart d’onde pour adapter l’antenne patch à la fréquence de résonnance désirée. Cette dernière agit comme un transformateur d’impédance entre la ligne d’alimentation 50 Ω et l’impédance de l’antenne, afin de minimiser les réflexions et maximiser le transfert de puissance montre sur le tableau II.3 :

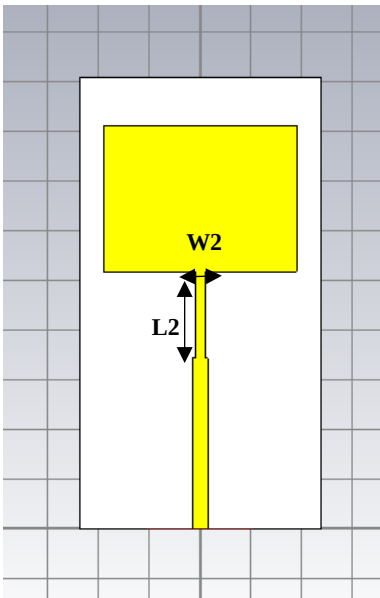


Table II.3 : Dimensions de la ligne quart d’onde.

Les paramètres	Les valeurs (mm)
L2	17.4
W2	1.9

Figure II. 3 : Antenne patch rectangulaire avec ligne quart d’onde.

Les résultats de simulations du paramètre **S11** sont donnés sur la figure II.4 :

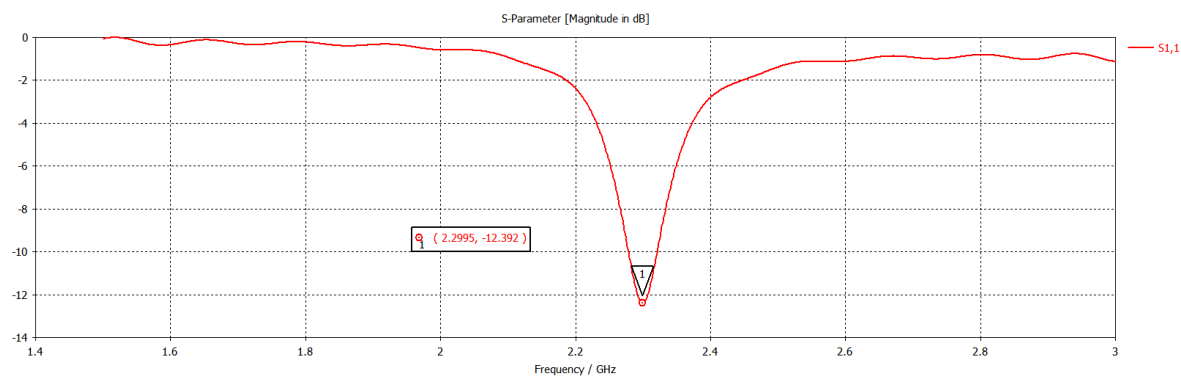


Figure II. 4 : Résultat de simulation avec ligne quart d'onde.

Bien que nous avons obtenu un S11 de $-12,392$ dB à la fréquence 2,29 GHz, ce résultat demeure peu concluant car la résonance reste trop éloignée de la fréquence cible de 2,4 GHz. Nous allons donc insérer des encoches au niveau du patch et effectuer des études paramétriques sur leurs dimensions afin d’ajuster la fréquence de résonance vers 2,4 GHz.

II.4.3.1 Etude paramétrique

La figure II.5 montre les dimensions (a, b) des encoches au niveau du patch montre sur le tableau II.4 :

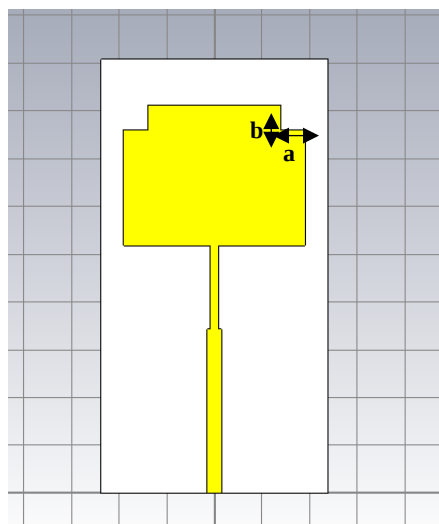


Table II.4 : Dimensions des encoches.

a	b
2.05	7.15
3.05	7.15
3.55	7.15
5.05	5.15

Figure II. 5 : Antenne patch rectangulaire avec encoche.

II.4.3.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulations obtenues sont démontrés sur la figure II.6 :

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

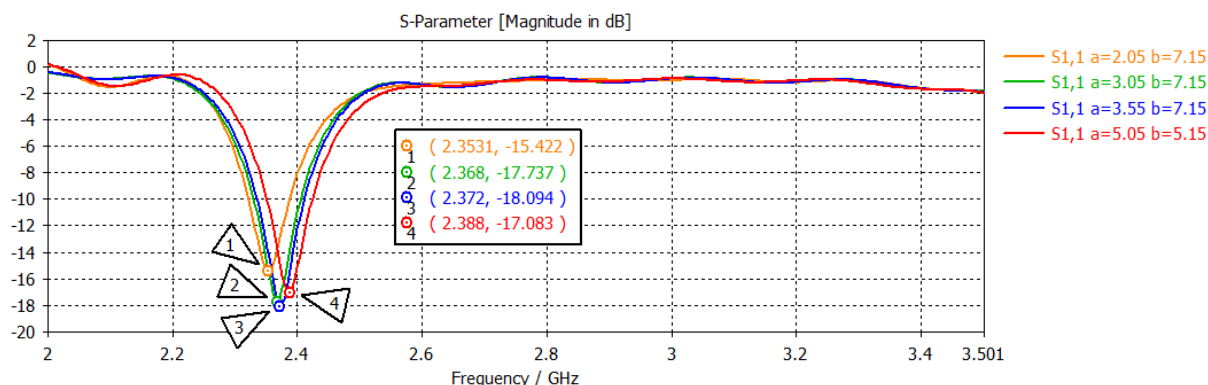


Figure II.6 : Résultats de simulation avec encoche.

Les résultats du tableau montrent que la variation des dimensions a et b améliore progressivement les performances de l'antenne. La fréquence de résonance se rapproche de 2.4 GHz et le coefficient S11 devient plus faible (meilleure adaptation). La configuration finale donne une fréquence de 2.388 GHz avec un S11 de -17.083 dB, indiquant une bonne performance globale de l'antenne. Les résultats de simulations sont résumés sur le tableau II.5 :

Table II.5 : Les résultats de simulation avec étude paramétrique sur les encoches.

Simulations	Dimensions des encoches		Resultat de Simulation	
	a	b	Fr (GHz)	S ₁₁
Simulation 1	2.05	7.15	2.35	-15.422
Simulations 2	3.05	7.15	2.36	-17.737
Simulations 3	3.55	7.15	2.37	-18.094
Simulation finale	5.05	5.15	2.388	-17.083

L'antenne patch rectangulaire à encoche et à alimentation par ligne quart d'onde présente une réponse satisfaisante autour de 2,4 GHz avec un paramètre S11 de -17.083dB (figure II.7), ce qui valide le choix de la géométrie vis-à-vis de la fréquence 2.4GHz et ouvre la voie à une étude de miniaturisation en maintenant la résonance dans la plage cible.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

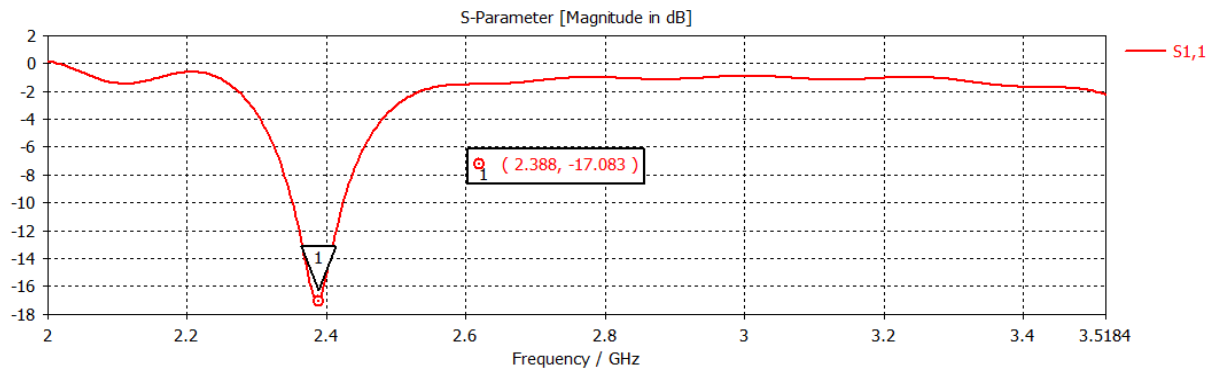


Figure II. 7 : Résultat de simulation finale avec encoche.

La figure II.8 montre la valeur du VSWR à la fréquence 2,38 GHz :

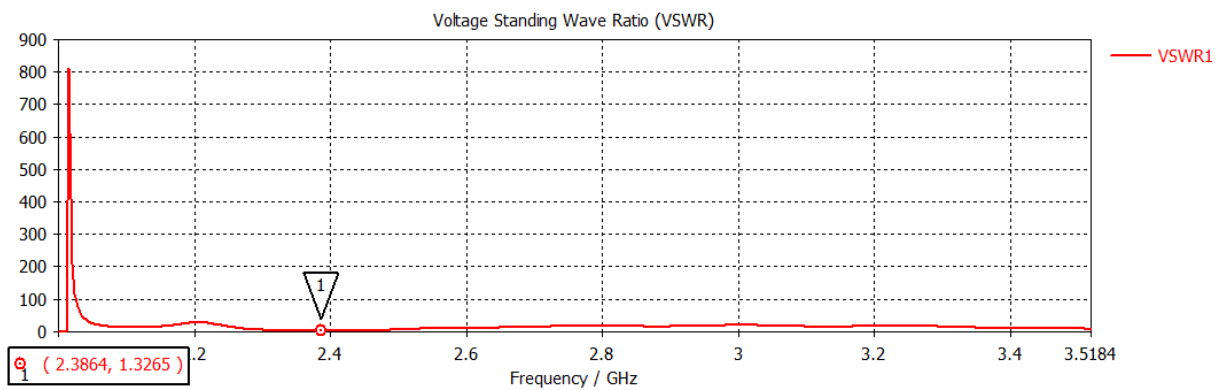


Figure II. 8 : Le rapport d'onde stationnaire (VWSR) de fréquence 2.38.

Nous avons obtenu une valeur de 1,32, ce qui traduit une bonne adaptation de l'impédance entre la ligne de transmission et l'antenne à cette fréquence.

La figure II.9 présente le diagramme de rayonnement de l'antenne patch adapté :

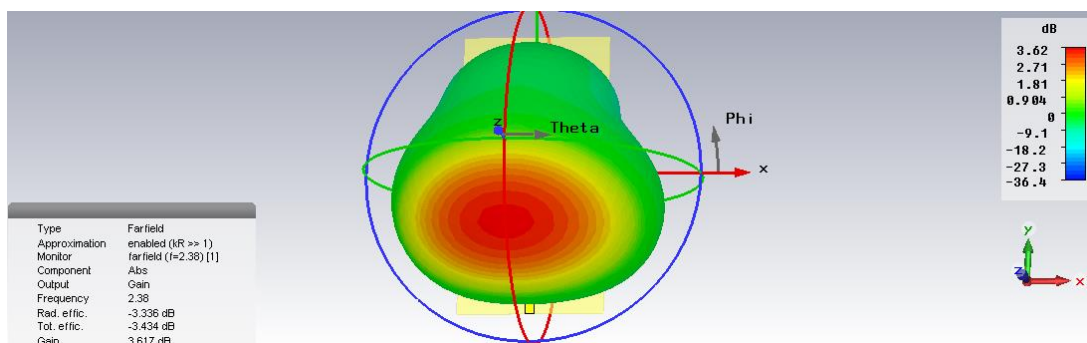


Figure II. 9 : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch rectangulaire.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

La figure II.9 montre que le diagramme de rayonnement obtenu est omnidirectionnel, avec un gain de 3.62 dB.

