

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد-تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : **HASNI ARBIA**

Sujet

**Etudes des Différentes Techniques de Reconfigurabilité des
Antennes Patch à Multi-Bandes de Fréquences Adaptées
aux Diverses Applications**

Soutenu publiquement, le 21/06/2025, devant le jury composé de :

Mme F. BOUSALAH	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen	Présidente
Mr M.Y BENDIMERAD	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen	Examineur
Mr M.Z BABA-AHMED	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme R.D TALEB	Docteur	Université de Tlemcen	Co-encadrante

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Avant toute chose, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Tout-Puissant, ALLAH pour m'avoir accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail. C'est grâce à Sa bienveillance que j'ai pu surmonter les obstacles et accomplir ce que j'ai entrepris.

*Mes plus sincères remerciements s'adressent à mon encadrant, Monsieur **BABA-AHMED Mohammed Zakarya**. Sa présence éclairée et sa guidance avisée ont été déterminantes dans l'élaboration et la finalisation de ce mémoire. Sa patience, sa confiance et sa rigueur m'a permis de progresser et de me dépasser. Je suis reconnaissante pour son expertise, ses encouragements et sa disponibilité constante. J'espère que ce travail soit à la hauteur de ses attentes et témoigne de ma profonde admiration.*

*Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à ma Co-encadrante, Madame **TALEB Rahma Djaouda**. Son soutien précieux, son écoute attentive et ses conseils avisés m'ont permis de naviguer avec assurance dans les méandres de notre recherche. Sa présence bienveillante a été une source de motivation et d'inspiration.*

*L'honneur me revient de remercier Madame **BOUSALAH Fayza**, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Sa présence distinguée et son expertise inestimable ont rehaussé l'importance de ce travail. Je suis reconnaissante pour sa précieuse contribution et ses conseils éclairés.*

*Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à Monsieur **BENDIMERAD Mohammed Yassine**, d'avoir accepté de faire partie du jury et de m'avoir apporté ses précieux conseils et éclairages. Je lui ai profondément reconnaissante pour son professionnalisme et son dévouement.*

Mes remerciements s'étendent également à l'ensemble des membres du Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen LTT, qui m'ont accueilli à bras ouverts et m'ont offert un cadre de travail propice à la recherche et à l'apprentissage. Leur bienveillance et leur disponibilité ont contribué à rendre cette expérience enrichissante et mémorable.

Dédicace

Au souvenir de mon père, que Dieu l'accueille dans Son vaste paradis.

À ma mère, source d'amour de sagesse et de prières.

À ma sœur et à mes frères, pour leur affection et leur soutien indéfectible.

**À mes amis, pour leur présence et leur encouragement tout au long de ce
parcours.**

Je vous dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Résumé

Ce mémoire étudie les différentes techniques de reconfigurabilité des antennes patch conçues pour fonctionner sur plusieurs bandes de fréquence, afin de répondre aux besoins spécifiques de diverses applications en communication. L'objectif est d'explorer les solutions permettant de modifier dynamiquement les caractéristiques fréquentielles de l'antenne, tout en assurant un fonctionnement stable sur plusieurs bandes. L'analyse inclut une comparaison des matériaux conducteurs tels que le cuivre et le graphène, ainsi que des substrats comme le FR4 et le Rogers, afin d'évaluer leurs effets respectifs sur les performances globales de l'antenne. L'utilisation de composants de reconfigurabilité tels que les diodes PIN et Varicap est également étudiée. En complément, la reconfigurabilité basée sur la variation du potentiel chimique du graphène est abordée comme une approche innovante pour l'adaptation fréquentielle offrant une alternative prometteuse aux techniques classiques de commutation dans le spectre radio.

Mots clés : Techniques de reconfigurabilité, Antenne patch, Multi-Bandes, Matériaux conducteurs, Diodes, Adaptation fréquentielle.

Abstract

This memoir investigates various reconfigurability techniques applied to patch antennas designed to operate across multiple frequency bands, aiming to meet the specific requirements of diverse communication applications. The objective is to explore solutions that enable dynamic modification of the antenna's frequency characteristics while ensuring stable performance over multiple bands. The analysis includes a comparison of conductive materials such as copper and graphene, as well as substrates like FR4 and Rogers, to evaluate their respective impacts on the overall antenna performance. The study also examines the use of reconfigurable components such as PIN and Varicap diodes. Additionally, reconfigurability based on the variation of the graphene's chemical potential is considered as an innovative approach to frequency tuning, offering a promising alternative to conventional switching techniques in the radio spectrum.

Keywords: Reconfigurability techniques, Patch antenna, Multi-band, Conductive materials, Diodes, Frequency tuning.

المخلص

تتناول هذه المذكرة دراسة مختلف تقنيات إعادة التهيئة المطبقة على هوائيات الباتش المصممة للعمل على عدة نطاقات ترددية، وذلك بهدف تلبية المتطلبات الخاصة لمختلف تطبيقات الاتصالات. يتمثل الهدف في استكشاف الحلول التي تسمح بتعديل الخصائص الترددية للهوائي بشكل ديناميكي، مع ضمان أداء مستقر عبر النطاقات المتعددة. تتضمن الدراسة مقارنة بين المواد الموصلة مثل النحاس والجرافين، بالإضافة إلى ركائز مثل FR4 وRogers، من أجل تقييم تأثيرها على أداء الهوائي بشكل عام. كما يتم دراسة استخدام مكونات إعادة التهيئة مثل ثنائيات PIN وVaricap بالإضافة إلى ذلك، يتم التطرق إلى تقنية إعادة التهيئة المعتمدة على تغيير الجهد الكيميائي للجرافين، كنهج مبتكر لضبط التردد، يوفر بديلاً واعداً للتقنيات التقليدية في مجال الطيف الراديوي.

الكلمات المفتاحية: تقنيات إعادة التهيئة، هوائي باتش، متعددة النطاقات، مواد موصلة، ثنائيات، ضبط التردد.

Table des matières

Remerciement.....	ii
Dédicace.....	iii
Résumé.....	iv
Liste des matières.....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xii
Acronymes et abréviations.....	xiv
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Généralités sur Les Antennes

I.1	Introduction.....	3
I.2	Définition d'une antenne.....	3
I.3	Les types d'antennes.....	4
I.3.3	Antenne parabolique.....	5
I.3.4	Antenne à fentes.....	6
I.3.5	Antenne Vivaldi.....	6
I.3.6	Antenne log-périodique.....	7
I.3.7	Le dipôle demi-onde	7
I.3.8	Antenne biconique.....	8
I.3.9	Antenne discône.....	9
I.3.10	Antenne Patch (micro-ruban).....	9
I.4	Techniques d'alimentation et d'adaptation des antennes.....	13
I.4.1	Techniques d'alimentation.....	13
I.4.2	Techniques d'adaptation.....	16
I.4.2.1	Adaptation par ligne quart d'onde.....	16
I.4.2.2	Adaptation par STUB	16
I.4.2.3	Adaptation avec encoche.....	17
I.5	Les caractéristiques d'une antenne.....	17
I.5.1	Caractéristiques électriques.....	17
I.5.2	Caractéristiques de rayonnement.....	19

I.6	Réseau d'antennes.....	21
I.6.1	Définition.....	21
I.6.3	Types de réseaux d'antennes	24
I.6.3.1	Antenne en réseau linéaire.....	25
I.6.3.2	Antenne en réseau plan.....	25
I.6.3.3	Antenne en réseau circulaire.....	25
I.7	Conclusion.....	26

CHAPITRE II : Les Différentes Antennes Reconfigurables

II.1	Introduction.....	29
II.2	Définition d'une antenne reconfigurable.....	29
II.3	Les techniques de reconfigurabilité.....	30
II.3.1	Diode PIN.....	30
II.3.2	Diode Varactor.....	31
II.3.3	Transistors FET.....	33
II.3.4	Les RF-MEMS.....	34
II.3.5	Les matériaux agiles	35
II.4	Classification des antennes Reconfigurables.....	37
II.4.1	Antennes reconfigurables en fréquence.....	37
II.4.1.1	La modification géométrique	38
II.4.1.2	Court-circuit commutable.....	38
II.4.1.3	Modification de matériaux.....	39
II.4.1.4	Fente ou de lignes commutables.....	39
II.4.2	La reconfiguration en diagramme de rayonnement.....	40
II.4.2.1	La Modification géométrique.....	41
II.4.2.2	Courts circuits commutables.....	41
II.4.2.3	Fente ou de lignes commutables.....	42
II.4.3	Antennes reconfigurables en polarisation.....	44

II.5	Domaines d'applications des antennes reconfigurables.....	45
II.6	Conclusion.....	47
Chapitre III : Conception et Simulation des Antennes Patch Reconfigurables à Multi-Bandes		
III.1	Introduction.....	51
III.2	Conception et simulation.....	51
III.2.1	Outils de simulation.....	51
III.3	Reconfigurabilité par matériaux d'une antenne patch rectangulaire.....	52
III.3.1	Conception d'une antenne patch par changement de substrat.....	52
III.3.1.1	Simulation et comparaison entre substrats.....	54
III.3.2	Réseaux d'antenne.....	60
III.3.2.1	Conception du réseau d'antennes à deux éléments.....	60
III.3.2.2	Simulations et résultats.....	61
III.3.3	Reconfigurabilité par matériau agile.....	63
III.3.3.1	Simulation et comparaison des matériaux.....	64
III.3.3.2	Variation du potentiel chimiques de l'antenne rectangulaire en Graphene	67
III.4	Reconfigurabilité par diodes PIN d'une antenne patch circulaire.....	70
III.4.1	Adaptation de l'antenne patch.....	71
III.4.2	Reconfigurabilité de l'antenne circulaire par diode PIN.....	74
III.5	Reconfigurabilité par diodes Varicap d'une antenne patch triangulaire.....	77
III.5.1	Adaptation de l'antenne patch.....	78
III.5.2	Reconfigurabilité de l'antenne triangulaire par diode Varicap.....	81
III.6	Conclusion.....	85
	Conclusion générale.....	87
	Bibliographie.....	90

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur Les Antennes

Figure. I.1 : Antenne d'émission et de réception	3
Figure I.2 : Antennes filaires usuelles	4
Figure I.3: Antenne cornet	5
Figure I .4 : Antenne parabolique	5
Figure I .5 : Antenne a fente	6
Figure I .6 : Antenne Vivaldi.	7
Figure I .7 : Antenne log périodique.....	7
Figure I .8 : Le dipôle demi-onde	8
Figure I .9 : Antenne biconique	9
Figure I .10 : Antenne discône.....	9
Figure I .11 : Structure d'antenne patch.....	10
Figure I .12 : Différentes formes du patch.....	10
Figure I .13 : Composition d'une antenne patch.....	11
Figure I .14 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban.....	14
Figure I .15 : Alimentation coaxiale directe.....	14
Figure I .16 : Alimentation par couplage électromagnétique.....	15
Figure I .17 : Alimentation par couplage par fente : (a) Alimentation du patch par couplage à travers une fente, (b) Modèle électrique.....	16
Figure I .18 : Adaptation par ligne quart d'onde.....	16
Figure I .19 : Adaptation par STUB.....	17
Figure I .20 : Adaptation avec encoche.....	17
Figure I .21 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission.....	19
Figure I .22 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	21
Figure I .23 : Différents états de polarisation d'une onde électromagnétique.....	21
Figure I .24 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes.....	22
Figure I .25 : Alimentation parallèle d'un réseau linéaire.....	23
Figure I .26: Alimentation série d'un réseau linéaire.....	23

Figure I .27: Différentes configurations géométriques des réseaux, (a) linéaire, (b) planaire et (c) circulaire.....	24
Figure I .28 : Réseau d'antenne circulaire.....	25
Figure I .29: Réseau d'antenne planaire.....	25
Figure I .30 : Géométrie d'un réseau d'antennes circulaire.....	26

Chapitre II : Les Différentes Antennes Reconfigurables

Figure II. 1 : différentes techniques adoptées pour réaliser des antennes reconfigurables	30
Figure II.2 : Circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF.....	31
Figure II.3 : Le symbole de diode Varicap	31
Figure II.4 : Circuit équivalent d'une diode Varicap.....	32
Figure II.5: Capacité de jonction variable du varactor MA46H120 correspondant au changement de tension de polarisation inverse.....	32
Figure II.6 : Schéma équivalent d'un transistor FET.....	34
Figure II.7 : Commutateur MEMS RF.....	35
Figure II.8 : Circuit équivalent et de commutateur MEMS RF.....	36
Figure II.9: (a)Cristal liquide (PVA : Poly Vinyl Alcohol), (b) Méta-matériaux	37
Figure II.10: Illustration de l'agilité fréquentielle.....	38
Figure II.11: Exemple sur la reconfiguration géométrique d'antenne.....	39
Figure II.12 : Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables.....	40
Figure II.13: Résultats S11 pour le modèle d'antenne avec fentes et commutateurs après l'étape 3 : (a) état1, (b) état 2, (c) état 3 et (d) état.....	41
Figure II.14: Diagrammes de rayonnement à 3.5 GHz selon les trois modes de configuration : Mode(1) : Diagramme omnidirectionnel irrégulier, Mode(2) : Diagramme directionnel et Mode(3) : Diagramme quasi omnidirectionnel.....	42
Figure II.15: Exemple d'antenne fractale reconfigurable en rayonnement.....	42
Figure II.16: Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme : (a) Topologie de l'antenne, (b) Diagrammes NS : configuration initiale, GO : diodes activées.....	43
Figure II.17: Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation.....	45
Figure II.18 : (a) Antenne patch à bord commuté, (b) Antenne PASS de l'UCLA.....	46
Figure II. 19 : Exemple d'antenne reconfigurable à polarisation par diode PIN (a) Prototypes de configuration d'antenne à fente en anneau fendu pour polarisation linéaire et circulaire	

(b) Les caractéristiques du diagramme de rayonnement de l'antenne pilotées par les états de commutation de la diode PIN.....46

Chapitre III : Conception des Antennes Patch Reconfigurables à Multi-Bandes

Figure III. 1: Outil de simulation CST Studio Suite 2019... ..52

Figure III.2 : Structure de l'antenne patch initial, (a) Rogers, (b) FR-454

Figure III.3: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch initial54

Figure III.4: Structure de l'antenne patch avec encoche, (a) Rogers, (b) FR-4.....55

Figure III. 5 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoche.....55

Figure III. 6 : VSWR de l'antenne patch avec encoche.....56

Figure III. 7 : Gain de l'antenne patch avec encoche.....56

Figure III. 8: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le substrat FR-4.....57

Figure III. 9 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le substrat FR-4 pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....58

Figure III. 10: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le substrat RogersRT588058

Figure III. 11 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le substrat RogersRT5880 pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....59

Figure III. 12: Structure d'un réseau d'antennes à deux éléments..... 60

Figure III. 13: Coefficient de réflexion de deux éléments.....61

Figure III. 14 : VSWR de l'antenne a deux éléments.....61

Figure III. 15 : Gain de réseau d'antennes à deux éléments.....62

Figure III. 16: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne a deux éléments.....62

Figure III. 17: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne a deux éléments pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....63

Figure III. 18 : Structure de l'antenne patch avec Graphene.....64

Figure III. 19: Comparaison des paramètres S_{11} entre le Cuivre et le Graphene.....64

Figure III. 20 : Comparaison des VSWR pour le Cuivre et le Graphene.....65

Figure III. 21: Comparaison du gain obtenu pour le Cuivre et le Graphene.....65

Figure III. 22: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le Graphene.....66

Figure III. 23: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le Graphene pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....	66
Figure III. 24: Variation du potentiel chimique du S_{11} de l'antenne en Graphene.....	67
Figure III. 25 : Variation du potentiel chimique sur le VSWR de l'antenne en Graphène.....	68
Figure III. 26 : Variation du potentiel chimique sur le gain de l'antenne en Graphene.....	68
Figure III. 27 : Potentiel chimique sur diagramme de rayonnement 3D de l'antenne en Graphene.....	69
Figure III. 28 : Potentiel chimique sur diagramme de rayonnement 2D de l'antenne en Graphene pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....	69
Figure III.29 : Structure de l'antenne patch circulaire initial.....	70
Figure III.30: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire initial.....	71
Figure III.31: Structure de l'antenne patch circulaire avec encoche	71
Figure III.32: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire avec encoche	72
Figure III.33: Le VSWR de l'antenne patch circulaire avec encoche	72
Figure III.34: Gain de l'antenne patch circulaire avec encoches.....	73
Figure III.35: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne circulaire avec encoche.	73
Figure III.36: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne circulaire avec encoche pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....	74
Figure III.37: Antenne circulaire avec diode PIN.....	75
Figure III.38: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire par diodes PIN.....	76
Figure III.39: Le VSWR de l'antenne patch circulaire par diode PIN.....	76
Figure III.40: Gain de l'antenne patch circulaire par diode PIN.....	77
Figure III.41: Structure de l'antenne patch triangulaire initial.....	77
Figure III.42: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch triangulaire initial.....	78
Figure III.43 : Structure de l'antenne patch triangulaire avec encoche.....	78
Figure III.44: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch triangulaire avec encoche.....	79
Figure III.45: Le VSWR de l'antenne patch triangulaire avec encoche.....	79
Figure III.46: Gain de l'antenne patch triangulaire avec encoche.....	80
Figure III.47: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne triangulaire avec encoche.....	80
Figure III.48: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne triangulaire avec encoche pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....	81

Figure III.49: Antenne triangulaire avec diode Varicap.....	82
Figure III.50: Coefficient de réflexion de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.....	82
Figure III.51: Le VSWR de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.....	83
Figure III.52: Gain de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.....	83
Figure III.53: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne triangulaire avec diode Varicap.....	84
Figure III.54: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne triangulaire avec diode Varicap pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).....	84

Liste des tableaux

Chapitre II : Les Différentes Antennes Reconfigurables

Tableau II.1 : valeurs des paramètres de la diode Varactor MA46H120.....	33
--	----

Chapitre III : Conception et Simulation des Antennes Patch Reconfigurables à Multi-Bandes

Tableau III.1: Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.....	53
Tableau III.2: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.....	53
Tableau III.3: Comparaison des résultats de FR4 et Rogers.....	60
Tableau III.4: Comparaison des résultats de Cuivre et Graphene.....	70
Tableau III.5: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch triangulaire proposé.....	77

Acronymes et abréviations

2D : Deux dimensions.

3D : Trois dimensions.

AF: Facteur de réseau (Array Factor).

BP: Bande passante relative exprimée.

BST : Titanate de baryum-strontium.

CoNb : Alliage cobalt-niobium.

CoZr : Alliage cobalt-zirconium.

CPW : Guide d'ondes coplanaire.

CST : Computer Simulation Technology.

dB : Décibel.

dBi : Décibel isotropique.

FeMB : Alliage fer–bore–métal de transition.

FET : Transistor à effet de champ.

HFSS: High Frequency Structure Simulator.

IA : Intelligence artificielle.

IEEE : Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens.

IoR : Internet de la robotique.

IoT : Internet des objets.

KNT : Niobate-tantalate de potassium.

LaTiON : Oxyazoture de lanthane et de titane.

LoRa : Communication longue portée.

LTE-M : Évolution à long terme pour objets connectés (Long Term Evolution for Machine).

MEMS : Systèmes micro-électromécaniques.

MICS : Service de communication pour implants médicaux.

NB-IoT : Internet des objets à bande étroite (Narrowband Internet of Things).

PIN : Diode Positive – Intrinsèque – Négative.

PVA : Alcool polyvinylique.

RF : Radiofréquence.

RFID : Identification par radiofréquence.

RF-MEMS : Systèmes micro-électromécaniques radiofréquence.

ROS : Rapport d'Ondes Stationnaires.

RS : Right Slot – Fente droite (mode d'alimentation par la fente latérale droite).

S11 : Coefficient de réflexion.

SMA : SubMiniature version A.

STUB : Ligne ouverte/fermée.

TOS : Taux d'Ondes Stationnaires.

TSA : Antenne à ouverture progressive (Tapered Slot Antenna).

UCLA : Université de Californie à Los Angeles.

UHF : Ultra haute fréquence (Ultra High Frequency).

ULB : Ultra large bande.

UWB : Ultra large bande.

VSWR: Taux d'Ondes Stationnaires (Voltage Standing Wave Ratio).

WiFi : Fidélité sans fil (Wireless Fidelity).

Zigbee: (Nom propre de protocole).

Introduction

Générale

Dans un contexte marqué par l'évolution rapide et continue des systèmes de communication sans fil, les exigences en matière de performance, de compacité, de multifonctionnalité et de flexibilité des dispositifs de communication sont devenues de plus en plus rigoureuses. Parmi les éléments fondamentaux de ces systèmes, l'antenne occupe une place centrale. Elle constitue l'interface essentielle entre le monde électromagnétique et le monde électrique, influençant de manière déterminante la qualité de la transmission et de la réception des signaux.

Les antennes classiques, bien qu'efficaces dans des applications spécifiques, montrent rapidement leurs limites face à la diversité croissante des normes de communication, des bandes de fréquences et des environnements d'utilisation. Ces contraintes ont conduit à l'émergence et à l'intérêt grandissant pour des solutions plus évoluées : les antennes reconfigurables. Parmi celles-ci, les antennes patch, connues pour leur profil bas, leur facilité d'intégration et leur compatibilité avec les circuits imprimés, apparaissent comme une solution privilégiée dans les architectures modernes.

Les antennes reconfigurables se distinguent par leur capacité à modifier dynamiquement certaines de leurs caractéristiques essentielles — telles que la fréquence de fonctionnement, le diagramme de rayonnement ou la polarisation — leur conférant une grande adaptabilité. Pour répondre à ces besoins, diverses techniques ont été développées : l'intégration de composants actifs (diodes PIN, varactors, MEMS), l'utilisation de matériaux innovants (graphène, matériaux à changement de phase), ou encore la reconfiguration géométrique. Ces approches permettent aux antennes de s'adapter en temps réel aux contraintes du système ou de l'environnement, ouvrant la voie à des applications avancées dans les domaines de l'Internet des objets (IoT), des réseaux 5G, des communications satellitaires ou encore des systèmes radar intelligents.

Ce mémoire a pour objectif principal d'étudier de manière comparative les différentes techniques de reconfigurabilité appliquées aux antennes patch multi-bandes, en évaluant leurs performances, leurs limites, ainsi que leurs domaines d'application privilégiés. Il s'agit de proposer un cadre d'analyse pertinent permettant de guider le choix de la solution la plus appropriée en fonction des contraintes spécifiques des systèmes de communication visés.

Pour répondre à cet objectif, le mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre propose une vue d'ensemble des différentes catégories d'antennes utilisées dans les systèmes de communication, en mettant particulièrement l'accent sur les antennes patch. Il présente leurs principes de fonctionnement, leurs configurations typiques, ainsi que les principaux paramètres influençant leurs performances (diagramme de rayonnement, impédance, bande passante, gain, etc.). Cette analyse permet de comprendre l'intérêt croissant pour ces structures dans les applications modernes, tout en posant les bases théoriques nécessaires à l'étude de leur reconfigurabilité. Une attention particulière est également accordée aux réseaux d'antennes, soulignant leur potentiel en termes d'amélioration du gain et de la directivité.

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes techniques de reconfiguration des antennes. Il s'intéresse aux mécanismes physiques et technologiques permettant d'agir sur les paramètres électromagnétiques de l'antenne : reconfiguration en fréquence, en polarisation ou du diagramme de rayonnement. Les composants technologiques impliqués, tels que les diodes, les MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ou encore les matériaux intelligents, sont présentés en détail. Ce chapitre met en évidence les avantages et les limites de chaque approche, ainsi que leur adéquation à différents contextes d'utilisation (mobile, spatial, militaire, etc.). Cette exploration offre une vision complète des possibilités offertes par les antennes reconfigurables en matière d'adaptabilité et d'optimisation des ressources spectrales.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation, à la conception et à l'analyse de performances de plusieurs antennes patch reconfigurables. En s'appuyant sur des simulations réalisées avec le logiciel CST Studio Suite 2019, différentes structures sont développées, comparées et évaluées. Les effets des matériaux utilisés (FR-4, Rogers RT5880, Graphène), de la géométrie (introduction d'encoques, forme circulaire ou triangulaire), ainsi que de l'intégration de composants électroniques (diodes PIN, Varicap) sont analysés en profondeur. Ce chapitre met en évidence la manière dont les choix techniques influencent la fréquence de résonance, le gain, la directivité ou encore l'impédance, et démontre qu'il est possible d'atteindre une reconfigurabilité efficace par différentes stratégies de conception.

Ainsi, à travers cette progression structurée, ce mémoire vise à fournir une vision globale mais détaillée des antennes reconfigurables, en soulignant les enjeux technologiques et les perspectives d'innovation dans le domaine des communications modernes.

CHAPITRE I
Généralités sur les Antennes

Sommaire

I.1	Introduction	3
I.2	Définition d'une antenne	3
I.3	Les types d'antennes	4
I.3.3	Antenne parabolique	5
I.3.4	Antenne à fentes	6
I.3.6	Antenne Vivaldi	6
I.3.7	Antenne log-périodique	7
I.3.8	Le dipôle demi-onde	7
I.3.10	Antenne biconique	8
I.3.11	Antenne discône	9
I.3.12	Antenne Patch (micro-ruban)	9
I.4	Techniques d'alimentation et d'adaptation des antennes	13
I.4.1	Techniques d'alimentation	13
I.4.2	Techniques d'adaptation	16
I.4.2.1	Adaptation par ligne quart d'onde	16
I.4.2.2	Adaptation par STUB	16
I.4.2.3	Adaptation avec encoche	17
I.5	Les caractéristiques d'une antenne	17
I.5.1	Caractéristiques électriques	17
I.5.2	Caractéristiques de rayonnement	19
I.6	Réseaux d'antennes	21
I.6.1	Définition	21
I.6.3	Types de réseaux d'antennes	24
I.6.3.1	Antenne en réseau linéaire	25
I.6.3.2	Antenne en réseau plan	25
I.6.3.3	Antenne en réseau circulaire	25
I.7	Conclusion	26

I.1 Introduction

Ces dernières années, les réseaux sans fil se développent de plus en plus en termes du nombre de connexions, diversité d'applications couvertes et en qualité de liaisons. La transmission par ondes électromagnétiques est considérée comme un support principal de cette génération de télécommunications au lieu des câbles et des liaisons filaires. L'efficacité de ces réseaux est totalement dépendante des performances des éléments qui les composent, en particulier les antennes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les antennes en générale avec leurs définitions, les différents types d'antennes et d'adaptation, des techniques d'alimentation, ainsi que les caractéristiques d'une antenne. Par la suite nous allons aborder brièvement les réseaux d'antennes, leur définition et les types de réseaux d'antennes.

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif permettant de convertir l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission ou en réception. Une antenne peut rayonner dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une direction définie (antenne sectorielle ou directionnelle) [1].

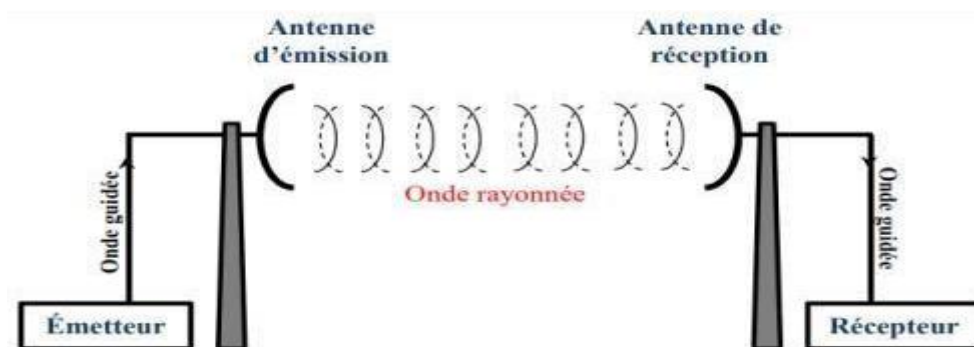


Figure. I.1. Antenne d'émission et de réception [2].

Une antenne, qu'elle soit en émission ou en réception, est définie selon son mode de fonctionnement. En émission, elle a pour rôle de transformer la puissance électromagnétique guidée, provenant d'un générateur en une puissance rayonnée, on parle alors de transducteur. En réception, la puissance rayonnée peut être captée par une autre antenne. Elle agit alors comme un capteur.

Par conséquent, une antenne est un dispositif, qui peut être exploité soit en émission ou en réception, tout en conservant les mêmes propriétés de rayonnement. On dit que le fonctionnement d'une antenne est réciproque, ce qui découle du théorème de réciprocité. [3].

I.3 Les types d'antennes

Il existe différents types d'antennes, chacun conçu pour répondre à des besoins de communication spécifiques en fonction de la fréquence de fonctionnement, de la directivité du faisceau, de la polarisation et d'autres paramètres. Voici quelques-uns des types d'antennes les plus courants.

I.3.1 Antenne filaire

Un dipôle est une antenne filaire consistant à deux brins conducteurs écartés en directions opposées. La catégorie des antennes filaires directives comprend des antennes qui se forment de la structure de câble conducteur de faible diamètre, où l'on considèrera des densités linéiques de courant. Les antennes filaires directives actuellement en service sont le plus souvent réalisées à partir du groupement de conducteurs rectilignes, circulaires ou hélicoïdaux. Elles incluent toutes les antennes formées de câble conducteur de petit diamètre. Les antennes de base sont : dipôles, monopôles, boucles. Exemple : les antennes du type « Yagi », les antennes en « V » et en losange, rideau d'antennes, cadre, antenne en hélice, etc. [4].

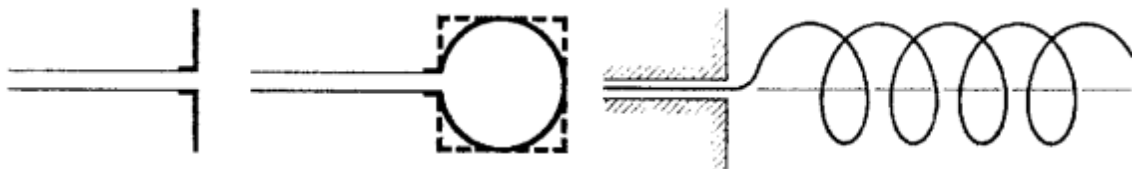


Figure I.2 : Antennes filaires usuelles [5].

I.3.2 Antenne cornet

L'antenne cornet est couramment utilisée pour la propagation des ondes électromagnétiques guidées, notamment en raison de ses excellentes performances en matière de transmission. Elle est particulièrement adaptée aux hautes fréquences et largement exploitée dans le domaine des hyperfréquences.

Comparée à d'autres types d'antennes, l'antenne cornet se distingue par une directivité plus élevée, concentrant l'énergie émise dans une région angulaire restreinte de l'espace [6].

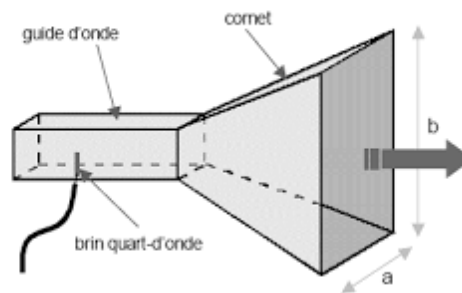


Figure I.3: Antenne cornet [7].

I.3.3 Antenne parabolique

L'antenne parabolique est un type d'antenne hautement directive, constituée principalement composée d'une parabole réfléchissante et d'un élément rayonnant situé à son foyer.

L'antenne parabolique utilise la propriété réfléchissante de la surface parabolique pour diriger les ondes électromagnétiques émises ou reçues par l'élément rayonnant dans une direction spécifique, ce qui permet d'obtenir une directivité élevée et une plus grande portée. Les antennes paraboliques sont couramment employées dans des domaines tels que les communications par satellite, la télédiffusion, la télédétection, les systèmes radar, ainsi que pour des applications de surveillance et de défense.

Les avantages des antennes paraboliques comprennent leur haute directivité, leur grande efficacité, leur faible niveau de bruit et leur capacité à traiter des signaux de très faible niveau. Cependant, ces antennes présentent aussi certains inconvénients, notamment leur encombrement, leur sensibilité au désalignement, ainsi que le coût élevé de fabrication, ce qui peut restreindre leur déploiement dans des applications portables ou à budget limité [8].

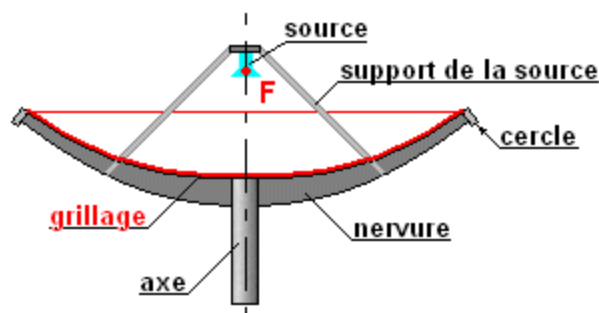


Figure I.4 : Antenne parabolique [9].

I.3.4 Antenne à fentes

Les antennes résonantes (fentes rayonnantes) ont généralement une ouverture rectangulaire ou circulaire. L'ouverture est située sur un plan conducteur et est alimentée par une ligne micro ruban. Une fente rayonnante est caractérisée par son extension verticale ou horizontale selon un certain angle, la taille et la position spécifiques de la fente dépendant de la fréquence.

Ce type d'appareil est utilisé lorsque le rayonnement doit être localisé. De nos jours, les antennes à fente sont largement utilisées dans de nombreux domaines. Les réseaux de fentes rayonnantes peuvent être placés là où la transmission des ondes est faible [5].

Parmi les avantages de ce type d'antennes est la facilité de fabrication, notamment dans des structures planes et compactes, ce qui rendent particulièrement adaptées aux systèmes radar [10].

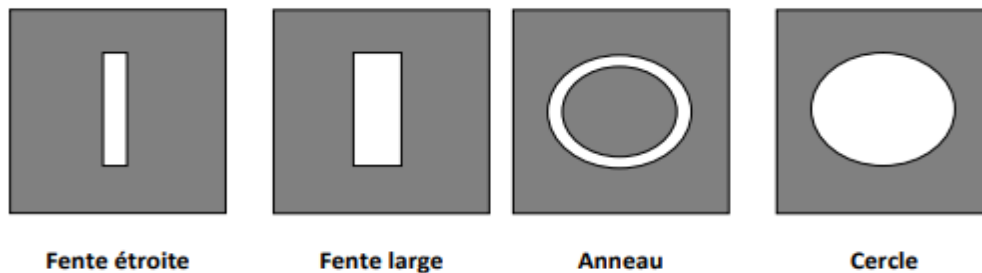


Figure I.5 : Antenne a fente [5].

I.3.5 Antenne Vivaldi

L'antenne Vivaldi de la famille des TSA (Tapered Slot Antenna : antenne à ouverture progressive) dont l'ouverture varie de manière exponentielle. Comme toutes les antennes TSA, elle est adaptée sur une large bande de fréquences [11].

L'antenne Vivaldi est comparable à un cornet, mais dans un plan. Il offre le même avantage d'adaptation avec l'espace libre que le cornet, et son encombrement est celui d'une antenne imprimée : faible de dimension. En contrepartie, les puissances supportées sont plus faibles et la polarisation est rectiligne. Contrairement aux antennes imprimées classiques comme les spirales, le champ électromagnétique est émis dans le plan de l'antenne Vivaldi dans la direction de l'ouverture, et non orthogonalement à celui-ci.

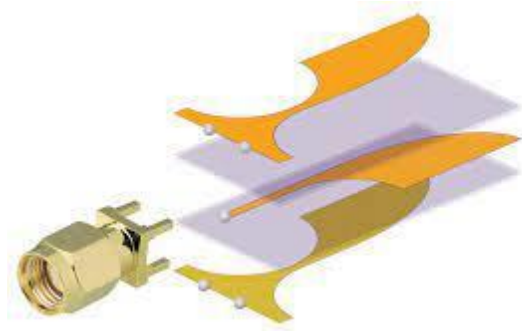


Figure I .6 : Antenne Vivaldi [12].

I.3.6 Antenne log-périodique

L'antenne log-périodique est largement utilisée dans le domaine des télécommunications, notamment en raison de ses bonnes performances en émission et en réception [13]. Elle peut être vue comme un réseau de dipôles rayonnant à $\lambda/4$ dont l'agencement et la taille sont ordonnés selon une loi logarithmique. L'antenne log-périodique réunit trois principes de base de conception :

- Le premier est le concept de l'angle qui est une approche de conception où la géométrie de la structure d'antenne est décrite complètement par des angles plutôt que des longueurs telle qu'une antenne biconique infinie.
- Le deuxième principe s'appuie sur le fait que l'impédance d'entrée d'une antenne identique à son complément est indépendante de la fréquence.
- Le troisième est conçu de telle manière que ses propriétés électriques (comme le gain ou l'impédance) se répètent périodiquement en fonction du logarithme de la fréquence [14].

