

الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE 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

Département des Télécommunications



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par :

- CHEKROUN Sid Ali Rezki - BOUKLI HACENE Diaa El Hak

Sujet

**Conception des antennes ULB reconfigurables pour la
réception dans la bande Ku.**

Soutenu publiquement, le 15/07/2023, devant le jury composé de

M. KAMECHE Samir
M.IRID Sidi Mohammed Hadj
M.KOURDI Zakarya
M. FEHAM Mohammed

Prof Université de Tlemcen
MCA Université de Tlemcen
MRA ASAL-CDS-Oran
Prof Université de Tlemcen

Président
Encadrant
Co-Encadrant
Examineur

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

***** REMERCIEMENTS *****

LE TRAVAIL PRESENTE DANS CE RAPPORT A ETE EFFECTUE A L'UNIVERSITE ABOU-BEKER BELKAID -TLEMCEN-

AVANT TOUT, NOUS REMERCIONS NOTRE SEIGNEUR D'AVOIR DONNE A L'HOMME LE POUVOIR DE RAISONNER ET D'EXPLORER LES VERITES DE L'UNIVERS.

QUE NOS REMERCIEMENTS LES PLUS SINCERES S'ADRESSENT A NOTRE ENCADRANT MR IRID SIDI MOHAMMED HADJ, MAITRE DE CONFERENCE CLASSE A A L'UNIVERSITE ABOU-BEKER BELKAID -TLEMCEN-, POUR AVOIR ACCEPTE DE SUPERVISER NOTRE TRAVAIL ET POUR NOUS AVOIR INITIE AUX BASES DE TELECOMMUNICATION SYSTEME, ET LE SOUTIEN INCONDITIONNEL, LES CONSEILS PRECIEUX ET LA PATIENCE SANS FIN QU'IL NOUS A GENEREUSEMENT FOURNIS PENDANT NOS RECHERCHES DE MEMOIRE.

QUE

NOS REMERCIEMENTS LES PLUS SINCERES S'ADRESSENT A NOTRE CO-ENCADRANT MR KOURDI ZAKARYA, MAITRE DE RECHERCHE CLASSE A AU CENTRE DEVELOPPEMENT DES SATELLITES A ORAN, POUR AVOIR ACCEPTE DE SUPERVISER NOTRE TRAVAIL. QUI MALGRE SES MULTIPLES RESPONSABILITES TANT SCIENTIFIQUES QUE PEDAGOGIQUES, A ACCEPTE DE METTRE A NOTRE DISPOSITION SON EXPERIENCE, SON ESPRIT DE SYNTHESE ET SES CONSEILS QUI NOUS ONT ETE UNE BASE D'APPUI POUR NOTRE TRAVAIL, ET SURTOUT DE NOUS AVOIR ACCORDE UNE GRANDE LIBERTE DANS L'EXPRESSION DE NOS IDEES.

NOS SINCERES REMERCIEMENTS A MONSIEUR KAMECHE SAMIR PROFESSEUR A L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID TLEMCEN DE NOUS AVOIR FAIT L'HONNEUR DE PRESIDER LE JURY DE SOUTENANCE.

NOUS REMERCIONS EGALEMENT MONSIEUR FEHAM MOHAMMED PROFESSEUR A L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID TLEMCEN DE NOUS AVOIR FAIT L'HONNEUR D'EXAMINER NOTRE TRAVAIL.

NOUS NE POURRIONS OUBLIER DE PRESENTER NOS VIFS REMERCIEMENTS ET NOTRE SINCERE GRATITUDE A TOUTES CELLES ET TOUS CEUX QUI NOUS ONT EPAULES DANS LES MOMENTS DURS ET NOUS ONT DONNE LA FORCE POUR CONTINUER ET ARRIVER AU BOUT DU TRAVAIL.