La figure 10 présente la distribution de courant sur toute l'interface de l'antenne patch rectangulaire proposée.

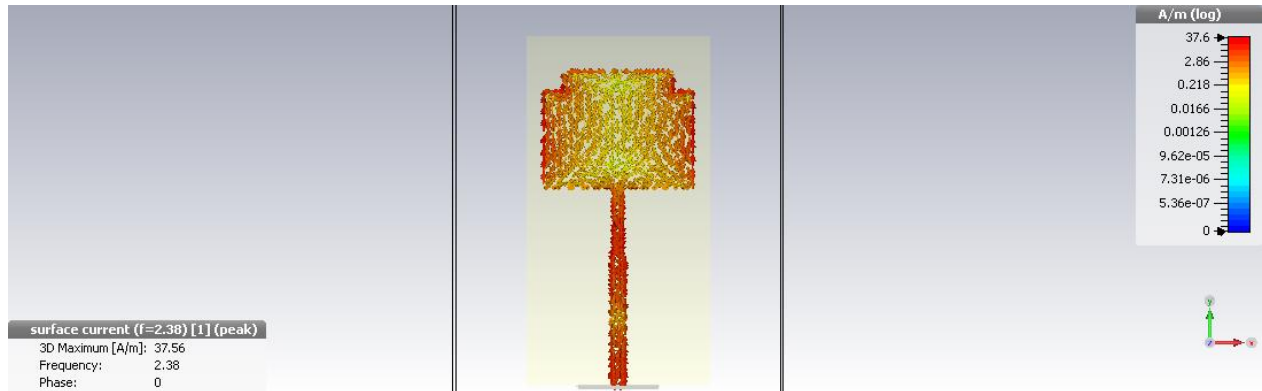


Figure II. 10 : La distribution de courant de surface de l'antenne patch rectangulaire.

Nous remarquons que le maximum du courant est concentré sur les contours de l'antenne patch rectangulaire proposée.

II.5. Miniaturisation de l'antenne patch rectangulaire

La miniaturisation des antennes est recherchée afin de réduire leur encombrement tout en conservant, voire en améliorant, leurs performances électriques, ce qui est essentiel pour leur intégration dans des dispositifs compacts et portables. Dans ce travail, nous allons insérer des fentes (ou slot en anglais) dans le patch pour augmenter le chemin électrique parcouru par les courants de surface. Cela nous a permis de faire descendre la fréquence de résonance de 2.38 GHz à 1.4 GHz sans augmenter la taille physique de l'antenne. C'est une technique efficace de miniaturisation qui permet de faire fonctionner l'antenne à une fréquence plus basse tout en gardant une structure compacte. La figure II.11 présente les dimensions de la fente insère au niveau du patch :

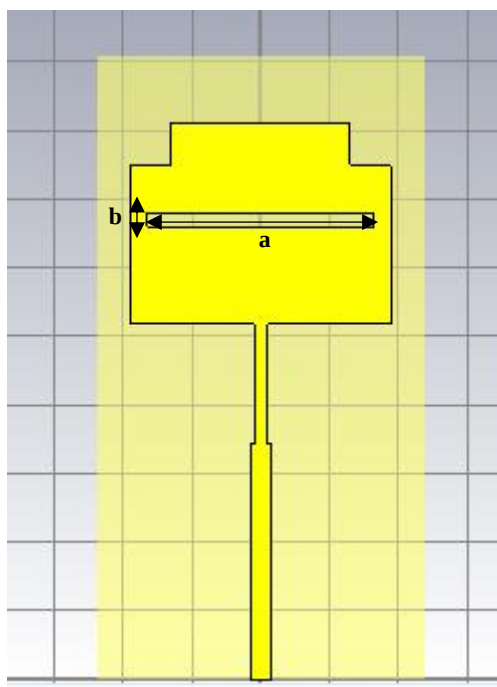


Figure II. 11 : Antenne patch rectangulaire avec fente.

II.5.1 Résultats de simulations

Dans la figure II.12, nous présentons les résultats de simulation du paramètre S11 après l'insertion de la fente sur le patch, afin d'aborder la partie consacrée à la miniaturisation de l'antenne :

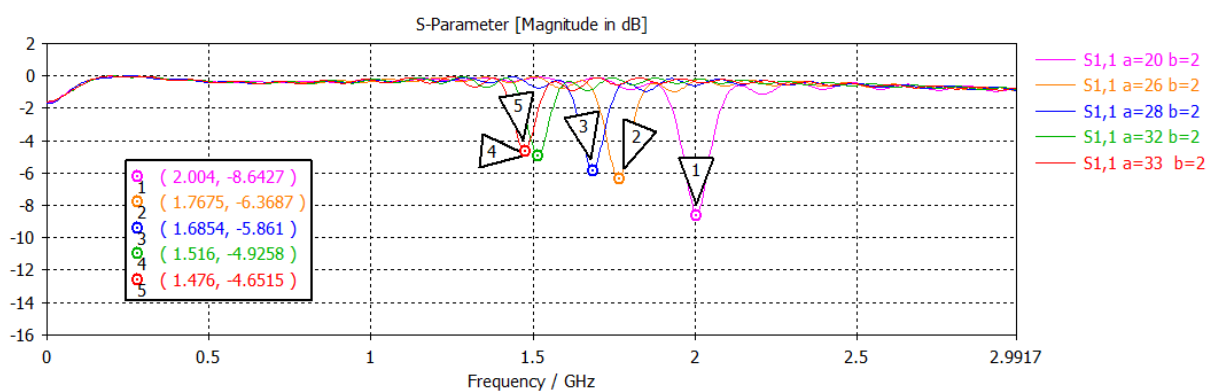


Figure II. 12 : Paramètres S11 obtenu aux dimensions de la fente.

Nous allons résumer les résultats sur le tableau II.6 :

Table II.6 : Les résultats de simulation avec insertion de la fente.

Simulations	Dimensions de la fente		Resultats de simulation	
	a	b	Fr (GHz)	S ₁₁ (dB)
Simulation 1	20	2	2.004	-8.6427
Simulations 2	26	2	1.7675	-6.3687
Simulations 3	28	2	1.6854	-5.861
Simulation 4	32	2	1.516	-4.9258
Simulation finale	33	2	1.476	-6.6515

Les résultats du tableau montrent que l'augmentation progressive du paramètre a entraîne une diminution de la fréquence de résonance, passant de 2.005 GHz à 1.474 GHz. Cela confirme l'effet de la fente sur les caractéristiques de l'antenne. La figure 13 montre que la fréquence de résonance diminue de **2.4 GHz à 1.47 GHz** :

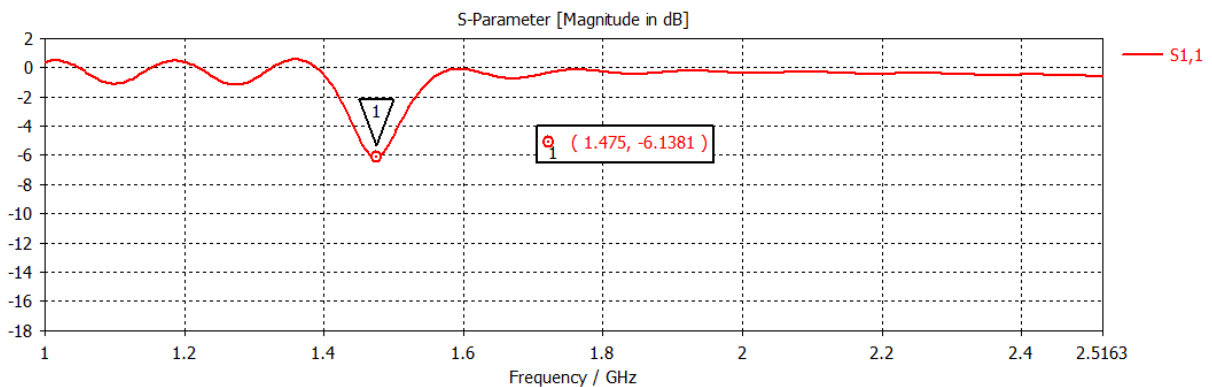


Figure II. 13 : Paramètre S11 pour les dimensions $a=33$ mm et $b=2$ mm des paramètres géométriques de la fente du patch.

II.5.2 Miniaturisations des dimensions de l'antenne patch

Après l'insertion de la fente, qui a permis de translater la fréquence vers 1.47 GHz, nous avons procédé à la miniaturisation des dimensions L_p et W_p (figure II.14). Cette étape d'optimisation est essentielle pour compenser l'effet de la fente et recentrer précisément la résonance sur la fréquence cible de 2.4 GHz, tout en assurant une miniaturisation de l'antenne et une adaptation d'impédance optimale.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

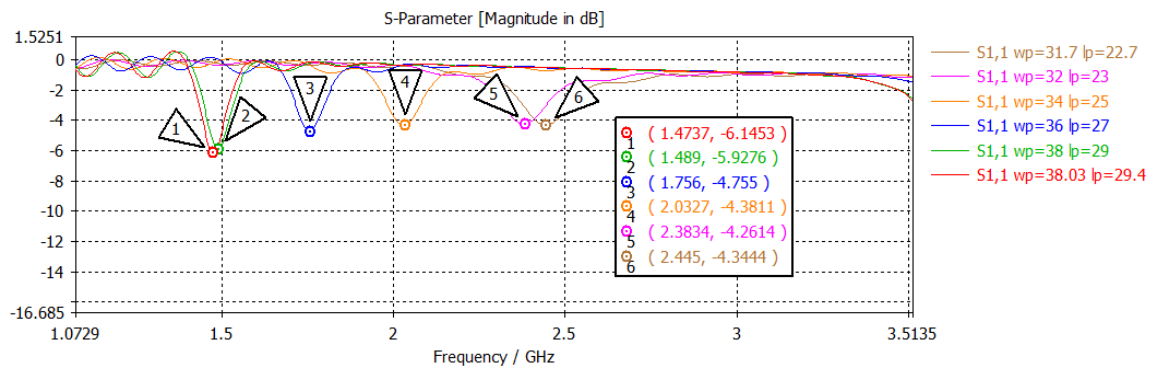


Figure II. 14 : Résultats de simulation avec la dégradation de L_p W_p .