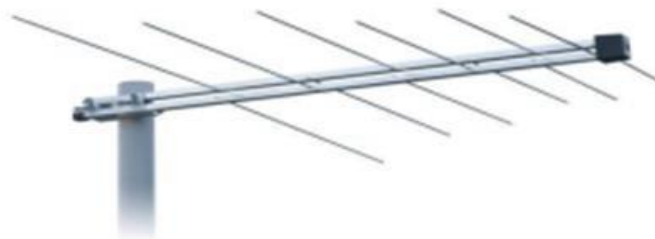


Figure I .7 : Antenne log périodique [5].

I.3.7 Le dipôle demi-onde

Le dipôle demi-onde est une antenne filaire couramment utilisée pour la transmission et la réception des ondes radio. C'est une antenne à polarisation linéaire, composée d'un fil

conducteur dont sa longueur est de longueur de $\lambda/2$ correspondant à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

Il est alimenté au centre par une ligne soit coaxiale, soit symétrique. Lorsqu'un signal est appliqué à l'antenne, un courant alternatif circule dans les deux moitiés du dipôle, produisant un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace.

Dans le plan horizontal, cette antenne présente un rayonnement omnidirectionnel. En revanche, dans le plan vertical, le diagramme de rayonnement est plus complexe et dépend de la hauteur d'installation ainsi que de l'environnement.

Le dipôle demi-onde se distingue par sa simplicité de réalisation, sa large bande passante et une impédance d'entrée relativement stable sur une certaine plage de fréquences [15].

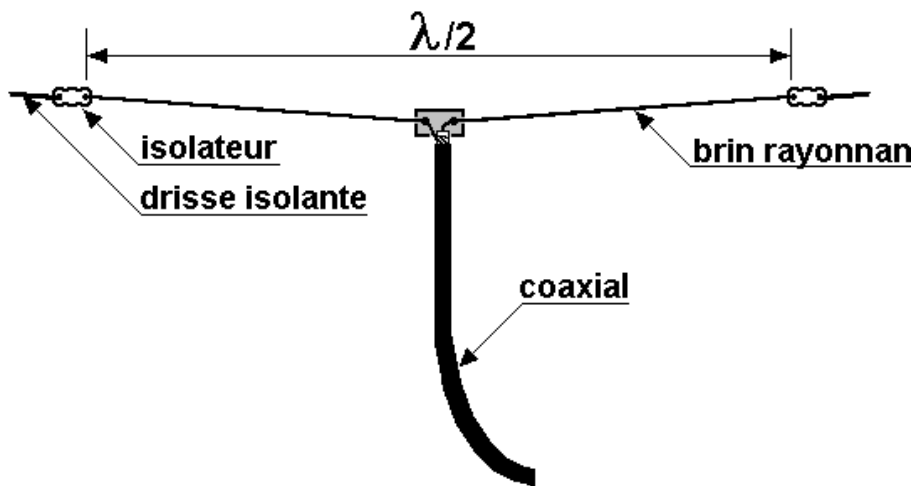


Figure I.8 : Le dipôle demi-onde [5].

I.3.8 Antenne biconique

L'antenne biconique a été inventée par S. A. Schelkunoff en 1943 [16]. Le concept d'une antenne biconique est basé sur le fait qu'un dipôle construit avec un fil épais offre une bande passante plus grande qu'un dipôle construit avec un fil fin. Ce concept utilise des conducteurs évasés pour obtenir une plus grande bande passante. L'antenne biconique peut être analysée comme suit : La ligne de transmission biconique de l'antenne s'étend infiniment vers l'extérieur.

Le principe de fonctionnement repose sur l'observation qu'un dipôle constitué d'un conducteur de grande épaisseur offre une bande passante plus large qu'un dipôle réalisé avec un fil fin. L'antenne biconique peut être analysée comme si la ligne de transmission biconique de l'antenne était évasée jusqu'à l'infini. L'antenne biconique infinie agit comme un guide pour une onde sphérique [17].



Figure I.9 : Antenne biconique [12].

I.3.9 Antenne discône

Une antenne discône est un type d'antenne à large bande très utilisée pour la réception (et parfois l'émission) dans les communications radio, notamment dans les domaines des radioamateurs, des services d'urgence, de la surveillance ou encore de certaines applications militaires ou aéronautiques. L'antenne discône est une antenne biconique dont un des cônes est remplacé par un plan de masse de dimensions infini par rapport à la longueur d'onde la plus bas [18].



Figure I.10 : Antenne discône [5].

I.3.10 Antenne Patch (micro-ruban)

L'antenne micro-ruban, ou antenne patch, est un type moderne d'antenne de plus en plus utilisé dans les systèmes de télécommunication [19]. Sa structure de base se compose d'un substrat diélectrique entre un plan de masse métallique (face inférieure) et un patch conducteur (face supérieure) comme il est illustré dans la figure I.11. Ce dernier émet un

rayonnement électromagnétique lorsqu'il est excité par un courant provenant d'une ligne d'alimentation, typiquement une ligne micro-ruban.

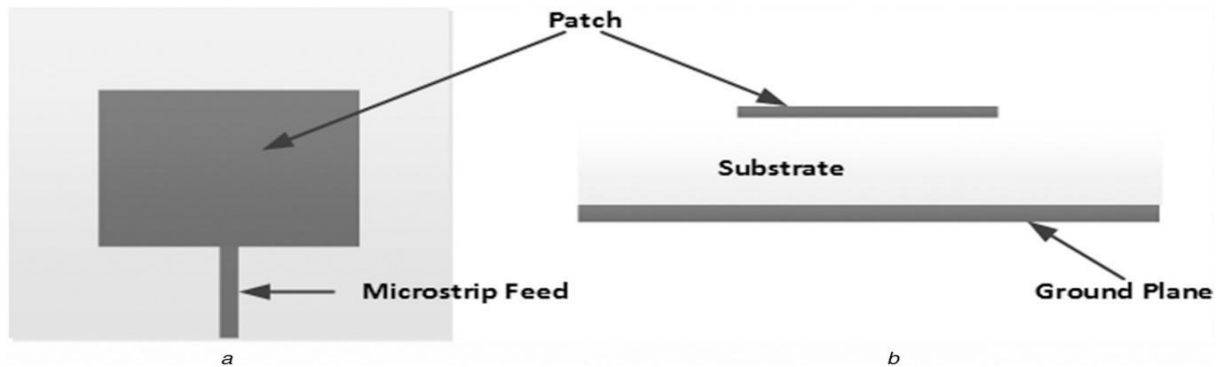


Figure I.11 : Structure d'antenne patch [20].

Le patch et le plan de masse sont généralement en cuivre. Le patch peut prendre diverses formes géométriques : rectangulaire, carré, elliptique, circulaire, triangulaire, annulaire, pentagonale, etc. [21].

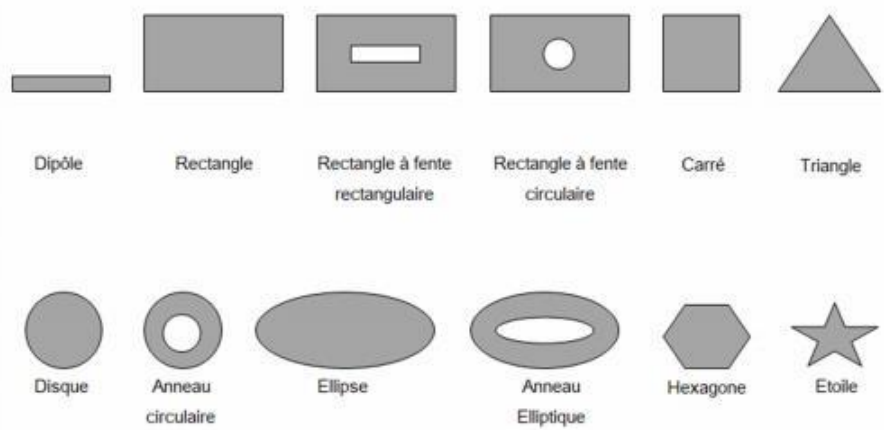


Figure I.12 : Différentes formes du patch [5].

Le choix de la forme du patch dépend des caractéristiques souhaitées, comme la polarisation, le gain, la directivité, largeur de bande passante, ...etc [20].

I.3.10.1 Description et structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est une antenne dont les composants sont fabriqués en utilisant des techniques d'impression. Elle est généralement composée d'un substrat diélectrique, d'une couche de métal imprimée, et éventuellement d'une couche de protection pour protéger la couche de métal. La forme et la disposition de la couche de métal déterminent les

caractéristiques de l'antenne, telles que la fréquence de fonctionnement, le gain, la polarisation et la directivité.

Les antennes imprimées sont souvent utilisées dans les systèmes de communication sans fil, tels que les téléphones portables, les réseaux Wifi, les radars, ... etc [20].

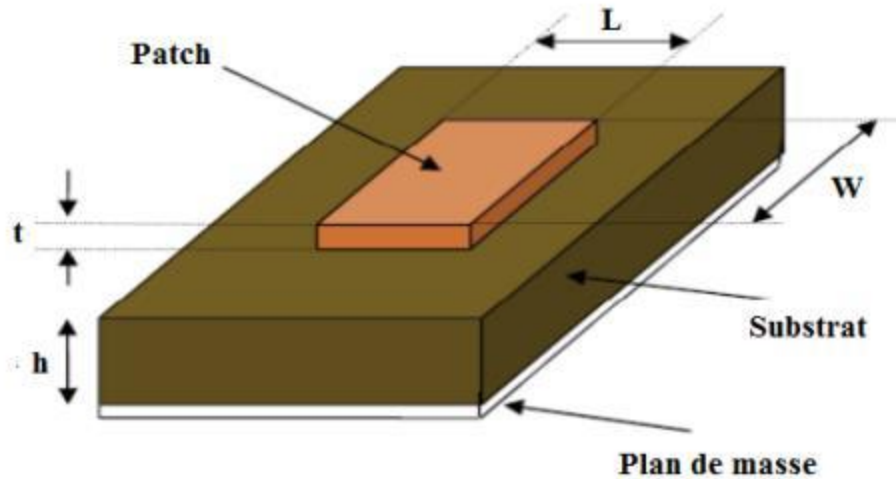


Figure I .13 : Composition d'une antenne patch [5].

Comme illustré dans la Figure I.13, une antenne patch est constituée d'un conducteur fin (le patch) déposé sur un substrat isolant, lui-même reposant sur un plan de masse métallique. Cette configuration permet d'optimiser le rayonnement, de réduire les pertes ohmiques (effet Joule), et d'élargir la bande passante. L'alimentation de l'antenne dépend de son intégration dans le dispositif et se divise généralement en trois types principaux :

- **L'alimentation par ligne** : Une ligne microstrip est connectée au patch pour fournir de l'énergie. Cependant, cette méthode peut engendrer des rayonnements parasites indésirables.
- **L'alimentation par connecteur** : Un connecteur standard (SMA) est fixé au plan de masse, perforé pour permettre à l'âme centrale du connecteur de traverser le diélectrique et se connecter au patch. L'énergie est alors transmise à l'antenne via un guide coaxial.
- **L'alimentation par fente** : Une ligne est placée derrière le plan de masse, qui comporte une fente sous le patch. Cette fente permet à l'énergie de la ligne d'être transmise à l'antenne. Ces différentes méthodes d'alimentation influencent directement les performances et les caractéristiques de l'antenne micro-ruban [22].

I.3.10.2 Paramètres géométriques d'une antenne imprimée

a) Largeur du Patch

La largeur du patch dépend de la fréquence de résonance et du rayonnement souhaité. Elle influe sur l'impédance d'entrée et la bande passante [23]. Elle est donnée par :

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{I.1})$$

ϵ_r : La permittivité relative.

f : La fréquence fondamentale de l'antenne.

C : La vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s).

b) Longueur du Patch

La longueur du patch détermine la fréquence de résonance de l'antenne. Il est à noter que la longueur (L) correspondant à l'extension des champs [23].

La longueur effective est donnée par l'expression suivante :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (\text{I.2})$$

Où : $\epsilon_{r_{eff}}$ représente la permittivité effective donnée par :

$$\epsilon_{r_{eff}} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{(1 + 12 \left(\frac{h}{w} \right)^2)}} \quad (\text{I.3})$$

La longueur effective du Patch est calculée par :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (\text{I.4})$$

La longueur du Patch est égale alors à :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (\text{I.5})$$

c) Choix du substrat

La conception d'antennes imprimées utilise divers substrats qui doivent être compatibles avec le matériau du patch [23].

Le matériau du patch d'antenne, comme le cuivre par exemple, est souvent couramment utilisé. Dans ce cas, la permittivité relative du substrat peut varier de 1 à 12 [24].

Les antennes Patches sont généralement conçues en utilisant des substrats avec une permittivité relative faible, inférieure ou égale à 3 ($\epsilon_r \leq 3$). Le constant diélectrique du substrat varie entre 2.2 et 12. Les matériaux les plus fréquemment utilisés pour la conception de ces antennes sont des composites à base de Téflon, qui présentent une permittivité relative comprise entre 2 et 3 et une tangente delta ($\tan \delta$) d'environ 10^{-3} . Le polypropylène est également utilisé, avec une permittivité relative de 2.18 et un tangent delta de 3×10^{-4} . De plus, des mousses synthétiques contenant de petites poches d'air sont utilisées. Ces mousses ont une permittivité relative de 1.03 et une tangente delta d'environ 10^{-3} [5], [25].

I.4 Techniques d'alimentation et d'adaptation des antennes

I.4.1 Techniques d'alimentation

I.4.1.1 Alimentations par contact

- **Alimentation directe par une ligne micro-ruban**

Dans cette technique d'alimentation, un ruban conducteur (Feed Line) est connecté directement au bord du patch rayonnant comme le montre la figure I.14. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch, et l'un de ces principaux avantages qu'elle peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane.

L'encoche introduite dans le patch a pour but d'adapter l'impédance entre la ligne d'alimentation et le patch, sans recourir à un élément d'adaptation externe. Cette adaptation est obtenue en contrôlant précisément la position et les dimensions de l'encart. Par conséquent c'est une technique d'alimentation facile, puisqu'elle fournit la facilité de fabrication et la simplicité de modélisation, ainsi que l'adaptation d'impédance. Cependant, certaines applications nécessitent un substrat épais, ce qui engendre l'augmentation des ondes de surface et le rayonnement parasite, entraînant une dégradation de la bande passante [26].

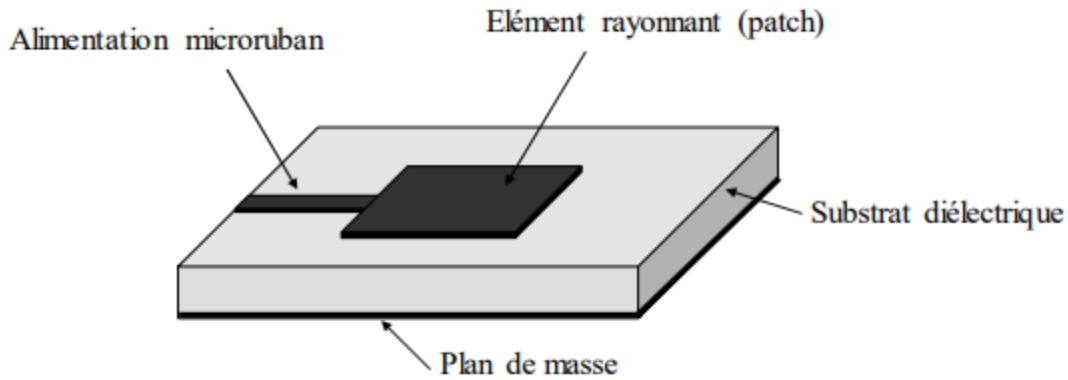


Figure I .14 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban [5].

- **Alimentation coaxiale directe**

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation par sonde est une technique très connue, utilisée pour alimenter les antennes plaques. Le conducteur intérieur du connecteur coaxial s'étend à travers le diélectrique et il est soudé au patch, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse « Figure I.15».

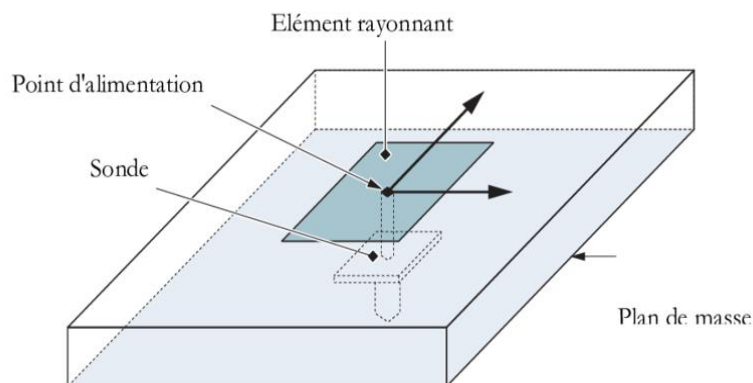


Figure I .15 : Alimentation coaxiale directe [5].

L'alimentation coaxiale permet un positionnement flexible du point d'alimentation sur le patch, facilitant ainsi l'adaptation d'impédance. Elle est facile à fabriquer et présente un rayonnement parasite faible. Cependant, son inconvénient principal est qu'elle fournit une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser puisqu'un trou doit être foré dans le substrat et le connecteur sort en dehors du plan de masse, cela ne la rend pas complètement plane pour les substrats épais ($h > 0.002 \lambda_0$).

En outre, pour des substrats plus épais, l'accroissement de la longueur de sonde rend l'impédance d'entrée plus inductive, menant aux problèmes d'adaptation [27] Cette technique est largement utilisée pour les patches circulaires et annulaires.

I.4.1.2 Alimentations par proximité

- **Alimentation par couplage électromagnétique**

Ce type d'alimentation se fait par couplage électromagnétique d'une ligne micro ruban a l'élément rayonnant. Parmi ses principaux avantages, on note la suppression des rayonnements parasites ainsi qu'une amélioration significative de la bande passant. Toutefois, sa principale limitation réside dans la complexité de sa mise en œuvre [28].

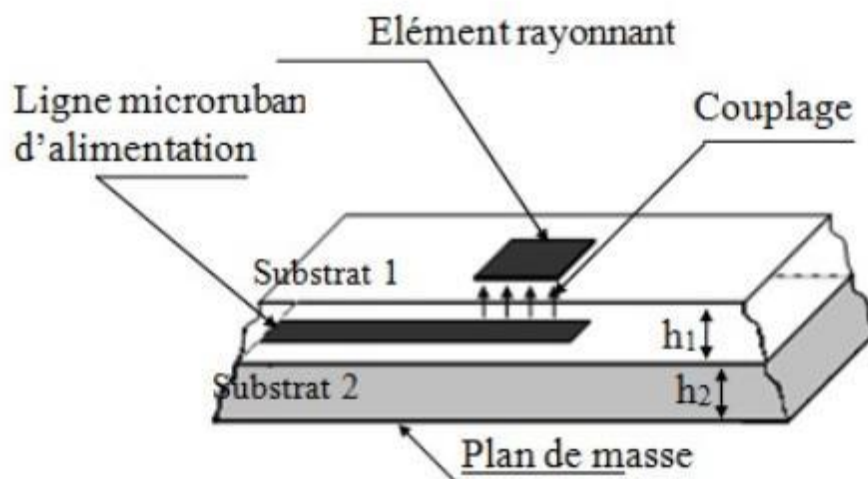


Figure I.16 : Alimentation par couplage électromagnétique [5].

- **Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse**

Dans cette méthode, le patch rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme elle est représentée dans la Figure I.17. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente ou une ouverture dans le plan de masse.

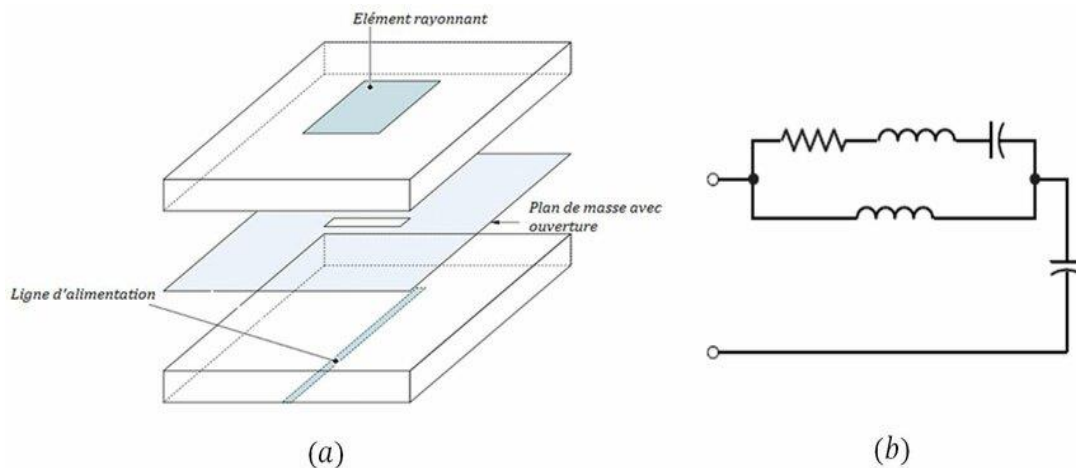


Figure I.17 : Alimentation par couplage par fente : (a) Alimentation du patch par couplage à travers une fente, (b) Modèle électrique [5].

L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle présente des difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples qui augmentent également l'épaisseur d'antenne. De plus, elle fournit une largeur de bande étroite [29].

I.4.2 Techniques d'adaptation

I.4.2.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Une ligne « quart d'onde » permet de réaliser une adaptation d'impédance en insérant un élément d'adaptation en série entre 2 éléments d'impédances différentes à condition qu'elles soient purement réelles [30].

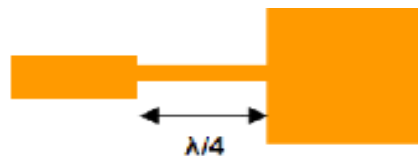


Figure I.18 : Adaptation par ligne quart d'onde [5].

I.4.2.2 Adaptation par STUB

Un stub ramène en parallèle sur la charge une certaine admittance pure qui dépend de son impédance caractéristique et de sa longueur. Cette admittance s'ajoute donc à celle de la

charge. Si elle est convenablement calculée, elle permet ainsi d'annuler la partie imaginaire présentée par la charge [28].

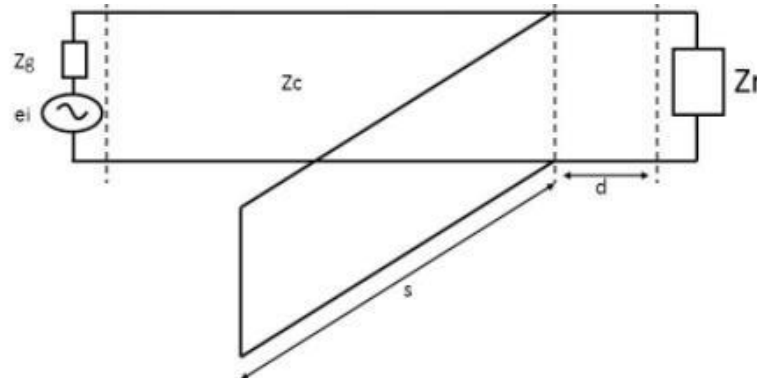


Figure I .19 : Adaptation par STUB [5].

I.4.2.3 Adaptation avec encoche

L'adaptation par encoche est une méthode utilisée pour ajuster l'impédance d'une charge à la sortie d'un circuit, en créant une encoche dans la ligne de transmission. Cette technique est également désignée sous le terme de « matching par encoche ».

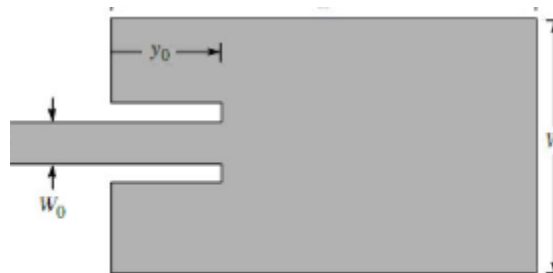


Figure I .20 : Adaptation avec encoche [5].

I.5 Les caractéristiques d'une antenne

I.5.1 Caractéristiques électriques

Les paramètres électriques définissent le comportement de l'antenne en tant qu'élément intégré dans un circuit. Ils permettent d'évaluer la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et, ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation ; nous nous limiterons ici à la définition des principaux paramètres [21].

- **Impédance d'entrée et coefficient de réflexion**

La définition de l'impédance d'entrée se réfère à l'impédance qui est offerte par une antenne à ses bornes. Elle est équivalente au rapport entre la tension V_e et le courant I_e présenté à l'entrée de l'antenne. Elle est donnée par [31] :

$$Z_{in} = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{I.6})$$

Où : V_e et I_e représentent le courant et la tension d'entrée de l'antenne, respectivement.

L'impédance d'une antenne est la résistance qu'elle présente à la transmission des signaux radioélectriques. Une impédance mal adaptée peut entraîner des pertes de signal et une diminution des performances de l'antenne.

Le coefficient de réflexion S_{11} mesure la partie du signal incident qui est réfléchi à l'entrée du composant. Pour garantir une adaptation satisfaisante dans la bande de fréquence voulue, il est impératif de respecter la condition suivante : $|S_{11}|$ doit être inférieur ou égal à -10 dB [32].

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (\text{I.7})$$

Le coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (\text{I.8})$$

- Z_{in} : impédance d'entrée de l'antenne.
- Z_c : impédance caractéristique de la ligne (habituellement à 50 Ω).
- $|\Gamma| \in [0,1]$.
- S_{11} est toujours négatif en dB (puisque'il représente une perte par réflexion).

TOS (Taux d'Ondes Stationnaires), aussi appelé ROS (Rapport d'Ondes Stationnaires) ou en anglais VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). C'est une autre manière d'exprimer le défaut d'adaptation entre une antenne et sa ligne de transmission. Quantifie l'adéquation entre la ligne de transmission et l'antenne, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement de cette dernière. En termes mathématiques, le TOS peut être défini comme suit :

$$TOS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (\text{I.9})$$

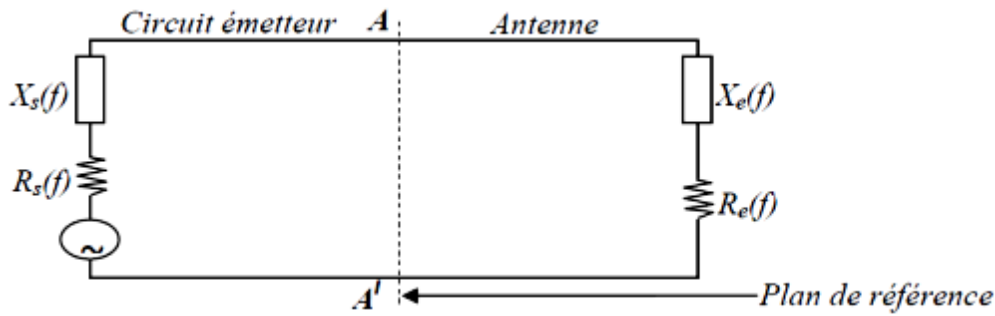


Figure I.21 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission [33].

- **Bande passante et fréquence de résonance**

La bande passante de l'antenne définit la gamme de fréquences sur lequel l'antenne présente les performances requises en termes de rayonnement et d'adaptation. Elle est généralement exprimée comme suit [34] :

$$BP = \Delta F = f_2 - f_1 \quad (\text{I.10})$$

Où : f_1 : est la fréquence la plus basse de la bande.

f_2 : est la fréquence la plus élevée de la bande.

On peut aussi exprimer la bande passante relative (en pourcentage) comme :

$$BP\% = \frac{f_2 - f_1}{f_{rés}} \times 100 \quad (\text{I.11})$$

I.5.2 Caractéristiques de rayonnement

Les caractéristiques de rayonnement d'une antenne sont les propriétés qui décrivent la façon dont l'antenne émet ou reçoit des ondes électromagnétiques dans l'espace. Ces caractéristiques sont importantes pour déterminer l'efficacité et les performances de l'antenne [21].

- **Gain (G)**

Le gain d'une antenne, noté G est une mesure de sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée, par rapport à une antenne isotrope qui rayonnerait de manière uniforme dans toutes les directions. Il combine à la fois l'efficacité de rayonnement et la directivité de l'antenne :

$$G = \eta \cdot D \quad (\text{I .12})$$

- G : gain (souvent exprimé en dBi).
- η : efficacité de l'antenne (rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie).
- D : directivité.

Le gain est généralement exprimé en décibels isotropes (dBi), où "isotrope" fait référence à une antenne idéale rayonnant uniformément dans toutes les directions. Une valeur plus élevée du gain indique une capacité accrue à concentrer l'énergie dans une direction spécifique, ce qui est particulièrement important dans les applications nécessitant une couverture directionnelle ou longue portée.

- **Directivité**

La directivité d'une antenne est une mesure de sa capacité à concentrer le rayonnement dans une direction spécifique. Elle est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée dans cette direction, $P(\theta, \varphi)$, et la puissance qui serait émise par une antenne isotrope. Ce rapport est appelé directivité $D(\theta, \varphi)$ [35]. Pour calculer la directivité d'une antenne dans une direction donnée (θ, φ) , on peut utiliser la formule suivante :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \cdot P(\theta, \varphi)}{P_{tot}} \quad (\text{I .13})$$

- $P(\theta, \varphi)$: densité de puissance rayonnée dans la direction (θ, φ) .
- P_{tot} : puissance totale rayonnée par l'antenne.

- **Diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique de la répartition angulaire de la puissance rayonnée par une antenne dans l'espace. Il illustre comment l'antenne émet ou reçoit les ondes électromagnétiques selon les différentes directions. Ce diagramme peut être représenté en 2D ou en 3D, et il permet d'identifier à la fois la direction principale du faisceau et l'intensité relative du rayonnement [21].

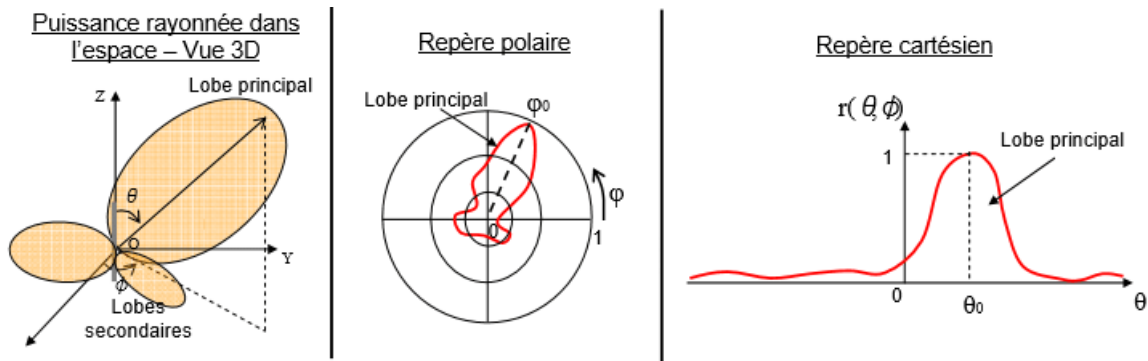


Figure I .22 : Représentation du diagramme de rayonnement d’une antenne [21].

• **Polarisation**

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identique à la direction du champ électrique, c'est à dire à celle des brins rayonnants de l'antenne. Le plan E (électrique) est parallèle au vecteur \vec{E} de l'onde émise. On parle de polarisation verticale si le plan E est perpendiculaire au sol ; s'il est parallèle au sol, on parle de polarisation horizontale.

Aussi le vecteur du champ électrique instantané trace dans le temps une figure. On réfère à ce phénomène simplement comme étant la polarisation du champ électrique. La figure est généralement une ellipse qui présente des cas particuliers [36].

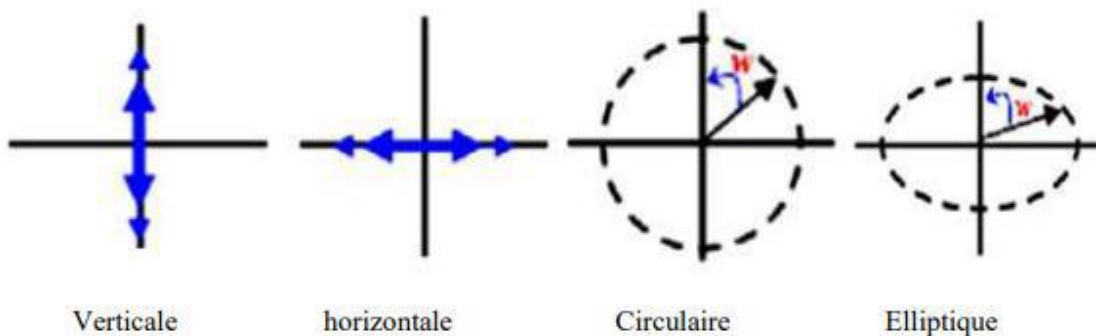


Figure I .23 : Différents états de polarisation d'une onde électromagnétique [5].

I.6 Réseau d'antennes

I.6.1 Définition

Un réseau d'antennes est un ensemble d'éléments rayonnants identiques, disposés géométriquement pour émettre ou recevoir une même fréquence. En appliquant des poids

d'amplitude et de phase au signal appliqué ou reçu au niveau de chaque élément, des diagrammes de rayonnement spécifiques peuvent être obtenus, par exemple très directionnels, ou sur un solide donné, ou même avec une suppression directionnelle spécifique. Par conséquent, le diagramme de rayonnement d'un réseau dépend du type de configuration, du nombre d'éléments dans cette configuration, de la distance entre les éléments et du diagramme de rayonnement de l'élément de base. La commande électronique du contreponds permet d'obtenir un "balayage électronique" dans l'espace, ce qui évite d'avoir recours à une antenne à orientation mécanique. Généralement, ce réseau est utilisé pour donner au concepteur plus de liberté pour répondre aux besoins de l'environnement [21].

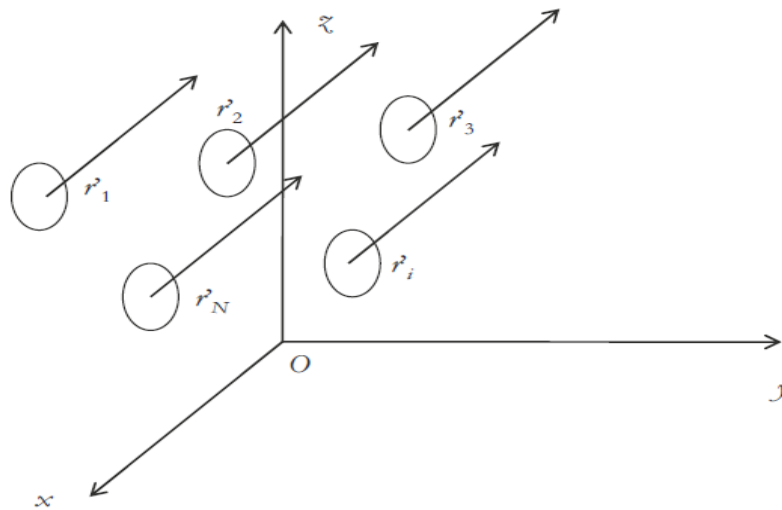


Figure I .24 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes [21].

I.6.2 Alimentation d'un réseau d'antennes

Le réseau d'alimentation des antennes a pour rôle de distribuer l'énergie aux différentes sources tout en respectant les lois de pondération. La méthode la plus simple consiste à utiliser une ligne micro ruban pour alimenter l'élément rayonnant. Selon les exigences, les réseaux d'alimentation peuvent adopter différentes architectures. L'acheminement de l'énergie repose sur des lignes micro ruban associées à des transformateurs d'impédance quart d'onde. De plus, le déphasage du circuit d'alimentation peut être assuré par des éléments supraconducteurs.

Afin de garantir une répartition homogène de la puissance, toutes les structures sont conçues pour fournir la même quantité d'énergie à chaque patch. Il est également primordial que les signaux émis par les différentes sources conservent une fréquence identique et stable dans le temps.

Les circuits d'excitation peuvent être conçus selon plusieurs architectures, Voici quelques exemples :

- **Alimentation parallèle**

Un réseau parallèle sera plus encombrant qu'un réseau série. De plus, il est important de noter que les réseaux parallèles ont des longueurs de ligne plus longues et plus de courbures, ce qui crée plus de pertes, en particulier dans la plage millimétrique. Un autre choix important dans la conception d'antennes imprimées est le substrat diélectrique. Pour bien adapter cette alimentation, il est conseillé d'utiliser un diviseur de tension de type Wilkinson [37].

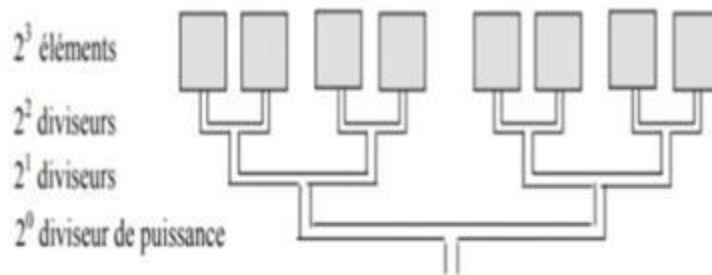


Figure I .25 : Alimentation parallèle d'un réseau linéaire [37].