NOUS NE POUVONS TERMINER SANS EXPRIMER TOUTE NOTRE GRATITUDE A TOUS LES MEMBRES DE NOS FAMILLE ET NOS AMIS QUI NOUS ONT SOUTENU ET CONSEILLE TOUT LE LONG DE CE TRAVAIL.

***** DEDICACES *****



Je dédie ce mémoire de fin d'études avec grand amour, sincérité et fierté :

A ma chère mère et à mon cher père Mustapha

Pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Que Dieu vous procure bonne santé et longue vie, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

A mes chers frères Islem et Rayane

qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Il m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A mon cher binôme « Diaa » et à toute sa famille

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Merci pour tes efforts avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite dans ta vie personnelle et professionnelle.

SID ALI REZKI

DÉDICACES



Je dédie ce mémoire de fin d'études à mes parents. Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être. Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et longue vie. Pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études en espérant que vous serez

toujours fiers de moi.

A mon frère Salah-Eddine

pour son encouragements et toute l'aide qu'il n'a cessé de m'apporter tout au long de mes années d'études.

A ma chère sœur Rabab

pour son dévouement, sa compréhension et sa grande tendresse, qui par son soutien, ses conseils et son amour, m'a permis d'arriver jusqu'ici car elle a toujours cru en moi.

Ma nièce Yasmine et mon neveu Rachad, J'espère que je serai un bon exemple pour vous, et je ferai tout pour.

A mon cher binôme « Sid Ali » et à toute sa famille

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Merci pour ton effort avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite dans ta vie personnelle et professionnelle.

DIAA

Abbreviations

***** ABBREVIATIONS**

2D - deux Dimensions.

3D- trois Dimensions.

ARD- l'antenne à résonateur diélectrique.

BP- Bande passante.

C - célérité de la lumière dans le vide. $c = 3 \times 10^8$ m/s.

CSRR- complementary Split Ring Resonator

CST- MWS Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO.

Dmax- Directivité maximale

DNG- Double Négative

DPS- Double Positive

PV- Panel photovoltaic

RCST- Return Channel Satellite Terminal

RF- Radio Frequency

TDM- Time Division Multiplexing

TTC& M- Telemetry and Tele-command Control & Maintenance

IDU- In Door Unit

VSAT- Very Small Aperture Antenna

*** SOMMAIRE ***

*** Dédicaces ***	II
*** Abréviations	IV
*** Sommaire ***	IV
Liste des figures	VIII
Listes Des Tableaux	X
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les antennes	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur les antennes	4
I.3 Types des antennes.....	5
I.3.1. Antennes à fentes (demi ou quart d'onde).....	6
I.3.2. Antennes à ouverture (cornet).....	6
I.3.3. Antennes à réflecteurs (paraboles).....	7
I.3.4. Antennes patchs (planaires)	8
I.4 Caractéristiques des antennes.....	8
I.4.1 La Polarisation	9
I.4.2 Directivité.....	10
I.4.3 Gain.....	11
I.4.4 Le Rendement	11
I.4.5 Coefficient de réflexion	12
I.4.6. La bande passante	13
I.5. Antenne patch	14
I.5.1. Définition	14
I.5.2 Structure d'une antenne patch.....	15
I.5.3. Techniques d'alimentation.....	16
I.5.3.A. Alimentation avec contact.....	16
I.5.3.A-1 Alimentation par ligne microruban.....	16
I.5.3.A-2 Alimentation coaxiale directe	16
I.5.3.A-3Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse	17
I.5.3.B. Alimentation sans contact (par proximité)	18