Les résultats de simulation montrent que la diminution des dimensions W_p et L_p entraîne une augmentation de la fréquence de résonance de 1,47 GHz à 2,44 GHz, mais le paramètre S_{11} reste encore insuffisamment optimisé (figure II.15) :

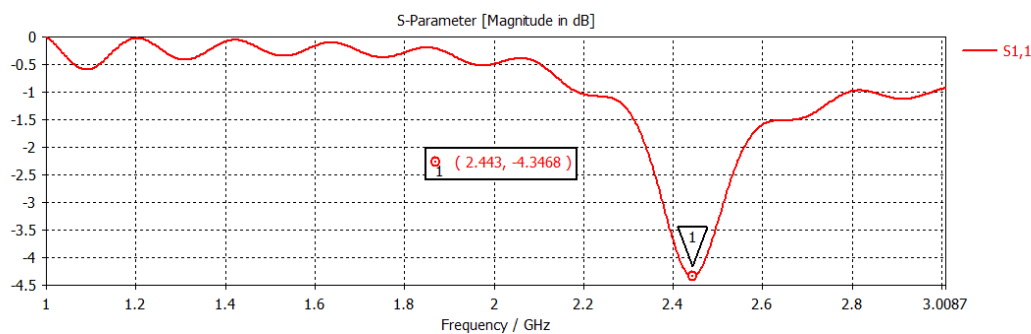


Figure II. 15 : Résultat de simulation finale avec $W_p = 31.7$ et $L_p = 22.7$.

Les résultats sont résumés sur le tableau II.7 :

Table II.7 : Les résultats de simulation avec miniaturisation du L_p et W_p .

Simulations	Dimensions du L_p et W_p		Résultats de Simulation	
	L_p	W_p	Fr (GHz)	S_{11} (dB)
Simulation 1	29.4	38.03	1.4737	-6.1453
Simulations 2	29	38	1.489	-5.9276
Simulations 3	27	36	1.756	-4.755
Simulation 4	25	34	2.0327	-4.3811
Simulation 5	23	32	2.3834	-4.2614
Simulation finale	22.7	31.7	2.445	-4.3444

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Dans la section suivante, nous allons utiliser une technique d'adaptation afin d'atteindre notre objectif.

II.5.3 Adaptation de l'antenne patch miniaturise par fente et encoche

La figure II.16 montre la géométrie du plan de masse avec l'intégration des fentes et d'encoches destinées à manipuler les courants d'excitation pour améliorer les performances de l'antenne patch miniature proposée:

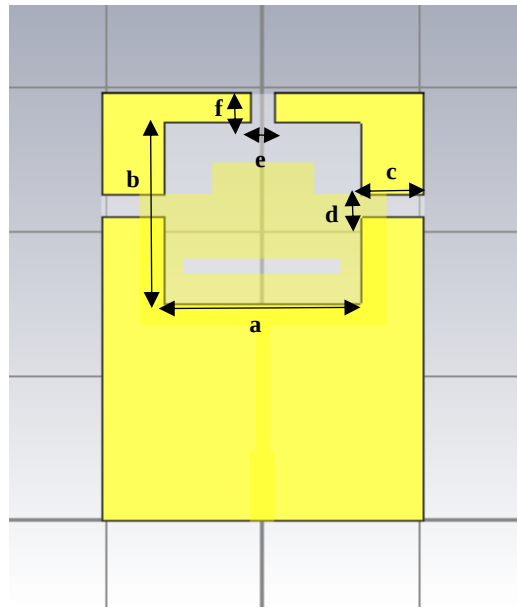


Figure II. 16 : Plan de masse avec les paramètres des encoches et fente.

La figure II.17 montre l'évolution du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour différentes configurations, mettant en évidence l'amélioration du niveau d'adaptation à 2,4 GHz :

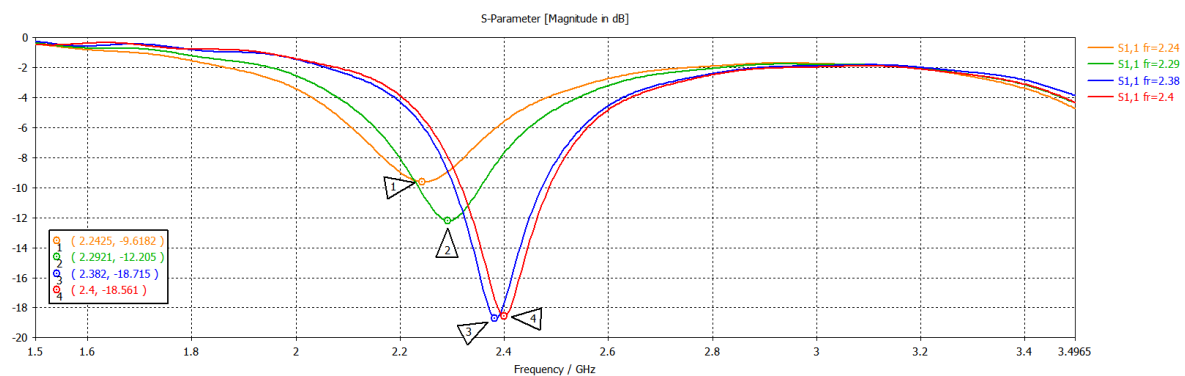


Figure II. 17 : Résultats de plusieurs simulations de l'antenne avec différentes configurations de paramètres (de a à f).

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Le tableau II.8 présente les résultats de plusieurs simulations de l'antenne avec différentes configurations de paramètres (a à f) et montre la variation de la fréquence de résonance et du coefficient de réflexion S11 :

Table II.8 : Les résultats de simulation avec fentes et encoche au plan de masse.

Simulations	Dimensions des fentes et encoches						Resultats de Simulation	
	a	b	c	d	e	f	Fr (GHz)	S11
Simulation 1	20	21.5	10.5	0.5	1	6.7	2.24	-9.6182
Simulations 2	20	21.5	10.5	1	1	6.7	2.29	-12.205
Simulations 3	20	21.5	10.5	0.5	1	6.7	2.38	-18.715
Simulation finale	20	21.5	10.5	0.5	0.5	6.7	2.4	-18.561

La figure II.18 montre le coefficient de réflexion S11 de l'antenne finale, présentant une résonance parfaitement centrée à 2,4 GHz avec un niveau d'adaptation optimal de -18,56 dB.

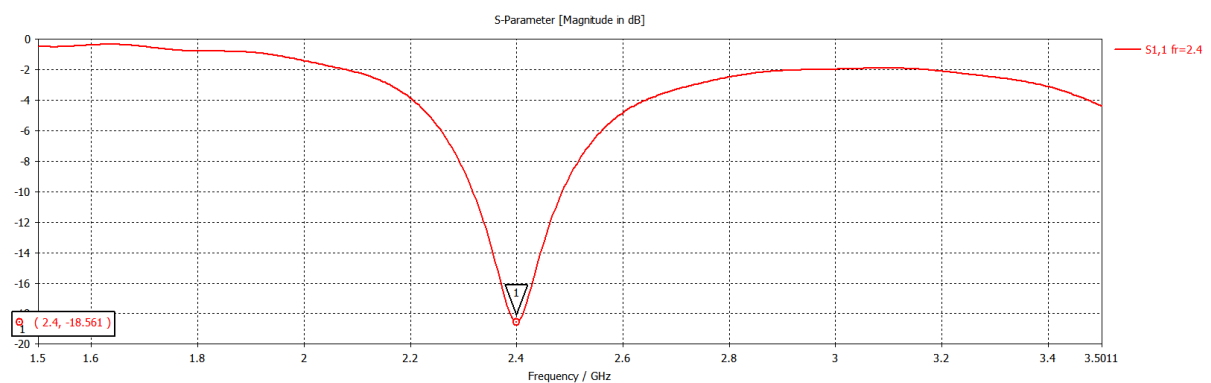
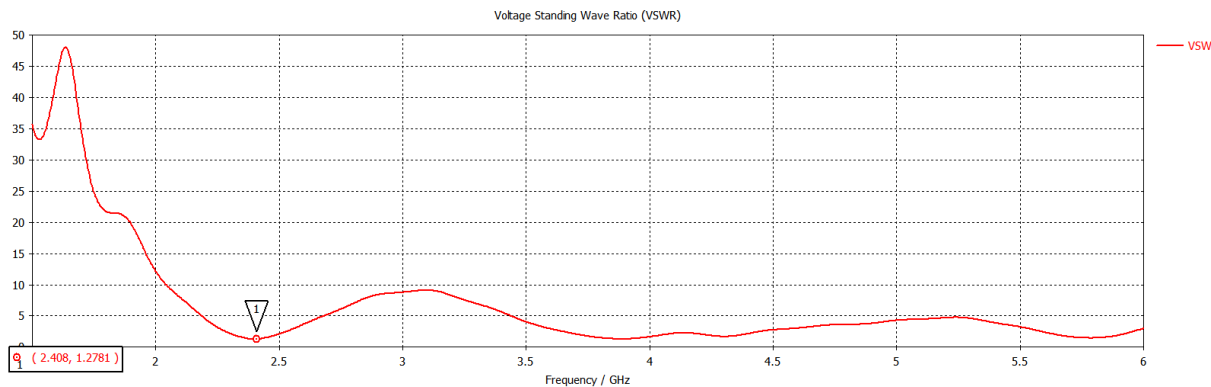


Figure II. 18 : Résultat de simulation finale de l'antenne patch miniature adapté à 2.4GHz.

La figure II.19 montre l'évolution du Rapport d'Onde Stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence,



Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Figure II. 19 : Le rapport d'onde stationnaire (VWSR) de fréquence 2.4.

On observe une valeur de 1.27 à 2.4 GHz, confirmant une excellente adaptation d'impédance. Les figures II.20 et II.21 montre les diagrammes de rayonnement 3D et polaire de l'antenne à 2,4 GHz, illustrant la distribution spatiale de l'énergie :

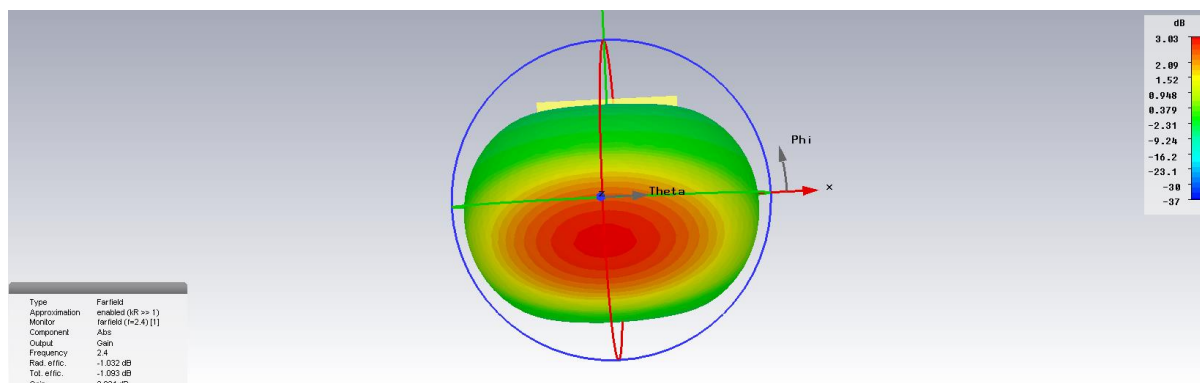


Figure II. 20 : Diagramme de rayonnement 3D d'antenne.