- **Alimentation série**

Dans une alimentation en série, le courant circule successivement d'un élément à l'autre. Chaque antenne est traversée par le même courant, mais la tension varie selon la position dans le réseau. Ce type d'alimentation est plus simple à mettre en œuvre, mais il peut entraîner des problèmes d'impédance cumulative et des désadaptations à haute fréquence. Dans la figure I.26, nous avons une ligne de transmission qui excite des éléments rayonnants en série. Chaque ligne comporte en entrée un déphaseur, lui-même relié en quadrature à un guide de puissance commun. La distance de connexion de la ligne sur la ligne principale doit être uniforme et le signal doit atteindre le déphaseur dans la même phase pour éviter une erreur de phase [37].

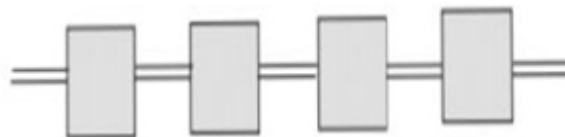


Figure I .26: Alimentation série d'un réseau linéaire [37].

L'alimentation hybride d'un réseau d'antennes combine les avantages des configurations en série et en parallèle, ou fait intervenir à la fois des réseaux passifs (réseaux de distribution)

et des composants actifs (amplificateurs, déphaseurs électroniques, commutateurs), dans le but d'optimiser les performances globales du système.

Ce type d'alimentation permet notamment de :

- Répartir la puissance de manière contrôlée entre les éléments rayonnants.
- Ajuster dynamiquement la phase et l'amplitude des signaux alimentant chaque antenne.
- Réaliser du beamforming (formation de faisceau) de manière flexible et reconfigurable.
- Réduire les lobes secondaires et améliorer la directivité.

Avantages :

- Bon compromis entre simplicité, performance, et flexibilité.
- Convient aux systèmes à large bande ou multi-bandes.
- Adapté aux réseaux reconfigurables ou intelligents.

Inconvénients :

- Complexité de conception et de calibration.
- Sensibilité aux variations de phase et d'amplitude entre les branches.

I.6.3 Types de réseaux d'antennes

Un réseau d'antennes est une structure composée de plusieurs éléments rayonnants disposés selon une géométrie particulière, et alimentés de manière coordonnée pour contrôler le diagramme de rayonnement global. Le choix du type de réseau dépend des performances souhaitées : directivité, gain, balayage de faisceau, ou réduction des lobes secondaires.

On distingue principalement les types suivants :

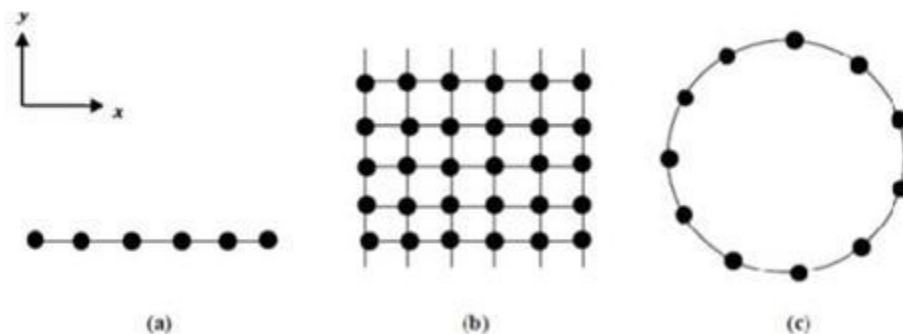


Figure I .27: Différentes configurations géométriques des réseaux, (a) linéaire, (b) planaire et (c) circulaire [38].

I.6.3.1 Antenne en réseau linéaire

Un réseau linéaire est un réseau dans lequel les sources sont disposées en ligne droite et séparées par une distance constante d . Dans ce cas, les propriétés du réseau apparaissent dans le plan contenant la normale source et source de base [39].

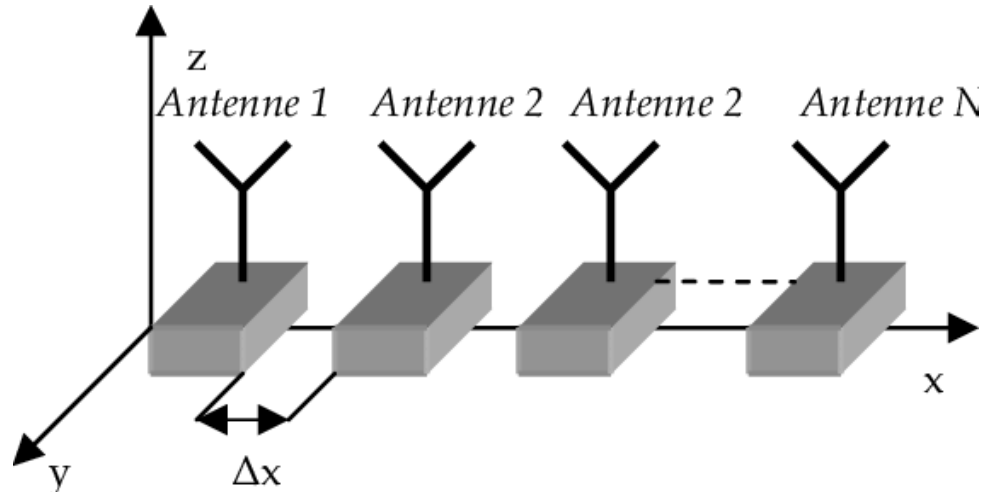


Figure I .28 : Réseau d'antenne circulaire [39].

I.6.3.2 Antenne en réseau plan

Un réseau plan, ou réseau planaire, désigne une disposition d'éléments rayonnants organisée dans un même plan. Le réseau planaire de type rectangulaire constitue une généralisation du réseau linéaire. Le cas le plus simple à modéliser correspond à une structure basée sur un maillage rectangulaire d'éléments. Les espacements entre les éléments peuvent différer selon les deux axes principaux du réseau [40].

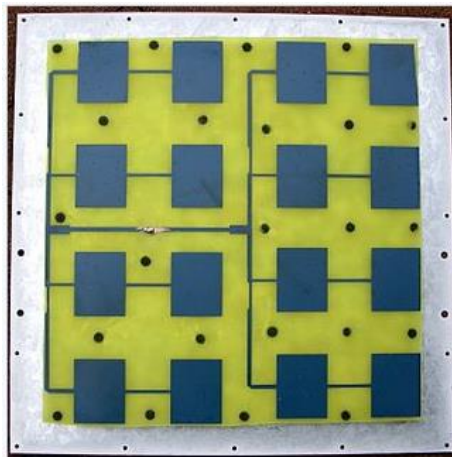


Figure I .29 : Réseau d'antenne planaire [40].

I.6.3.3 Antenne en réseau circulaire

Un réseau circulaire est caractérisé par la répartition des éléments rayonnants le long du périmètre d'un cercle, avec des espacements égaux entre eux. Ce type de réseau permet une

couverture angulaire circulaire et peut être utilisé pour des applications de balayage omnidirectionnel ou de suivi de cible.

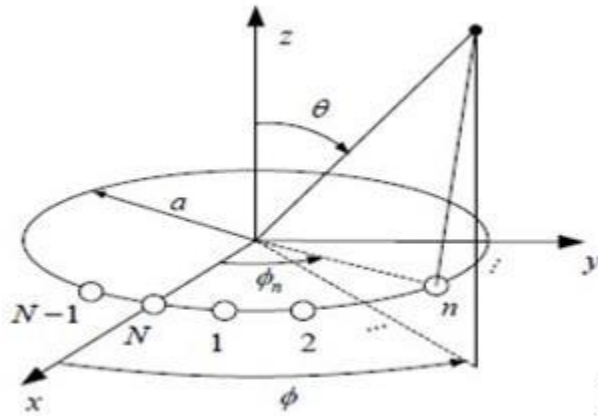


Figure I .30 Géométrie d'un réseau d'antennes circulaire [41].

L'analyse du réseau se limite au plan horizontal, représenté par les coordonnées polaires (θ , φ). L'expression du facteur de réseau est donnée par [42] :

$$AF(\theta, \psi) = \sum C_i e^{j(\psi_i + k a \sin \theta \cos(\theta - \psi_i))} \quad (I.14)$$

I.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble des différentes catégories d'antennes, de leurs caractéristiques techniques, ainsi que des principaux paramètres influençant leurs performances, tels que le diagramme de rayonnement, la bande passante, l'impédance ou encore le gain.

Chaque type d'antenne, selon sa configuration et son principe de fonctionnement, répond à des besoins spécifiques dans des contextes variés, allant des systèmes sans fil aux communications spatiales.

L'analyse menée met en lumière l'importance d'une approche globale pour comprendre les enjeux liés au choix et à la conception d'une antenne. Cette base théorique prépare le terrain pour des études plus ciblées sur des architectures reconfigurables et des applications avancées dans les systèmes de communication modernes.

CHAPITRE II
Les Différentes Antennes
Reconfigurables

Sommaire

II.1	Introduction	29
II.2	Définition d'une antenne reconfigurable	29
II.3	Les techniques de reconfigurabilité.....	30
II.3.1	Diode PIN.....	30
II.3.2	Diode Varactor	31
II.3.3	Transistors FET	33
II.3.4	Les RF-MEMS	34
II.3.5	Les matériaux agiles	35
II.4	Classification des antennes Reconfigurables.....	37
II.4.1	Antennes reconfigurables en fréquence.....	37
II.4.1.1	La modification géométrique	38
II.4.1.2	Court-circuit commutable.....	38
II.4.1.3	Modification de matériaux	39
II.4.1.4	Fente ou de lignes commutables.....	39
II.4.2	La reconfiguration en diagramme de rayonnement	40
II.4.2.1	La Modification géométrique	41
II.4.2.2	Courts circuits commutables	41
II.4.2.3	Fente ou de lignes commutables.....	42
II.4.3	Antennes reconfigurables en polarisations	44
II.5	Domaines d'applications des antennes reconfigurables	45
II.6	Conclusion.....	47

II.1 Introduction

L'essor rapide des systèmes de communication sans fil, couplé à la demande croissante en capacité spectrale et en flexibilité des dispositifs radiofréquences, a motivé le développement de nouvelles architectures d'antennes capables de s'adapter dynamiquement à des conditions d'opération variées. Dans ce contexte, les antennes reconfigurables ou antennes adaptatives sont apparues comme une solution innovante et stratégique. Ces antennes sont conçues pour modifier certaines de leurs propriétés électromagnétiques de manière contrôlée, en réponse à un stimulus électrique, optique, thermique ou mécanique.

Contrairement aux antennes traditionnelles, qui sont dimensionnées pour fonctionner sur des fréquences et des conditions de rayonnement fixes, les antennes reconfigurables peuvent adapter telles que la fréquence de résonance, la polarisation, le diagramme de rayonnement ou encore la largeur de bande.

Ces adaptations sont réalisées grâce à l'intégration de composants actifs (diodes PIN, Varactor, transistors FET) ou passifs (MEMS, matériaux à changement de phase, graphène, cristaux liquides), insérés stratégiquement sur la surface rayonnante ou dans le circuit d'alimentation de l'antenne. Par l'action de signaux de commande, ces composants modifient les caractéristiques du circuit RF, entraînant un changement souhaité dans le comportement de l'antenne.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps définir les antennes reconfigurables. Ensuite, nous allons expliquer les techniques de reconfigurabilité pour chaque type de reconfigurations, ainsi que les classifications des antennes reconfigurables. Par après nous allons parler des différents domaines d'application des antennes reconfigurables.

II.2 Définition d'une antenne reconfigurable

Une antenne reconfigurable est une structure capable d'ajuster dynamiquement certaines de ses propriétés électromagnétiques, telles que la fréquence de fonctionnement, le diagramme de rayonnement, la polarisation ou la largeur de bande. Afin de répondre aux exigences spécifiques d'un environnement ou d'une application. Cette reconfiguration peut concerner une seule caractéristique ou une combinaison de plusieurs, selon les besoins du système [42]. Elle est généralement réalisée en modifiant la distribution du courant électrique sur l'antenne, ce qui influence directement le comportement du champ rayonné et de

l'impédance. On distingue principalement trois grandes catégories de reconfigurabilité : la variation de fréquence, le contrôle du faisceau de rayonnement, et l'ajustement de la polarisation [43].

II.3 Les techniques de reconfigurabilité

Pour exploiter pleinement le potentiel des antennes reconfigurables, il est indispensable de déterminer avec précision les paramètres de configuration les plus adaptés à chaque situation. Plusieurs approches permettent d'assurer cette reconfigurabilité, selon la technologie utilisée. [44] Parmi elles, la méthode la plus répandue est la reconfiguration de type électrique, qui repose sur l'intégration de composants actifs ou adaptatifs. Ces éléments permettent de modifier les caractéristiques de l'antenne en agissant sur la distribution du courant ou l'impédance du circuit. Les dispositifs couramment utilisés incluent notamment :

- Les diodes PIN.
- Les diodes Varactor.
- Les transistors à effet de champ (FET).
- Les systèmes micro électromécaniques (MEMS).
- Et divers matériaux à propriétés modulables, également appelés matériaux intelligents ou agiles.

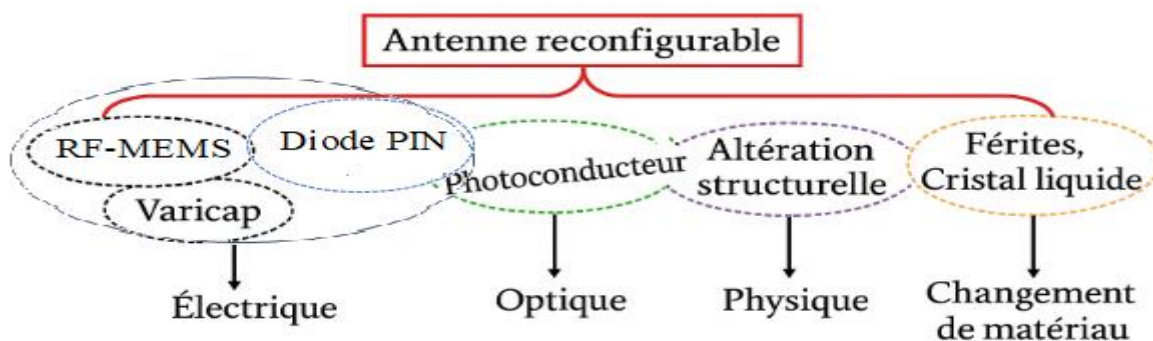


Figure II. 1 : différentes techniques adoptées pour réaliser des antennes reconfigurables [45].

II.3.1 Diode PIN

La diode PIN (Positive Intrinsèque Négative diode) est un composant semi-conducteur est largement utilisé dans les systèmes à haute fréquence, notamment pour ses capacités de commutation rapide (Figure II.2). Elle est constituée d'une très grande impédance et surtout d'une très faible capacité, elle se comporte comme un condensateur de très faible valeur [46].

En mode polarisation directe, la diode conduit le courant : elle est alors considérée comme active (ON) et permet le passage du signal. À l'inverse, en polarisation inverse, elle bloque le courant, devenant inactive (OFF), et agit comme un élément isolant dans le circuit. Cette propriété est exploitée pour activer ou désactiver certaines parties d'une antenne reconfigurable, modifiant ainsi ses caractéristiques de rayonnement.

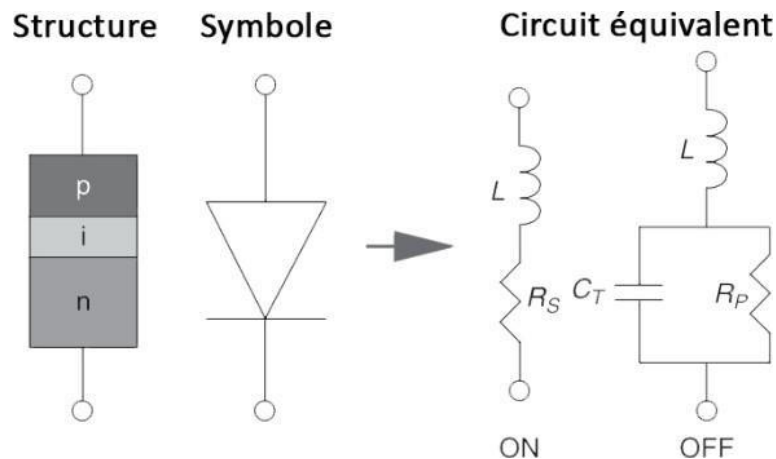


Figure II.2 : Circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF [47].

II.3.2 Diode Varactor

Une diode Varactor (acronyme de variable reactor) appelée aussi Varicap, c'est une diode fonctionne comme un condensateur dont la valeur de capacité varie avec la tension inverse appliquée à ses bornes comme le montre la Figure II.3. La valeur de cette capacité est modifiée lorsque la tension de polarisation est modifiée. Même si les diodes Varicap offrent une intégration aisée et une grande agilité continue, les pertes causées par ce composant peuvent parfois être considérables et Le réseau de polarisation devient de plus en plus complexe avec le nombre de diodes Varicap utilisées [48].



Figure II.3 : Le symbole de diode Varicap [48].

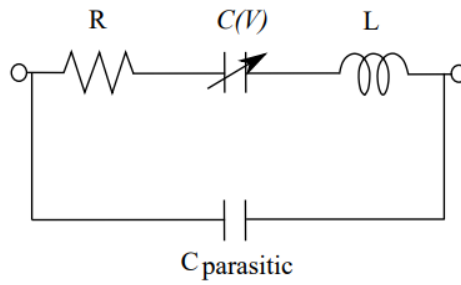


Figure II.4 : Circuit équivalent d’une diode Varicap [49].

La formule pour calculée la capacité de jonction variable $C(v)$ est [50] :

$$C(v) = \frac{C_{jo}}{\left(1 + \frac{v}{V_j}\right)^M} + C_{par} \quad (II.1)$$

R	L	C_{Jo}	V_J	M	C_{par}
2Ω	0.05 nH	1.2 pF	4.155 V	1.97	0.1044 Pf

Tableau II.1 : valeurs des paramètres de la diode varactor MA46H120 [50].

Avec :

- v : la tension de polarisation inverse.
- C_{Jo} : la capacité des jonctions à 0 v.
- V_J : la tension potentielle intégrée.
- M : le paramètre de la jonction abrupte.
- C_{par} : la capacité parasite du varactor.

La capacité varactor $C(v)$ varie de 1,304 à 0,149 pF lorsque la tension de polarisation inverse est portée de 0 à 18 V, comme illustré dans la Figure II.5.

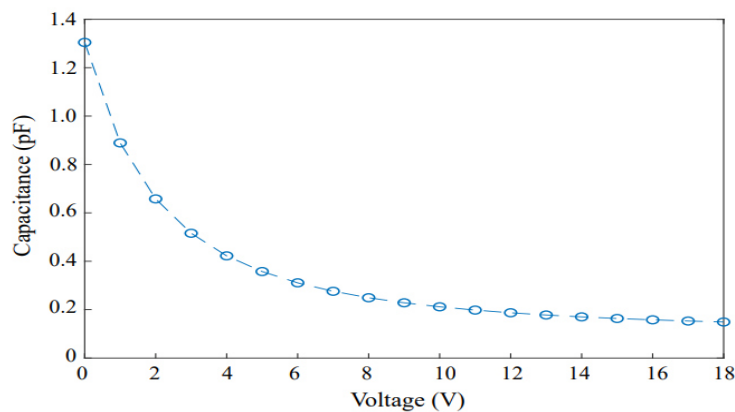


Figure II.5: Capacité de jonction variable du varactor MA46H120 correspondant au changement de tension de polarisation inverse [49].

II.3.3 Transistors FET

Le transistor FET (transistor à effet de champ) est un composant électronique de type unipolaire, dans lequel le transport du courant est assuré par un seul type de porteur de charge, selon la nature du semi-conducteur utilisé. Ce dispositif se comporte comme une résistance variable, contrôlée par une tension appliquée sur sa borne de commande. Sa structure repose sur un canal conducteur placé entre deux électrodes : la source et le drain, par lequel circule le courant. Ce flux est modulé par un champ électrique généré via une troisième électrode, appelée grille [51] :

Le FET est un dispositif à trois terminaux actifs, définis comme suit :

- **Grille (G)** : électrode de commande qui contrôle la conductivité du canal via un champ électrique.
- **Source (S)** : borne par laquelle les porteurs de charge majoritaires pénètrent dans le canal.
- **Drain (D)** : borne par laquelle ces porteurs quittent le canal une fois le courant établi.

Grâce à sa capacité de modulation rapide du courant et à sa faible consommation, le FET est fréquemment utilisé dans les circuits de commutation RF, notamment dans les architectures d'antennes reconfigurables.

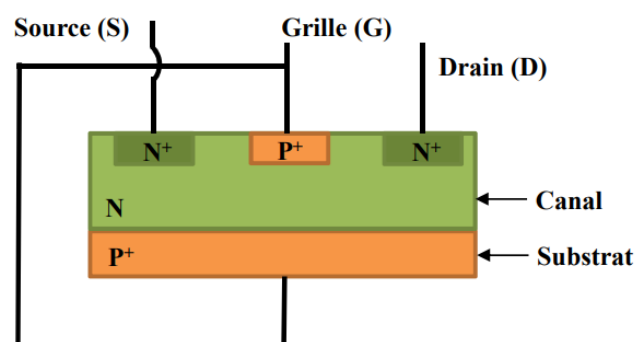


Figure II.6 : Schéma équivalent d'un transistor FET [51].

II.3.4 Les RF-MEMS

Les RF-MEMS (Radio-Frequency Micro-Electro-Mechanical Systems) sont des dispositifs miniaturisés combinant des éléments mécaniques mobiles et des circuits électroniques pour fonctionner à des fréquences radioélectriques. Dans les antennes reconfigurables, ces commutateurs sont utilisés pour modifier la topologie du circuit RF en établissant soit un Court-Circuit (CC), soit un Circuit-Ouvert (CO) sur une ligne de transmission, par le biais d'un déplacement mécanique contrôlé [48].

Il existe plusieurs types de configurations de commutateurs RF-MEMS, qui se distinguent par :

- La nature du chemin du signal (configuration série ou shunt).
- Le mécanisme d'actionnement utilisé (électrostatique, thermique ou magnétostatique).
- Le type de contact (ohmique ou capacitif).
- La structure mécanique (en pont ou en porte-à-faux).

Le mouvement mécanique requis est généralement induit par une force électrostatique ou magnétostatique, selon la conception du dispositif. Les commutateurs RF-MEMS sont appréciés pour leur très faible consommation d'énergie, leur excellente linéarité, et leur capacité à fonctionner avec des puissances allant jusqu'à 20 Watts, sur des durées de vie dépassant 10^{12} cycles. Ces caractéristiques en font des solutions de choix dans les applications exigeantes comme les radars, les analyseurs de réseaux ou les systèmes de communication par satellite [44].

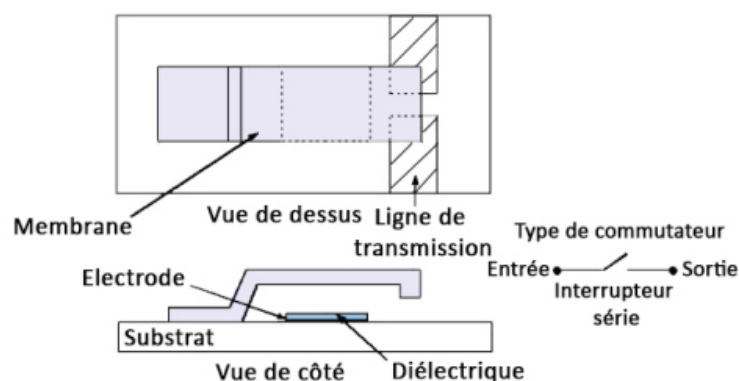


Figure II.7 : Commutateur MEMS RF [47].

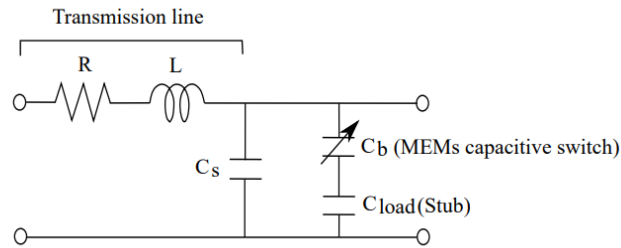


Figure II.8 : Circuit équivalent et de commutateur MEMS RF [50].

II.3.5 Les matériaux agiles

Outre les techniques classiques de reconfiguration électrique ou mécanique, une approche plus récente et prometteuse repose sur l'emploi de matériaux dits agiles ou intelligents.

Ces matériaux sont généralement utilisés comme substrats ou éléments actifs dans la structure de l'antenne. Leur particularité réside dans la possibilité de modifier leurs propriétés électromagnétiques, telles que la permittivité ou la perméabilité, sous l'effet d'une stimulation externe (champ électrique, champ magnétique, température, etc.). Cette capacité d'adaptation permet de modifier dynamiquement les caractéristiques de l'antenne, comme la fréquence de résonance ou la directivité [48].

L'un des grands avantages des matériaux agiles est leur faible encombrement ainsi qu'une consommation énergétique réduite pour les dispositifs de commande. Toutefois, leur intégration présente aussi plusieurs défis techniques, notamment une complexité de fabrication, des circuits d'alimentation sophistiqués, ainsi qu'un temps de réponse relativement lent, ce qui peut limiter leur efficacité dans certaines applications à haute vitesse [47].

Plusieurs catégories de matériaux agiles ont fait l'objet de recherches avancées pour leur intégration dans les antennes reconfigurables :

- **Les matériaux ferroélectriques :** Les matériaux ferroélectriques sont des matériaux non linéaires dont la permittivité relative varie en fonction du champ électrique qu'on leur applique, comme le BST, LaTiON et KNT.

- ❖ **BST** : (Barium Strontium Titanate, $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$) matériau très utilisé pour ses excellentes propriétés diélectriques et sa capacité de syntonisation sous faible tension, idéal pour les dispositifs micro-ondes [52].
- ❖ **LaTiON** : (oxyazoture de lanthane et de titane) matériau ferroélectrique stable thermiquement [53].
- **KNT** : (Potassium Niobate-Tantalate, $K(Ta,Nb)O_3$) offre une permittivité modulable et une bonne réponse aux champs électriques, utile en reconfiguration RF [54].
- **Les matériaux ferromagnétiques** : Les matériaux sont des matériaux dont la perméabilité peut être modifiée en fonction du champ magnétique appliqué comme le CoNb, CoZr et FeMB.
 - ❖ **CoNb** : (alliage cobalt-niobium) perméabilité magnétique contrôlable et compatible avec la microfabrication [55].
 - ❖ **CoZr** : (alliage cobalt-zirconium) faibles pertes à haute fréquence et bonne stabilité thermique [56].
 - ❖ **FeMB** : (alliage fer-bore-métal de transition, souvent du molybdène ou du niobium) matériau souple, fortement ferromagnétique, avec une réponse rapide aux champs magnétiques, adapté aux systèmes RF compacts [57].
- **Les cristaux liquides** : Les cristaux liquides, On les appelle « cristaux liquides » car ils traversent des phases intermédiaires, ou mésophases, entre un état liquide et un état solide. [58].
- **Le Graphene** : Le Graphene matériau bidimensionnel aux propriétés électriques remarquables, permet la reconfiguration dynamique des antennes grâce à la modulation de sa conductivité par un champ électrique. Il favorise la miniaturisation et la réactivité dans les dispositifs térahertz. Des recherches ont démontré son efficacité dans des antennes patchs et à fente reconfigurables, avec un contrôle actif du gain, de la phase et de la fréquence [59].

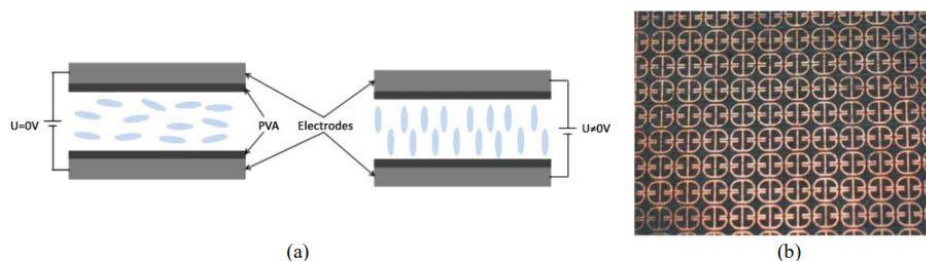


Figure II.9: (a) Cristal liquide (PVA : Poly Vinyl Alcohol), (b) Méta-matériaux [47].

II.4 Classification des antennes reconfigurables

II.4.1 Antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence, souvent appelées antennes accordables, ont la capacité d'ajuster leur fréquence de fonctionnement pour couvrir différentes bandes. On distingue généralement deux grandes catégories : celles à reconfiguration continue, où le changement de fréquence est progressif, et celles à reconfiguration commutée, où la fréquence passe d'un état discret à un autre. Bien que leur principe de fonctionnement repose sur la modification du chemin de courant dans la structure rayonnante, ces deux types diffèrent par la manière dont ce chemin est modifié, ce qui impacte la plage de fréquences couverte [60].

Pour obtenir cette reconfigurabilité fréquentielle, plusieurs approches techniques peuvent être utilisées :

- La modification de la géométrie de l'antenne.
- L'introduction de courts-circuits commutables.
- L'ajout de fentes ou de lignes de transmission reconfigurables.
- Le recours à des matériaux à propriétés variables.

Ces différentes techniques permettent aux antennes de fonctionner efficacement dans plusieurs bandes de fréquence, répondant ainsi aux exigences de systèmes de communication multi-bandes et adaptatifs [43].

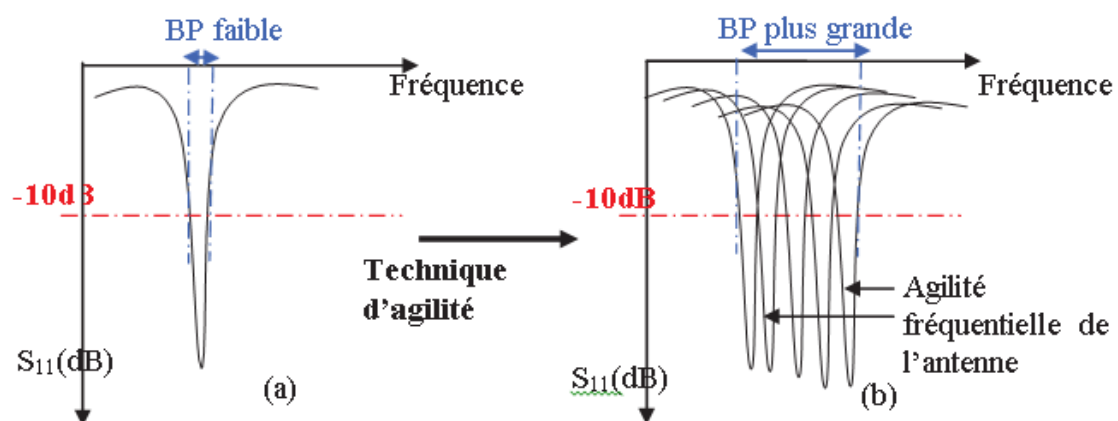


Figure II.10: Illustration de l'agilité fréquentielle [61].

II.4.1.1 Modification géométrique

La reconfiguration géométrique est largement employée dans les antennes reconfigurables afin d'ajuster leurs performances. Elle repose essentiellement sur la variation de la longueur électrique de l'élément rayonnant. Cette approche est compatible avec plusieurs types d'antennes, notamment les dipôles, les antennes patch et les antennes fractales, qui intègrent des structures aux dimensions variées pour optimiser leur fonctionnement [43].

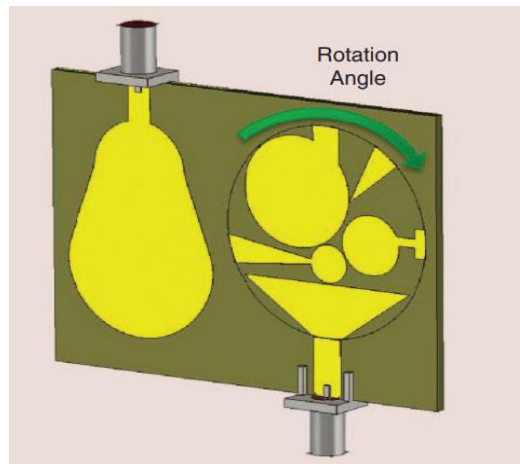


Figure II.11: Exemple sur la reconfiguration géométrique d'antenne [62].

II.4.1.2 Court-circuit commutable

Une autre technique dans le domaine des antennes reconfigurables consiste en l'utilisation des courts circuits commutables. De manière générale, l'activation ou non d'un court-circuit commutable permet de modifier les circulations des courants électromagnétiques sur l'antenne et par la suite sur sa ou ses fréquence(s) de fonctionnement. La Figure II.12 présente un exemple simple d'antenne patch équipée de courts-circuits reconfigurables. La commutation de ces interrupteurs permet ici d'obtenir deux fréquences de résonance distinctes [63].

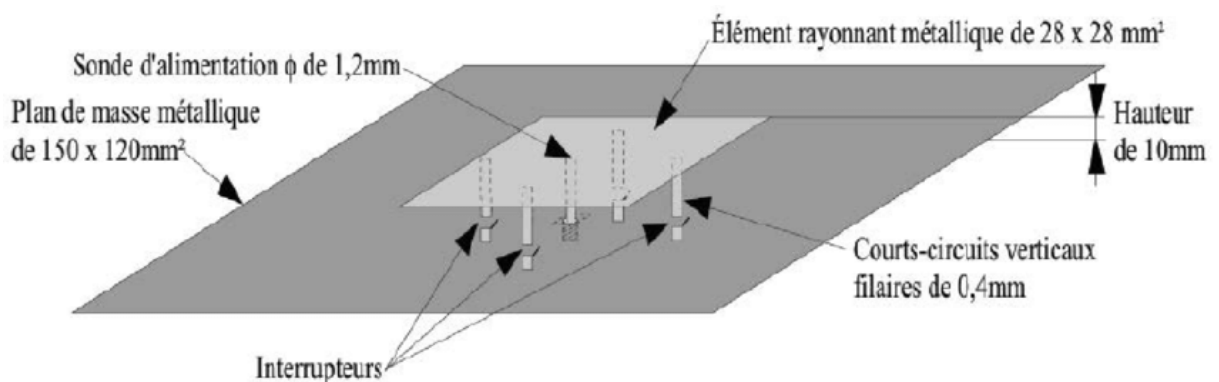


Figure II.12 : Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables [63].

II.4.1.3 Modification de matériaux

La modification de matériaux consiste à intégrer des matériaux intelligents au sein de l'antenne, capables de faire varier leur fréquence de fonctionnement sans modifier la structure physique. Ces matériaux présentent une permittivité ou une perméabilité modulable lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique ou magnétique. Cette approche permet d'obtenir des antennes compactes, adaptatives et performantes, idéales pour les systèmes de communication radiofréquence avancés [64].

II.4.1.4 Fente ou de lignes commutables

L'intégration de fentes ou de lignes de transmission commutables est une méthode largement adoptée pour permettre la reconfigurabilité en fréquence. Cette technique repose sur la création de perturbations contrôlées du courant dans l'élément rayonnant, générées par l'ajout de discontinuités ou de charges actives telles que des diodes PIN ou des Varactor. Ces perturbations modifient la longueur électrique effective du trajet parcouru par le courant, entraînant ainsi un changement de la fréquence de résonance de l'antenne [43].

Un exemple typique est celui d'une antenne quasi-Yagi reconfigurable équipée d'un dipôle replié, illustré à la figure II.13. Dans cette configuration, la fréquence centrale peut être ajustée électroniquement en modifiant la longueur effective du dipôle grâce à l'activation ou la désactivation de diodes PIN (notamment les modèles MA4AGBL912 de chez Macom). Lorsque seules les diodes 1 et 2 sont activées (les autres restant inactives), le dipôle est raccourci, permettant à l'antenne de fonctionner dans une plage de 6,4 à 8 GHz. À l'inverse, en désactivant les diodes 1 et 2 et en activant les diodes 3 à 6, la longueur du dipôle est augmentée, ce qui abaisse la fréquence de fonctionnement à une plage de 5,3 à 6,6 GHz.

Ce dispositif démontre ainsi la capacité d'un système de commutation intégré à offrir plusieurs bandes passantes distinctes, en fonction de la configuration électronique adoptée [65].