Sommaire

I.5.3.B-1Alimentation par fente	18
I.3.3.B-2 Alimentation par ligne couplée	19
I.6. La bande Ku« Kurz-unten »	19
I.7 Conclusion	20
Chapitre II : Etude sur le antenne patch reconfigurable	21
II.1 Introduction.....	21
II-1-1 Techniques d’adaptation des antennes imprimées	21
II-1-2- Adaptation par ligne quart d’onde	22
II-1-3 Adaptation par stub	22
II-1-4 Adaptation avec encoche.....	23
II.2 Les antennes reconfigurables agiles	24
II.3.1 Les diodes PIN.....	24
II.3.2 Les diodes avec capacitives variables.....	25
II.3.3 Matériaux Agiles	26
II.3.4 Classification des antennes reconfigurables	26
II.3.4.A Reconfiguration fréquentielle	27
fréquences.....	27
II.3.4.B Reconfiguration du diagramme de rayonnement	28
II.3.4.C Reconfiguration de la polarisation	29
II.3.4.D La reconfiguration hybride	30
II.4 Nécessité de la reconfigurable	31
II.4.1 Applications des antennes reconfigurables.....	31
II.4.2 Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables	32
II.4.2.A Avantages	32
II.4.2.B Inconvénients	32
II.5 Conclusion	33
Chapitre III : Résultats et discussion de simulation antenne Patch reconfigurable.....	34
III.1. Introduction	34
III.2. PRESENTATION DU LOGICIEL CST MICROWAVE STUDIO	34
III.2.1 Description générale de l’interface CST	35
III.3. Design et structure de l’antenne	36
III.3.1.A La structure de l’antenne patch.....	37
III.3.1.B Dessiner le plan de masse	38

Sommaire

III.3.1.C La ligne microruban.....	38
III.3.1.D Le port de polarisation.....	39
III-4 Résultat et discussion	40
III-4-1 Antenne patch propose	40
III-4-1-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avant adaptation	40
III-4-1-B Adaptation de l'antenne.....	39
III-4-1-C Nouvelle structure de l'antenne	41
III-4-1-D Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch après adaptation	41
III-4-1-E Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)	41
III-4-1-F Le gain.....	42
III-4-1-G Le diagramme de rayonnement	42
III.4.2 Les différents matériaux utilisés dans l'antenne patch	44
III.4.3.Les diodes PIN	45
III-4-3-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avec diode PIN.....	45
III-4-3-B le taux d'onde stationnaire (VSWR) d'antenne patch avec diode PIN	46
III-4-3-C Le gain d'antenne patch avec diode PIN	46
III-4-3-D Le diagramme de rayonnement d'antenne patch avec diode PIN	47
III-4-3-E La distribution de courant d'antenne patch avec diode PIN	50
III.4.4. Diode Varicap	51
III-4-4-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avec diode varicap	51
III-4-4-B Paramètre VSWR d'antenne patch avec diode varicap	52
III-4-4-C Le Gain d'antenne patch avec diode varicap.....	52
III-4-4-E La densité de courant d'antenne patch avec diode varicap.....	56
III.5. Conclusion	57
Conclusion générale	58
Références	60

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I- 1 : Schéma de principe d'un système de communication radio [I-13].	5
Figure I- 2 : Antenne filaire Yagi [I-38].	6
Figure I- 3 : Antenne à fente [I-16].	6
Figure I- 4:(a) Antenne cornet (b) Antenne cylindrique[I-17].	7
Figure I- 5 : Antenne à réflecteur parabolique[I-18].	8
Figure I- 6 : Antenne patch[I-20].	8
Figure I- 7 : Différents types de polarisation [I-21].	9
Figure I- 8 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive[I-22].	10
Figure I- 9 : La directivité des antennes-rapport avant-arrière [I-23].	10
Figure I- 10 : Gain d'une antenne isotrope [I-23].	11
Figure I- 11 : Rayonnement d'une antenne[I-24].	12
Figure I- 12 : Coefficient de réflexion à l'entrée du réseau d'antennes [I-27].	13
Figure I- 13 : Bande passante[I-29].	13
Figure I- 14 : Géométrie d'une antenne patch[I-30].	14
Figure I- 15 : Différentes formes d'antennes patches[I-32].	15
Figure I- 16 : Alimentation par ligne microruban[I-35].	16
Figure I- 17 : Alimentation coaxiale directe[I-37].	17
Figure I- 18 : Alimentation coaxiale directe[I-39].	18
Figure I- 19 : Alimentation coaxiale directe[I-41].	19
Figure I- 20 : Alimentation par couplage[I-42].	19