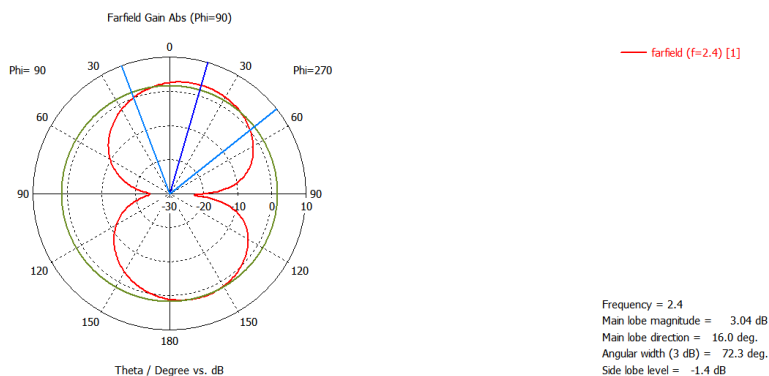


Figure II. 21 : Diagramme de rayonnement polaire d'antenne.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire miniature est omnidirectionnel avec un gain de 3.03 dB et une ouverture de 72.3 deg à -3dB.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

La figure II.22 présente la distribution du courant de surface de l'antenne patch à la fréquence de résonance 2.4 GHz, mettant en évidence les zones de forte intensité où l'excitation est maximale

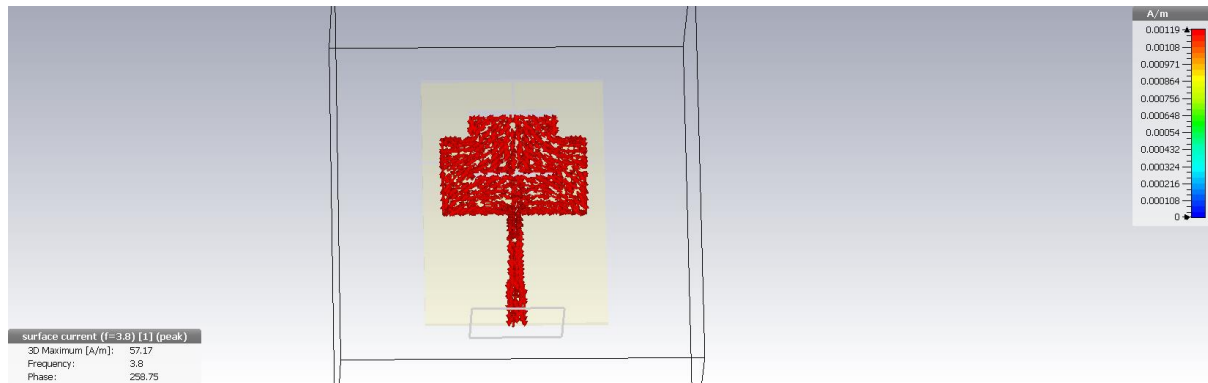


Figure II. 22 : La distribution de courant de surface de l'antenne patch rectangulaire adapté.

II.6. Antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le wifi 2.4GHz, la 5G (3.5GHz) et le wifi5 (5.2GHz)

Dans ce travail, nous avons exploité des diodes PIN pour réaliser la reconfigurabilité en fréquence de l'antenne, en utilisant ces diodes en mode ON/OFF afin de modifier le chemin des courants RF sur le plan rayonnant et, par conséquent, de déplacer les fréquences de résonance selon l'état des commutateurs, démontrant ainsi sa capacité à commuter entre plusieurs standards de communication (Wi-Fi, 5G et LTE). La figure II.23 montre l'insertion des diodes D1/ D2 et D3 sur le plan de masse :

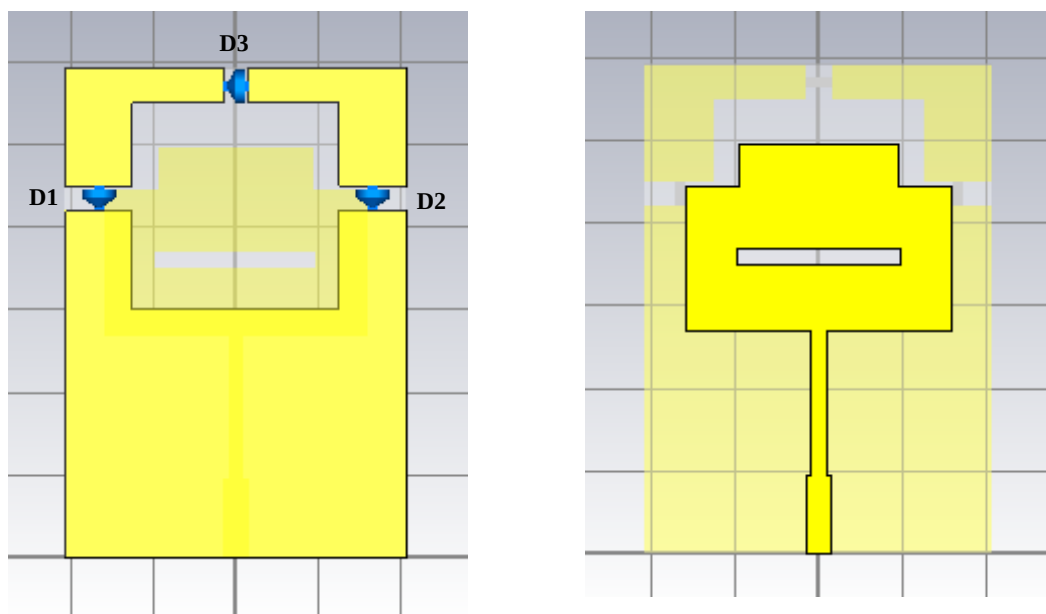


Figure II. 23 : Antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable avec diode.

Le circuit équivalent d'une diode PIN [50] est donné par la figure II.24 :

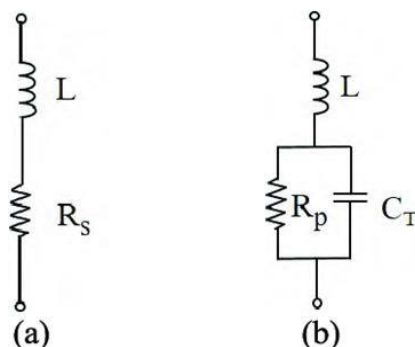


Figure II. 24 : Circuit équivalent de la diode PIN, (a) mode ON, (b) mode OFF.

II.6.1 Résultats de simulations avec les diodes PIN

Nous avons utilisé plusieurs types de diodes PIN afin d'atteindre la reconfigurabilité en fréquence. Dans cette sous-section, nous allons présenter les résultats des simulations de quelques-unes d'entre elles :

- **Diode HSMP-3860**

Les modes de fonctionnement et les valeurs RLC correspondantes pour la diode HSMP-3860, utilisées dans la simulation pour les états ON et OFF, sont présentés sur le tableau II.9 :

Table II.9 : Les valeurs de la diode PIN HSMP-3860 utilisée[51].

Mode de diode	Résistance (R)	Inductance (L)	Capacité (C)
On	2.5 Ω	6e-10H	0 F
Off	70000 Ω	6e-10H	2e-13F

La figure II.25 présente les résultats de simulation du paramètre S_{11} pour les différents modes de fonctionnement, et le tableau II.10 résume l'ensemble de ces résultats.

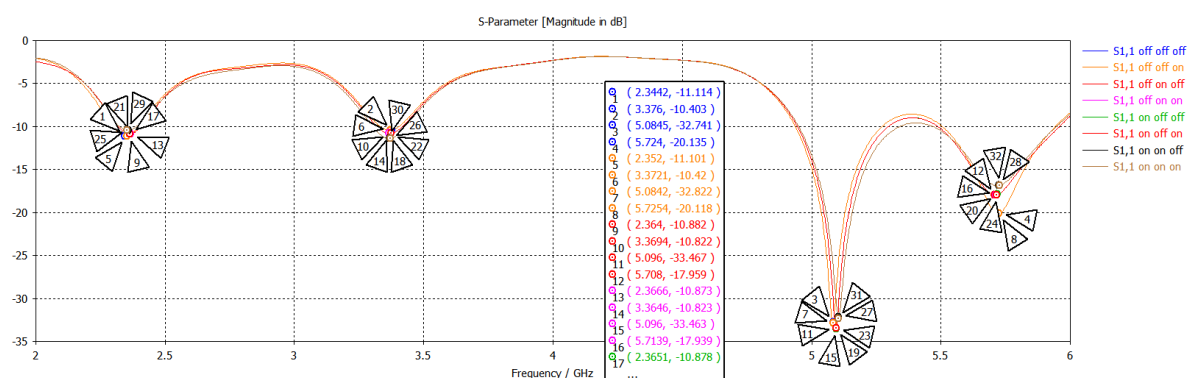


Figure II. 25 : Résultats de simulation avec la diode HSMP 3860.

Table II.10 : Résultats des états de la diode HSMP 3860.

État	Les fréquences (GHz)	S11 (dB)
OFF OFF OFF	2.34 / 3.37 / 5.08 / 5.72	-11.11 / -11.40 / -32.74 / -20.13
OFF OFF ON	2.35 / 3.37 / 5.08 / 5.72	-11.10 / -11.42 / -32.82 / -20.11
OFF ON OFF	2.36 / 3.36 / 5.09 / 5.70	-10.88 / -10.82 / -33.46 / -17.95
OFF ON ON	2.36 / 3.36 / 5.09 / 5.71	-10.87 / -10.82 / -33.46 / -17.93
ON OFF OFF	2.36 / 3.36 / 5.10 / 5.72	-10.87 / -11.39 / -33.46 / -16.88
ON OFF ON	2.36 / 3.37 / 5.09 / 5.70	-10.86 / -10.81 / -33.46 / -17.95
ON ON OFF	2.36 / 3.36 / 5.10 / 5.72	-10.38 / -11.39 / -32.11 / -16.88
ON ON ON	2.36 / 3.36 / 5.10 / 5.72	-10.38 / -11.39 / -32.11 / -16.88

D'après le tableau II.10, la diode HSMP-3860 ne donne aucune reconfigurabilité en fréquence, nous allons essayer un autre type, la **MA4AGBLP912**.

- **Diode MA4AGBLP912**

Le tableau II.11 montre les paramètres de la diode MA4AGBLP912 pour les états On et Off, définissant les valeurs de résistance (R), d'inductance (L) et de capacité (C) utilisées dans la simulation.

Table II.11 : Mode de fonctionnement des diodes MA4AGBLP912[52].

Mode de diode	Résistance(R)	Inductance(L)	Capacité(C)
On	4 Ω	5e-10H	0F
Off	10000 Ω	5e-10H	2.5e-14F

La figure II.26 présente les résultats de simulation du paramètre S_{11} pour les différents modes de fonctionnement, et le tableau 12 résume l'ensemble de ces résultats.

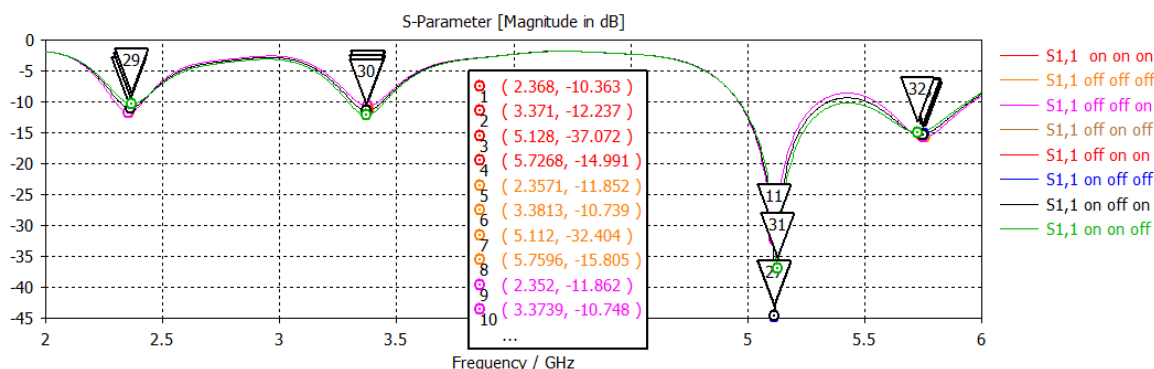


Figure II. 26 : Résultats de simulation avec la MA4AGBLP912.