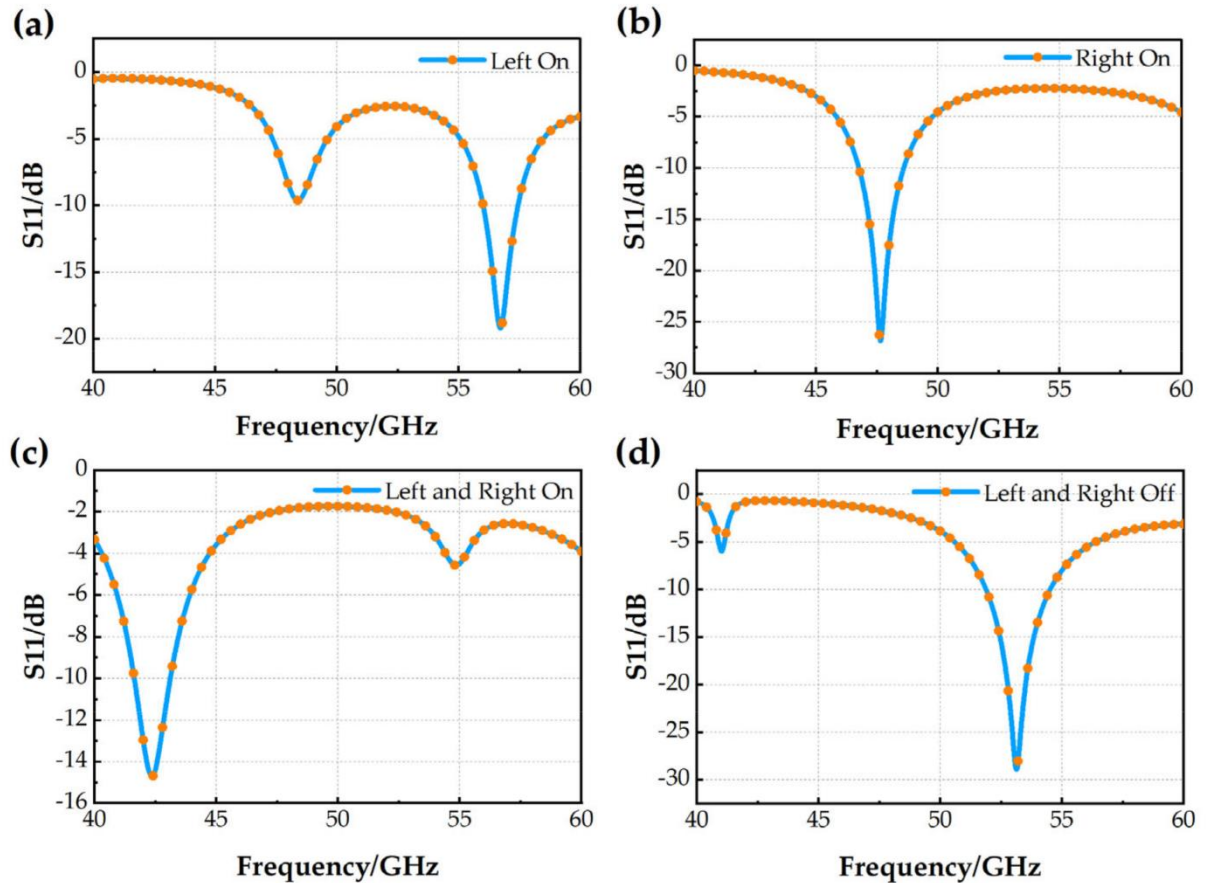


Figure II.13: Résultats S11 pour le modèle d'antenne avec fentes et commutateurs après l'étape 3 : (a) état1, (b) état 2, (c) état 3 et (d) état [66].

II.4.2 La reconfiguration en diagramme de rayonnement

La reconfiguration du diagramme de rayonnement consiste à modifier la direction de propagation ou le niveau de gain du rayonnement d'une antenne, dans le but d'orienter le signal vers une zone spécifique ou d'éviter certaines directions sensibles. Cette capacité permet notamment de cibler dynamiquement des utilisateurs, de réduire les interférences, ou encore d'optimiser la consommation énergétique.

Différentes approches permettent d'implémenter cette forme de reconfigurabilité. Parmi les méthodes les plus courantes, on retrouve la modification de la géométrie de l'antenne, l'intégration de courts-circuits contrôlables, ou encore l'ajout de fentes commutables dans la structure rayonnante. Ces techniques permettent de faire varier la distribution du courant et, par conséquent, de rediriger le rayonnement électromagnétique [43].

Ce type de reconfiguration s'avère particulièrement utile dans des environnements perturbés, où il est nécessaire de détourner le signal des sources de bruit ou d'interférences,

mais également dans des applications où la sécurité et l'efficacité énergétique sont prioritaires. En adaptant dynamiquement le lobe principal du diagramme, on peut améliorer la qualité du lien radio dans la direction souhaitée tout en réduisant l'impact des signaux indésirables [47].

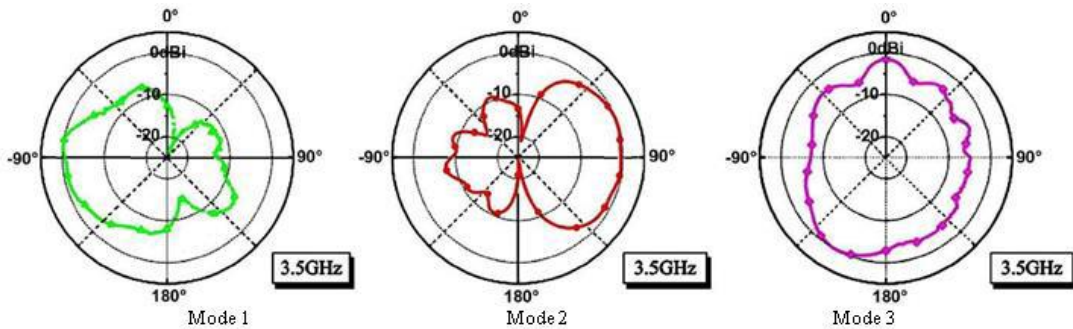


Figure II.14: Diagrammes de rayonnement à 3.5 GHz selon les trois modes de configuration : Mode(1) : Diagramme omnidirectionnel irrégulier, Mode(2) : Diagramme directionnel et Mode(3) : Diagramme quasi omnidirectionnel [43].

II.4.2.1 La Modification géométrique

Dans cette technique, la reconfiguration de diagramme cherche à obtenir des distributions de courant différentes sur la structure afin de modifier la direction du diagramme rayonnement tout en gardant la fréquence de fonctionnement fixe [43]. Voir la figure II.15.

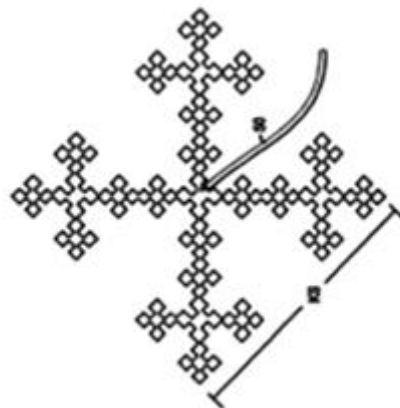


Figure II.15: Exemple d'antenne fractale reconfigurable en rayonnement [67].

II.4.2.2 Courts circuits commutables

Les courts-circuits activables jouent également un rôle important dans la reconfiguration des diagrammes de rayonnement. En permettant de commuter entre différentes positions

d'alimentation d'un même élément rayonnant, ces dispositifs offrent la possibilité de modifier le comportement directionnel de l'antenne tout en conservant une fréquence de résonance inchangée. Placés de manière stratégique, ces courts-circuits modifient la distribution du courant sur la surface rayonnante sans altérer l'impédance, ce qui permet de maintenir les performances à la fréquence cible [63] [43].

Dans l'exemple considéré, une antenne spirale carrée de type microruban est utilisée. La configuration géométrique de cette antenne, ainsi que l'emplacement des éléments de commutation (câblés dans le cadre de cette démonstration), sont représentées à la Figure II.16. La longueur totale de la spirale est de 80 mm, équivalente à une longueur d'onde à la fréquence de fonctionnement principale. L'écartement entre les segments initial et terminal de la spirale est de 1 mm. Le tout est monté sur un substrat Duroid 58801, de dimensions 34 mmx36 mm, avec une permittivité relative de 2,2 [63].

Pour permettre la reconfiguration du diagramme de rayonnement, deux diodes PIN sont employées : l'une, placée à environ un quart de longueur d'onde de l'alimentation, établit une connexion avec le plan de masse, l'autre, insérée directement dans la spirale, crée un court-circuit interne. Lorsque ces deux diodes sont activées simultanément, la direction principale du rayonnement est modifiée d'un angle de 45° [58].

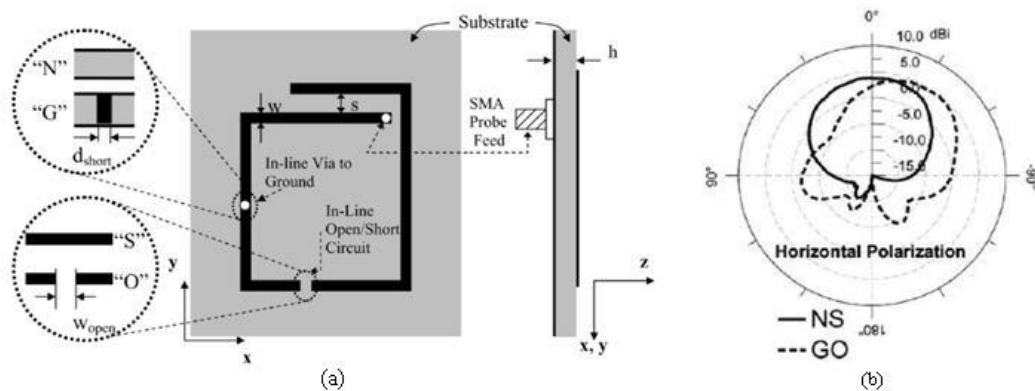


Figure II.16: Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme : (a) Topologie de l'antenne, (b) Diagrammes NS : configuration initiale, GO : diodes activées [63].

II.4.2.3 Fente ou de lignes commutables

Contrairement à leur usage pour la reconfiguration en fréquence, les courts-circuits sont ici exploités différemment pour modifier le diagramme de rayonnement sans affecter la fréquence de résonance. Cette adaptation repose sur une implantation symétrique des

éléments de commutation autour du point d'alimentation, ce qui permet d'ajuster la direction du rayonnement tout en conservant les propriétés fréquentielles de l'antenne [43].

Un exemple représentatif de cette approche est l'antenne de type "nœud papillon" à fentes, reconfigurable en motif, illustrée à la Figure II.17. Le réseau de polarisation associé est implanté dans le plan xy , avec une direction normale alignée selon l'axe z . Le signal est injecté via un connecteur SMA dans une ligne d'alimentation de type CPW (coplanar waveguide), laquelle est reliée en cascade à une paire de transitions CPW-vers-ligne à fente. Cette ligne est conçue pour avoir une impédance caractéristique de 50 ohms sur la bande de fréquences visée, tandis que la ligne à fente présente une impédance proche de 90 ohms, correspondant à une largeur de fente de 0,2 mm dans le design. La section radiale de la transition de premier ordre, entre le CPW et la ligne à fente, possède un rayon de 19,6 mm et une ouverture angulaire de 60° . Un condensateur de découplage et des fentes étroites sont insérés respectivement sur la ligne CPW d'entrée et à l'extrémité du tronçon radial ouvert, afin d'assurer l'isolation en courant continu [63].

Pour permettre la reconfiguration du diagramme de rayonnement, comme illustré dans la Figure II.17(c), quatre diodes PIN sont placées à des points stratégiques : deux à l'entrée des branches radiales en circuit ouvert, et deux autres à travers les lignes de fente couplées à l'entrée CPW. En fonction de l'état de polarisation des diodes, l'antenne peut être configurée selon trois modes d'alimentation distincts : alimentation CPW, alimentation via la fente droite (RS), ou via la fente gauche (LS). Les diodes PIN utilisées sont de type MACOM MA4AGBPL912, en technologie AlGaAs, offrant une résistance directe de 4 ohms et une faible capacité inverse (inférieure à 0,022 pF à 10 GHz). Chaque diode a des dimensions approximatives de $0,63 \text{ mm} \times 0,18 \text{ mm}^2$ [63].

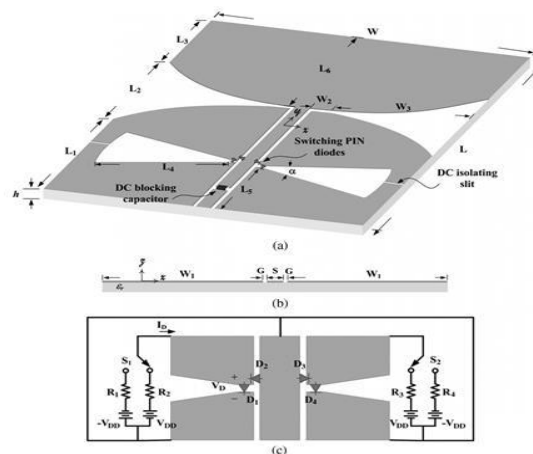


Figure II.17: Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation [63].

II.4.3 Antennes reconfigurables en polarisations

Les antennes à polarisation reconfigurable suscitent un intérêt croissant en raison de leurs nombreux avantages dans les systèmes de communication sans fil modernes. Elles permettent notamment de réduire les pertes dues au fading multipath dans les réseaux Wifi, d'assurer des connexions plus stables et fiables, et de prendre en charge des modulations avancées dans les systèmes RFID (Radio-Frequency Identification) actifs à micro-ondes. De plus, elles favorisent la réutilisation des fréquences dans les communications par satellite et s'intègrent efficacement dans les architectures MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), ce qui améliore la capacité et la performance globale du réseau [68].

Un exemple représentatif est une antenne à polarisation variable fonctionnant à 26 GHz, utilisant des commutateurs MEMS. Ces derniers sont constitués d'une bande métallique mobile suspendue. Dans cette conception, le commutateur est intégré à une antenne patch micro-ruban alimentée en coin, permettant l'excitation de deux modes orthogonaux. Lorsque la bande métallique est suspendue au-dessus d'une encoche, l'antenne émet une onde à polarisation circulaire. En abaissant cette bande, le rayonnement devient doublement polarisé linéairement (voir figure II.18.a) [63].

Un autre dispositif notable est l'antenne PASS (Patch Antenna with Switchable Slots), développée par l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA). Il s'agit d'une antenne patch micro-ruban intégrant une ou plusieurs fentes. En plaçant un commutateur électronique (tel qu'une diode PIN ou un transistor FET) au centre d'une fente (figure II.18.b), il devient possible de contrôler le parcours du courant. Si le commutateur est ouvert (OFF), les courants contournent la fente. Lorsqu'il est fermé (ON), le courant suit un chemin plus direct, modifiant ainsi la distribution de courant. En positionnant deux fentes orthogonales, différentes configurations de polarisation peuvent être obtenues [63].

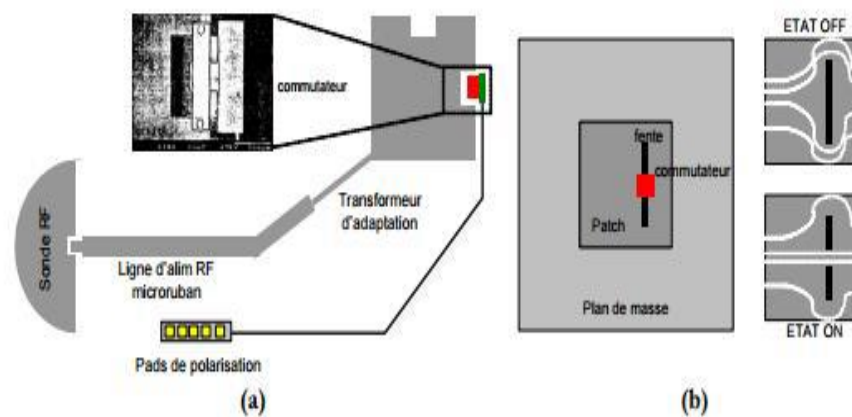
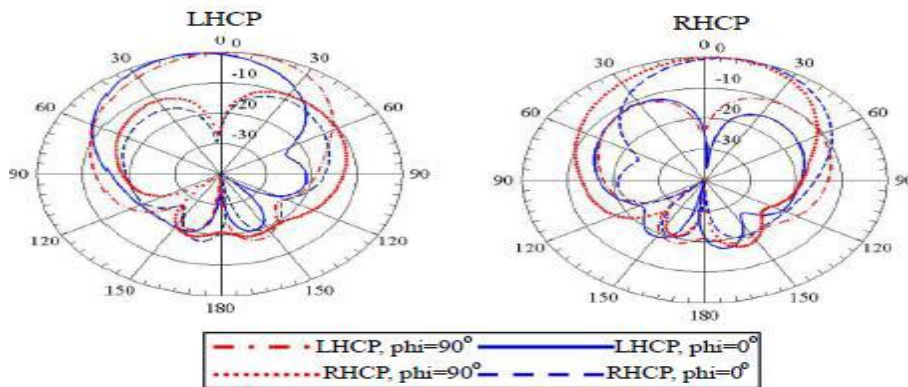


Figure II.18 : (a) Antenne patch à bord commuté, (b) Antenne PASS de l'UCLA [63].



(a)



(b)

Figure II. 19 : Exemple d'antenne reconfigurable à polarisation par diode PIN (a) Prototypes de configuration d'antenne à fente en anneau fendu pour polarisation linéaire et circulaire (b) Les caractéristiques du diagramme de rayonnement de l'antenne pilotées par les états de commutation de la diode PIN [49].

II.5 Domaines d'applications des antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables jouent un rôle crucial dans les technologies de communication modernes, en raison de leur capacité à ajuster dynamiquement des paramètres clés tels que la fréquence, le diagramme de rayonnement ou la polarisation. Cette adaptabilité leur confère un avantage décisif dans plusieurs domaines stratégiques. Voici les principales applications où ces antennes sont utilisées :

➤ Réseaux Wi-Fi

Le Wi-Fi est une technologie de communication sans fil basée sur la norme IEEE 802.11, fonctionnant principalement dans les bandes de fréquence 2,4 GHz et 5 GHz. Selon la version du standard (a/b/g/n), les performances varient en termes de couche physique et de méthode d'accès au canal, permettant des débits allant de 54 Mbit/s à plus de 300 Mbit/s. Ce type de réseau offre une grande liberté de déplacement aux utilisateurs tout en assurant une couverture sur une zone étendue [69].

➤ **Santé (E-santé et Télémedecine)**

Dans le domaine de la santé les antennes reconfigurables jouent un rôle essentiel dans les dispositifs médicaux tels que les capteurs corporels (wearables), les implants et les systèmes de surveillance à distance. Leur capacité à adapter dynamiquement leur fréquence permet de compenser les variations de l'environnement corporel, notamment les changements de permittivité des tissus biologiques. Cela garantit une communication plus fiable et stable entre l'antenne et les différents modules de transmission, qu'il s'agisse de Bluetooth, d'ultra-large bande (UWB) ou de la bande médicale MICS (402-405 MHz). Par exemple, un capteur portable peut commuter automatiquement entre la bande MICS pour une communication intracorporelle et le Bluetooth pour la transmission de données vers un Smartphone ou une station médicale, selon le type et la quantité d'informations à transmettre.

Cette flexibilité améliore l'efficacité énergétique, la miniaturisation des dispositifs et la qualité globale du service médical à distance [70].

➤ **Satellites et Radars**

Satellites et radars offrent une flexibilité indispensable pour répondre aux exigences variées des missions spatiales et militaires. Elles sont largement utilisées dans des applications telles que l'observation de la Terre, les télécommunications satellitaires, ainsi que les radars météorologiques et de défense. Leur principal avantage réside dans leur capacité à commuter entre différentes bandes de fréquence. Notamment les bandes X (8-12 GHz), Ku (12-18 GHz) et Ka (26,5-40 GHz) en fonction des objectifs de la mission ou des conditions opérationnelles. Cette reconfigurabilité contribue également à améliorer la furtivité des radars, notamment dans les scénarios de guerre électronique, en rendant plus difficile leur détection ou brouillage.

Par exemple une antenne installée sur un satellite peut basculer dynamiquement de la bande X à la bande Ka selon sa position orbitale ou le besoin de capacité de transmission. Cette adaptabilité améliore considérablement l'efficacité spectrale, la portée et la résilience des systèmes de communication avancés [71].

➤ **La Bande UHF**

Les antennes reconfigurables en fréquence trouvent une application stratégique dans la bande UHF (Ultra High Frequency : 300 MHz - 3 GHz), utilisée notamment pour la télévision numérique, les systèmes RFID et les communications de sécurité publique. Leur principal atout est la capacité à couvrir plusieurs services UHF avec une seule antenne, ce qui permet

de réduire l'encombrement et d'optimiser les performances dans les dispositifs compacts comme les talkies-walkies ou les terminaux portables.

Par exemple une antenne RFID peut être reconfigurée pour fonctionner à 860 MHz pour les normes européennes, ou à 915 MHz pour les normes nord-américaines, sans changer de composant physique. Cette souplesse facilite le déploiement global de dispositifs compatibles multinormes [72].

➤ L'IoT, IoR et IA

Les antennes reconfigurables occupent un rôle central dans le développement des systèmes intelligents tels que l'Internet des objets (IoT), l'Internet des objets Robotiques (IoR) et les réseaux assistés par Intelligence Artificielle (IA). Leur principal avantage réside dans leur capacité à adapter automatiquement leur fréquence de fonctionnement selon le protocole de communication utilisé comme LoRa, Zigbee, NB-IoT ou LTE-M, afin de répondre aux exigences spécifiques en matière de portée, de consommation d'énergie ou de débit.

Elles trouvent ainsi des applications dans des domaines variés comme les capteurs intelligents, la gestion des infrastructures urbaines ou encore l'agriculture connectée. Dans un environnement industriel, un robot autonome peut, comme illustration, changer dynamiquement de fréquence pour éviter les interférences et maintenir une connexion fiable. L'intégration de l'IA permet en outre de gérer cette reconfiguration en temps réel, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et réduisant la latence du système [73].

- ❖ **LoRa (Long Range)** : Technologie de modulation radio longue portée utilisée dans les réseaux LoRaWAN [74].
- ❖ **Zigbee** : protocole basé sur la norme IEEE802.15.4, utilisé pour la communication à courte distance [75].
- ❖ **NB-IoT (Narrowband Internet of Things)** : Technologie cellulaire normalisée par la 3GPP pour les objets connectés à faible consommation [76].
- ❖ **LTE-M (LTE of Machines)** : variation de la 4G(LTE) optimisée pour les objets connectés mobiles [77].

II.6 Conclusion

Ce chapitre a révélé l'évolution des antennes vers des structures plus intelligentes et adaptatives, capables de répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication modernes. Les antennes reconfigurables se distinguent par leur aptitude à modifier dynamiquement certains paramètres fondamentaux, tels que la fréquence, le diagramme de

rayonnement ou la polarisation, ce qui leur confère une grande polyvalence d'utilisation. Nous avons passé en revue les différentes techniques de reconfiguration, les composants technologiques associés (diodes, MEMS, matériaux intelligents, etc.), ainsi que les classifications fonctionnelles de ces antennes selon le type de reconfiguration apportée.

Grâce à cette capacité d'adaptation, elles offrent des solutions efficaces pour améliorer la gestion du spectre, réduire le nombre de composants dans un système, et optimiser les performances dans des environnements complexes ou changeants. Leur utilité s'étend à de nombreux domaines d'application, allant des communications mobiles et satellites à la défense, en passant par l'aéronautique, les systèmes embarqués ou encore la télédétection.

Ce panorama général constitue une base essentielle pour aborder, dans le chapitre suivant, la modélisation, la conception et l'évaluation de performances d'antennes reconfigurables adaptées à des besoins spécifiques.

Chapitre III

Conception et Simulation des Antennes Patch Reconfigurables à Multi-Bandes

Sommaire

III.1	Introduction	51
III.2	Conception et simulation.....	51
III.2.1	Outils de simulation	51
III.3	Reconfigurabilité par matériaux d'une antenne patch rectangulaire.....	52
III.3.1	Conception d'une antenne patch par changement de substrat	52
III.3.1.1	Simulation et comparaison entre substrats	54
III.3.2	Réseaux d'antennes	60
III.3.2.1	Conception du réseau d'antennes à deux éléments	60
III.3.2.2	Simulations et résultats.....	61
III.3.3	Reconfigurabilité par matériau agile	63
III.3.3.1	Simulation et comparaison des matériaux.....	64
III.3.3.2	Variation du potentiel chimiques de l'antenne rectangulaire en Graphene.....	67
III.4	Reconfigurabilité par diodes PIN d'une antenne patch circulaire.....	70
III.4.1	Adaptation de l'antenne patch	71
III.4.2	Reconfigurabilité de l'antenne circulaire par diode PIN	74
III.5	Reconfigurabilité par diodes Varicap d'une antenne patch triangulaire	77
III.5.1	Adaptation de l'antenne patch	78
III.5.2	Reconfigurabilité de l'antenne triangulaire par diode Varicap	81
III.6	Conclusion.....	85

III.1 Introduction

Dans le but de valider les concepts de reconfigurabilité en fréquence étudiés dans les chapitres précédents, ce chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de différentes géométries d'antennes patch micro-ruban à l'aide du logiciel CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite 2019. Ce logiciel permet une analyse précise des performances électromagnétiques à travers des outils avancés de calcul de champs et de paramétrisation géométrique.

Trois structures géométriques ont été choisies pour cette étude : rectangulaire, circulaire et triangulaire. Ces formes ont été sélectionnées pour comparer leur réponse fréquentielle et leur capacité à être reconfigurées. La reconfigurabilité en fréquence a été envisagée à travers la modification de certains paramètres physiques (dimensions, emplacement d'un court-circuit, ou intégration de dispositifs actifs simulés par des ports ou des switches idéalisés).

Chaque antenne est modélisée en respectant les contraintes d'un substrat standard, avec des conditions limites et des ports adaptés. Les résultats obtenus, notamment les courbes de réflexion S11, le gain, les diagrammes de rayonnement et les distributions de champ électrique, permettent d'évaluer les performances et la faisabilité de la reconfiguration fréquentielle pour chaque géométrie.

III.2 Conception et simulation

Dans le cadre notre étude, nous avons pensé à étudier la reconfigurabilité des antennes patch sous différentes formes et sous différentes méthodes, chaque forme d'antenne patch est liée à une technologie différente à savoir : la rectangulaire, la circulaire et la triangulaire afin de modifier la fréquence ou le diagramme de rayonnement. Pour ce faire, plusieurs approches seront mises en œuvre.

III.2.1 Outils de simulation

Pour la modélisation et l'analyse des antennes patch, plusieurs logiciels de simulation électromagnétique sont disponibles, notamment le logicielle HFSS (High Frequency Structure Simulator) et le logicielle CST Microwave Studio. Le HFSS est largement reconnu pour sa

précision grâce à son solveur par éléments finis, particulièrement adapté aux structures complexes.

Cependant, dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser CST Microwave Studio 2019. Ce logiciel offre une interface intuitive, une prise en main rapide, et surtout un solveur temporel performant, ce qui permet d'obtenir des résultats précis dans des délais réduits. De plus, CST facilite l'intégration des composants actifs comme les diodes PIN, ce qui est essentiel dans la conception d'antennes reconfigurables.

Grâce au logiciel CST, nous avons pu simuler les différents modèles d'antennes, analyser les paramètres (S_{11} , la bande passante et le gain) et observer les effets des modifications apportées à chaque géométrie.

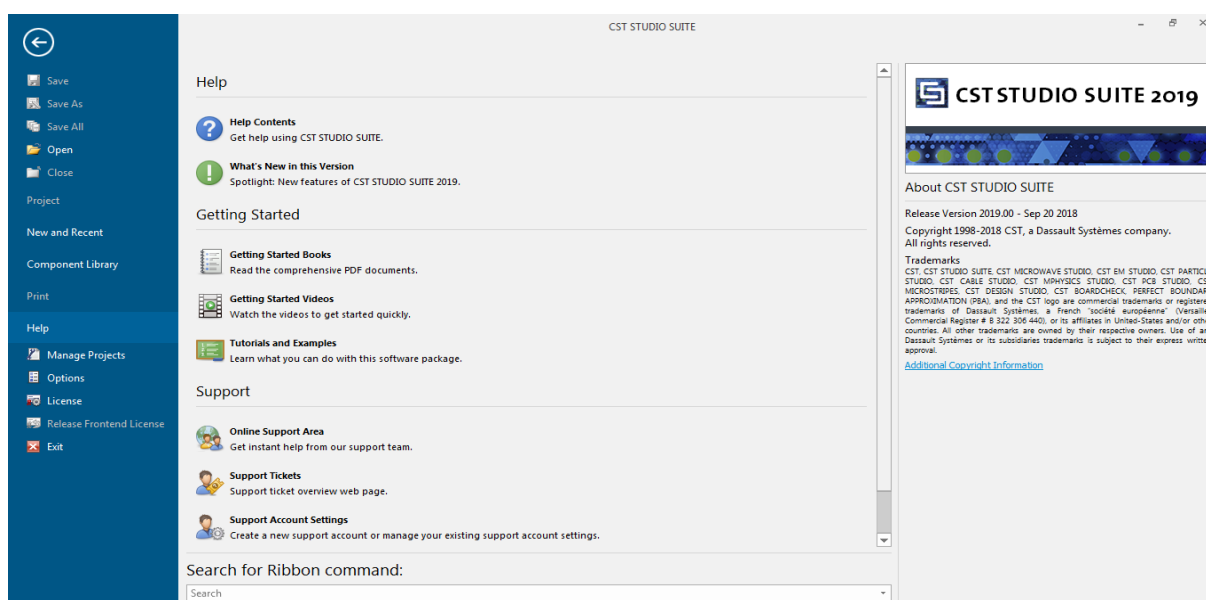


Figure III. 1 : Outil de simulation CST Studio Suite 2019.

III.3 Reconfigurabilité par matériaux d'une antenne patch rectangulaire

III.3.1 Conception d'une antenne patch par changement de substrat

L'antenne analysée est une antenne patch de forme rectangulaire conçue pour fonctionner à une fréquence de résonance à 11.75 GHz et adaptée à une impédance d'entrée de 50 Ohms. Deux types de substrats ont été utilisés pour la conception :

- **FR-4 (lossy)** : caractérisé par une permittivité relative de $\epsilon_r = 4.3$ et une épaisseur de 1.6 mm.

- **Rogers RT5880** : connu pour ses faibles pertes avec une permittivité relative de $\epsilon_r = 2.2$ et une épaisseur de 0.8 mm.

Le patch et le plan de masse sont tous deux réalisés en cuivre avec une épaisseur de 0.035 mm. Les dimensions de l'antenne ont été déterminées à l'aide d'une méthode analytique, comme indiqué dans le tableau III.1 ci-dessous.

Tableau III.1: Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.

Paramètres de l'antenne	Equations
Longueur du patch	$L_P = L_{eff} - 2\Delta L$ (III.1)
Longueur effective	$L_{eff} = \frac{C}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}}$ (III.2)
L'extension de longueur	$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{reff}+0.3)(\frac{W}{h}+0.264)}{(\epsilon_{reff}-0.258)(\frac{W}{h}+0.8)}$ (III.3)
Constante diélectrique	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2}$ (III.4)
Largeur du patch	$W_P = \frac{C}{2fr\sqrt{\epsilon_r+1}}$ (III.5)
Longueur du substrat	$L_S = L_P + 6h$ (III.6)
Largeur du substrat	$W_S = W_P + 6h$ (III.7)
Largeur de la ligne	$W_f = \frac{8 \cdot e^A}{e^{2A} - 2} \times h$ Avec $A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right)$ (III.8)

Les résultats après calculs sont mentionnés dans le Tableau III.2 :

Tableau III.2: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.

Paramètres (mm)	W_g	L_g	W_p	L_p	W_f	F_i	h	t	ϵ_r
FR-4	17.5	15	7.84	5.4	2	1.97	1.6	0.035	4.3
RogersRT5880	14.9	12.93	10.09	8.13	2.46	2.85	0.8	0.035	2.2

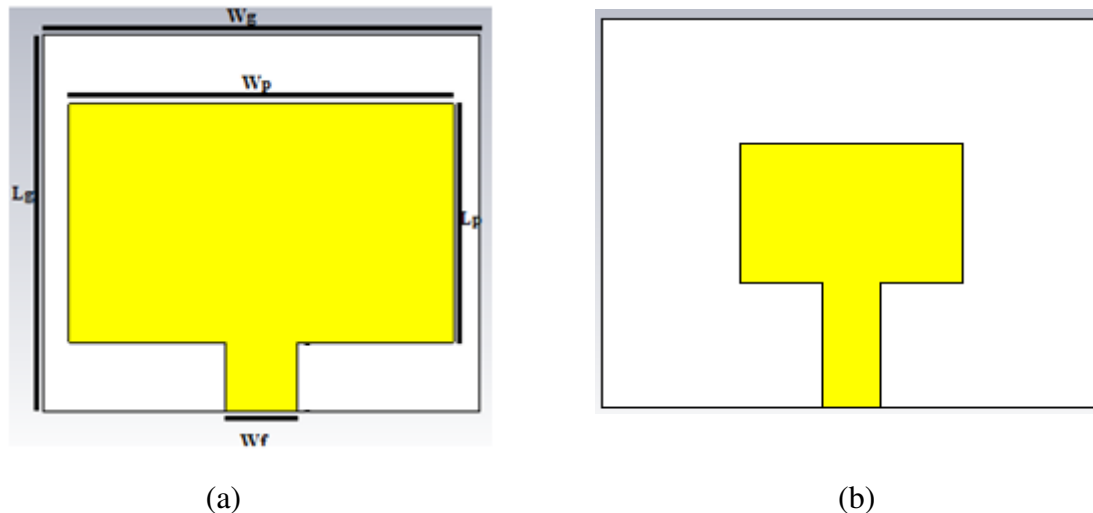


Figure III.2 : Structure de l'antenne patch initial, (a) Rogers, (b) FR-4.

- Coefficient de réflexion S11

La figure III.3 illustre le coefficient de réflexion S11 dont la valeur atteint -6.23 dB et -6.71 dB. Ce paramètre permet d'évaluer le niveau de réflexion ou de transmission des ondes par l'antenne. On constate que l'antenne simulée n'est pas encore bien adaptée à la fréquence souhaitée. Une adaptation sera donc effectuée afin d'optimiser ses performances à la fréquence cible.

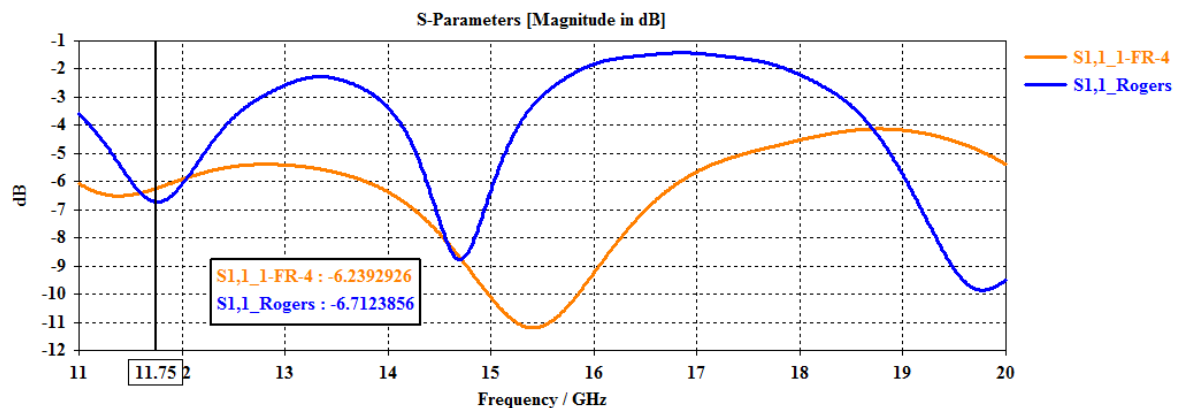


Figure III.3: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch initial.

III.3.1.1 Simulation et comparaison entre substrats

À la lumière des résultats obtenus, un correctif a été appliqué en intégrant des encoches au niveau de la ligne micro-ruban figure III.4. Par ailleurs, une étude paramétrique menée avec le logiciel a permis d'augmenter la largeur du patch à $W_p=13.2$ mm pour le substrat Rogers RT5880 avec une largeur G_{pf} de 0.06 mm. Pour le substrat FR-4, le facteur de perte $G_{pf}=$

0.04mm ce qui engendre des performances moins optimales. Ces modifications visent à ajuster la fréquence de résonance et à améliorer l'adaptation de l'antenne à la fréquence cible à 11.75 GHz.