Chapitre II :

Figure II- 1 : Adaptation par quart à adaptation quart d'onde [II-2].	22
Figure II- 2 : Stub en circuit ouvert [II-2].	23
Figure II- 3 : Patch rectangulaire [II-2].	23
Figure II- 4 : L'équivalence en circuit [II-2].	23
Figure II- 5 : Patch adapté par encoches de longueur [II-2].	23
Figure II- 6 : Schéma d'une diode PIN [II-5].	25
Figure II- 7 : Antennes RF MEMS pour applications sans fil[II-8].	25
Figure II- 8 : (a) Prototype de l'antenne utilisant un substrat de silicone extensible TC5005. (b) Vue de dessus et vue de dessous [II-11].	26
Figure II- 9 : Schéma des types d'antennes reconfigurables [II-12].	27

Liste des figures

Figure II- 10 : Prototype de l'antenne reconfigurable en fréquence: (a) vue de dessus et (b) vue de dessous [II-14].	27
Figure II- 11 : Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence [II-16].	28
Figure II- 12 : Réseau d'éléments déphasés pointant dans la direction (θ_0) [II-17].	29
Figure II- 13 : Antenne patch reconfigurable avec quatre états de polarisation [II-20].	30
Figure II- 14 : Géométrie de l'antenne Méandre optimisée vue du dessus en (A) et en dessous en (B) [II-22].	31

Chapitre III :

Figure III- 1 : Outil de simulation CST Studio Suite 2019.	35
Figure III- 2 : Interface du CST[III-2].	35
Figure III- 3: La structure du substrat.	37
Figure III- 4 : La structure de la masse.	38
Figure III- 5 :La structure du patch.	38
Figure III- 6: Structure d'un patch rectangulaire simple.	39
Figure III- 7 : Structure d'une antenne patch alimentée par une ligne micro ruban.	39
Figure III- 8 : Le coefficient de réflexion de l'antenne.	40
Figure III- 9 : Forme de l'antenne adaptée.	40
Figure III- 10 : La nouvelle structure de l'antenne.	41
Figure III- 11 : Coefficient de réflexion S_{11} .	41
Figure III- 12 : VSWR de l'antenne patch.	42
Figure III- 13 : Le gain à 12.5 GHz.	42
Figure III- 14 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à 12.5GHz en 3D et polaire.	43
Figure III- 15 : Antenne patch avec une diode PIN.	45
Figure III- 16 : Coefficient de réflexion de la diode dans état ON et OFF.	45
Figure III- 17 : VSWR de la diode dans état ON et OFF.	46
Figure III- 18 : Le gain dans l'état de diode OFF.	46
Figure III- 19 : Le gain dans l'état de diode ON.	47
Figure III- 20 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état diode PIN OFF en 3D et polaire.	48
Figure III- 21 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état diode PIN ON en 3D et polaire.	49
Figure III- 22 : La distribution de courant de la diode PIN dans l'état OFF.	50
Figure III- 23 : La distribution de courant de la diode PIN dans l'état ON.	50

Liste des figures

Figure III- 24 : Antenne rectangulaire avec diode varicap.....	51
Figure III- 25 : Coefficient de réflexion de la diode varicap.	52
Figure III- 26 : VSWR de la diode varicap.	52
Figure III- 27 : La variation du gain d'une antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.	53
Figure III- 28 :Diagramme de rayonnement de l'antenne diode varicap en 3D et polaire.....	55
Figure III- 29: La distribution de courant de la diode varicap.	56

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre I :