Table II.12 : Les états de la MA4AGBLP912.

Etat	Les fréquences	S11
On on on	2.36/3.37/5.12/5.72	-10.36/-12.23/-37.07/-14.99
Off off off	2.35/3.38/5.11/5.75	-11.85/-10.73/-32.40/-15.80
Off off on	2.35/3.37/5.11/5.74	-11.86/-10.74/-31.59/-15.83
Off on off	2.36/3.37/5.11/5.74	-11.05/-11.44/-44.75/-15.54
Off on on	2.36/3.37/5.11/5.74	-11.05/-11.45/-44.73/-15.34
On off off	2.36/3.36/5.11/5.72	-10.34/-11.44/-44.75/-15.30
On off on	2.36/3.37/5.11/5.74	-11.05/-11.44/-44.75/-15.54
On on off	2.37/3.36/5.12/5.72	-10.34/-12.23/-37.07/-14.99

Nous remarquons que cette diode aussi ne donne aucune reconfigurabilité en fréquence, nous allons utiliser par la suite la famille PIN BAR.

- **Diode PIN BAR 64**

Le tableau II.13 montre les paramètres de la diode PIN BAR 64 pour les états On et Off, définissant les valeurs de résistance (R), d'inductance (L) et de capacité (C) utilisées dans la simulation.

Table II.13 : Les valeurs de R L C du PIN BAR 64[53].

Mode de diode	Résistance (R)	Inductance (L)	Capacité (C)
On	3 Ω	2.6e-13 H	0 F
Off	20000Ω	0 H	40e-12F

Le tableau II.14 résume l'ensemble des états de fonctionnement des diodes (D1, D2, D3):

Table II.14 : Les modes de fonction de la diode PIN BAR 64.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Modes	D1	D2	D3
Mode 1	ON	ON	ON
Mode 2	OFF	ON	ON
Mode 3	ON	OFF	OFF

Les résultats de simulations des différents modes sont présentés ci-dessous :

- **Mode 1**

La figure II.27 montre le coefficient de réflexion S11 pour le Mode 1, illustrant un comportement tri-bande avec trois pics de résonance distincts situés à 2,4 GHz, 3,41 GHz et 5,20 GHz avec un paramètre S11 de -13.48 dB, -14.10 dB et -17.8 dB respectivement.

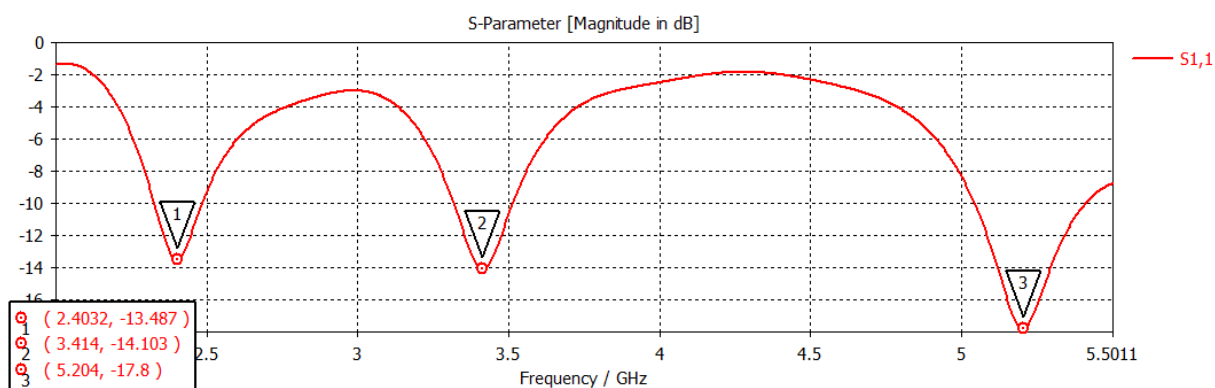


Figure II. 27 : Résultats de simulation du mode 1.

Les diagrammes de rayonnement des différentes fréquences obtenus sont données aux figures II.28 ; II.29 et II.30 :

Le diagramme montre la distribution tridimensionnelle du rayonnement de l'antenne à la fréquence de 2,4 GHz, mettant en évidence un lobe principal bien défini avec un gain simulé de 2,27 dBi.

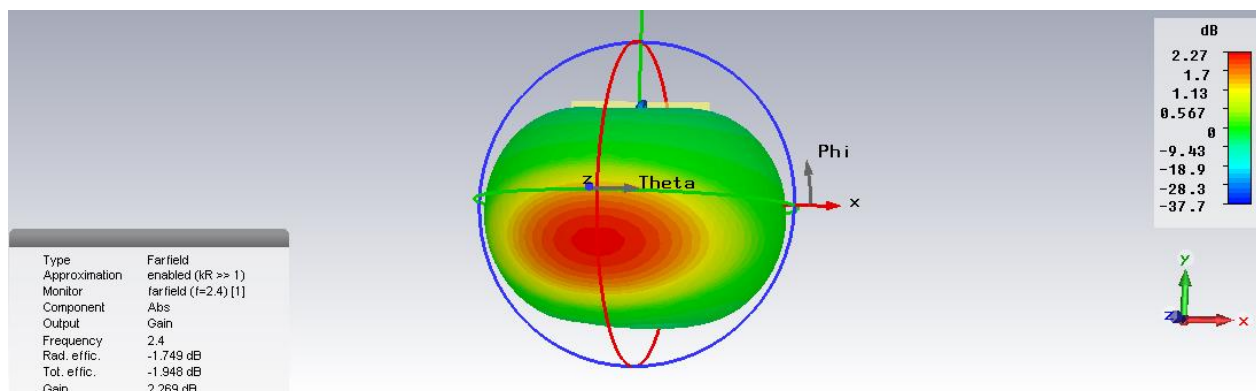


Figure II. 28 : Le diagramme de rayonnement en mode M1 à 2.4 GHz.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Le diagramme montre les résultats de rayonnement à la fréquence de 3,41 GHz, donnant un gain maximal de 2,57 dBi.

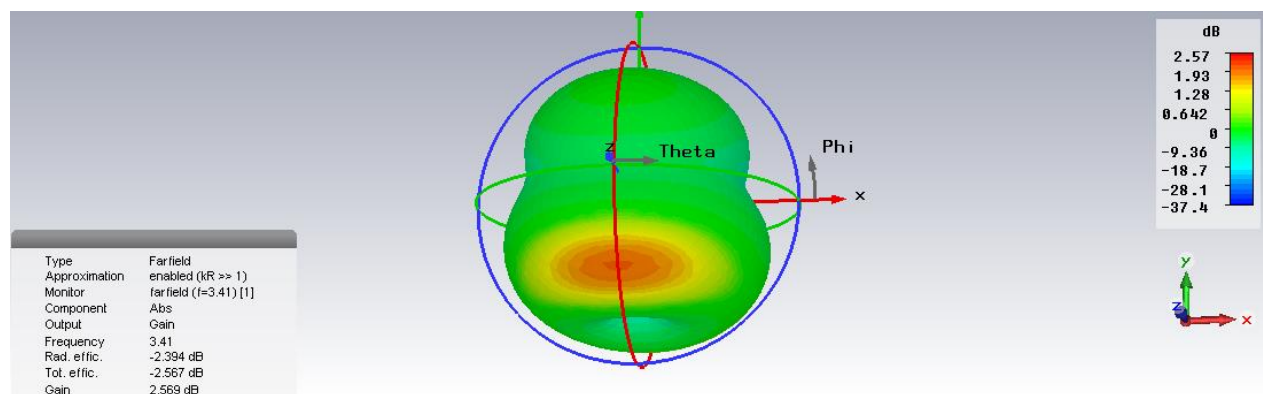


Figure II. 29 : Le diagramme de rayonnement en mode 1 à 3.41GHz.

Le diagramme de rayonnement montre un gain de 1.85 dB en mode M1 à la fréquence 5.20GHz.

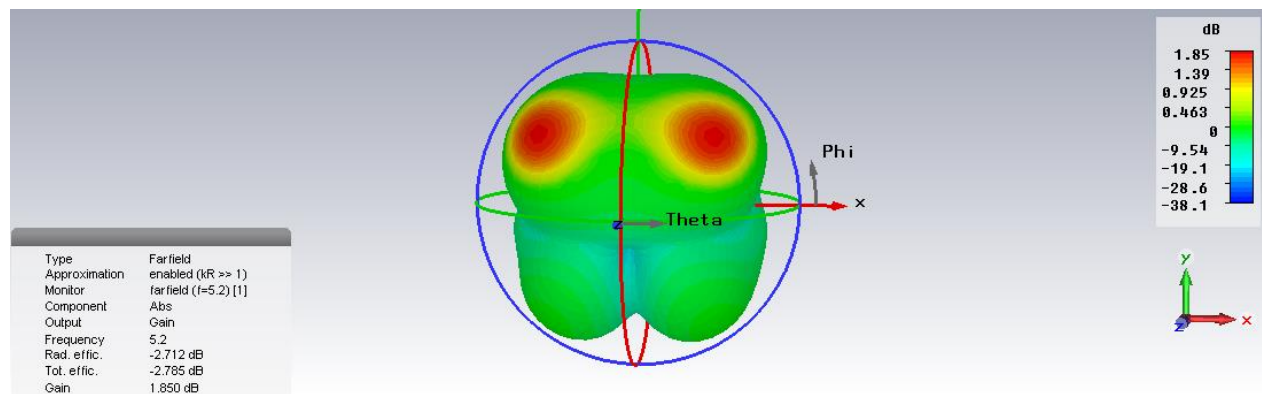
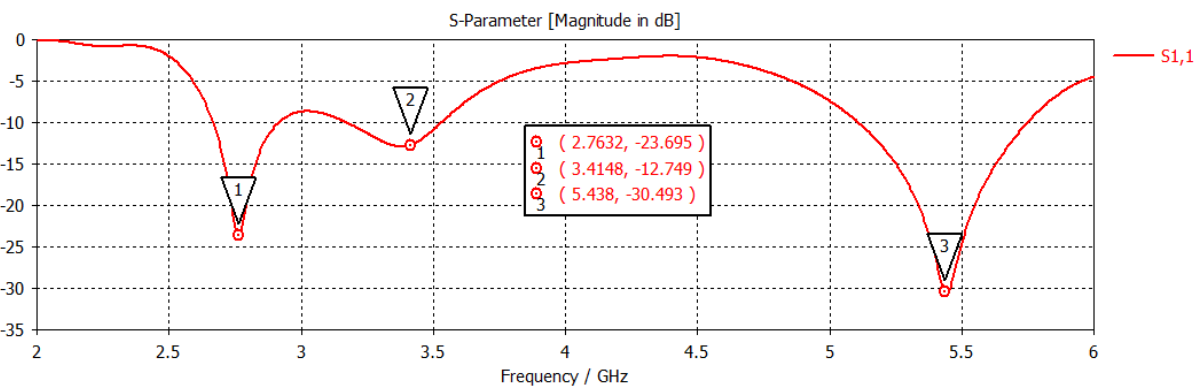


Figure II. 30 : Le diagramme de rayonnement en mode M1 à 5.20 GHz.

• Mode 2

La figure II.31 montre le coefficient de réflexion S 11 pour le Mode 2, illustrant le décalage des fréquences de résonance vers 2,76 GHz, 3,41 GHz et 5,43 GHz suite au changement d'état des diodes PIN. Le coefficient de réflexion obtenu est de -23.69 dB, -12.74 dB et -30.49 dB aux déferrentes fréquences respectivement.



Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Figure II. 31 : Résultats de simulation en mode 2.

Les diagrammes de rayonnement des différentes fréquences obtenus sont données aux figures II.32 ; II.33 et II.34 :

Le diagramme de rayonnement montre les performances en champ lointain pour la fréquence de 2,76 GHz, affichant un gain maximal de 2,65 dB.

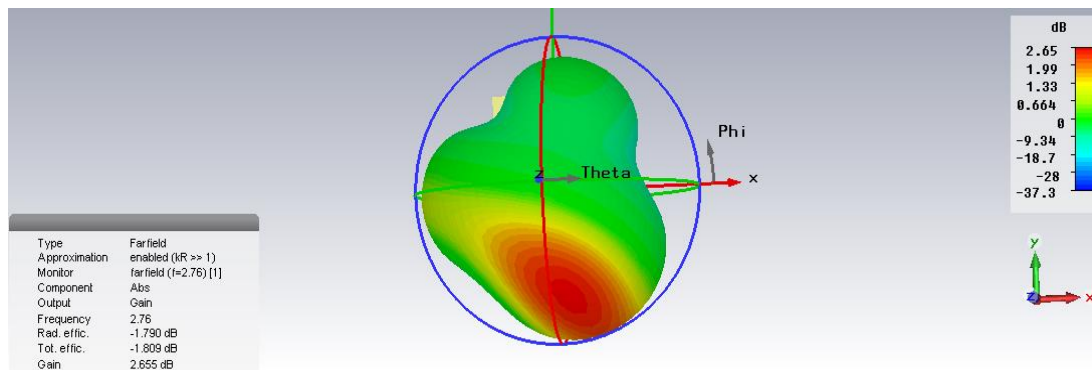


Figure II. 32 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 2.7 GHz.

Le diagramme de rayonnement montre une nette amélioration du gain maximal, atteignant 3,31 dBi à 3,41 GHz, ce qui démontre une excellente concentration de l'énergie rayonnée dans cette configuration du Mode 2.

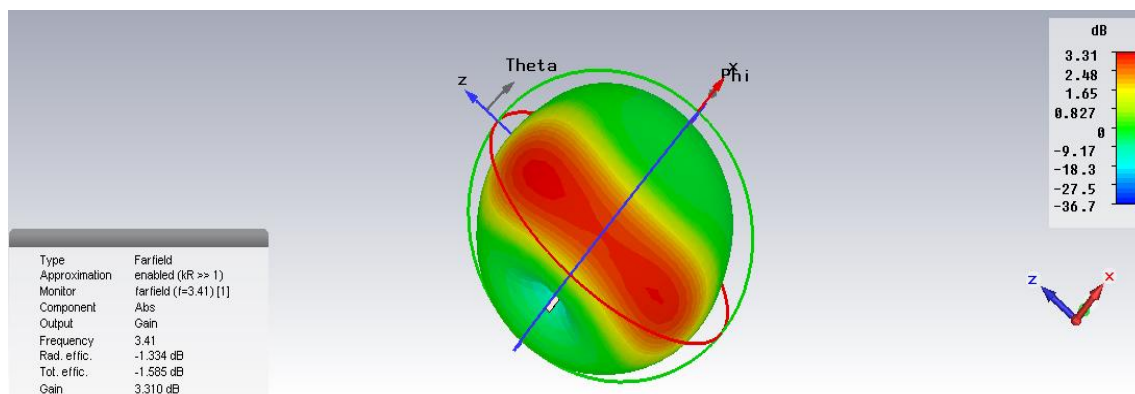


Figure II. 33 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 3.41 GHz.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Le diagramme de rayonnement montre les résultats en champ lointain pour la fréquence de 5,42 GHz, affichant un gain maximal de 2,35 dBi, ce qui confirme l'efficacité de l'antenne.

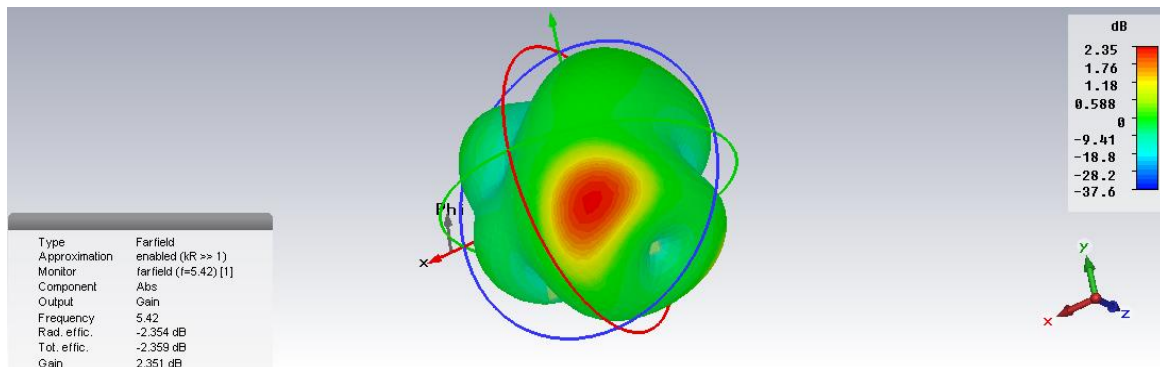


Figure II. 34 : Le diagramme de rayonnement en mode M2 à 5.4 GHz.

• Mode 3

La figure II.35 montre le coefficient de réflexion S 11 pour le Mode 3, mettant en évidence un fonctionnement bi-bande avec deux résonances distinctes situées à 3,64 GHz et 5,34 GHz avec un coefficient de réflexion de -14.12 dB et -41.52 dB :

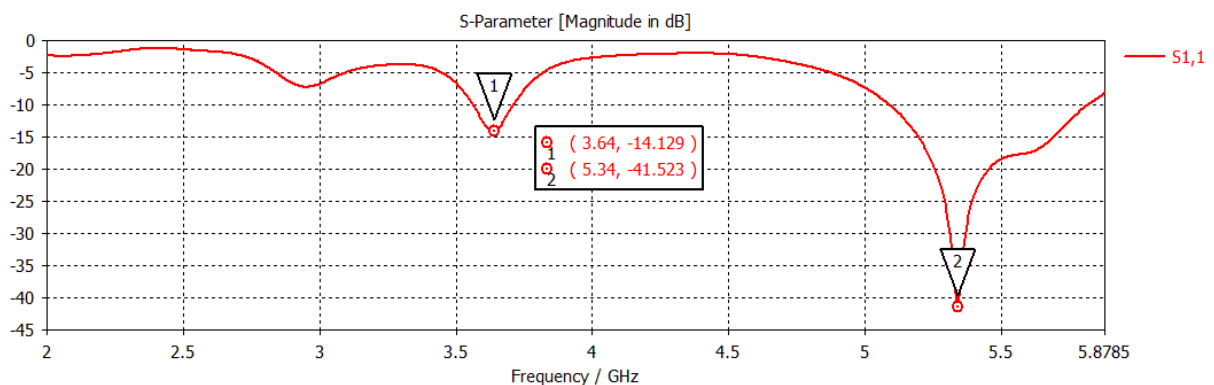


Figure II. 35 : Résultats de simulation en mode 3.

Les diagrammes de rayonnement des différentes fréquences obtenus sont données aux figures II.36 et II.37 :

Le diagramme de rayonnement montre un gain maximal de 2,42 dBi à 3,64 GHz.

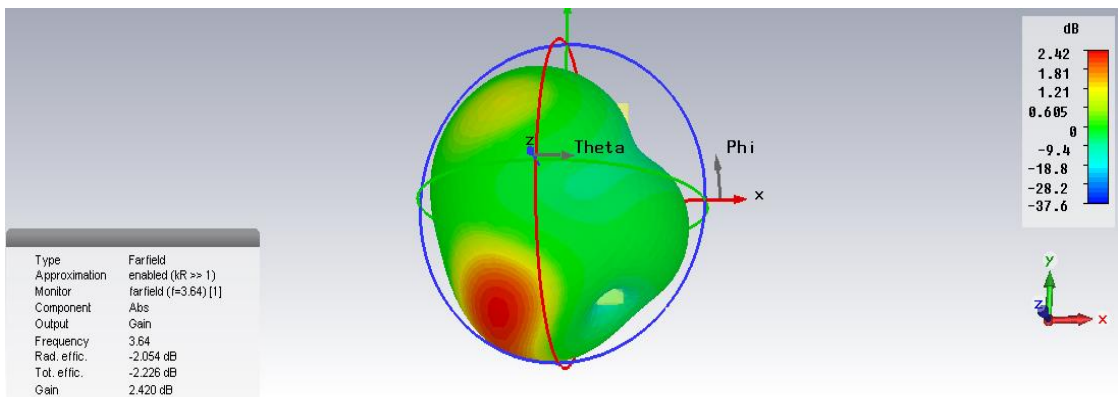


Figure II. 36 : Le diagramme de rayonnement en mode M3 à 3.6 GHz.

Le diagramme de rayonnement pour la fréquence de 5,34 GHz, présente un gain maximal de 2,14 dBi.

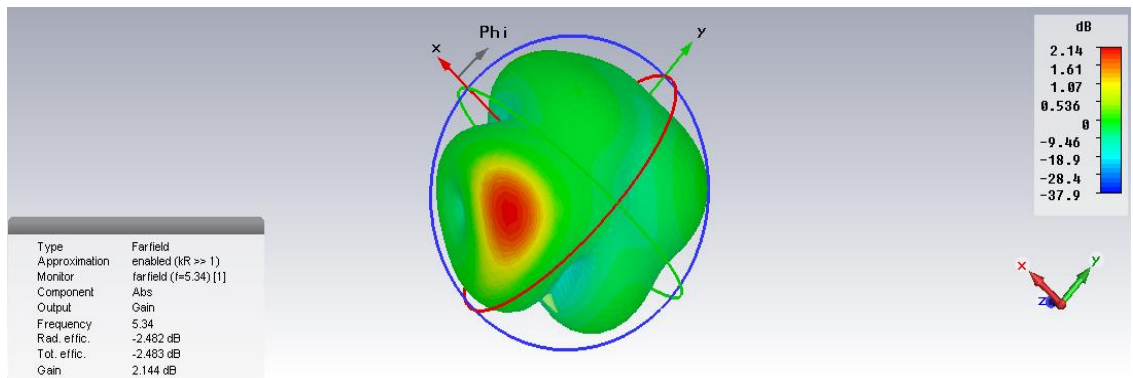


Figure II. 37 : Le diagramme de rayonnement en mode M3 à la fréquence 5.3 GHz.

II.6.2 Synthèses des performances de l'antenne pour les trois modes de fonctionnement avec la diode PIN BAR 64

Le tableau II.15 résume les résultats des modes de fonctionnement M1, M2 et M3 de la diode PIN BAR 64 et leurs domaines d'applications. Il met en évidence les différentes configurations de la diode (ON/OFF) associées à chaque mode, ainsi que les fréquences de résonance et les niveaux de retour correspondants, permettant d'identifier clairement les bandes couvertes et les standards de communication ciblés (Wi-Fi, 5G, LTE, etc.) :

Table II.15 : Synthèses des performances de l'antenne aux modes M1, M2 et M3.