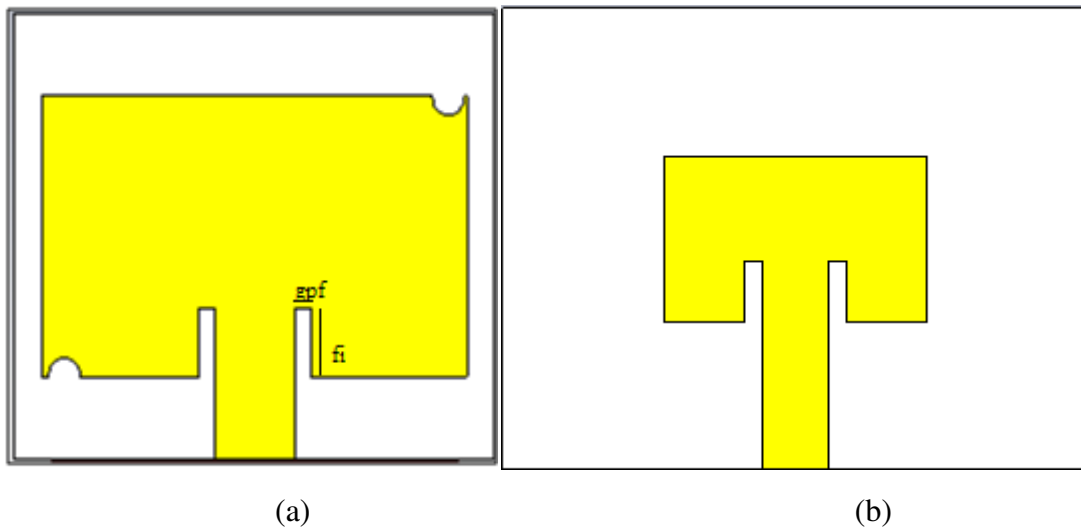


Figure III.4: Structure de l'antenne patch avec encoche, (a) Rogers, (b) FR-4.

- Coefficient de réflexion S11

Comme illustré dans la figure III.5, l'antenne présente une configuration multi bande avec une bonne adaptation. Pour le substrat Rogers, le coefficient de réflexion S11 = -18.75 dB à la fréquence désirée de 11.81GHz tandis que pour le substrat FR-4, la valeur de S11 est de -15.09 dB à 11,74GHz et présente une deuxième résonance à 16,67 GHz avec une très bonne adaptation à -28,67 dB. Ces résultats confirment une meilleure adaptation avec le substrat Rogers pour une adaptation à -18.75 dB pour la fréquence à 11,75 GHz, mais favorise le FR4 pour la multi résonance.

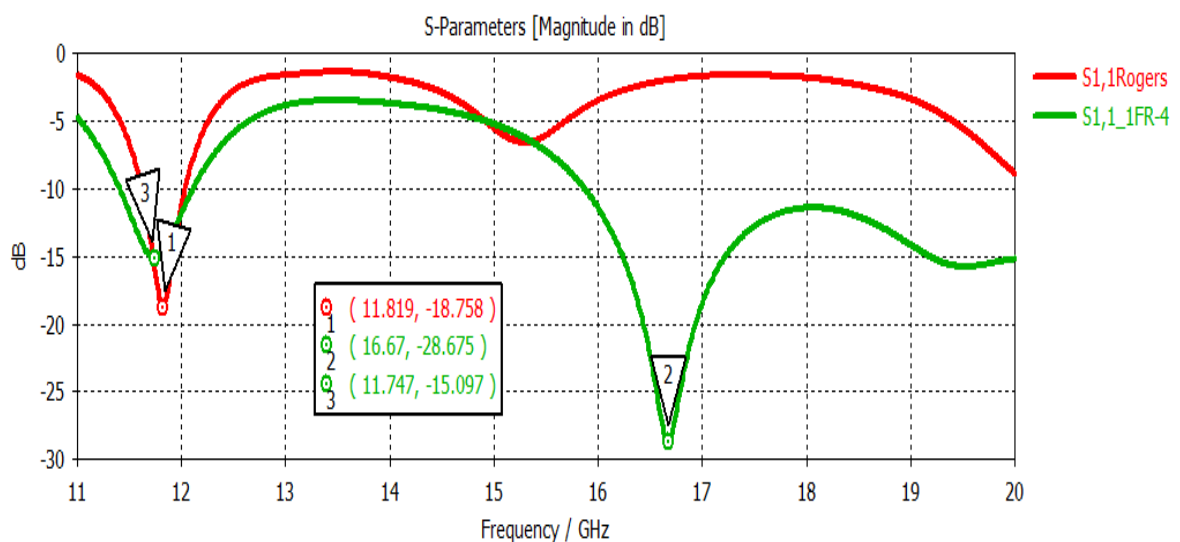


Figure III. 5 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch avec encoche.

• Rapport d'ondes stationnaire VSWR

La figure III.6 nous montre le rapport d'onde stationnaire (ROS) pour les deux substrats. Le substrat Rogers présente un VSWR de 1.44 à la fréquence de 11.81 GHz, indiquant une bonne adaptation d'impédance. En comparaison, le substrat FR-4 affiche un VSWR plus élevé de 1.36 à 11.75 GHz, ce qui traduit une adaptation moins optimale.

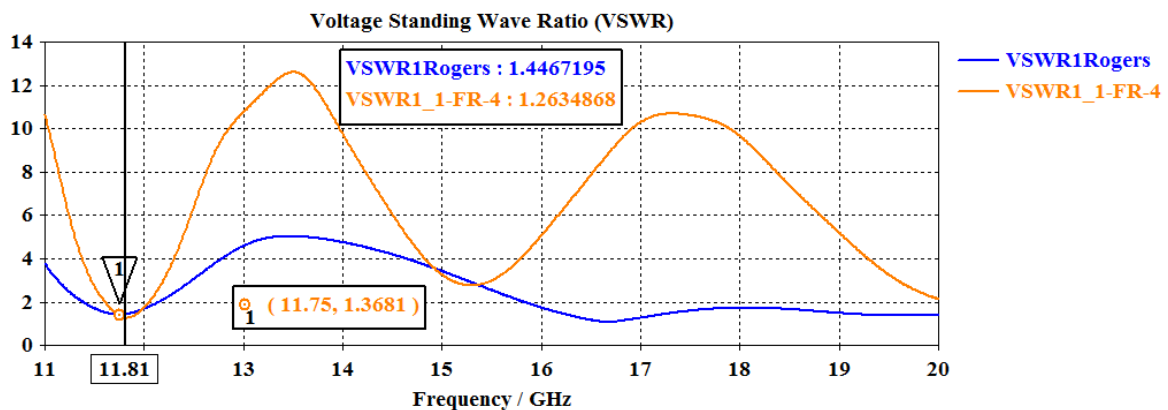


Figure III. 6 : VSWR de l'antenne patch avec encoche.

• Le Gain

L'antenne conçue sur substrat Rogers présente un gain supérieur de 5.43 dBi, contre seulement 3.20 dBi pour celle réalisée sur substrat FR-4. Cette différence illustre clairement la meilleure performance en rayonnement offerte par le substrat Rogers.

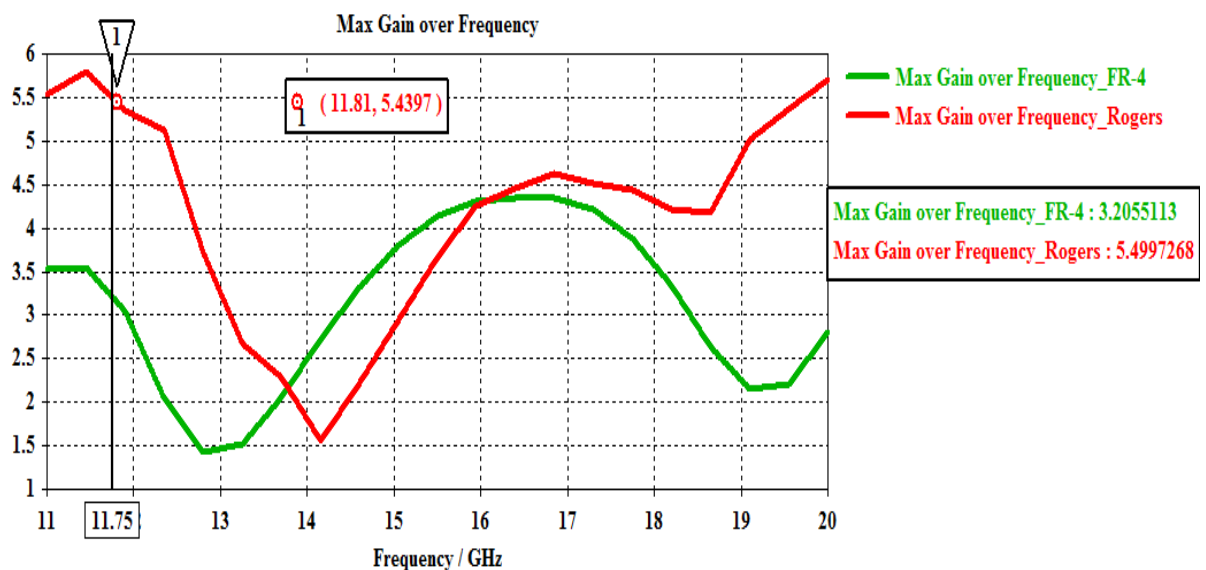


Figure III. 7 : Gain de l'antenne patch avec encoche.

- **Le diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement tridimensionnel montre dans la figure III. 8 une répartition relativement large de l'énergie avec une directivité modérée caractéristique d'un rayonnement quasi-omnidirectionnel.

La figure III.9 illustre le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne conçue avec un substrat FR-4. On y observe que le lobe principal présente une largeur de faisceau d'environ 97.7° dans le plan E ($\text{Phi} = 0^\circ$) et de 73.5° dans le plan H ($\text{Phi} = 90^\circ$).

Cette différence traduit une dispersion du rayonnement plus large dans le plan E, tandis que le rayonnement est davantage concentré dans le plan H. Cela reflète une directivité légèrement supérieure dans ce dernier, ce qui peut s'avérer bénéfique pour des applications requérant une focalisation accrue dans cette direction.

La figure III.10 illustre le diagramme 3D avec l'utilisation du substrat Rogers RT5880, révèle un lobe principal plus concentré avec une directivité accrue par rapport au substrat FR-4. Cette amélioration est due aux faibles pertes diélectriques du substrat Rogers qui permettent une meilleure focalisation du champ électromagnétique.

La Figure III.11 nous montre que l'ouverture à -3 dB dans le plan E est réduite à environ 73° ce qui témoigne d'une meilleure directivité. Dans le plan H, elle reste relativement large à 84.8° conservant ainsi une bonne couverture latérale tout en améliorant la performance directionnelle.

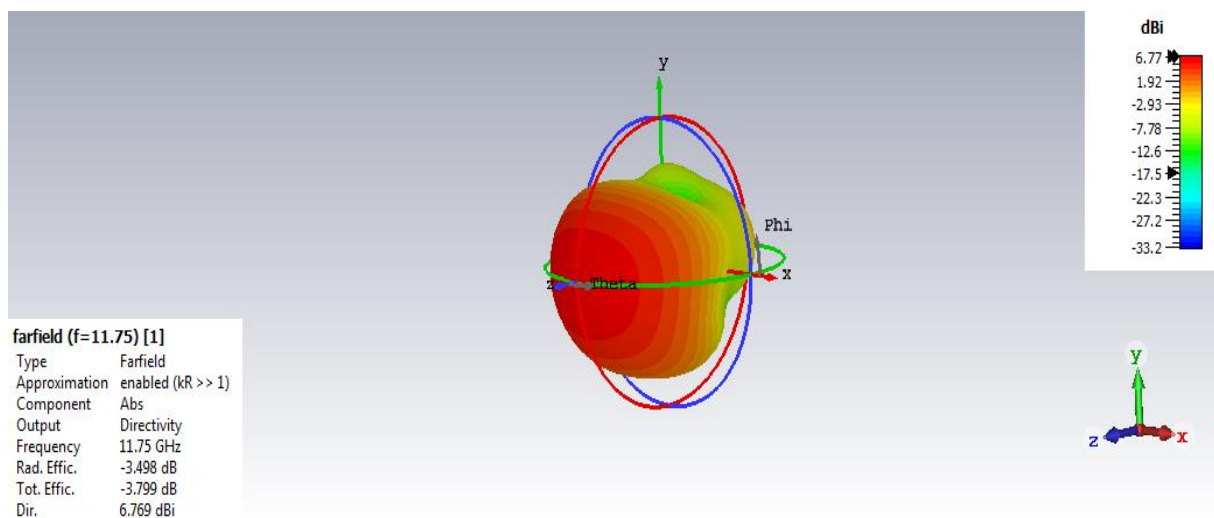


Figure III. 8: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le substrat FR-4.

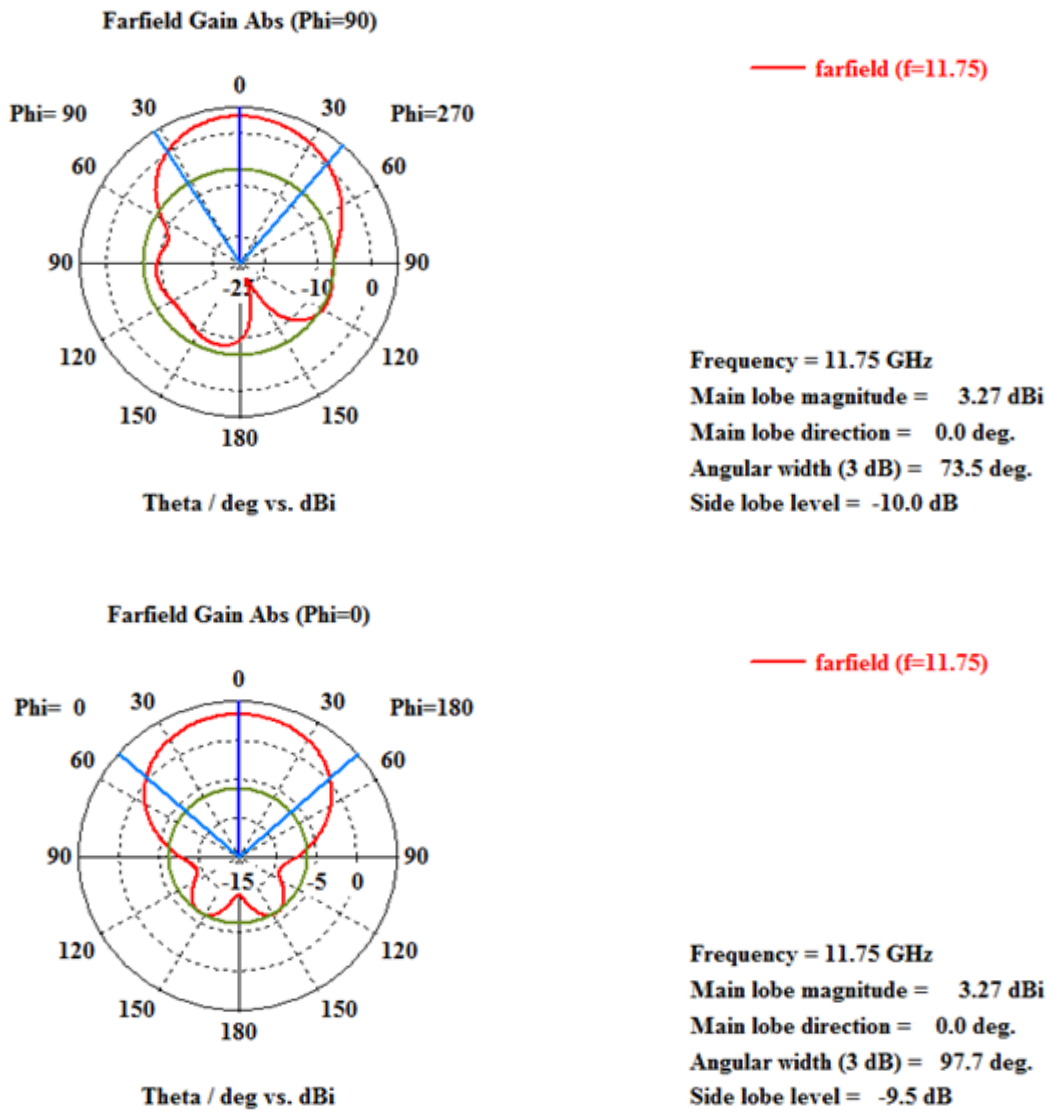


Figure III. 9 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le substrat FR-4 pour (phi=0° et phi=90°).

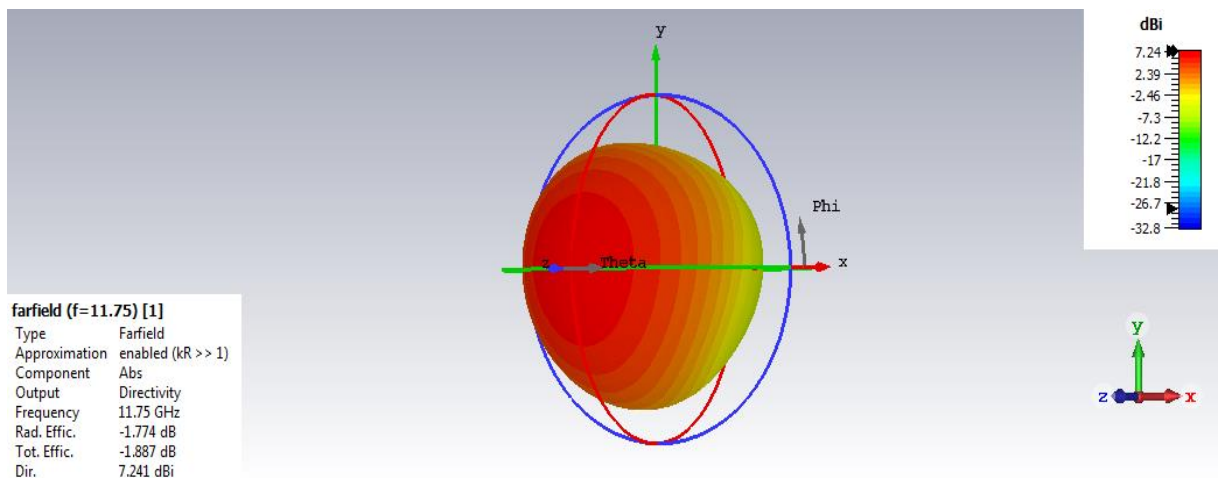


Figure III. 10 : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le substrat RogersRT5880.

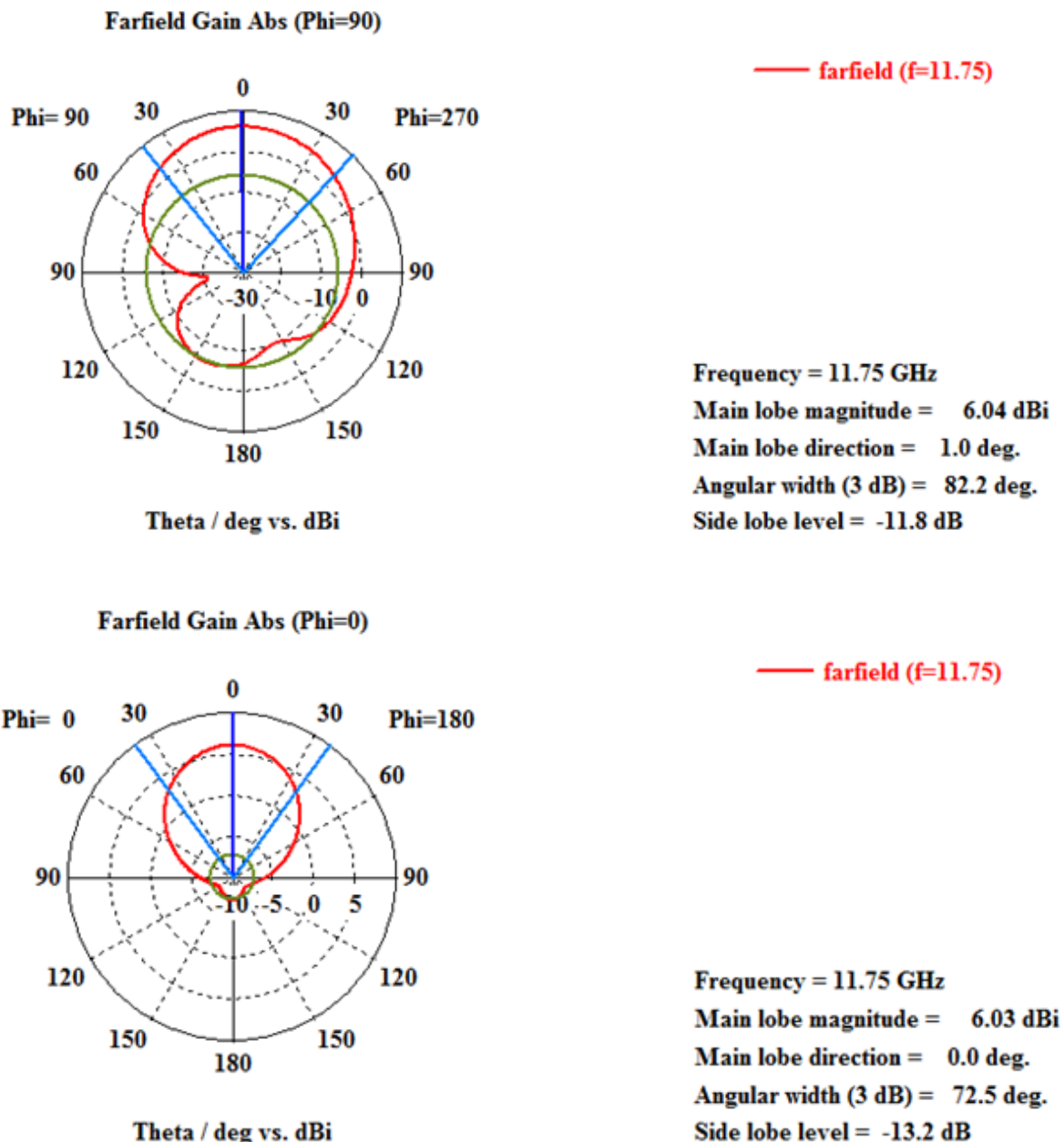


Figure III. 11 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le substrat RogersRT5880 pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

- **Comparaison des résultats entre le FR4 et le Rogers**

Dans le tableau III.3, nous observant clairement une meilleure adaptation à -18.75 dB en utilisant le substrat Roger au lieu du FR4, un meilleur gain à 5,43 dBi et un VSWR plus proche du cas idéal (égale à 1). Ceci nous amène à conclure que le Roger est la meilleure solution pour l'utilisation du substrat de notre antenne rectangulaire résonnant à 11,75 GHz pour une reconfigurabilité en matériaux.

Tableau III.3: Comparaison des résultats entre FR4 et Rogers.

Paramètres	S11 (dB)	Gain (dBi)	VSWR
FR-4	-15.09	3.20	1.36
RogersRT5880	-18.75	5.43	1.44

Afin d’optimiser notre antenne rectangulaire, puisqu’elle fonctionne dans la bande Ku pour des applications divers à savoir les applications satellitaires, le gain élevé est une condition primordiale pour ce type d’application.

III.3.2 Réseaux d’antennes

Un réseau d’antennes désigne une configuration composée de plusieurs éléments rayonnants agencés et alimentés de manière coordonnée pour fonctionner comme une seule entité. Cette approche permet d’optimiser certaines performances électromagnétiques, telles que le gain ou la directivité. Dans notre étude, l’objectif principal de l’utilisation d’un réseau est d’améliorer le gain et la directivité de l’antenne par rapport à une structure unitaire.

III.3.2.1 Conception du réseau d’antennes à deux éléments

Un réseau à deux éléments constitue une configuration simple composée de deux antennes disposées en parallèle ou en série. Dans notre cas, illustré par la figure III.12, nous avons conçu un réseau formé de deux antennes disposées en parallèle, en réutilisant les mêmes paramètres que l’antenne unitaire précédemment étudiée. Le système d’alimentation comprend une ligne d’entrée de 50 Ω , accompagnée de lignes d’interconnexion et d’alimentation des antennes, toutes en 70 Ω , assurant une distribution équilibrée du signal entre les deux éléments.

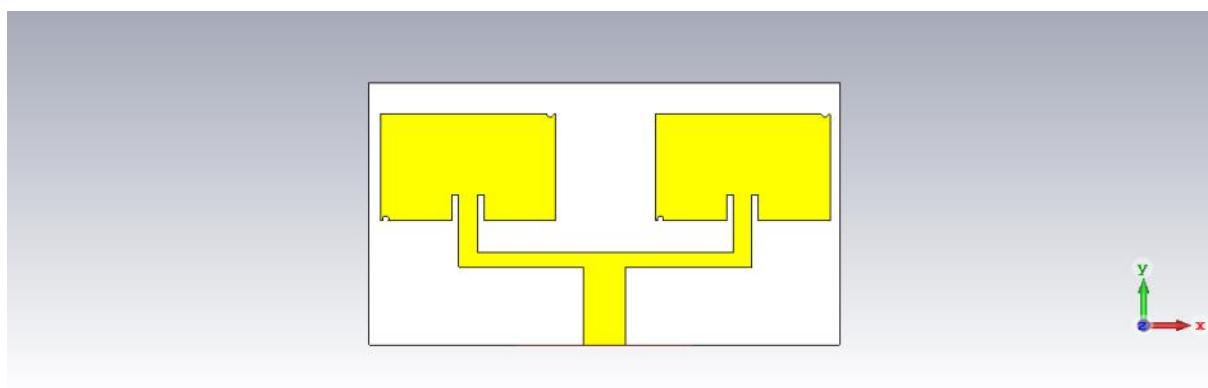


Figure III. 12: Structure d’un réseau d’antennes à deux éléments.

III.3.2.2 Simulations et résultats

- Coefficient de réflexion S11

La figure III.13 représente le coefficient de réflexion S11 révèle deux résonances, la première est un peu décalée de notre fréquence de résonance initiale (à 11,75 GHz) estimée à 11.54 GHz et la deuxième résonance est à 14.87 GHz, avec des valeurs respectives de -11.95 dB et -12.86 dB. Ces résultats indiquent une adaptation correcte sur les deux fréquences, assurant une faible réflexion et une transmission efficace de l'énergie. La présence de ces deux fréquences souligne le caractère multi bande de fréquence du réseau d'antenne.

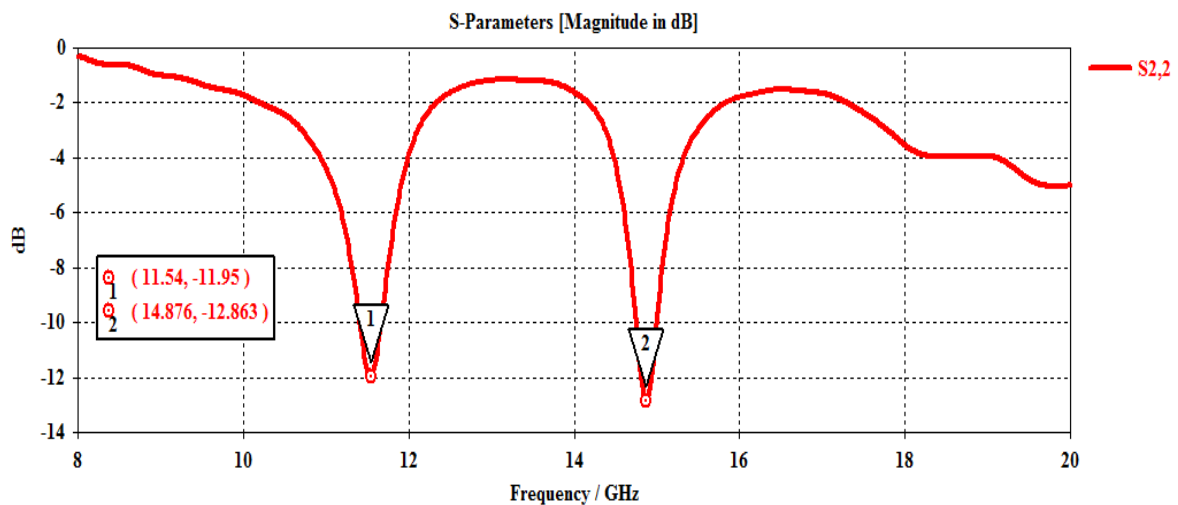


Figure III. 13: Coefficient de réflexion de deux éléments.

- Rapport d'ondes stationnaire VSWR

Selon la figure III.14, le taux d'onde stationnaire (ROS) est de 1.67, ce qui confirme une adaptation d'impédance globalement bonne, bien que légèrement moins performante qu'une antenne unitaire bien adaptée.

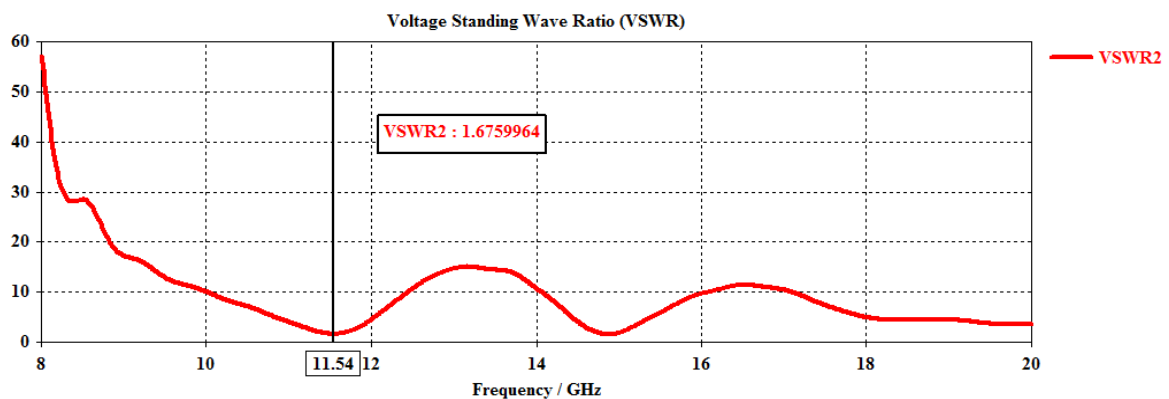


Figure III. 14 : VSWR de l'antenne a deux éléments.

- Le Gain

La figure III.15 illustre que le réseau d’antennes atteint un gain de 9,33 dBi, ce qui représente une nette amélioration par rapport à l’antenne seule. Ce gain élevé est dû à l’effet de couplage et à la formation d’un faisceau plus directionnel grâce à la configuration en réseau d’antenne.

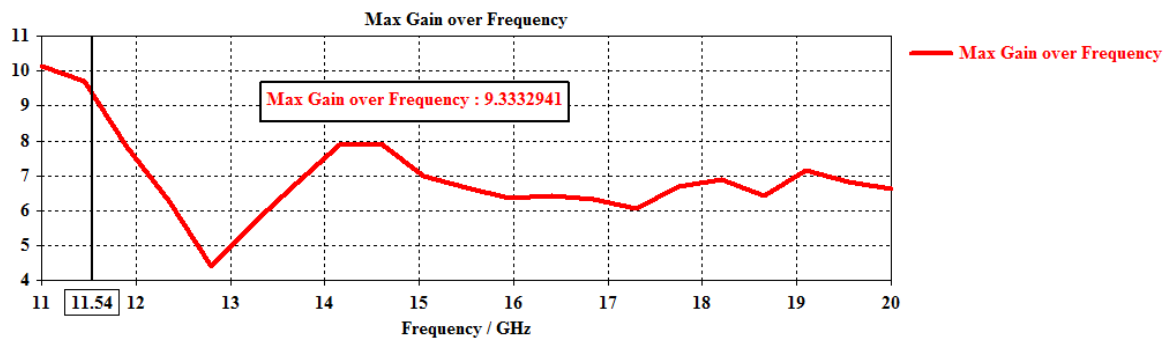


Figure III. 15 : Gain du réseau d’antenne a deux éléments.

- Le diagramme de rayonnement

La figure III.16 présente Le rayonnement 3D du réseau d’antennes qui nous montre une forte directivité avec un lobe principal bien défini grâce au couplage constructif entre les deux éléments. Le niveau de rayonnement secondaire (lobes latéraux) est réduit, ce qui est favorable pour la concentration du signal dans une direction précise.

La figure III. 17 illustre dans le plan E ($\phi = 0^\circ$), l’ouverture à -3 dB du lobe principal est de 34.7° ce qui indique une excellente concentration du rayonnement. Le lobe latéral est atténué à -11.1 dB réduisant les interférences hors axe. Dans le plan H ($\phi = 90^\circ$), la largeur angulaire est plus large à 96.8° ce qui permet une bonne couverture latérale tout en maintenant une directivité générale élevée.

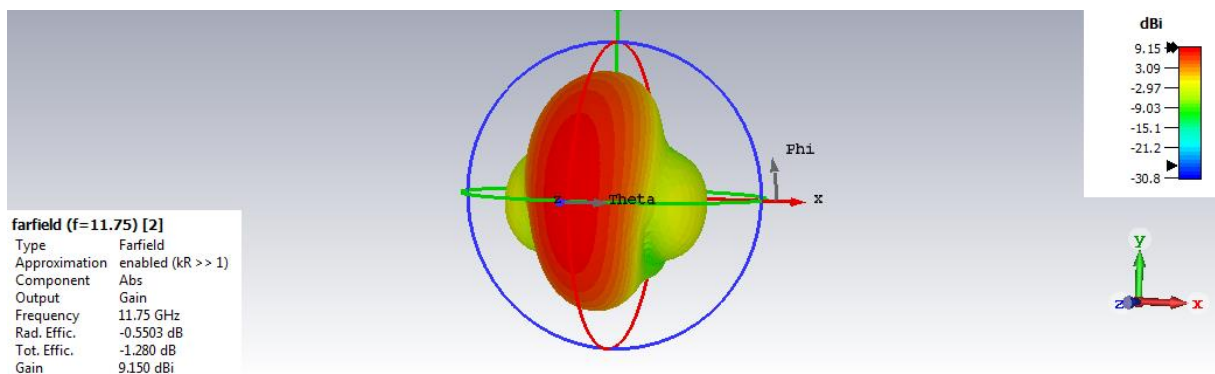


Figure III. 16: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne a deux éléments.

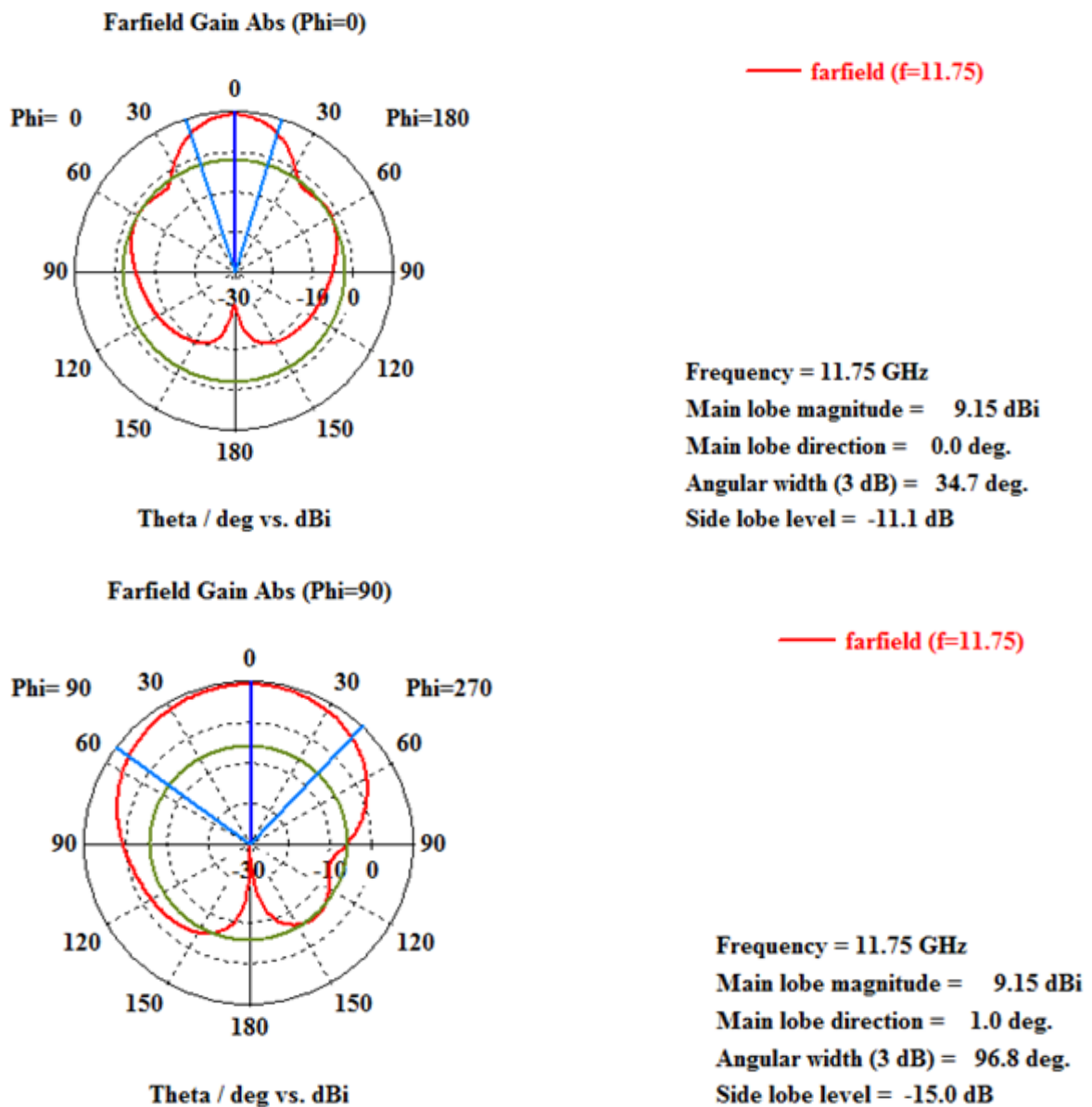


Figure III. 17: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne a deux éléments pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

III.3.3 Reconfigurabilité par matériau agile

➤ Graphene

Dans cette approche, le Cuivre traditionnellement utilisé pour la fabrication des antennes est remplacé par du Graphene un matériau aux propriétés remarquables. Grâce à sa conductivité ajustable et à sa grande flexibilité, le Graphene présente un fort potentiel pour le développement d'antennes reconfigurables et performantes. Cependant, en Algérie son utilisation reste encore très limitée. Cela s'explique principalement par son coût élevé et par

l'absence d'infrastructures locales adaptées à sa production et à son intégration dans les systèmes de communication. Pour l'instant, son application se limite donc essentiellement aux travaux de recherche et aux simulations.