Tableau I- 1 : Equations paramétriques d'un patch [I-31].	15
Tableau I- 2 :La bande Ku« Kurz-unten » [I-44].	20

Chapitre III :

Tableau III- 1 : Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.	36
Tableau III- 2 : Les résultats des différents matériaux utilisés.	44
Tableau III- 3 : Les résultats des fréquences et de bande passante en fonction de la valeur de la capacité.	54

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les antennes jouent un rôle fondamental dans les systèmes de communication sans fil, permettant la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Leur conception et leur optimisation sont des éléments clés pour garantir des performances fiables et efficaces des systèmes de communication. Dans ce contexte, les antennes patches reconfigurables ont suscité un intérêt croissant ces dernières années, offrant des capacités d'adaptation et de flexibilité dans les applications de communication sans fil.

Les antennes patches sont des structures microstrip largement utilisées en raison de leur profil bas, de leur légèreté et de leur compatibilité avec les technologies d'intégration. Elles sont constituées d'un patch conducteur placé sur un substrat diélectrique et associé à un plan de masse. Les antennes patches reconfigurables permettent de modifier leurs propriétés électromagnétiques, telles que la fréquence de résonance, la polarisation, le diagramme de rayonnement et le gain, en fonction des besoins spécifiques des systèmes de communication.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est d'étudier en détail les antennes patches reconfigurables, en explorant leurs caractéristiques, leurs techniques de reconfiguration et leurs applications potentielles. Pour atteindre cet objectif, le projet est organisé en plusieurs chapitres qui suivent une progression logique.

Le chapitre I présente une introduction générale sur les antennes, en mettant l'accent sur les différents types d'antennes existants et leurs caractéristiques. Les antennes filaires telles que le dipôle, le monopôle et la Yagi, les antennes à fentes, les antennes à ouverture, les antennes à réflecteurs et les antennes patches font partie des types d'antennes abordés [1][2][3].

Ensuite, le chapitre II se concentre sur l'étude des antennes patches reconfigurables. Il présente les différentes techniques de reconfiguration utilisées, telles que l'utilisation de diodes PIN, de diodes avec capacités variables et de matériaux agiles. De plus, les différentes classifications des antennes reconfigurables sont explorées, notamment la reconfiguration fréquentielle, la reconfiguration du diagramme de rayonnement, la reconfiguration de la polarisation et la reconfiguration hybride [4] [5].

Le chapitre III est dédié à la simulation et à la discussion des résultats des antennes patches reconfigurables. Il présente le logiciel CST Microwave Studio utilisé pour les simulations et examine en détail la conception et la structure des antennes patches. Les résultats des simulations sont analysés, y compris les paramètres de réflexion, le voltage standing wave ratio (VSWR), le gain et le diagramme de rayonnement. De plus, les différents matériaux utilisés dans les antennes patches et l'utilisation de diodes PIN et de diodes varicap sont également discutés [6].

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats et contributions du projet de fin d'étude.

Ce mémoire vise à approfondir la compréhension des antennes patchs reconfigurables, en explorant les différentes techniques de reconfiguration et en évaluant leurs performances. Les antennes patchs reconfigurables offrent un potentiel significatif dans les applications de communication sans fil, offrant des avantages tels que l'adaptabilité aux conditions de propagation, la multi-bande et la diversité de polarisation. Cependant, il est également important de considérer les inconvénients potentiels liés à ces antennes, tels que la complexité de conception et les contraintes de fabrication [1] [5].