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

Modes	D1	D2	D3	La fréquence	S11 (dB)	Applications
Mode 1	On	on	on	2.4/3.414/5.204	-13.48/-14.10/-17.8	WiFi 2.4 / 5G / WiFi 5
Mode 2	off	on	on	2.76/3.41/5.43	-23.69/-12.74/-30.49	LTE / 5G / WiFi 5
Mode 3	on	off	off	3.64/5.34	-14.12/-41.523	5G / WiFi 5

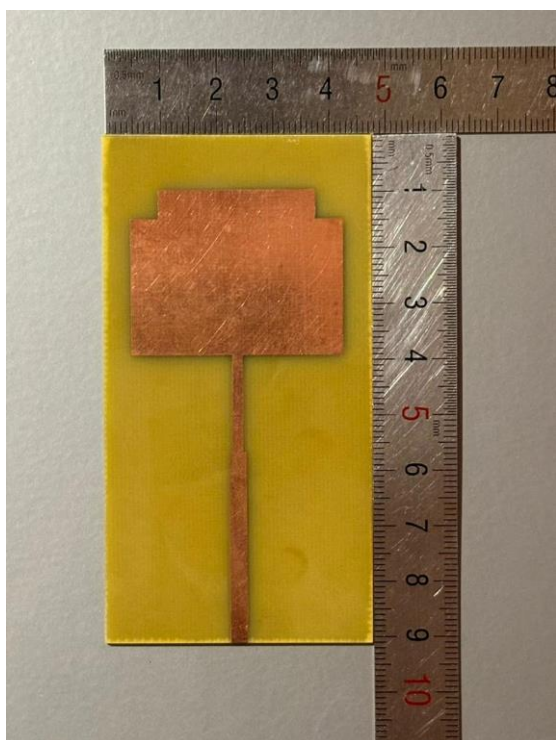
Le tableau II.15 synthétise les performances de l'antenne reconfigurable. Grâce à cette configuration, l'antenne joue un rôle crucial de sélectivité en filtrant et en ciblant uniquement les bandes utiles pour chaque scénario. En mode 1 (D1, D2, D3 en ON), l'antenne présente trois fréquences de résonance à 2,4 GHz, 3,34 GHz et 5,20 GHz avec des niveaux de retour respectifs de -13,48 dB, -14,10 dB et -17,8 dB, ce qui la rend adaptée aux standards Wi-Fi 2,4 GHz, 5G et Wi-Fi 5. En mode 2 (D1 OFF, D2 et D3 ON), les fréquences de résonance se déplacent à 2,76 GHz, 3,41 GHz et 5,43 GHz, avec des valeurs de S_{11} de -22,84 dB, -12,48 dB et -29,49 dB, ce qui permet de couvrir les bandes LTE, 5G et Wi-Fi 5. Enfin, le mode 3 (D1 ON, D2 et D3 OFF) sélectionne deux résonances à 3,64 GHz et 5,34 GHz, avec des S_{11} de -14,16 dB et -30,56 dB, montrant une bonne adaptation pour les applications 5G et Wi-Fi 5. Cette sélectivité dynamique confirme la capacité de l'antenne à commuter efficacement entre plusieurs standards de communication en fonction de la configuration des diodes, tout en optimisant la réception des signaux d'intérêt.

II.7 Prototype de l'antenne patch rectangulaire miniature sélective

II.7.1 Prototype de l'antenne rectangulaire initiale

Le prototype de l'antenne patch initiale simulé à 2.4 GHz est présenté sur la figure II.38 :

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE



(a)

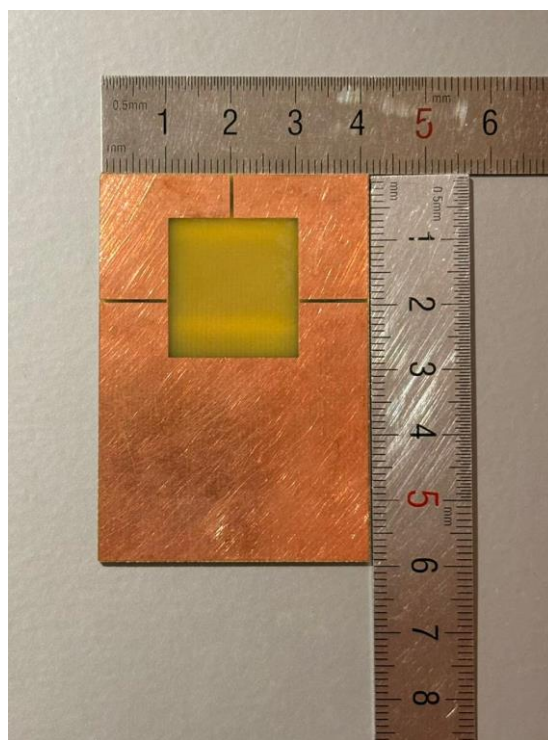
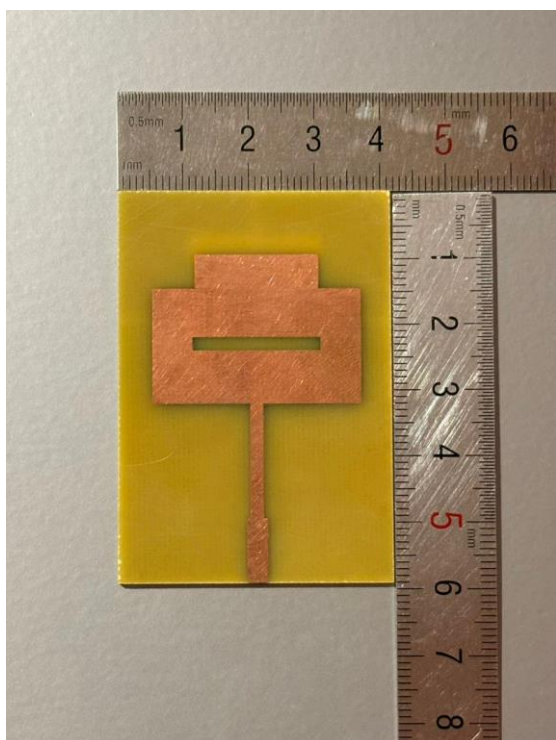


(b)

Figure II. 38 : Prototype de l'antenne initiale proposé, (a)vue de face, (b) vue d'arrière.

II.7.2 Prototype de l'antenne miniature

Le prototype de l'antenne miniature finale proposée, basée sur l'intégration de fentes, encoches et de diodes, est présenté respectivement dans la figure II.39 :



(a) (b)

Figure II. 39 : Prototype de l'antenne miniature proposé (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

II.7.3 La comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et Antenne miniature final à base de fente encoche et diode

Dans la figure II.40, nous allons comparer les dimensions de l'antenne rectangulaire initiale et miniature :

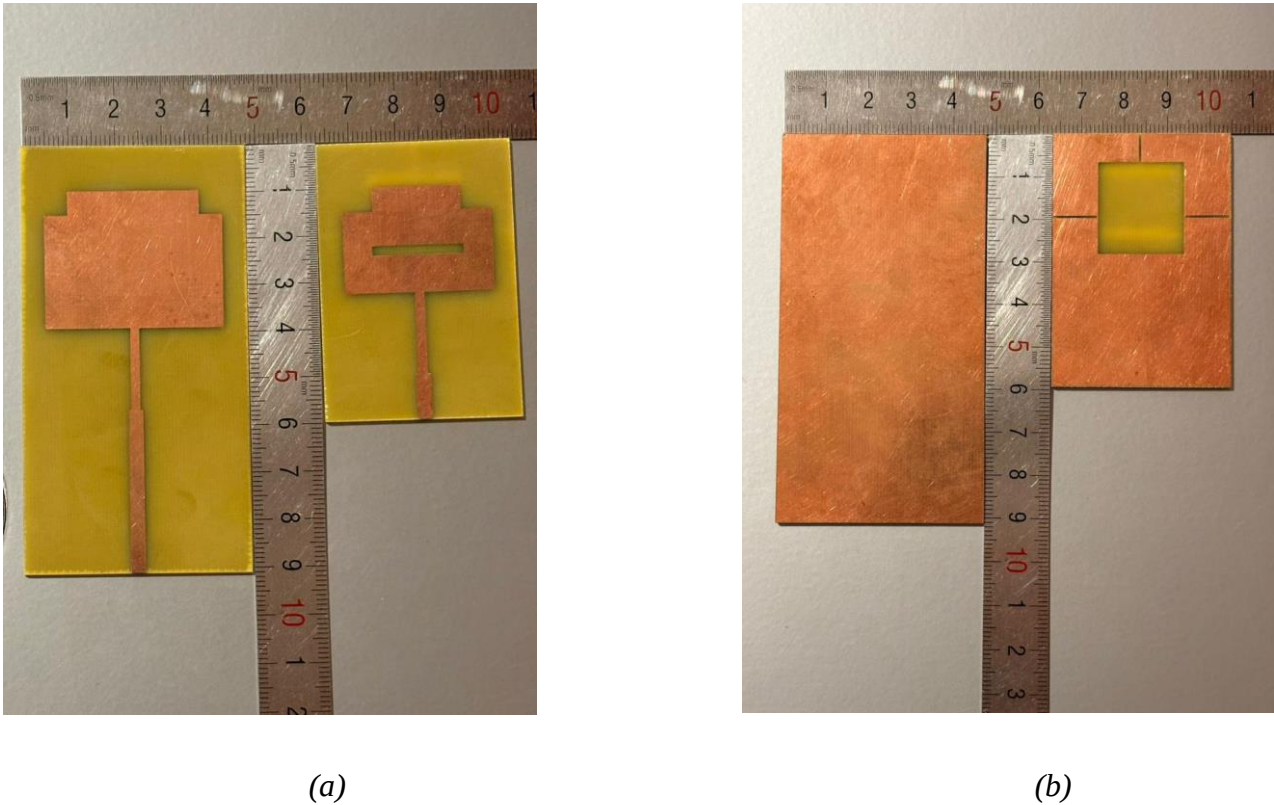


Figure II. 40 : comparaison entre Antenne rectangulaire initiale proposée et Antenne miniature final à base de fente encoche et diode (a) vue de face : patch ,(b) vue d'arrière.

Nous avons obtenu un taux de miniaturisation de 43%.

II.8 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux publiés

Nous allons présenter dans cette partie la comparaison de notre travail avec les d'autres travaux de recherches scientifiques :

Table II. 16 : comparaison de nos résultats avec les résultats de la littérature.

Réf	Fréq(GHz)	S11 (dB)	Gain (dB)	Dimension (mm2)
[54]	2.8/2.9/3.4/3.5/ 5.2/ 5.9	-20.09/19.64/ -55.43/62.93/	1.38/1.45/1.32/1.33/ 0.6 /2/2.02	26×28

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

		-35.25/-24.54		
[55]	2.45/3.2/2.1/3.5	35.33/-42.17/ 33.16/-35.16	1.73/1.97/1.01/1.86	37 × 35
Notre travail	2.4/3.414/5.204 2.76/3.41/5.43 3.64/5.34	-13.48/-14.10/ -17.8/-23.69/ -12.74/-30.49/ -14.12/-41.523	2.27/2.57/1.85/2.65/ 3.31/2.35/2.42/2.14	31.7×22.7

Comme le montre le tableau II.16, la comparaison porte sur les dimensions de l'antenne, les fréquences de fonctionnement, le coefficient de réflexion S11 ainsi que le gain obtenu. L'antenne proposée présente une structure compacte de 31.7×22.7mm². Par rapport aux travaux de [54] et [55], notre conception permet d'obtenir huit fréquences de résonance réparties sur plusieurs bandes de fonctionnement grâce aux différents modes de commutation utilisés.