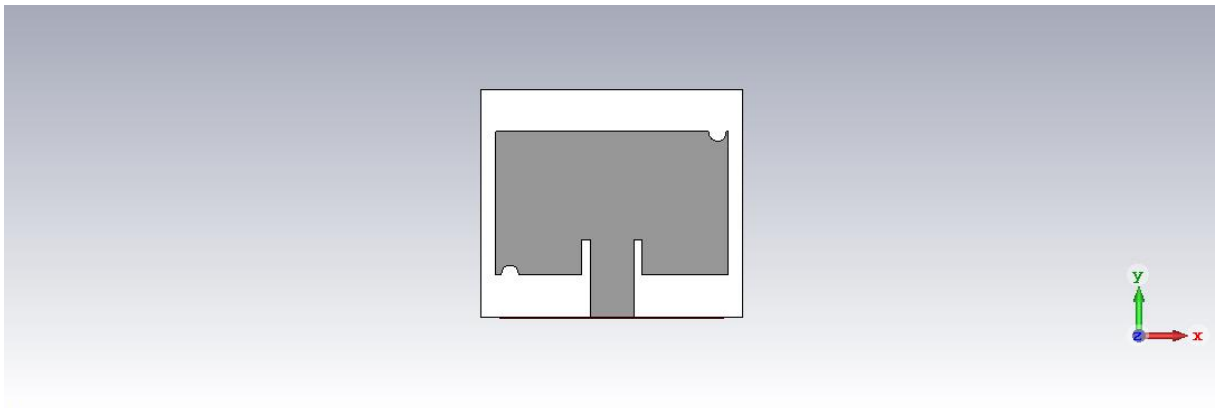


Figure III. 18 : Structure de l'antenne patch avec Graphene.

III.3.3.1 Simulation et comparaison des matériaux

- Coefficient de réflexion S11

Dans cette figure III. 19, on observe une comparaison directe entre les performances d'adaptation d'impédance de l'antenne réalisée en cuivre et celle conçue en Graphene. La courbe du graphène présente une adaptation plus prononcée à 11.39 GHz décalé vers la gauche, atteignant une valeur de $S_{11} = -14.40$ dB contre -18.75 dB pour la courbe du Cuivre à la fréquence de 11.81 GHz. Ce décalage est dû à la structure agile du graphène qui permet de décaler les hautes fréquences généralement vers la gauche tout en assurant une adaptation optimale de l'antenne.

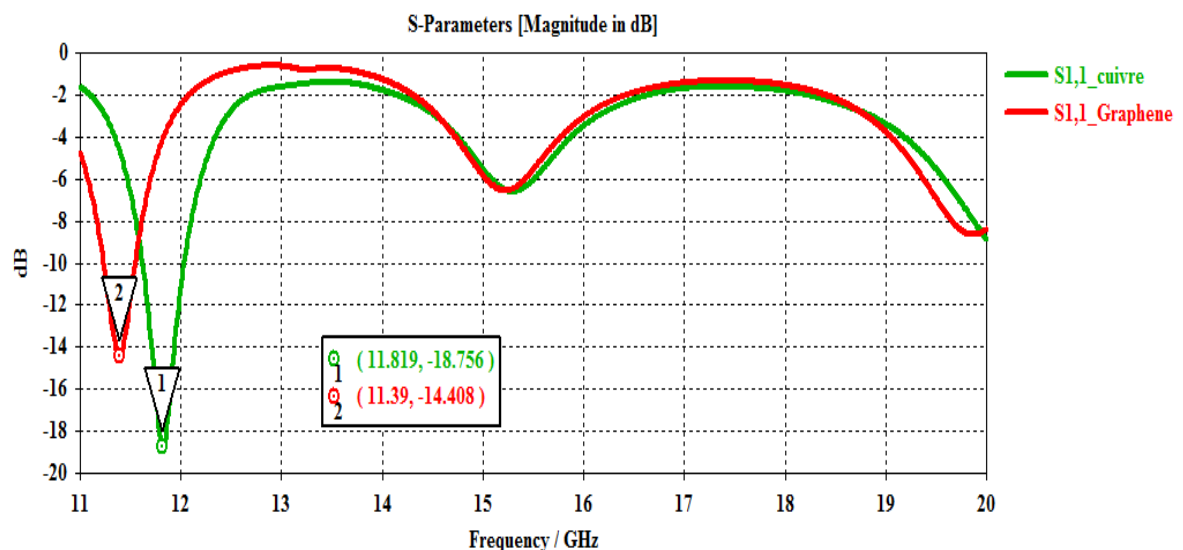


Figure III. 19 : Comparaison des paramètres S11 entre le Cuivre et le Graphene.

• Rapport d'ondes stationnaire VSWR

Le VSWR obtenu avec le Graphene est à 1,54 à la fréquence de 11,39 GHz tandis que celui obtenu avec le Cuivre est à 1,22 à 11,81 GHz, ce qui signifie une transmission efficace de l'énergie sans pertes significatives.

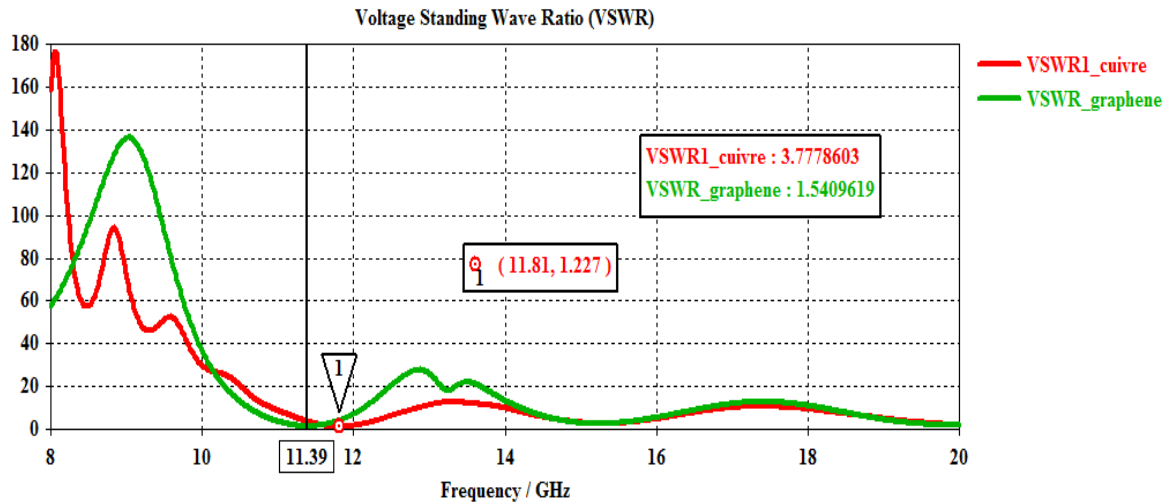


Figure III. 20 : Comparaison des VSWR pour le Cuivre et le Graphene.

• Le Gain

L'antenne en Graphene montre un gain nettement meilleur à celui du Cuivre, avec des valeurs pouvant dépasser les 5 dBi sur toute la bande de fréquence entre 8 et 20 GHz, selon la fréquence. Cela confirme le potentiel de ce matériau pour des applications avancées. Et un gain supérieur de 6.61 dBi à la fréquence de 11,39 GHz comparé au cuivre qui est à 5,43 dBi à la fréquence de 11,81 GHz.

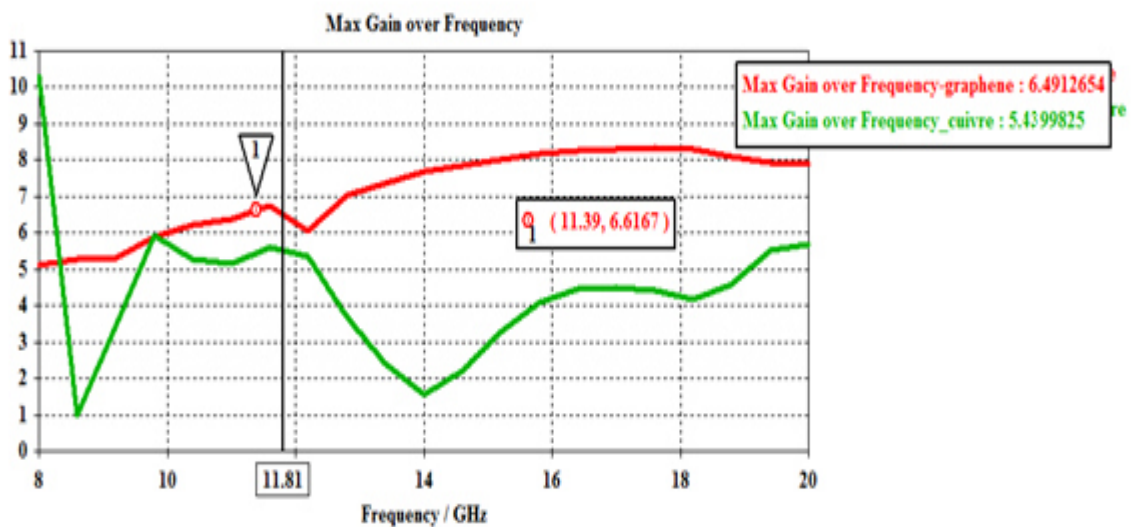


Figure III. 21: Comparaison du gain obtenu entre le Cuivre et le Graphene.

• Le diagramme de rayonnement

La figure III. 22 illustre le rayonnement tridimensionnel de l'antenne en Graphene montrant un faisceau principal bien orienté avec une forme symétrique et une bonne concentration énergétique comparable à celle obtenue avec le Cuivre. Et pour la figure III. 23, le lobe principal dans le plan E présente une largeur angulaire d'environ 75.4° illustrant une directivité raisonnable. Dans le plan H, la largeur est plus large, avoisinant 108.1° ce qui conserve une certaine omni directionnalité latérale favorable à des applications mobiles ou adaptatives.

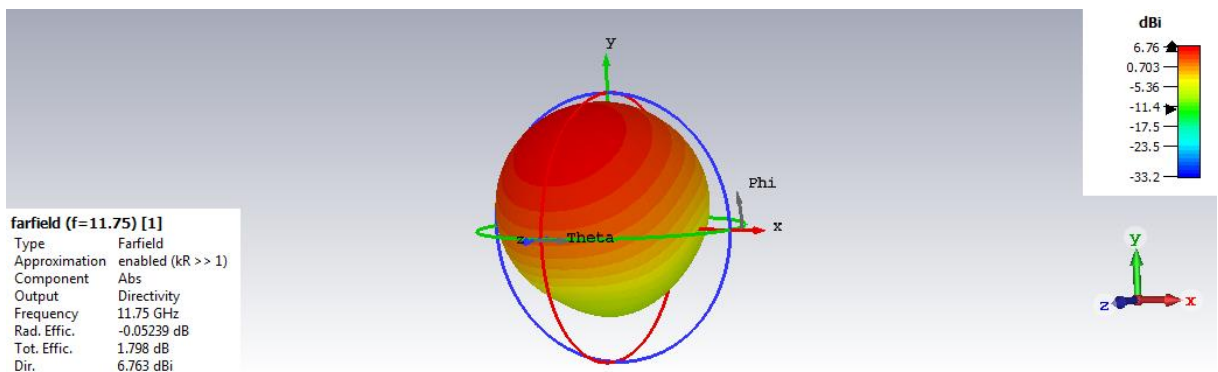


Figure III. 22: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec le Graphene.

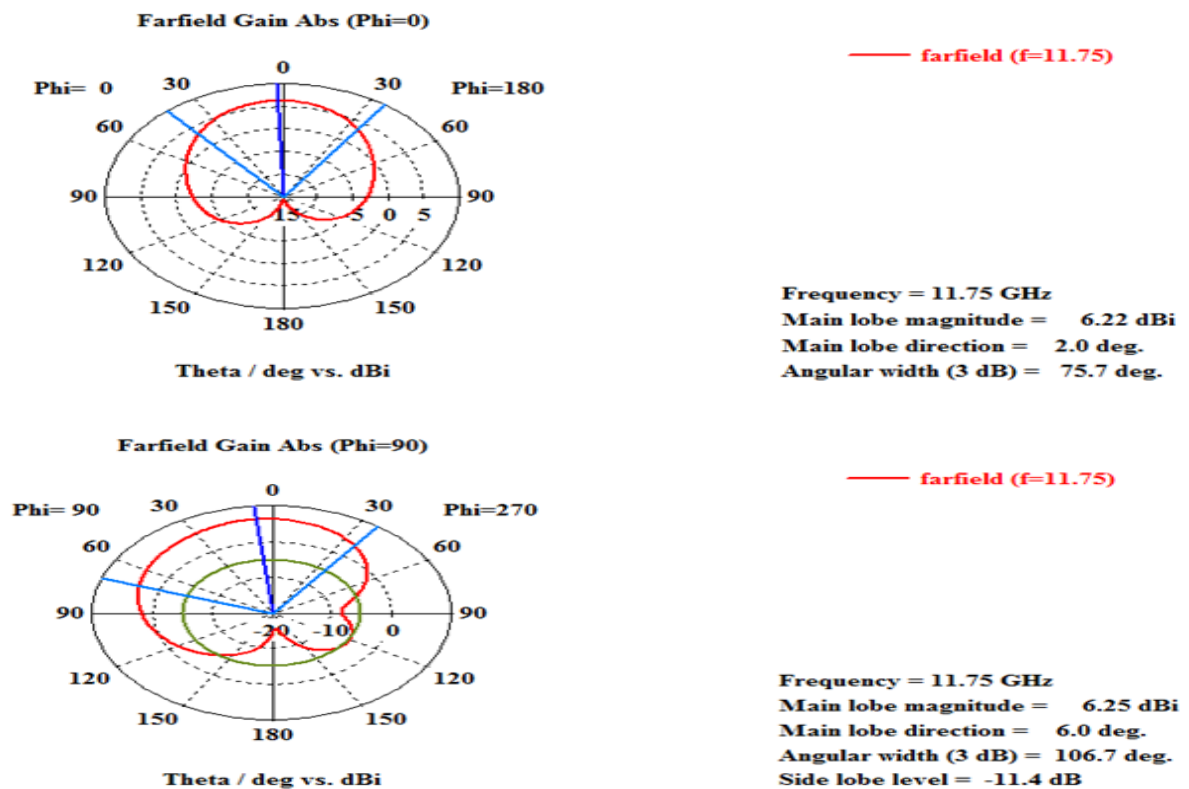


Figure III. 23: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne avec le Graphene pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

III.3.3.2 Variation du potentiel chimiques de l'antenne rectangulaire en Graphene

Dans le but de la reconfigurabilité par le matériau Graphène, nous allons faire varier le potentielle chimique de l'antenne patch rectangulaire de 0 à 4 eV, en utilisant le substrat Roger.

- **Coefficient de réflexion S11**

La courbe S11 montre une variation significative de la fréquence de résonance en fonction du potentiel chimique appliqué. À différents niveaux de potentiel, le S11 vari entre des valeurs entre -13 et -14 dB ce qui traduit une excellente adaptation sur plusieurs bandes. Cette reconfigurabilité dynamique démontre la capacité du Graphene à ajuster les propriétés d'impédance sans modification mécanique. Et présente un meilleur résultat à la variation du potentielle chimique à 3,5 eV avec une adaptation à -24,98 dB pour une fréquence à 11,33 GHz.

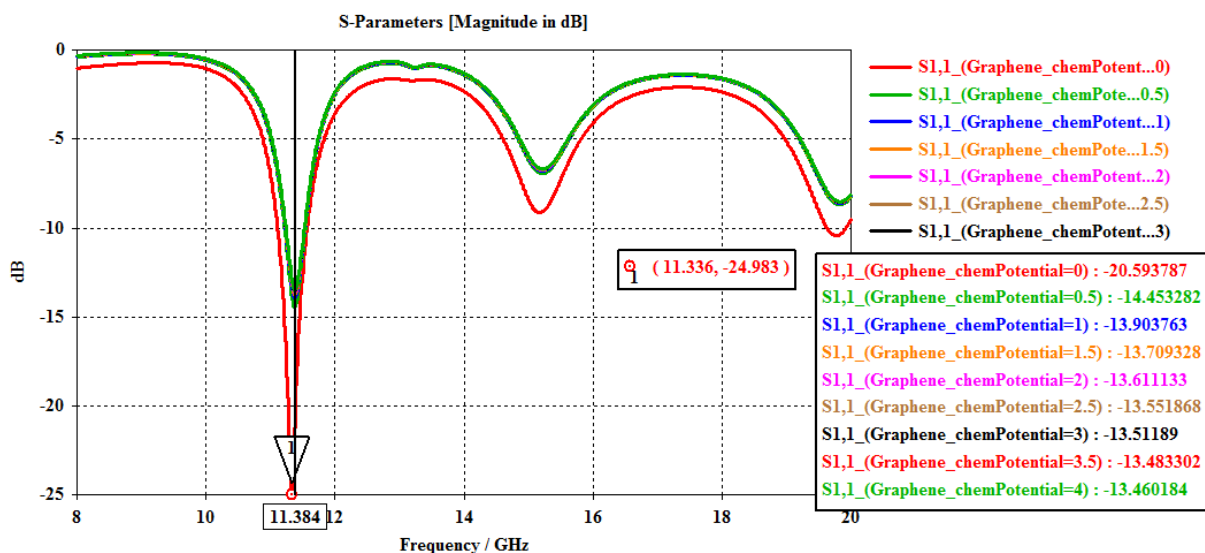


Figure III. 24: Variation du potentiel chimique du S11 de l'antenne en Graphene.

- **Rapport d'ondes stationnaire VSWR**

Le VSWR varie selon les conditions appliquées, mais reste inférieur à 2 confirmants une bonne adaptation adaptable selon les besoins.

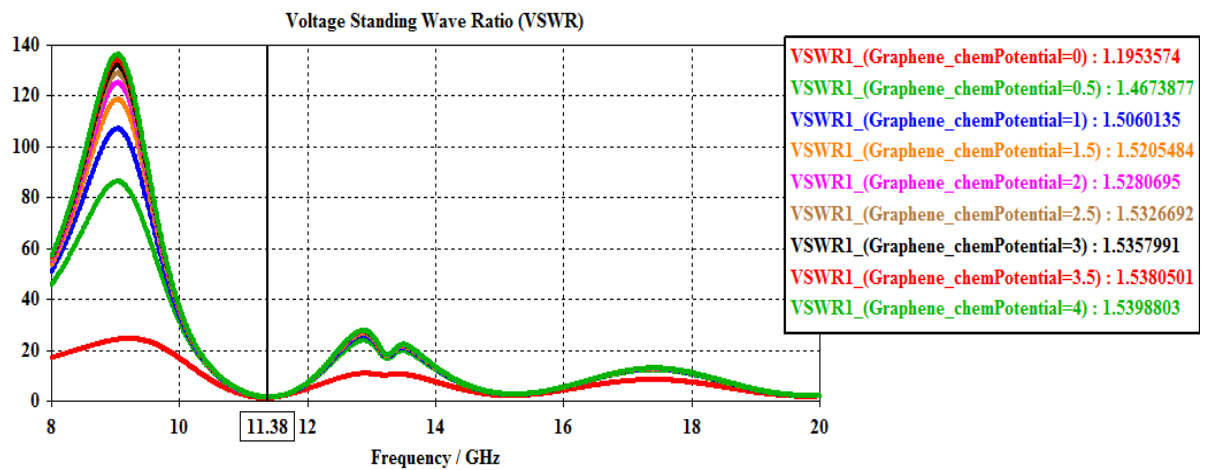


Figure III. 25 : Variation du potentiel chimique sur le VSWR de l'antenne en Graphène.

• Le Gain

La figure III.26 montre que le gain de l’antenne en Graphene peut atteindre jusqu’à 6.61 dBi sous l’effet d’un potentiel chimique appliqué. Cette variation contrôlable illustre clairement le potentiel de reconfigurabilité du Graphene permettant une adaptation active du rayonnement selon les besoins fonctionnels du système sans modifier la géométrie de l’antenne.

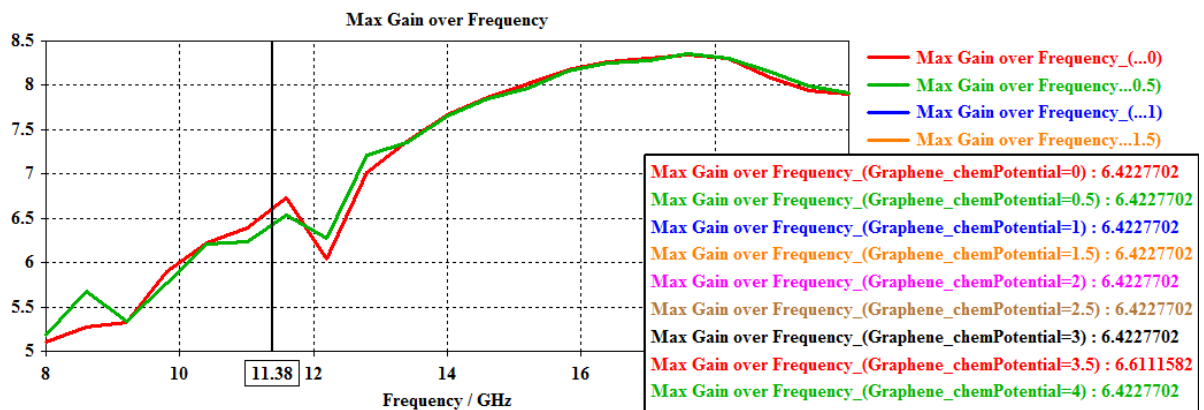


Figure III. 26 : Variation du potentiel chimique sur le gain de l'antenne en Graphene.

• Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement 3D de l’antenne en Graphene soumis à une variation du potentiel chimique, montre un lobe principal bien formé et stable, avec une distribution homogène de l’énergie dans l’espace. Cette visualisation tridimensionnelle illustre la capacité du Graphene à maintenir une directivité contrôlée tout en conservant une bonne couverture angulaire globale. et pour 2D révèle une largeur angulaire d’environ 116° dans le plan E (phi =

0°) et 83.8° dans le plan H (phi = 90°). Cette différence entre les deux plans illustre une dispersion directionnelle maîtrisée, confirmant que le Graphene permet une reconfigurabilité non seulement en fréquence, mais également en directivité, sans altération de la structure physique de l'antenne.

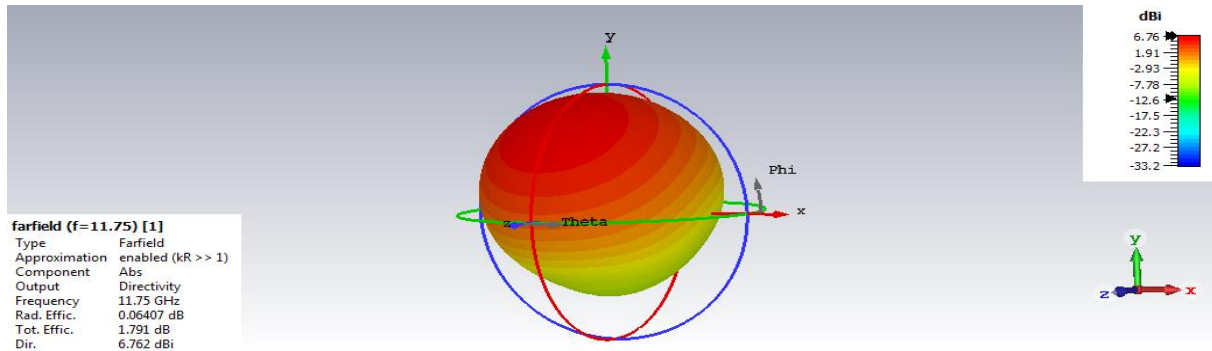


Figure III. 27 : Potentiel chimique sur diagramme de rayonnement 3D de l'antenne en Graphene.

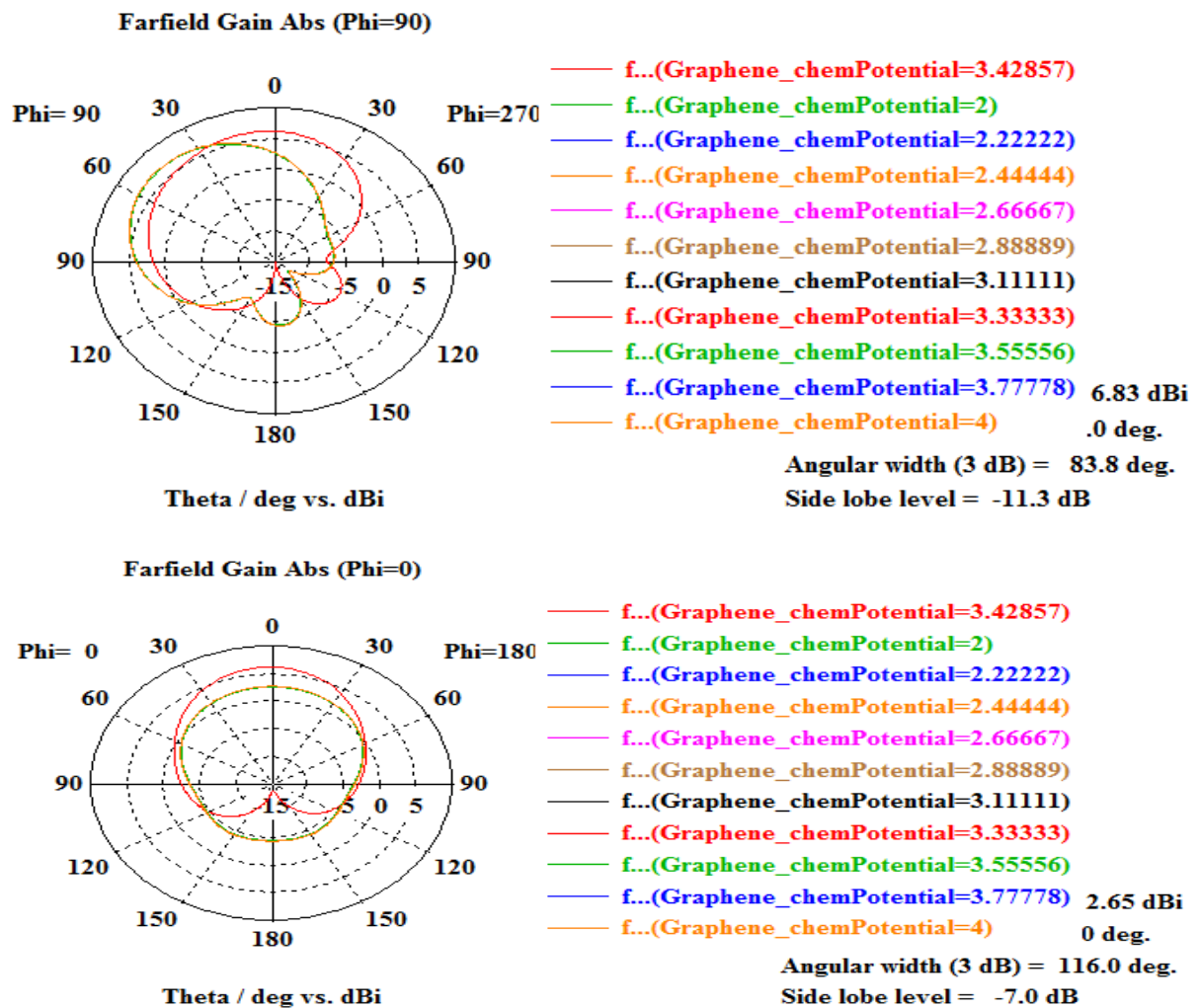


Figure III. 28 : Potentiel chimique sur diagramme de rayonnement 2D de l'antenne en Graphene pour (phi=0° et phi=90°).

- Comparaison des résultats entre le Cuivre et le Graphene

Tableau III.4: Comparaison des résultats entre Cuivre et Graphene.

Paramètres	S11	Gain	VSWR
Cuivre	-18.75	5.43	1.22
Graphene	-14.40	6.61	1.54

III.4 Reconfigurabilité par diodes PIN d’une antenne patch circulaire

Avant l’intégration des diodes PIN, une antenne patch circulaire a été conçue pour valider la structure de base. Cette antenne est dimensionnée pour fonctionner à 2.4 GHz avec un substrat FR-4 ($\epsilon_r = 4.3$, $h = 1.6$ mm), choisi pour sa disponibilité et son faible coût. Le rayon du patch a été fixé à 17.35 mm et la largeur de la ligne d’alimentation à 3.13 mm pour assurer une adaptation à 50 Ω . Enfin, une distance d’alimentation de 10.08 mm a été définie pour optimiser le couplage avec le patch.

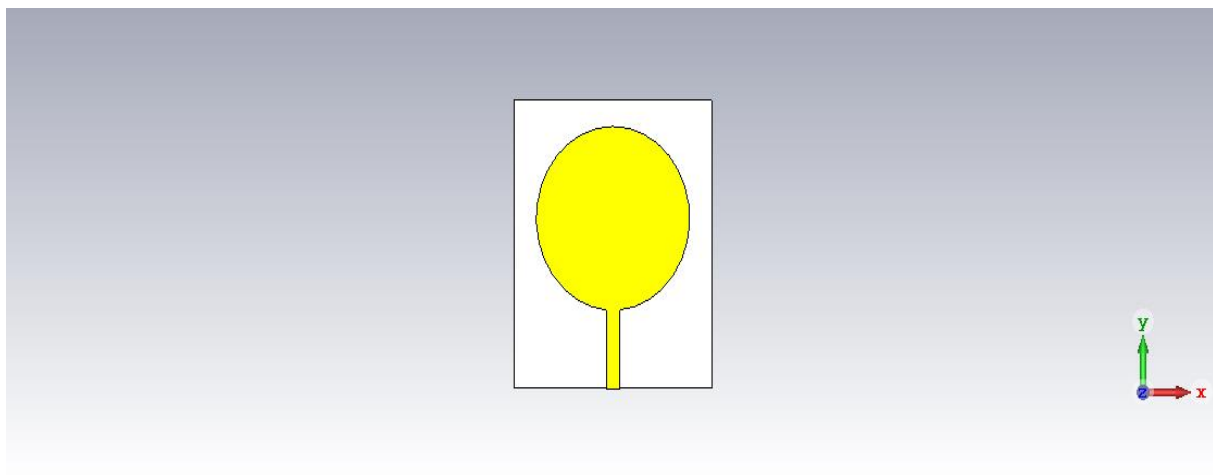


Figure III.29 : Structure de l’antenne patch circulaire initial.

- Coefficient de réflexion S11

Le coefficient de réflexion pour la figure III.30 atteint une valeur minimale de - 6.20 dB ce qui indique une mauvaise adaptation d’impédance. Une grande partie de la puissance est réfléchiée vers la source, traduisant un couplage inefficace entre l’antenne et la ligne d’alimentation.

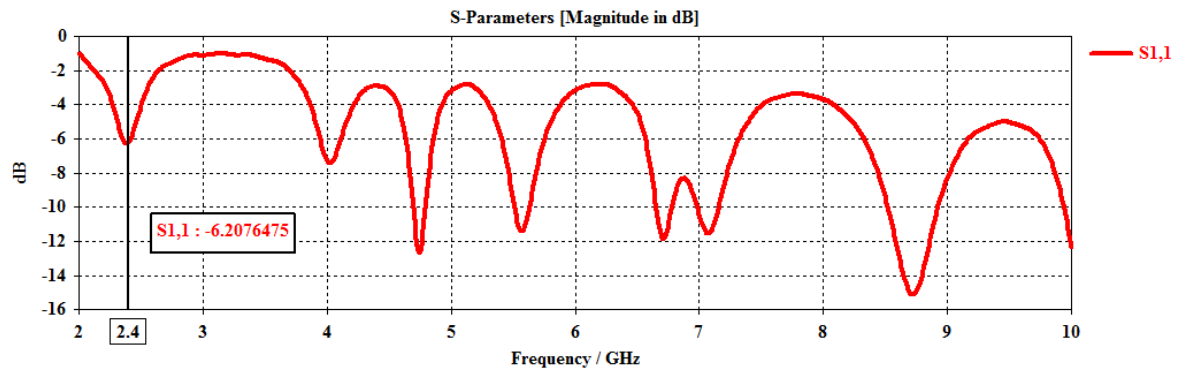


Figure III.30: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire initial.

III.4.1 Adaptation de l'antenne patch

Afin d'améliorer l'adaptation d'impédance de l'antenne circulaire conçue, des ajustements supplémentaires ont été réalisés. Un facteur de perte $G_{pf}=2\text{mm}$ a été appliqué à la ligne d'alimentation, et des encoches ont été introduites au niveau du patch. Ces modifications visent à affiner la fréquence de résonance, permettant ainsi une meilleure correspondance avec l'impédance de 50Ω . Cette optimisation garantit un couplage plus efficace entre la source et l'antenne, préalable essentiel avant l'intégration des éléments de reconfiguration.

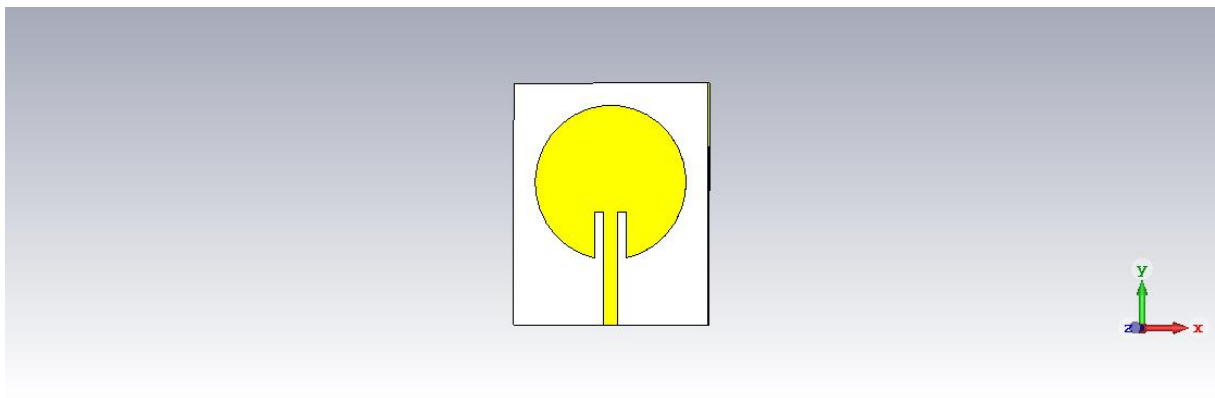


Figure III.31: Structure de l'antenne patch circulaire avec encoche.

- Coefficient de réflexion S₁₁

La figure III.32 illustre le coefficient de réflexion qui met en évidence trois fréquences de résonance distinctes : -37.90 dB à 2.48 GHz , -18.01 dB à 4.60 GHz et -28.37 dB à 8.90 GHz . Ces valeurs traduisent un comportement multi bande de l'antenne avec une très bonne adaptation d'impédance sur chacune des bandes. La résonance principale à 2.48 GHz , caractérisée par une forte atténuation de S₁₁, témoigne d'un excellent couplage entre la ligne

d'alimentation et le patch favorisé par l'introduction des encoches dans la structure.