Chapitre I :

Généralités sur les antennes

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

I.1 INTRODUCTION

Le vaste sujet des systèmes reconfigurables [I-1] [I-6] a suscité une grande attention au cours des dernières décennies et a fait l'objet d'une recherche active ces derniers temps. Les antennes reconfigurables [I-7] constituent un segment important des systèmes reconfigurables visant à atteindre la reconfigurabilité principalement dans les régimes RF, micro-ondes et ondes millimétriques du spectre de fréquences. Les tendances technologiques et les applications telles que les communications 5G, l'internet des objets (IoT), les véhicules autonomes, les réseaux spatiaux et terrestres intégrés devenant de plus en plus importantes, il est d'autant plus nécessaire de développer des technologies de conception nouvelles et de pointe pour parvenir à la reconfigurabilité dans les systèmes d'antennes. Cet article de synthèse vise à fournir aux lecteurs une perspective des avancées récentes dans le domaine des antennes reconfigurables, les innovations technologiques qui démontrent des caractéristiques reconfigurables, les dernières tendances de croissance et la traction dans cette discipline et le point de vue des auteurs sur les perspectives futuristes des technologies qui pourraient être mises en œuvre dans des applications commercialisées. Il convient de noter que plusieurs articles de synthèse ont été publiés précédemment sur les antennes reconfigurables. Toutefois, un nombre important de développements nouveaux et innovants ont été signalés depuis la parution de ces articles. Cet article d'analyse se concentre donc principalement sur la présentation d'un résumé des développements récents importants dans ce domaine, ainsi que sur les perspectives d'avenir pour les systèmes de la prochaine génération.

Les antennes reconfigurables sont des antennes ou un réseau d'éléments d'antennes qui peuvent réaliser de manière dynamique une modification réversible de la fréquence de fonctionnement, des propriétés du diagramme de rayonnement, des modes de polarisation, des caractéristiques de la largeur de bande ou une combinaison de quelques-uns ou de tous ces aspects pour s'adapter à une application spécifique. Ces antennes présentent l'avantage majeur d'être multifonctionnelles par nature, ce qui réduit le nombre d'antennes nécessaires et donc l'empreinte totale occupée pour atteindre de multiples objectifs spécifiques. Les antennes reconfigurables en fréquence peuvent s'adapter dynamiquement à différentes fréquences de fonctionnement, ce qui évite de devoir concevoir des systèmes d'antennes multibande. Les antennes reconfigurables en termes de diagramme peuvent orienter le faisceau de rayonnement principal, placer des zéros aux endroits angulaires prévus et modifier la forme du diagramme, la directivité et le gain des antennes en fonction des applications auxquelles elles sont destinées.

Cela contraste avec la technologie des antennes intelligentes et adaptatives où la commutation adaptative du faisceau dépend largement d'un réseau externe de formation de faisceau au lieu d'un mécanisme de réglage interne. Les antennes reconfigurables en termes de polarisation, quant à elles, peuvent passer d'un état de polarisation à un autre, par exemple d'un modèle à polarisation verticale à un modèle à polarisation circulaire. Cette caractéristique multifonctionnelle des antennes reconfigurables a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années.

La reconfigurabilité d'un système d'antenne est généralement obtenue en modifiant dynamiquement le chemin parcouru par les courants sur la structure ou en changeant l'ouverture effective de l'antenne. En outre, dans le cas d'un réseau d'éléments d'antenne, on y parvient traditionnellement en personnalisant l'amplitude et la phase des excitations des radiateurs individuels. Il existe une pléthore de techniques décrites dans la littérature qui permettent d'atteindre les objectifs susmentionnés. L'approche électrique la plus populaire consiste à incorporer des systèmes micro-électromécaniques RF (MEMS) et des commutateurs actifs dans la configuration de conception de l'antenne [I-8, I-11], ce qui génère ensuite une réponse de commutation dynamique pour modifier efficacement la distribution du courant. Récemment, des matériaux artificiels tels que les méta matériaux et les méta surfaces se sont révélés efficaces pour obtenir des caractéristiques reconfigurables et accordables pour les applications d'antennes [I-2]. Le mécanisme de commutation peut également être déclenché par des phénomènes induits optiquement tels que les effets photoconducteurs [I-12], les plasmas induits optiquement (OIP), etc. En outre, la reconfiguration mécanique de plusieurs parties du système d'antenne peut également donner lieu à des caractéristiques électriques accordables [I-7].