Les valeurs de S11 obtenues montrent une bonne adaptation de l'antenne, avec une valeur minimale de S11 égale à -41.523 dB. De plus, le gain maximal obtenu est de 3.31 dB, ce qui est supérieur aux gains rapportés dans les références [54] et [55]. Ces résultats démontrent que l'antenne proposée offre de bonnes performances en termes de miniaturisation, de multibande et d'amélioration du gain, ce qui la rend adaptée aux applications de télécommunications sans fil modernes.

II.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter la démarche complète de conception, de simulation et d'optimisation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence. À partir d'une antenne initiale simple, plusieurs techniques ont été introduites, notamment l'adaptation par ligne quart d'onde, l'insertion d'encoches et de fentes, ainsi que la miniaturisation des dimensions, afin d'améliorer les performances et d'atteindre la fréquence cible de 2,4 GHz. Les résultats de simulation ont montré une nette amélioration du coefficient de réflexion, de l'adaptation d'impédance et de la compacité de la structure. Par ailleurs, l'intégration des diodes PIN a permis de rendre l'antenne reconfigurable, offrant ainsi un fonctionnement multi-bande couvrant les applications Wi-Fi, 5G et LTE. Les différents modes étudiés ont confirmé la capacité de l'antenne à changer ses fréquences de résonance selon l'état des diodes, tout en conservant des caractéristiques de rayonnement satisfaisantes. Ainsi,

Chapitre II : Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire miniature reconfigurable en fréquence pour le Wi-Fi 2.4, Wi-Fi 5,5G et le LTE

l'antenne proposée constitue une solution efficace, compacte et flexible, répondant aux exigences des systèmes de communication sans fil modernes.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, consacré à la conception et à l'optimisation d'une antenne imprimée miniature et reconfigurable, il apparaît que les défis posés par la multiplication des standards de communication modernes peuvent être relevés grâce à des structures rayonnantes agiles et compactes.

L'étude théorique menée dans la première partie a permis d'établir les bases fondamentales des antennes microruban et de comprendre les leviers de la miniaturisation et de la reconfigurabilité. Ces concepts ont ensuite été mis en pratique lors de la phase de conception et de simulation sous l'environnement CST Studio Suite.

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des techniques de miniaturisation employées, telles que l'insertion de fentes et d'encoches, qui ont permis de réduire l'encombrement physique de l'antenne tout en préservant ses performances de rayonnement. De plus, l'intégration de diodes PIN comme éléments de commutation a permis d'aboutir à une structure reconfigurable capable de commuter entre plusieurs bandes de fréquences. Ce prototype final répond aux exigences des standards Wi-Fi (2.4 et 5 GHz), LTE et 5G, offrant ainsi une solution polyvalente pour les terminaux mobiles actuels.

En conclusion, ce projet de fin d'études a permis de valider une approche de conception combinant compacité et agilité fréquentielle. Bien que le prototype ait été usiné, la réalisation de mesures expérimentales reste essentielle afin de confronter les simulations aux résultats réels. Par ailleurs, étendre la reconfigurabilité à la polarisation ou au diagramme de rayonnement constituerait une suite pertinente pour optimiser les performances de cette antenne dans des environnements de propagation complexes.

Bibliographie

- [1] B. T. B. A. S. Y. Zohra, “Réalisation d’une Interface graphique de Calcul des paramètres d’antennes patch et conception logicielle,” *mémoire*, 2019.
- [2] Z. Sarra and S. R. Rania, “Influence du substrat sur les performances des antennes imprimées,” *Mémoire*, 2020.
- [3] M. F. T. Souhila, “Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation,” *mémoire*, 2016.
- [4] Mr. RAS LAINE ABDELWAHED, “Etude, simulation et mise en réseaux d’une antenne imprimée de forme U,” *mémoire*, 2009.
- [5] B. KHAOULA and K. SAFA, “Simulation des antennes imprimées par le logiciel CST .,” *mémoire*, 2021.
- [6] B. F. C. R. K. M. YOUNES, “Conception et Simulation d’Antenne imprimée WiFi Présenté,” *Mémoire*, 2024.
- [7] D. M. R. Walid, “Etude et conception d’ une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée,” *mémoire*, 2017.
- [8] H. CHORFI, “CONCEPTION D’UN NOUVEAU SYSTÈME D’ANTENNE RÉSEAU CONFORME EN ONDE MILLIMÉTRIQUE,” *Mémoire*, 2012.
- [9] A. S. A. et B. D. Eddine, “Etude et conception d’antennes intelligentes reconfigurables large bande pour les systèmes de communication Radio Cognitive.,” *Mémoire*, 2022.
- [10] Z. HAMOUDA, “Antenne Microondes Souples Ultra Large Bandes a Base De Matériaux Composites,” *these Dr.*, pp. 0–182, 2016.
- [11] L. BELABAS and L. CHEMMOUN, “Miniaturisation de l’antenne PATCH sous CST,” *Mémoire*, 2018.
- [12] G. Djihene, “Etude et conception d’une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs,” *Mémoire*, 2023.
- [13] M. S. Y. W. M. K. B. Bochra, “Conception d’un réseau d’antennes patch pour les applications satellitaires en bande C,” *Mémoire*, 2021.
- [14] B. K. B. Marwa., “Etude et réalisation de rectenna en utilisant les ondes électromagnétiques du réseau mobile Présentés,” *Mémoire*, 2022.

- [15] M. Bouchra, “Antenne patch pentagone multi bandes reconfigurable en fréquence pour différentes applications de télécommunications,” *Mémoire*, 2020.
- [16] G. Zakaria, “Etude et conception d’antennes reconfigurables en fréquence pour le standard 5G,” *Mémoire*, 2021.
- [17] S. imane et S. N. Ikram, “Miniaturisation d’une Antenne Micro-ruban par l’utilisation des Méta-matériaux,” *Mémoire*, 2020.
- [18] A. BEHLOUL, “ibution à l’étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire,” *Mémoire*, 2010.
- [19] B. Abir, K. Enada, and B. Chahinez, “Conception d’une antenne patch Pour les applications Wifi 5 et Wifi 6,” *Mémoire*, 2023.
- [20] L. HUITEMA, “Conception d’antennes miniatures à base de matériaux innovants pour systèmes de communications mobiles,” *these Dr.*, 2011.
- [21] C. Amel, “Etude et conception d ’ une antenne reconfigurable pour les applications WLAN,” *Mémoire*, 2018.
- [22] M. B. Khouloud and M. F. Zahra, “Antenne patch pentagone miniature pour des applications en ISM,” *Mémoire*, pp. 2019–2020, 2020.
- [23] Z. Y. et F. A. Eddine, “Étude et Conception d ’ Antennes Reconfigurables par Association d ’ éléments actifs,” *Mémoire*, 2017.
- [24] O. A. B. Said. and Devant, “La miniaturisation d’antenne imprimée par l’ajout de fente,” *Mémoire*, 2020.
- [25] L. Hadda, “Conception et simulation d ’ un réseau d ’ antennes microrubans circulaires pour les applications radar,” *Mémoire*, no. June 2015, 2015.
- [26] K. N. el Houda, “Conception et réalisation d’une antenne bi-bande pour des Applications GPR,” *Mémoire*, 2022.
- [27] H. K. et R. HANANE, “Conception et réalisation des antennes fractales imprimées à gain élevé pour les applications satellitaires,” *Mémoire*, 2024.
- [28] BENAZZOUZ Ghouti et BENSENANE Ikram, “Conception et réalisation d ’ une antenne miniature pour l ’ application LTE,” *article*, 2019.
- [29] S. Sufyar, “Contribution à l ’ étude d ’ Antennes Miniatures Reconfigurables en

- Fréquence par Association d ' éléments actifs," *these Dr.*, 2012.
- [30] John D. Kraus, "Antennas," 2004.
- [31] R. Garg, "Microstrip Antenna Design Handbook," *article*, 2000.
- [32] H. Nachouane, "Contribution à la conception et à la réalisation d ' antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération," *these Dr.*, 2018.
- [33] D. El Hadri, A. Zakriti, and A. Zugari, "Reconfigurable antenna for Wi-Fi and 5G applications," *article*, vol. 46, no. 2019.
- [34] S. Loizeau, "Conception et Optimisation d ' antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande," *article*, 2010.
- [35] I. Rouissi, I. Ben Trad, J. M. Floc'H, H. Rmili, and H. Trabelsi, "Frequency reconfigurable antenna using active capacitors," *article*, vol. 2015-Janua, pp. 1–4, 2015.
- [36] F. Alsharif, S. Safi, T. AbouFoul, M. Abu Nasr, and S. Abu Nasser, "Mechanical reconfigurable microstrip antenna," *article*, vol. 11, no. 3, pp. 153–160, 2016.
- [37] J. R. Leon Valdes, "Antennes agiles reconfigurables optiquement dans le domaine millimétrique avec l'intégration de matériaux à changement de phase," *these Dr.*, 2020.
- [38] M. B. KHOULOUD, "Conception, optimisation et réalisation de nouvelles antennes micro ruban intelligentes miniatures reconfigurables pour les réseaux mobiles," *these Dr.*, 2025.
- [39] B. Atef, "Architectures numériques versatiles avancées pour la transmission sans fil de données à très haut débit," *these Dr.*.
- [40] K. M. Younus, K. Sayidmarie, K. Sultan, and A. Abbosh, "Optically Controlled Bias-Free Frequency Reconfigurable Antenna," *article*, vol. 25, no. 19, pp. 1–14, 2025.
- [41] T. D. Nguyen, "Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive," *article*, 2013.
- [42] H. C. Mohanta, A. Z. Kouzani, and S. K. Mandal, "Reconfigurable antennas and their applications," *article*, vol. 6, no. 4, pp. 239–258, 2019.
- [43] K. bouazza ibrahim B. abdallah Imed, "Antenne reconfigurable pour des applications

- satellites Présenté,” *Mémoire*, 2020.
- [44] D. Anagnostou, “Reconfigurable antennas,” *article*, vol. 10, pp. 203–220, 2021.
- [45] P. Atelin, “Wi - Fi,” *article*.
- [46] G. PUJOLLE, “Les réseaux,” *article*, 2020.
- [47] M. A. U. Gawas, “An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G,” *article*, vol. 5, no. May, pp. 3130–3133, 2015.
- [48] S. Hossain, “5G Wireless Communication Systems Saddam,” *article*, no. 10, pp. 1–6, 2013.
- [49] A. R. ouadiaa barrou, “Etude Paramétrique Des Antennes Patches Rectangulaires Alimentées Par Proximité,” *these Dr.*, 2016.
- [50] A. Fatima and M. Nadia, “ETUDE ET CONCEPTION D’UNE ANTENNE FRACTALE RECONFIGURABLE EN FREQUENCE,” *Mémoire*, 2019.
- [51] A. Technologies, “HSMP-3860 Surface Mount Microwave Schottky Diode,” *Data Sheet*, pp. 1–10.
- [52] M.-C. Inc., “MA4AGBLP912 AlGaAs Beamlead PIN Diode,” *Datasheet*, pp. 2–4, 2003.
- [53] Infineon Technologies, “BAR64 Silicon PIN Diode,” *Datasheet*, pp. 1–9, 2003.
- [54] B. Saikia and K. Borah, “A Parasitic Array Based Pattern Reconfigurable Patch Antenna for Wi-Fi 6E Application,” vol. 107, no. January, pp. 119–129, 2022.
- [55] B. Saikia and K. Borah, “Parasitic Array Based Radiation Pattern Reconfigurable Patch Antenna for WLAN Application,” *article*, vol. 11, no. 4, pp. 42–50, 2022.