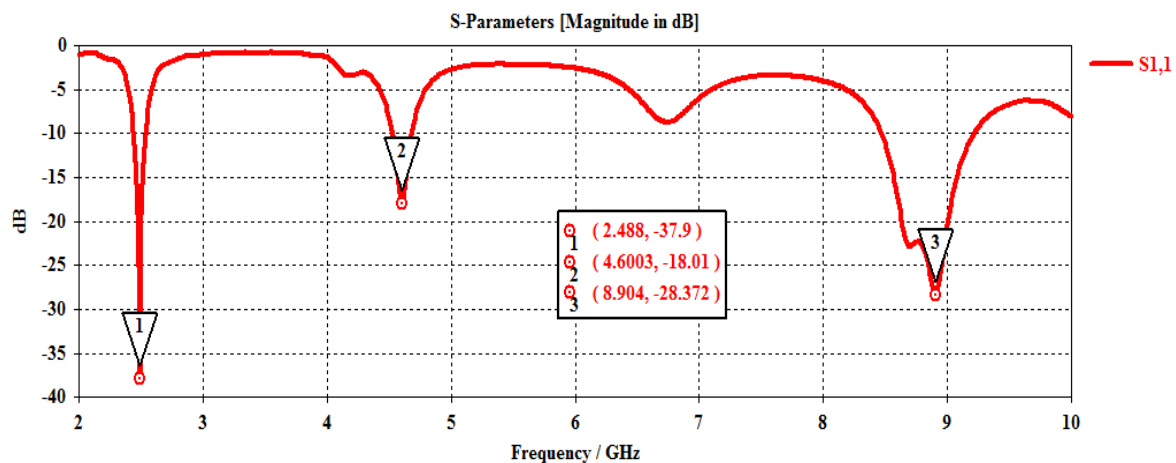


Figure III.32: Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire avec encoche.

- **Rapport d'ondes stationnaire VSWR**

Le rapport d'ondes stationnaires (VSWR) est de 1.11 à la fréquence de résonance de 2,48 GHz ce qui reflète une adaptation presque idéale (VSWR = 1 signifie une adaptation parfaite). Ce résultat confirme la bonne adaptation de l'antenne sur la fréquence de 2.48 GHz et justifie les très faibles pertes par réflexion.

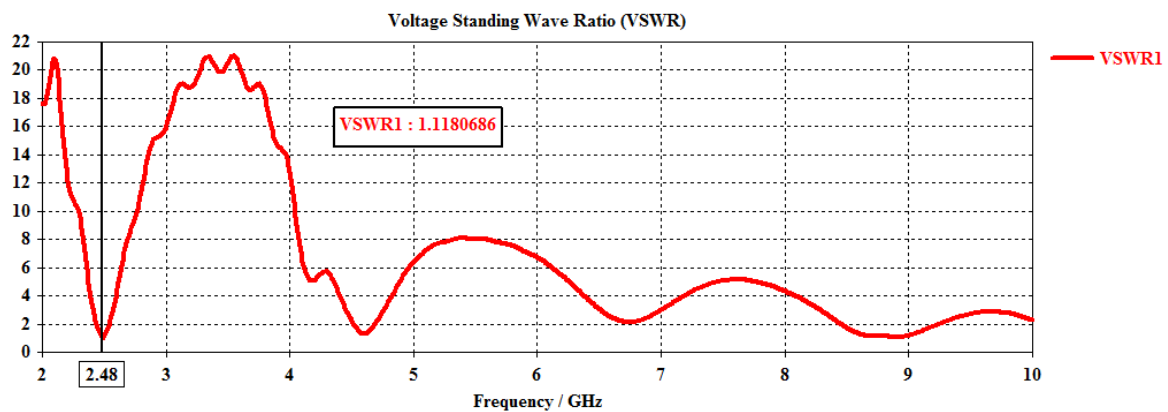


Figure III.33: Le VSWR de l'antenne patch circulaire avec encoche.

- **Le Gain**

Le gain maximum mesuré est de 1.70 dBi. Ce gain est légèrement supérieur à celui obtenu avec la structure initiale (1.40 dBi), montrant que l'ajout d'encoches améliore non seulement l'adaptation, mais aussi l'efficacité du rayonnement.

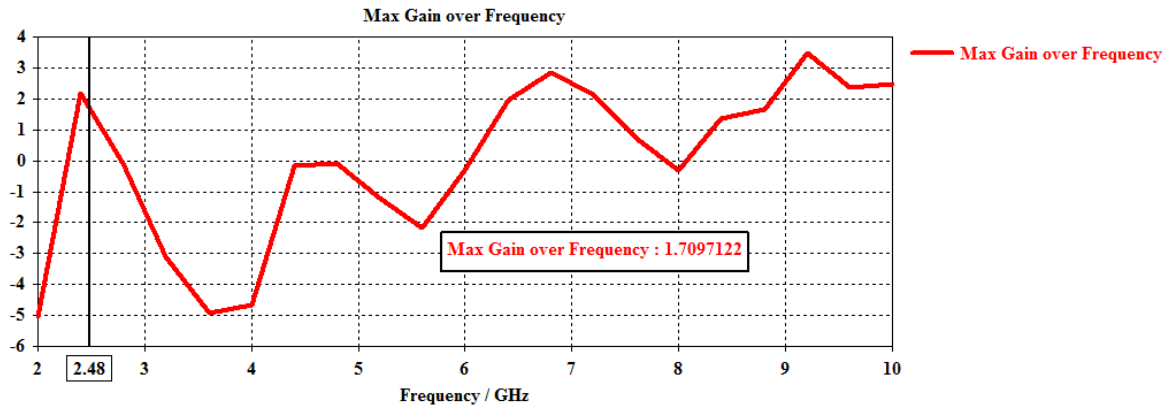


Figure III.34: Gain de l’antenne patch circulaire avec encoche.

- **Le diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement en 3D représenté dans la figure III.35, le lobe principal est clairement orienté verticalement ce qui indique une émission axiale optimale. Le rayonnement est globalement symétrique autour de l'axe principal, traduisant une conception bien équilibrée de l'antenne. Et pour la figure III.36 Dans le plan $\Phi = 90^\circ$ l’ouverture angulaire de $91,5^\circ$ offre un bon compromis entre directivité et couverture. Dans le plan $\Phi = 0^\circ$ une ouverture à -3dB de 108.2° indique un rayonnement bien focalisé. Les lobes secondaires très faibles confirment un excellent contrôle directionnel, limitant les pertes et interférences.

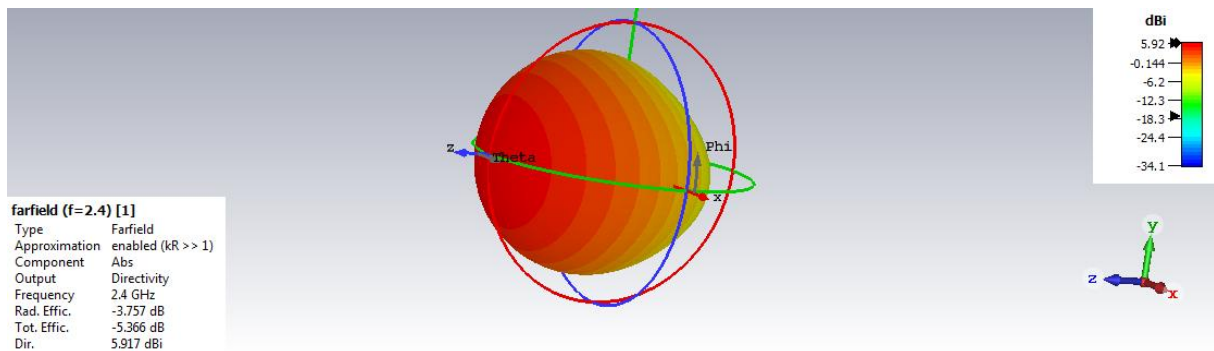


Figure III.35: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne circulaire avec encoche.

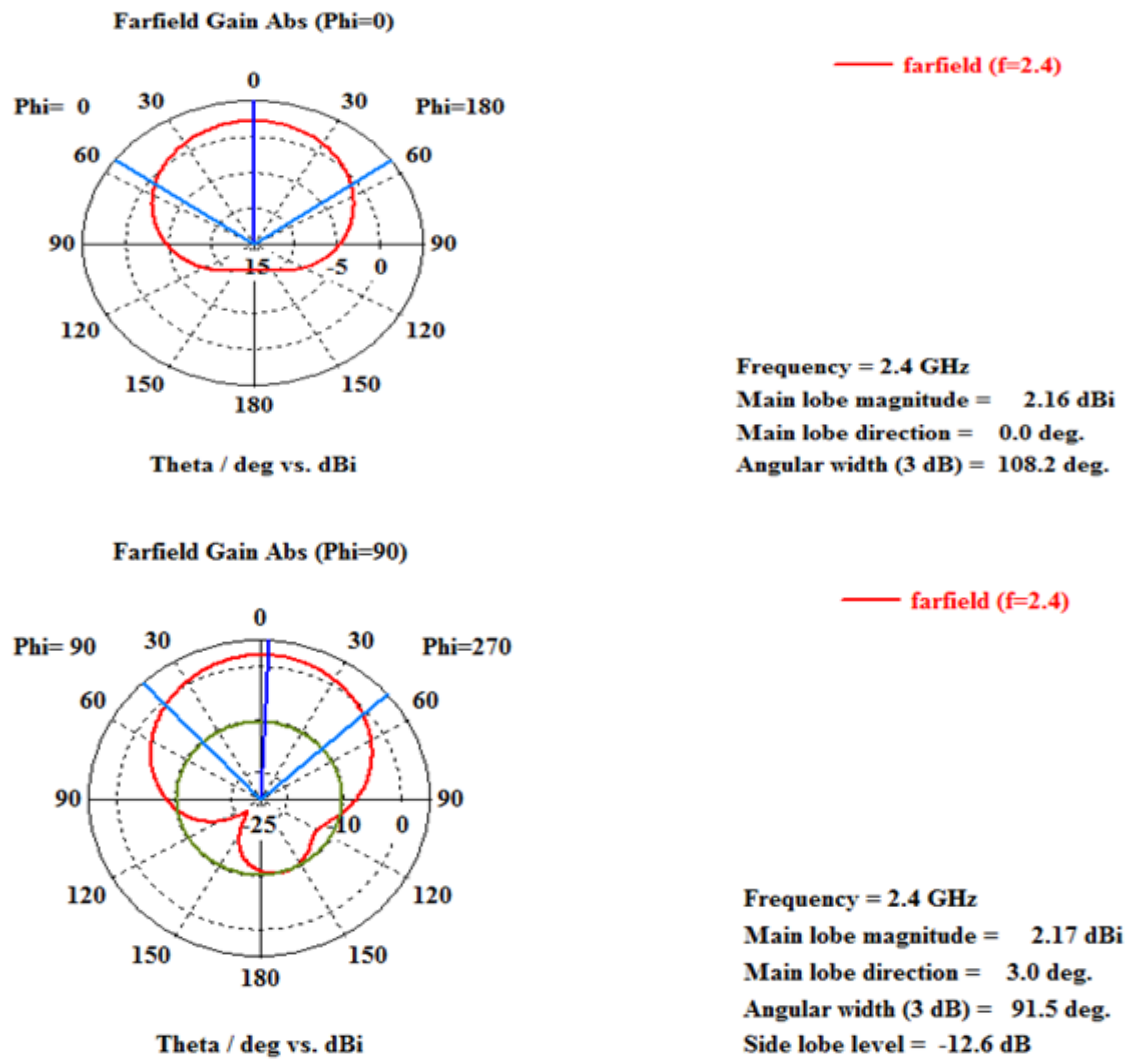


Figure III.36: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne circulaire avec encoche pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

III.4.2 Reconfigurabilité de l'antenne circulaire par diodes PIN

Dans cette partie, une antenne patch circulaire a été étudiée afin d'exploiter la reconfigurabilité en fréquence à l'aide de diodes PIN. Ces diodes agissant comme des interrupteurs RF permettent de modifier dynamiquement la fréquence de résonance de l'antenne en changeant leur état ON/OFF sans modification physique de la structure. Elles sont modélisées comme des circuits RLC avec des valeurs différentes selon l'état :

- **État ON** : $R = 3 \Omega$, $L = 0.2 \text{ nH}$, C négligeable.
- **État OFF**: $R = 100 \text{ k}\Omega$, $L = 0.2 \text{ nH}$, $C = 0.1 \text{ pF}$.

Ce principe permet de réaliser des antennes compactes et reconfigurables électriquement, capables de s'adapter à plusieurs bandes de fréquence par simple commutation électronique.

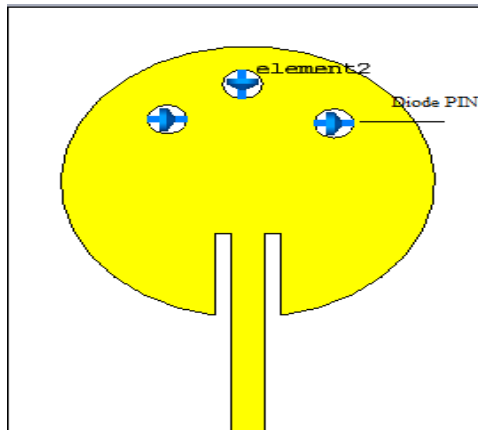


Figure III.37: Antenne circulaire avec diode PIN.

- **Coefficient de réflexion S11**

La Figure III.38 représentés la courbe S11 par diodes PIN révèle trois bandes de résonance distinctes aux fréquences de 2.47 GHz (-31 dB), 4.58 GHz (-38 dB) et 8.85 GHz (-47 dB) traduisant une excellente adaptation d'impédance et des pertes par réflexion extrêmement faibles. Ces résonances correspondent à différentes configurations d'activation des diodes PIN (états ON/OFF), démontrant ainsi la capacité de l'antenne à changer dynamiquement de bande de fonctionnement sans modification physique de la structure. La profondeur importante des creux de S11 témoigne d'une bonne pureté spectrale, garantissant un rayonnement efficace dans chaque bande active. Par ailleurs, la séparation claire entre les bandes confirme une bonne sélectivité essentielle pour minimiser les interférences dans les applications multi bandes.

Pour l'état on, on, off, on observe les meilleures performances en termes de coefficient de réflexion (S 11), avec une valeur de -33,1 dB à la fréquence de 8,4 GHz.

- L'état off, on, off offre une meilleure adaptation avec un S 11 de -38,11 dB à 4,5 GHz.
- Dans la configuration off, on, un très bon coefficient de réflexion est obtenu à la fréquence de 8,7 GHz, avec une valeur de -33 dB.
- Pour l'état on, off, on, une excellente adaptation est observée à 9,8 GHz avec un S 11 de -42,4 dB.
- Les autres états de commutation présentent des performances similaires.

Ces résultats confirment le concept de reconfigurabilité en fréquence à l'aide des diodes PIN, où chaque état de commutation est dédié à une fréquence précise.

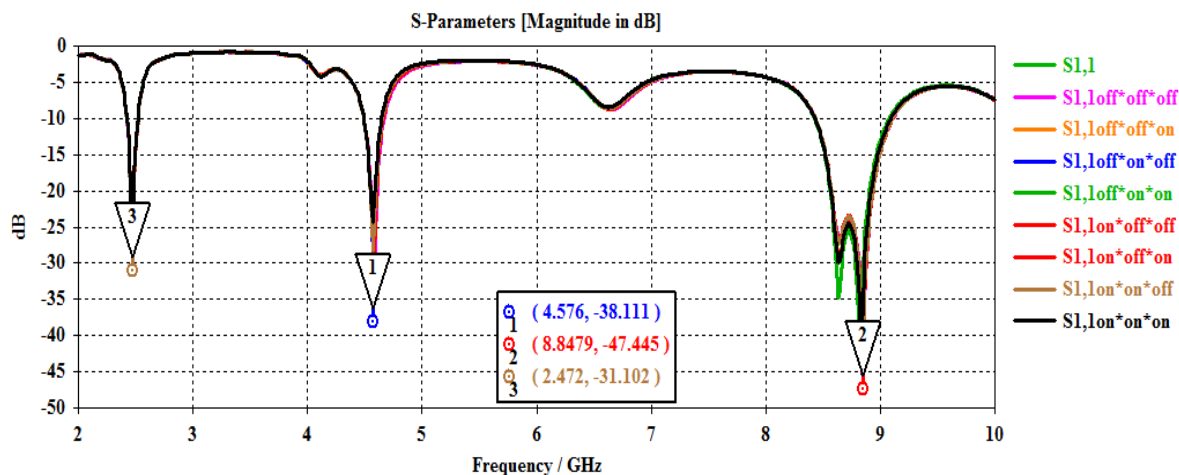


Figure III.38: Coefficient de réflexion de l’antenne patch circulaire par diode PIN.

- Rapport d'ondes stationnaire VSWR

Cette figure III.39 présente le graphique révèle plusieurs minima prononcés du VSWR aux fréquences de résonance, avec des valeurs approchant le cas idéal à 1, ce qui indique une adaptation d'impédance satisfaisante. Les configurations OFF/OFF/OFF et ON/ON/OFF montre les meilleurs VSWR représentant le minimum très marqué vers 2.47 GHz avec un VSWR proche de 1, représentant une adaptation quasi-parfaite. Les autres configurations présentent des comportements différents, avec des décalages fréquentiels notables selon l'état des diodes.

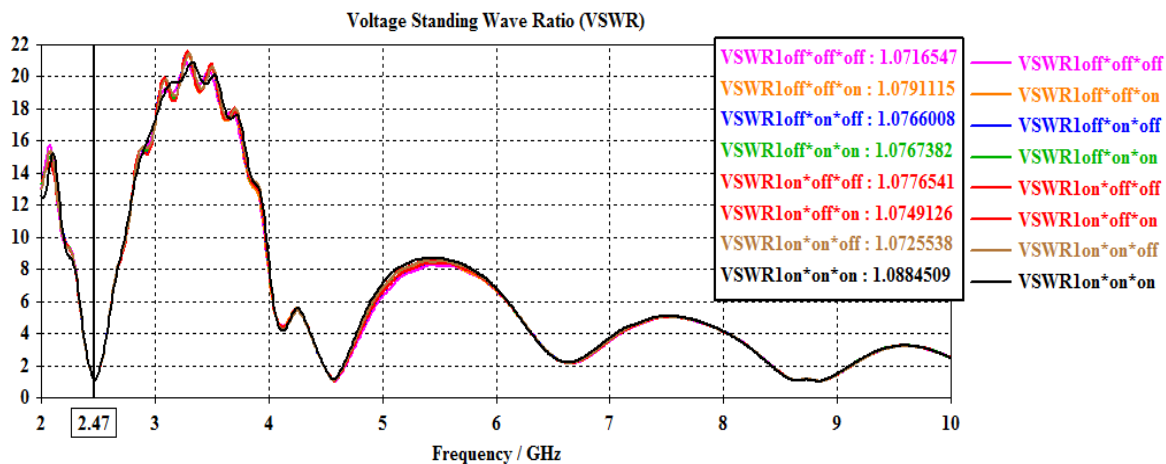


Figure III.39: Le VSWR de l’antenne patch circulaire par diode PIN.

- Le Gain

La figure III.40 illustre le gain varie significativement selon l'état des diodes, avec des valeurs maximales comprises entre 1.70 dBi et 1.74 dBi selon les différentes combinaisons, le gain est relativement élevé, ce qui coïncide avec une forte résonance à 2.47 GHz. Cela

indique une excellente adaptation d'impédance et un rayonnement efficace dans cette bande. Ce niveau de gain montre que l'antenne est bien adaptée aux applications dans la bande Wi-Fi, assurant une bonne couverture et une transmission stable du signal. Les autres pics de gain observés.

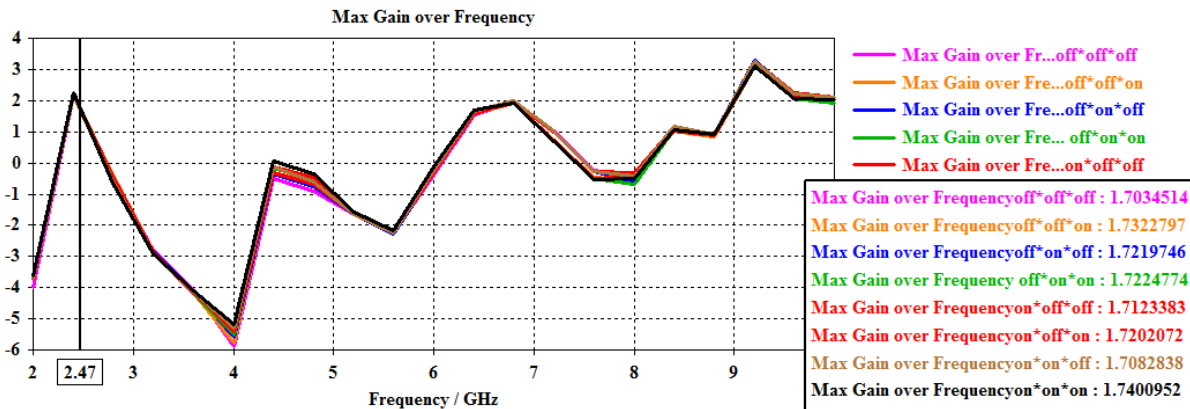


Figure III.40: Gain de l'antenne patch circulaire par diode PIN.

III.5 Reconfigurabilité par diodes Varicap d'une antenne patch triangulaire

Avant l'intégration des diodes Varicap, une antenne patch triangulaire a été conçue pour fonctionner à une fréquence de résonance à 5.8 GHz. Le substrat utilisé est le FR-4 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$ et une épaisseur de 1.6 mm, couramment utilisé pour sa facilité d'accès et son faible coût.

Cette structure constitue la base de départ avant toute amélioration d'adaptation ou reconfiguration.

Les dimensions principales sont les suivantes :

Tableau III.5: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch triangulaire proposée.

Paramètres	W_g	L_g	W_p	L_p	W_f	F_i
Dimensions (mm)	25.5	24.95	15.9	11.88	3	4.4

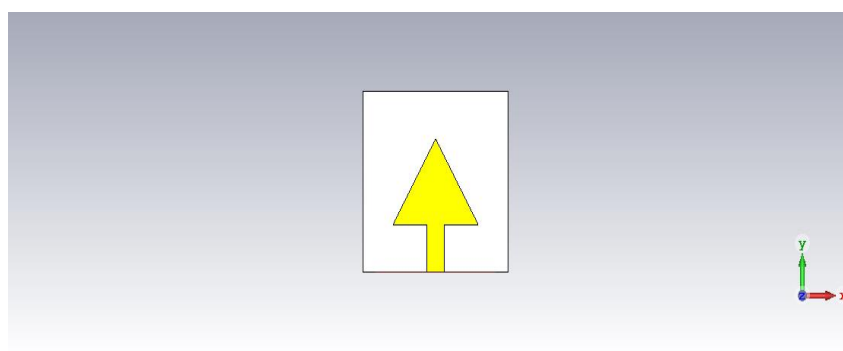


Figure III.41 : Structure de l'antenne patch triangulaire initial.

- **Coefficient de réflexion S11**

On peut remarquer que l'antenne simulé n'est pas adaptée, par la suite on va l'adapter à la fréquence désirée.

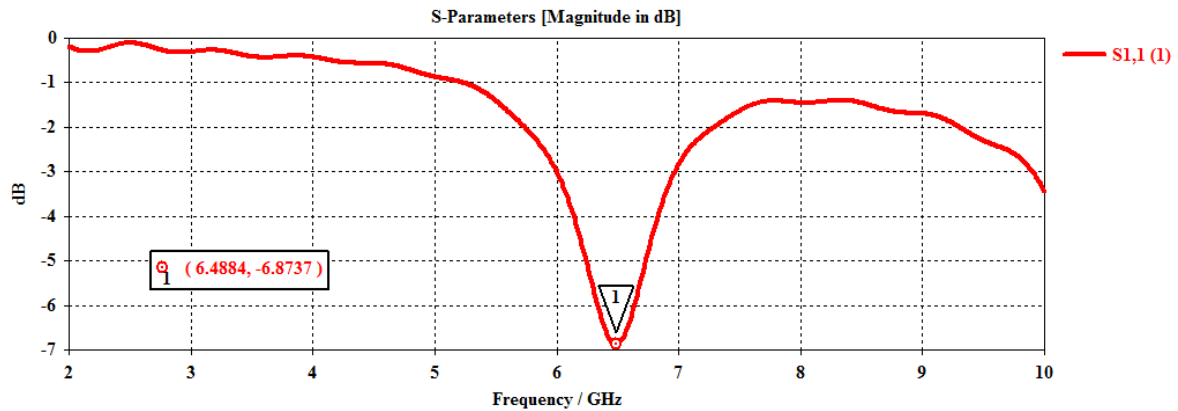


Figure III.42: Le coefficient de réflexion de l'antenne patch triangulaire initial.

III.5.1 Adaptation de l'antenne patch

Afin d'améliorer l'adaptation d'impédance de l'antenne triangulaire à 5.8 GHz, plusieurs modifications ont été apportées à la ligne d'alimentation. Ces ajustements comprennent l'ajout de découpes d'adaptation (encoches) le réglage de la largeur du conducteur, ainsi que l'application d'un facteur de perte $G_{pf} = 1\text{mm}$ pour optimiser la transition d'impédance. ce qui constitue une étape essentielle avant l'intégration des diodes Varicap pour la reconfigurabilité en fréquence.

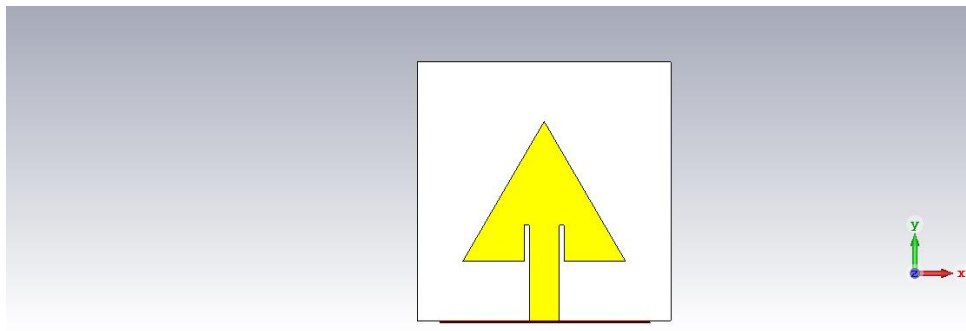


Figure III.43: Structure de l'antenne patch triangulaire avec encoche.

- **Coefficient de réflexion S11**

La figure III.44 montre que le coefficient de réflexion (S₁₁) atteint une adaptation de -20,51 dB à la fréquence de 5,8 GHz et présente une deuxième résonance à -18,63 dB à la fréquence de résonance de 9,7 GHz, Ces deux valeurs indiquent une très bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation. L'énergie réfléchié est donc très faible, ce qui améliore significativement l'efficacité de l'antenne dans cette bande de fréquence.

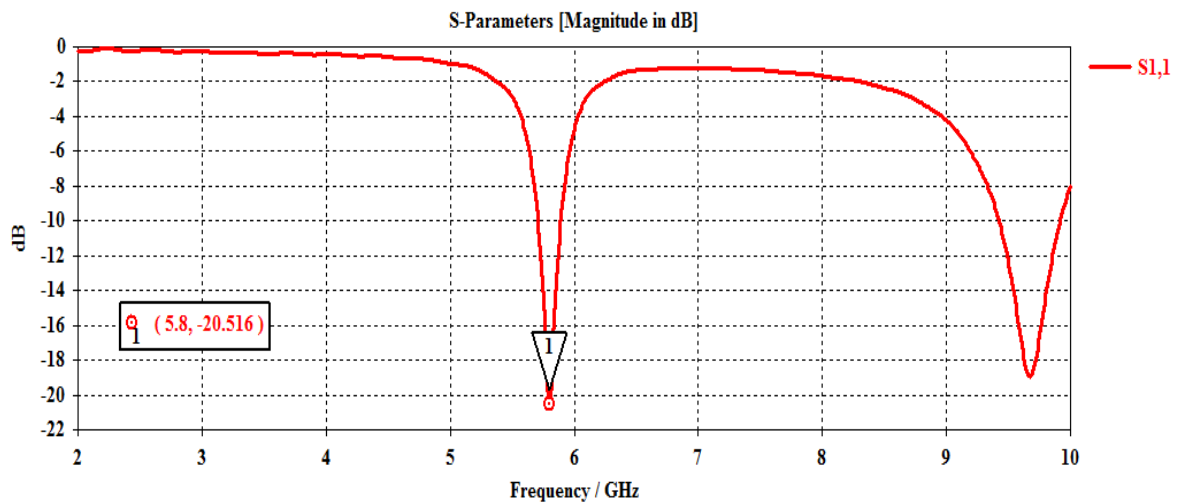


Figure III.44: Le coefficient de réflexion de l’antenne patch triangulaire avec encoche.

- **Rapport d'ondes stationnaire VSWR**

La figure III.45 illustre un rapport d’ondes stationnaires (VSWR) de 1.20. Cette valeur proche de l’idéal (1) confirme une très bonne adaptation d’impédance. Cela signifie que la majorité de la puissance transmise est bien rayonnée, avec très peu de pertes par réflexion, ce qui est essentiel pour assurer une transmission efficace.

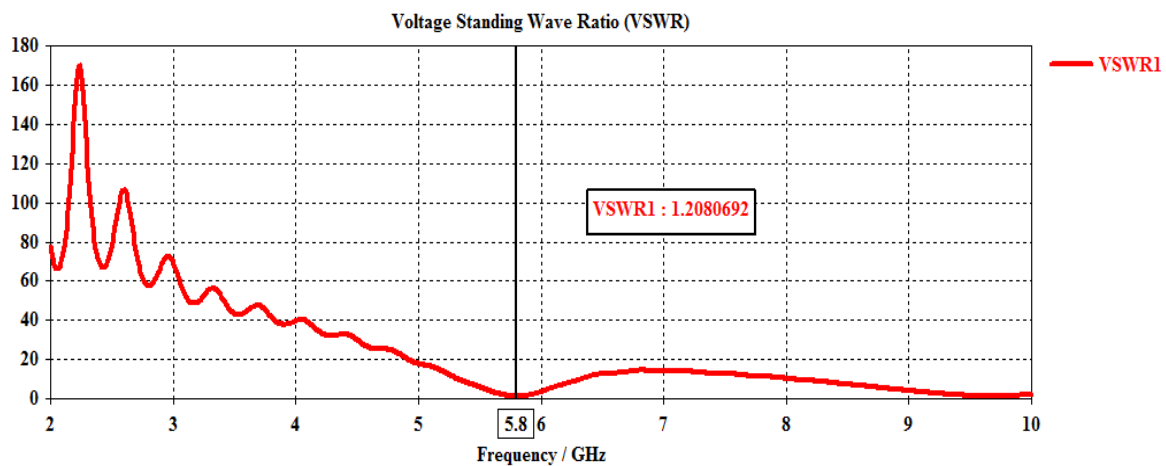


Figure III.45: Le VSWR de l’antenne patch triangulaire avec encoche.

- **Le Gain**

Dans la figure III.46, le gain de l’antenne est évalué à 1.24 dBi à 5,8 GHz. Ce gain modéré témoigne d’une capacité de rayonnement satisfaisante pour une antenne compacte. Il montre que l’antenne est capable de rayonner efficacement tout en conservant une structure simple et adaptée à des applications peu directives.

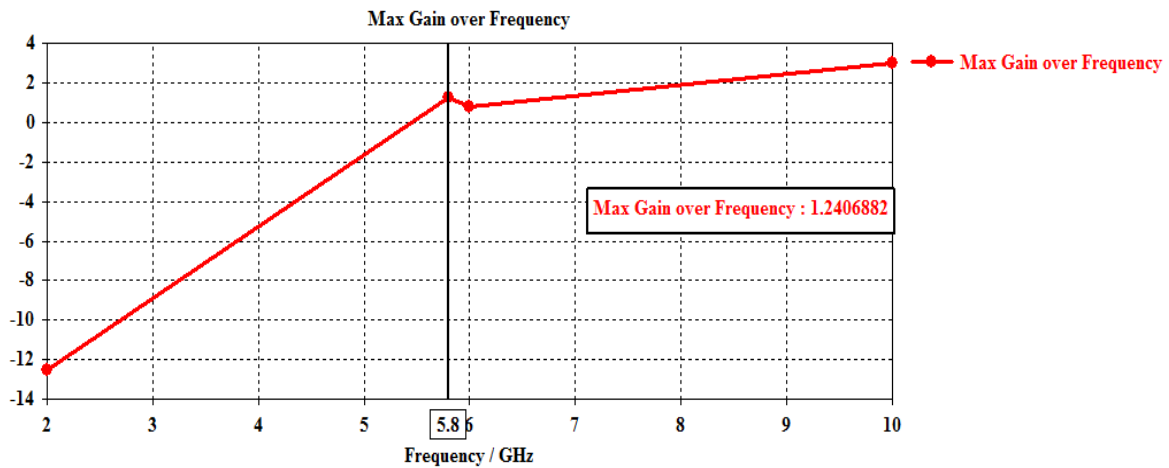


Figure III.46: Gain de l'antenne patch triangulaire avec encoche.

- **Le diagramme de rayonnement**

La figure III.47 présente le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne, qui révèle un comportement quasi omnidirectionnel. Ce type de rayonnement est particulièrement utile pour les applications nécessitant une couverture étendue. Comme le montre le diagramme de rayonnement 2D dans les plans E et H, avec des angles d'ouverture à 3 dB de 107.1° et 100.5° respectivement. Ces larges angles illustrent une bonne dispersion du rayonnement, ce qui est avantageux dans les environnements mobiles où la direction de réception varie constamment.

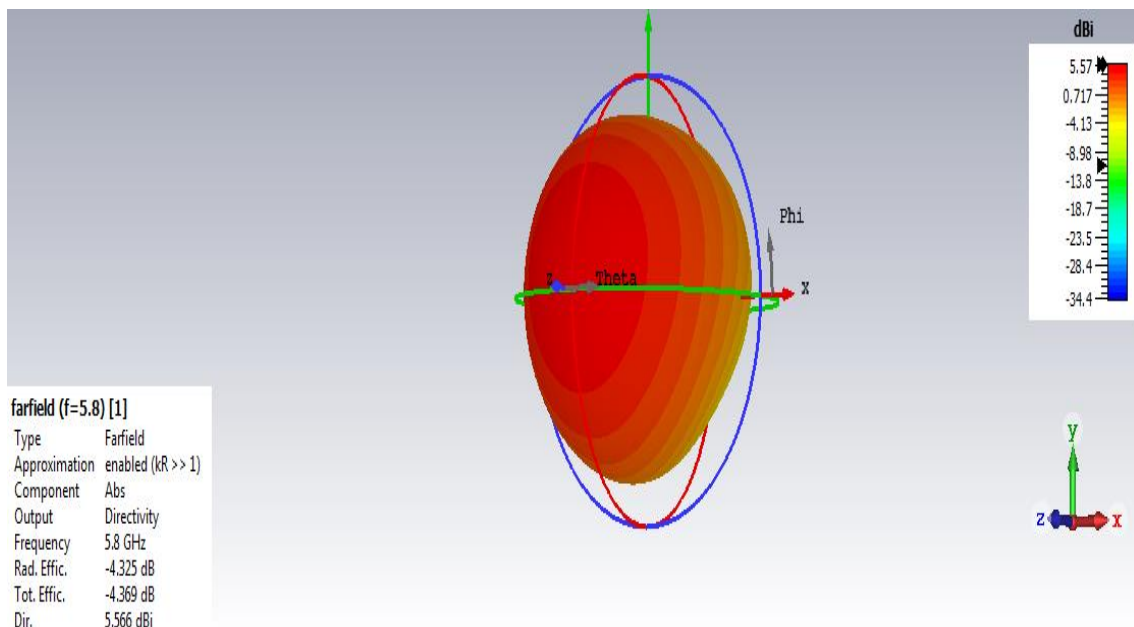


Figure III.47: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne triangulaire avec encoche.

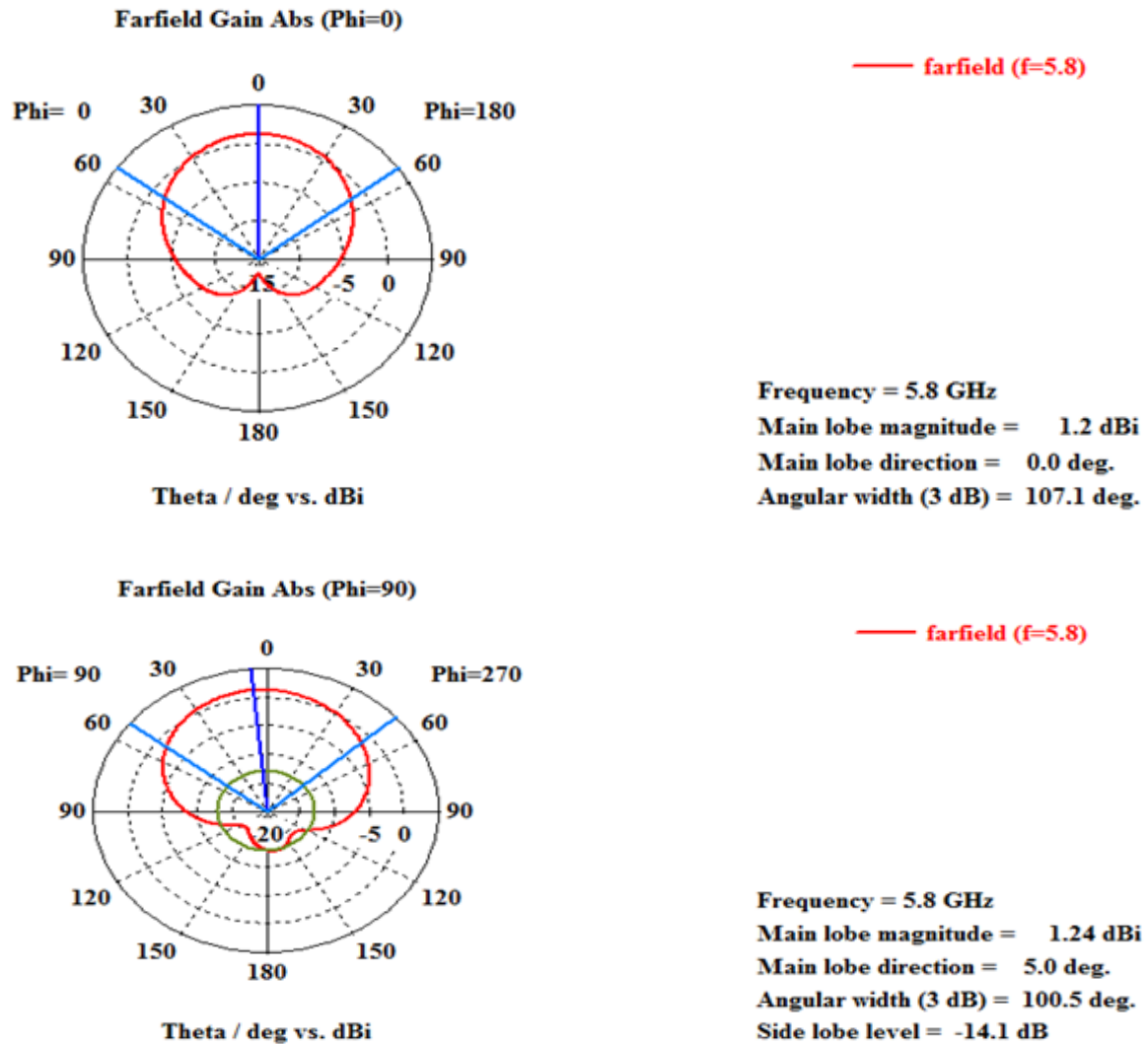


Figure III.48: Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne triangulaire avec encoche pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

III.5.2 Reconfigurabilité de l'antenne triangulaire par diode Varicap

Après optimisation de l'adaptation d'impédance, La reconfigurabilité en fréquence de l'antenne patch triangulaire a été réalisée à l'aide d'une diode Varicap SMV1231-079. Ce composant permet de modifier la capacité équivalente du circuit en fonction de la tension de polarisation, ce qui entraîne un déplacement dynamique de la fréquence de résonance sans modifier la géométrie de l'antenne. Dans cette étude, une valeur typique de $C_v = 2.17$ pF a été utilisée pour simuler un état de fonctionnement. Cette approche offre une solution simple, compacte et adaptable pour les systèmes de communication multi bandes.

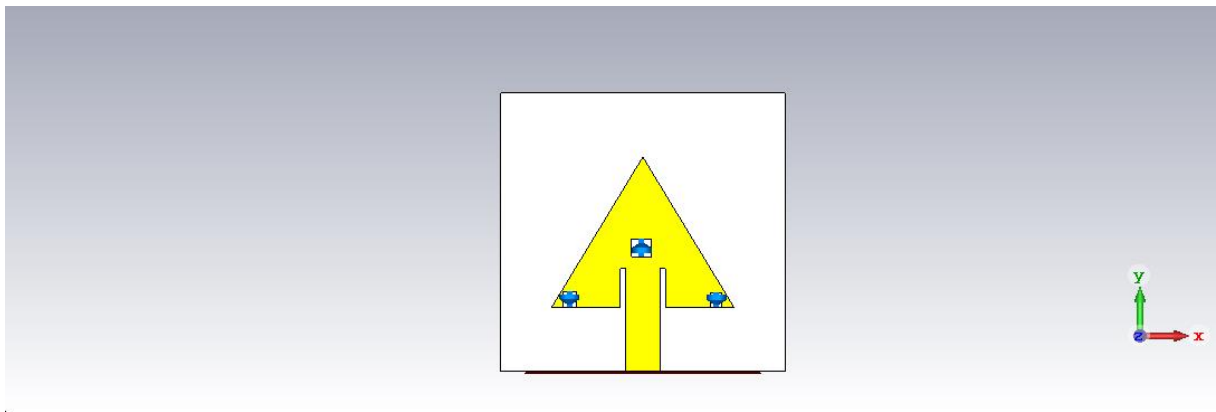


Figure III.49: Antenne triangulaire avec diode Varicap.

- Coefficient de réflexion S11

La figure III.50 montre l'évolution du coefficient de réflexion S11 de l'antenne triangulaire en fonction de la capacité variable C_v de la diode Varicap. On observe un décalage net de la fréquence de résonance lorsque le C_v varie entre 0.4 pF et 1.28 pF, traduisant un comportement typique de reconfiguration.

La meilleure adaptation est atteinte à 5.848 GHz pour un $C_v = 2.4$ pF avec un $S_{11} = -27.97$ dB, ce qui reflète une excellente adaptation d'impédance et présentant une multi résonance à 4,6 et 9,8 GHz.

La variation capacitive permet ainsi d'ajuster la fréquence de fonctionnement de l'antenne sans modifier sa structure physique, démontrant l'efficacité de la reconfigurabilité par Varicap. Certaines courbes suggèrent également un comportement multi bande potentiel, à explorer pour des applications élargies.

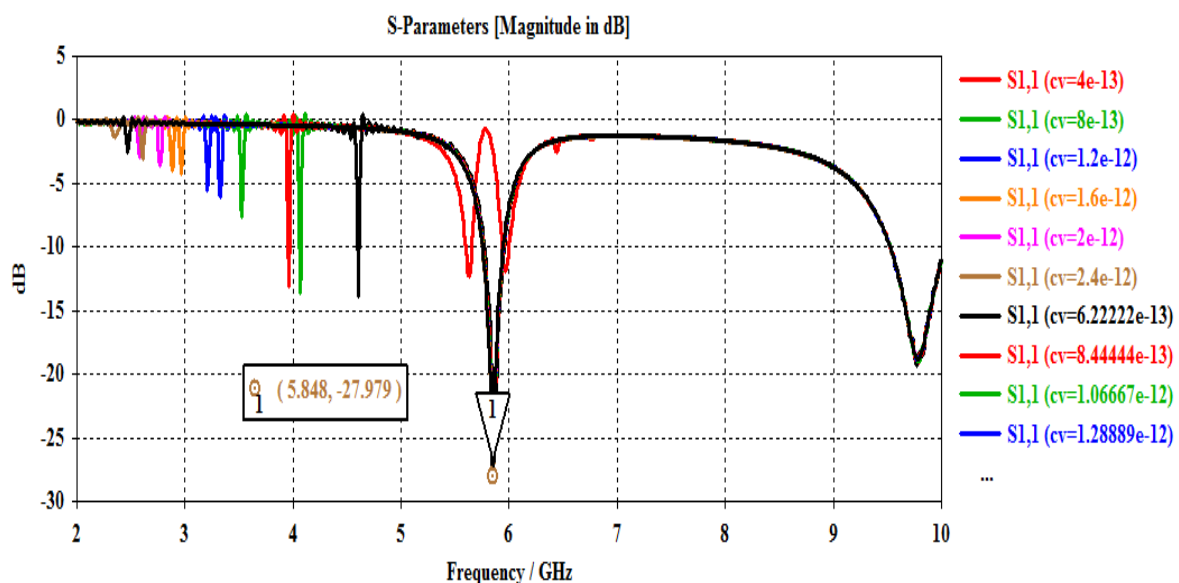


Figure III.50: Coefficient de réflexion de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.

• Rapport d'ondes stationnaire VSWR

La figure III.51 illustre le VSWR de l'antenne triangulaire reconfigurable par diode Varicap. On y observe une valeur minimale de l'ordre de 1.08 à la fréquence cible de 5.84 GHz, confirmant une très bonne adaptation d'impédance.

Ce faible taux d'onde stationnaire indique que l'intégration de la diode Varicap n'a pas affecté négativement les performances d'appariement. Ainsi, la quasi-totalité de la puissance transmise par la ligne d'alimentation est efficacement rayonnée par l'antenne, ce qui est un critère clé de performance en environnement RF reconfigurable.

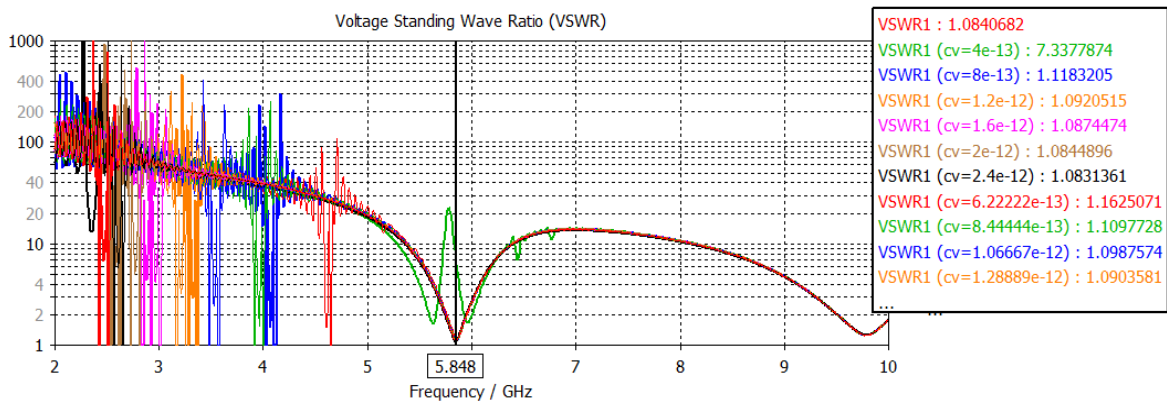


Figure III.51: Le VSWR de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.

• Le Gain

La figure III.52 indique que le gain de l'antenne patch triangulaire varie entre 0.42 et 1.29 dBi après l'intégration de la diode Varicap. Ce gain a été un peu amélioré de 1,24 initiale à 1,29 dBi pour une variation de capacité entre 0,6 et 1,2 pF. Ainsi, l'antenne conserve des performances fiables tout en bénéficiant d'une flexibilité, ce qui est essentiel pour des systèmes de communication adaptatifs.

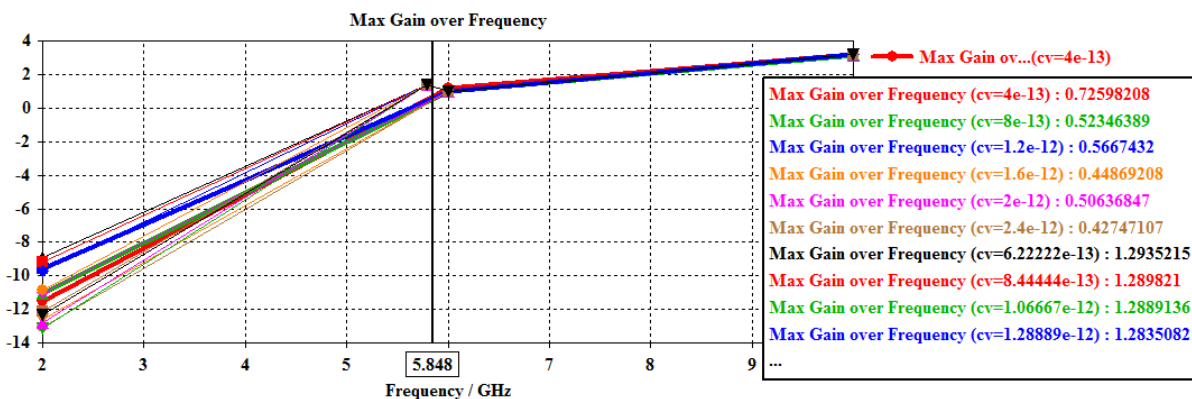


Figure III.52: Gain de l'antenne patch triangulaire par diode Varicap.

- Le diagramme de rayonnement

La figure III.53 présente le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch triangulaire reconfigurée par diode Varicap. Le diagramme 3D conserve une forme globalement omnidirectionnelle, témoignant de la stabilité du rayonnement spatial malgré l'ajout du composant actif.

Dans La figure III.54 les diagrammes 2D dans les plans E ($\Phi = 0^\circ$) et H ($\Phi = 90^\circ$) montrent une bonne symétrie et une largeur de faisceau modérée. Ces résultats indiquent que la directivité, la couverture angulaire et la forme du faisceau sont préservées, assurant une fiabilité du comportement rayonnant même en mode reconfiguré.

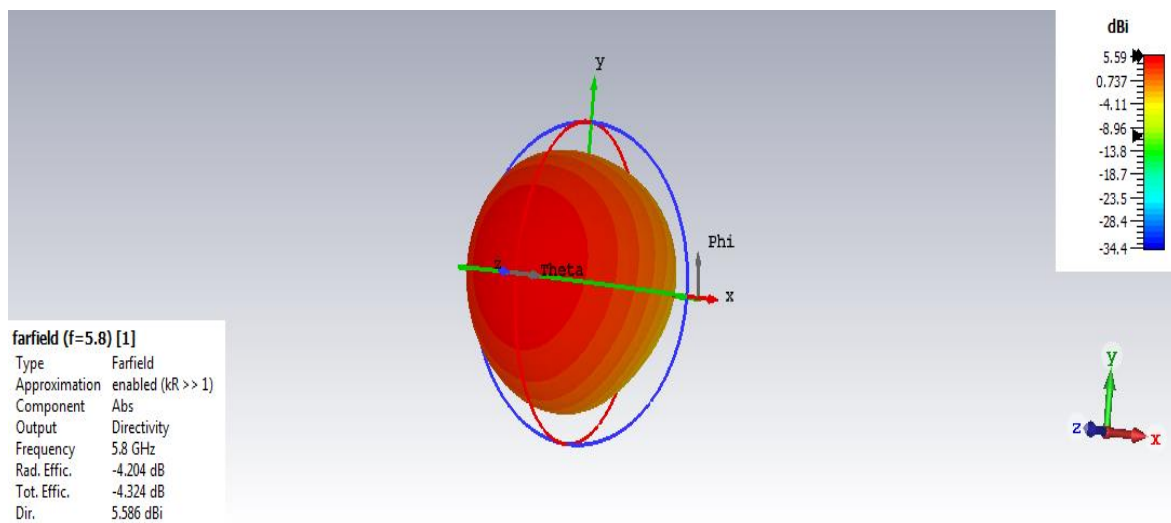
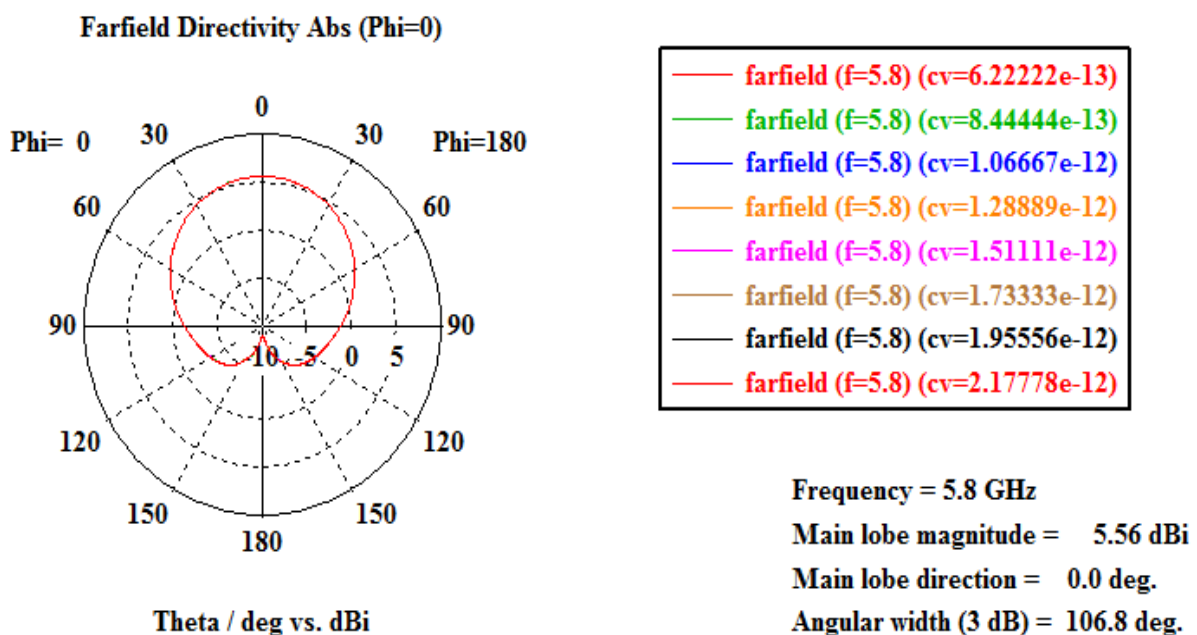


Figure III.53 : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne triangulaire avec diode Varicap.



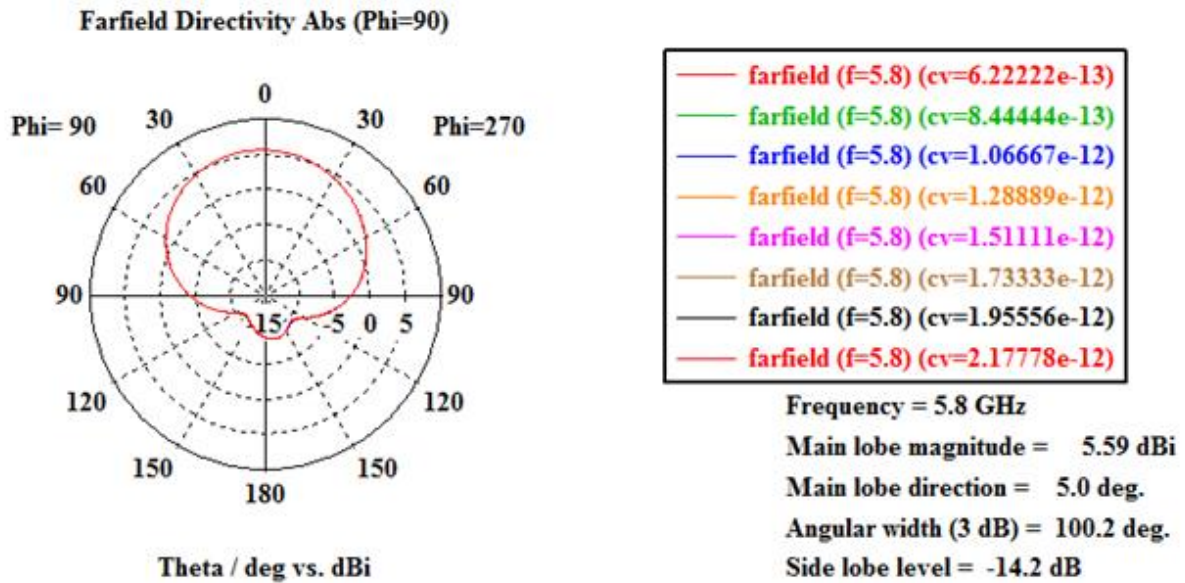


Figure III.54 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne triangulaire avec diode Varicap pour ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé et analysé plusieurs structures d'antennes patch micro-ruban en mettant l'accent sur leur capacité à être reconfigurées en fréquence. L'étude s'est appuyée sur des simulations réalisées avec le logiciel CST Studio Suite 2019, permettant d'évaluer les performances électromagnétiques des antennes à travers différentes approches de conception.

La première partie a porté sur la comparaison entre deux substrats FR-4 et Rogers RT5880, appliqués à une antenne patch rectangulaire. Les résultats ont montré que le substrat Rogers, grâce à ses faibles pertes diélectriques, améliore sensiblement les performances de l'antenne en termes d'adaptation, de gain et de directivité. L'introduction d'encoches a également permis de corriger la fréquence de résonance et d'améliorer l'adaptation d'impédance.

Par la suite, la mise en place d'un réseau de deux antennes a permis de renforcer la directivité et d'augmenter le gain total. Ce type de configuration démontre un comportement multi bande intéressant. Une autre approche a consisté à remplacer le cuivre par du Graphene pour tirer parti de ses propriétés exceptionnelles, notamment sa conductivité ajustable. Les simulations ont révélé que ce matériau permet une adaptation dynamique sans altération de la structure, offrant ainsi une voie prometteuse vers des antennes plus intelligentes et performantes.

Enfin, des dispositifs électroniques tels que les diodes PIN et Varicap ont été intégrés aux antennes circulaires et triangulaires respectivement. Ces composants, en modifiant leur état ou leur capacité, ont permis d'ajuster électroniquement les bandes de résonance de manière efficace, sans nécessité de modifier physiquement la géométrie des antennes.

En conclusion, les différentes techniques de reconfigurabilité abordées dans ce chapitre montrent qu'il est possible d'atteindre la reconfigurabilité d'une antenne par des méthodes variées que ce soit via le choix des matériaux, les ajustements géométriques ou l'intégration de composants.

Conclusion Générale

L'évolution constante des technologies de communication sans fil impose des solutions de plus en plus performantes, adaptables et compactes. Dans ce cadre, les antennes reconfigurables représentent aujourd'hui un axe stratégique dans la recherche et le développement des systèmes de télécommunication modernes.

Ce mémoire s'est inscrit dans cette dynamique, en explorant les principales techniques de reconfigurabilité appliquées aux antennes patch multi-bandes, aussi bien du point de vue théorique que dans le milieu de simulation.

La première partie de ce travail a permis de poser les fondements nécessaires en présentant les différents types d'antennes, leurs structures, caractéristiques et domaines d'utilisation. Une attention particulière a été portée aux antennes patch, qui allient simplicité, faible coût et adaptabilité, en les plaçant au centre des systèmes embarqués actuels.

L'étude s'est ensuite orientée vers les antennes reconfigurables, qui se distinguent par leur capacité à modifier dynamiquement certaines propriétés électromagnétiques (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement, etc.). Plusieurs approches technologiques ont été examinées : l'intégration de diodes (PIN, Varicap), l'utilisation de transistors FET, de commutateurs RF-MEMS, ainsi que l'emploi de matériaux intelligents tels que le graphène. Chaque méthode offre un degré différent de flexibilité et de performances, en fonction des contraintes d'implémentation et des objectifs d'application.

La partie optimisation, quant à elle, s'est appuyée sur le logiciel CST Studio 2019 pour concevoir et simuler plusieurs structures d'antennes. Des prototypes rectangulaire, circulaire et triangulaire ont été modélisés en intégrant différents mécanismes de reconfiguration. Les simulations ont mis en évidence l'impact des choix de substrats (FR4, Rogers), de composants actifs et de matériaux agiles sur les performances globales des antennes, notamment en matière de coefficient de réflexion, gain, bande passante et diagramme de rayonnement. Les résultats ont démontré la faisabilité et l'efficacité des techniques explorées. L'utilisation de diodes a permis une reconfiguration rapide entre différentes bandes de fréquences, tandis que l'emploi du graphène a montré un fort potentiel pour des solutions innovantes basées sur des variations de propriétés matérielles sans composants électroniques.

Comme perspective, ce mémoire donne la possibilité d'intégrer ces antennes dans des systèmes intelligents via les systèmes multi-agents, en vue d'une gestion autonome et optimisée des ressources spectrales. Cette perspective ouvre la voie à des applications dans les réseaux adaptatifs, la radio cognitive et les environnements IoT.

En somme, ce travail met en évidence la pertinence des antennes reconfigurables comme réponse aux nouveaux défis des communications sans fil. Il constitue une base solide pour des recherches futures, notamment dans le domaine de l'intelligence embarquée, de la miniaturisation, et des systèmes de communication de nouvelle génération.

Bibliographies

- [1] S.Bounebbab, H. S. (2017). Étude et conception d'antennes à résonateurs diélectriques . Tlemcen : Mémoire master.
- [2] Azzeddine, B. M. (2022). Etude et conception d'antennes PIFAs fractales quadribandes pour les différents systèmes de communication sans fils. Tlemcen: Mémoire master Faculté de technologie Université Aboubakr Belkaïd.
- [3] Rabia, M. A. (2017). Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelle . Tlemcen: Mémoire master.
- [4] HAMDIKEN, N. (2017). Application de nouvelles méthodes de modélisation et d'optimisation dans l'étude des antennes microbandes et des systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO (Doctoral dissertation, Université de Batna 2). Modifié par google scholar.
- [5] Kdrouci, A. (2021). Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID . Tlemcen: Mémoire de fin d'études
- [6] Bachir, Z. (2015). Modélisation d'une antenne micro ruban compacte. Master académique, Université EchahidHamma Lakhdar-El oued.
- [7] BENOMAR, Ahmed. "Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques.: Application aux Réseaux de Télécommunications ". Thèse de doctorat. Limoges, 2015.
- [8] Benderradji, R. G. (2018). Effet de Diamètre d'un Concentrateur Solaire Parabolique Sur la Distribution du Flux. Eloued: Mémoire de fin d'étude, Université d' Eloued.
- [9] Iméne, R. (2020). Synthèse d'un réseau d'antennes adaptatif pour une topologie circulaire. M'sila: Mémoire de fin d'étude
- [10] Ladjal, S. (2024). Etude et Conception d'antenne patch planaire avec réseau de fentes pour des applications de communication multifréquence (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI).
- [9]Kdrouci, A. (2021). Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID . Tlemcen: Mémoire de fin d'études.

- [11] Li, L., Yan, J. B., O'Neill, C., Simpson, C. D., & Gogineni, S. P. (2022). Coplanar side-fed tightly coupled ultra-wideband array for polar ice sounding. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(6), 4331-4341.
- [12] Abdallaoui, I. A. (2018). "Contribution à l'analyse CEM globale de structures et de circuits. Application aux antennes Vivaldi en présence d'un système non linéaire pour la récupération d'énergie: une approche FDTD". Thèse de Doctorat, Normandie Université.
- [13] Rasilainen, K., Phan, T. D., Berg, M., Pärssinen, A., & Soh, P. J. (2023). Hardware aspects of sub-THz antennas and reconfigurable intelligent surfaces for 6G communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 41(8), 2530-2546.
- [14] Ouasli, F. (2013). Conception d'une caméra électromagnétique pour la caractérisation du niveau d'exposition des personnes . Bretagne: Université européenne . Thèse de Doctorat.
- [15] Debab, M. (2020). Contribution à l'étude et à la conception d'antennes destinées aux télécommunications Multi-Bandes et Large-Bande. Sidi Bel Abès: Mémoire de fin d'étude.
- [16] GHAOUTI, M., & MOULESSEHOUL, W. (2023). Les antennes imprimées pour la 5G (Doctoral dissertation).
- [17] MENDJEL INSSAF, K. D. I. (2024). ETUDE ET ANALYSE D'UNE ANTENNE MIMO 4× 4 A DEUX BANDES REJETEES POUR LES APPLICATIONS ULTRA LARGE BANDE (ULB).
- [18] Kumar, G., & Kumar, R. (2019). A survey on planar ultra-wideband antennas with band notch characteristics: Principle, design, and applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 109, 76-98.
- [19] Kada, B. E. C. H. A. R. E. F., Turkiya, A. B. E. S., & Keltouma, N. O. U. R. I. (2019, November). Application of Metamaterials for the Design of Antenna. In 2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA) (pp. 1-4). IEEE.
- [20] Deghfel, W. M. (2017). Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée. M'SILA: Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed Boudiaf.

- [21] Soltane, S. (2015). ETUDE ET CARACTERISATION D'ANTENNES IMPRIMEES POUR SYSTEME ULTRA-LARGE BANDE (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [22] IKRAM, B. S. (2023). Optimisation des réseaux d'antennes reconfigurables dans la radio cognitive destinés aux applications satellitaires. Tlemcen: Université Aboubakr Belkaïd Faculté de TECHNOLOGIE.
- [23] DARBOE, O. K. (2019). A 28 GHz rectangular microstrip patch antenna for 5G applications. International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 12, no 6, p. 854-857.
- [24] Mosbah, S. (2023). Modélisation et réalisation d'un capteur micro-onde à base de méta-matériaux (Doctoral dissertation).
- [25] MOHAMED, G. (2016). Conception d'une antenne "PIFA" multi-bandes pour applications sans fil. Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.
- [26] Mihad, B. H., Lamia, G. H. E. R. B. I., & Fouad, C. H. E. B. B. A. R. A. (2018). Étude D'une Antenne Microbande Rectangulaire Avec Une Couche Protectrice.
- [27] Rafik, A. Analyse Evaluation De La Fréquence De Résonance Complexe Et De La Bande Passante D'une Antenne Microbande Rectangulaire Par La Méthode Neurospectrale. Batna: mémoire de Magister en Electronique, Département d'Electronique .
- [28] Boufrioua, A. (2006). Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant. Constantine: Thèse de Doctorat, Université Mentouri.
- [29] Eddin, T. M. (2014). Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire. Biskra: mémoire de master en Télécommunications, Département d'Electronique, Mohamed Khider .
- [30] Benamrane, F. (2011). Conception d'une antenne patch microstrip . (Fès) MAROC: Université Sidi Mohamed Ben Abdellah ,Master télécoms hyperfréquence .

- [31] Chihi, I. L. (2022). Conception d'une antenne patch micro-ruban rectangulaire pour applications biomédicales. Mémoire de fin d'étude, faculté des sciences et de la technologie univ bba.
- [32] Ammar, R. (2018). Etude d'une antenne microruban de forme arbitraire par la méthode FDTD. Setif: Mémoire de fin d'étude, Univeristé Ferhat Abbas .
- [33] Pinault, B. (2024). Évaluation de topologies d'amplificateurs faible bruit et robustes en filière GaN pour applications radar ou télécom en bande X (Doctoral dissertation, Université de Toulouse).
- [34] HAOUED MOUISSA, N. M. (2017). L'effet d'une cellule AMC sur la bande passante d'une antenne patch. Ouargla: Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah.
- [35] SONTHALIA, Manisha et SIKDAR, D. C. "Production of starch from mango (*Mangifera Indica* L.) seed kernel and its characterization." *International journal of technical research and applications* 3.3 :346-349, 2015.
- [36] Smith, D. R., Yurduseven, O., Mancera, L. P., Bowen, P., & Kundtz, N. B. (2017). Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna. *Physical Review Applied*, 8(5), 054048.
- [37] Zhang, Yan, Song, Zhe, Hong, Wei, Mitra, Raj, « Wideband high-gain $\hat{\pm}45^\circ$ dualpolarisedstacked patch Antennaarray for Ku-band back-haul services », *ET Microwaves, Antennas& Propagation*, 202
- [38] Guerhazi, M., Kanoun, O., & Derbel, N. (2013, April). Reduction of anisotropy influence and contacting effects in in-vitro bioimpedance measurements. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 434, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.
- [39] CHENINA, H. (2022). Contribution à la modélisation des vibrations et des turbulences dans les satellites optiques (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [40] O. A. Civil, P. H. Pathak, P. Janpugdee' and B. A. Mu Surface Waves On A Finite Planar
- [41] MADANI YOUSFI, Z. (2021). Réseau d'antennes Vivaldi pour des applications médicales . Tlemcen: Mémoire de fin d'études.

- [42] Majid, H. A., Abd Rahim, M. K., Hamid, M. R., & Ismail, M. F. (2014). Frequency reconfigurable microstrip patch-slot antenna with directional radiation pattern. *Progress In Electromagnetics Research*, 144, 319-328.
- [43] Dakhli, S. (2015). Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par métamatériaux: conception d'antennes, inspirée par métamatériaux (Doctoral dissertation, Université de Rennes; Université de Tunis. Faculté des sciences de Tunis).
- [44] Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., M. Abdulkhaleq, A., & A. Abd-Alhameed, R. (2020). Reconfigurable antennas: Switching techniques—A survey. *Electronics*, 9(2), 336.
- [45] Christodoulou, C. G., Tawk, Y., Lane, S. A., & Erwin, S. R. (2012). Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2250-2261.
- [46] Mansoul, A. (2016). Conception et réalisation d'antennes reconfigurables en fréquence (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [47] Nachouane, H. (2017). 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 (Thèse de Doctorat, Institut National des Postes et Télécommunications).
- [48] Trad, I. B. (2014). Antennes agiles pour les télécommunications multistandards (Doctoral dissertation, INSA de Rennes; Université de Tunis El-Manar. Faculté des Sciences de Tunis (Tunisie)).
- [49] Zainarry, S. N. M. (2019). Reconfigurable antennas based on varactor-loaded stubs (Doctoral dissertation, Ph. D. dissertation, The University of Adelaide, Adelaide SA 5005, Australia).
- [50] Nguyen-Trong, N., Kaufmann, T., Hall, L., & Fumeaux, C. (2015). Analysis and design of a reconfigurable antenna based on half-mode substrate-integrated cavity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(8), 3345-3353.
- [51] Nguyen, T. D. (2012). Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).

- [52] Zhao, Y., Wang, X., Li, X., & Liu, Y. (2019). Propriétés diélectriques des films minces de $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ pour dispositifs micro-ondes accordables. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(20), 19078–19085.
- [53] Liu, X., Zhang, J., & Tanaka, K. (2011). Comportement diélectrique des films minces de $LaTiO_2N$ pour applications micro-ondes. *Thin Solid Films*, 519(14), 4497–4501.
- [54]. Ali, A., Wang, S., & Zuo, C. (2023). Étude des céramiques de niobate-tantalate de potassium pour des applications diélectriques accordables. *Materials Today: Proceedings*, 73, 130–136.
- [55] Chen, H., Zhang, M., & Li, Y. (2020). Propriétés magnétiques douces des films minces d'alliage Co-Nb pour applications RF. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5342–5346.
- [56]. Wang, Z., Zhang, Y., & Liu, Q. (2019). Caractéristiques magnétiques et haute fréquence des films minces de Co-Zr. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 491, 165548.
- [57] Kim, J. H., Park, M. S., & Lee, D. H. (2023). Performances magnétiques des alliages à base de Fe-B dopés avec des métaux de transition pour dispositifs RF miniaturisés. *Magnetochemistry*, 9(4), 109.
- [58] https://www.unilim.fr/pages_perso/valerie.madrangear/Transistor-effet-champ.pdf, dernièrement consulté le 27 mars 2024.
- [59] Dragoman, M., & Dragoman, D. (2019). Gain and phase control in a graphene-loaded reconfigurable patch antenna. *Applied Physics Letters*, 115(13), 133103.
- [60] Ali, T., Pathan, S., & Biradar, R. C. (2018). Multiband, frequency reconfigurable, and metamaterial antennas design techniques: Present and future research directions. *Internet Technology Letters*, 1(6), e19.
- [61] El Kadri, S. S. (2011). Contribution à l'étude d'antennes miniatures reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- [62] Rutschlin, M., & Sokol, V. (2013). Reconfigurable antenna simulation: Design of reconfigurable antennas with electromagnetic simulation. *IEEE Microwave Magazine*, 14(7), 92-101.

- [63] CHOUHBANE, M. (2021). Etude et Conception d'une antenne Reconfigurable En Fréquence et en Diagramme de rayonnement. Université de Guelma.
- [64] Moslehi, S. A., Sobhani, A., & Komjani, N. (2025). Design and analysis of a frequency-reconfigurable terahertz graphene-based slot antenna. *Optics & Laser Technology*, 168, 109498.
- [65] ZEMAM, Y., & FOUKIA, A. E.(2017) Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs. Mémoire de Master ; Université de Tlemcen.
- [66] Chen, Y., Guo, H., Liu, Y., Li, J., Zhan, Y., Wu, Q., & Li, M. (2023). An L-slot frequency reconfigurable antenna based on MEMS technology. *Micromachines*, 14(10), 1945.
- [67] Ghosh, Basudeb; Sinha, Sachendra N.; and Kartikeyan, M. V. (2014). Fractal Apertures in Waveguides, Conducting Screens and Cavities: Analysis and Design, p.88. Volume 187 of Springer Series in Optical Sciences.
- [68] He, F. (2016). Design and implementation of reconfigurable patch antennas for wireless communications.
- [69] Saadaoui, S. (2019). Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [70] Sharma, V., et al. "Reconfigurable antennas in biomedical applications." *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022.
- [71] Wong, H., et al. "Reconfigurable antennas for satellite communications." *IEEE Access*, 2019.
- [72] Singh, P., & Prasad, R., "Frequency reconfigurable UHF antenna for RFID and TV bands," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2021.
- [73] Miao, Y., et al., "AI-based frequency reconfigurable antennas for intelligent IoT networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1123–1134, 2023.
- [74] Semtech Corporation. (s.d.). LoRa et LoRaWAN : Aperçu technique.
- [75] IEEE. (2016). Norme IEEE pour les réseaux sans fil à faible débit (IEEE 802.15.4).
- [76] Zayas, A. D., & Merino, P. (2017, May). The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)* (pp. 277-282). IEEE.
- [77] GSMA. (2017). Guide de déploiement LTE-M pour les opérateurs mobiles.