I.2 GENERALITES SUR LES ANTENNES

Dans les systèmes utilisant la propagation dans l'espace libre tels que la radiodiffusion, le radar ou le faisceau hertzien, il est essentiel d'avoir des éléments qui assurent la transition entre une onde guidée (comme une ligne de transmission ou un guide d'onde) et une onde rayonnée, et vice versa. Ces éléments de transition sont appelés antennes. Grâce à leur structure géométrique spécialement conçue à cet effet, les antennes permettent de détacher les champs électromagnétiques de leur support métallique.

De plus, une antenne peut être utilisée pour orienter le signal dans une direction souhaitée en concentrant les champs électromagnétiques dans une région spécifique de l'espace. Dans ce chapitre, nous allons décrire les principes caractéristiques des antennes.

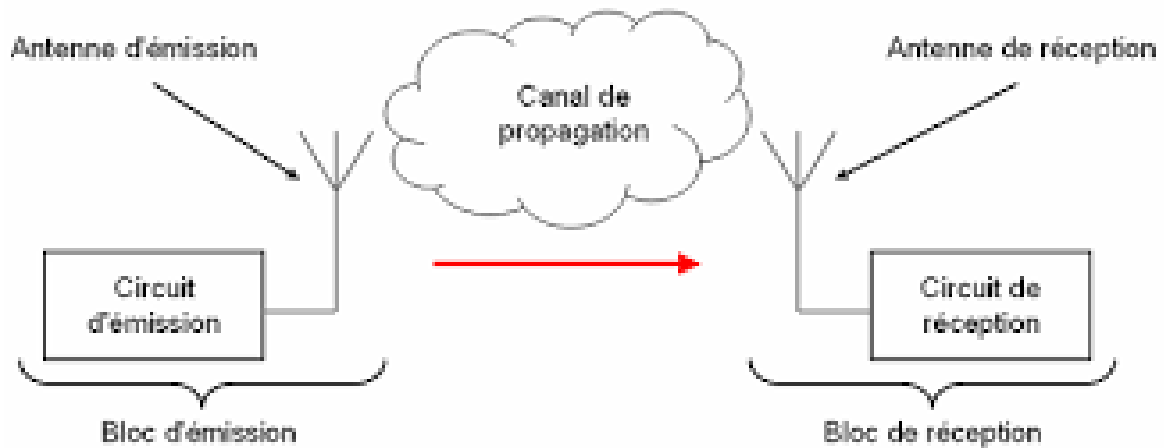


Figure I- 1 : Schéma de principe d'un système de communication radio [I-13].

Une antenne est un dispositif physique qui permet à la fois l'émission et la réception des ondes électromagnétiques. Elle est composée généralement d'éléments conducteurs, tels que des fils métalliques ou des plaques, spécialement conçus pour rayonner ou capter les ondes électromagnétiques dans une direction spécifique. Lorsqu'elle est utilisée pour l'émission, l'antenne transforme un signal électrique en une onde électromagnétique qui se propage dans l'espace. Lorsqu'elle est utilisée pour la réception, l'antenne capte les ondes électromagnétiques présentes dans l'environnement et les convertit en signaux électriques pouvant être traités par un récepteur [I-14].

I.3 TYPES DES ANTENNES

Il existe plusieurs types d'antennes classées par rapport à leur principe de fonctionnement et leur rôle dans le domaine de la télécommunication :

I.3.1. Antennes filaires (dipôle, monopôle, Yagi)

La catégorie des antennes filaires englobe toutes les antennes constituées d'une structure de câble conducteur de faible diamètre, où l'on considère des densités linéiques de courant. Les antennes de base dans cette catégorie comprennent les dipôles, les monopoles et les boucles. Pour analyser ces types d'antennes, il est possible de les décomposer en petites parties appelées antennes élémentaires ou doublets d'Hertz.

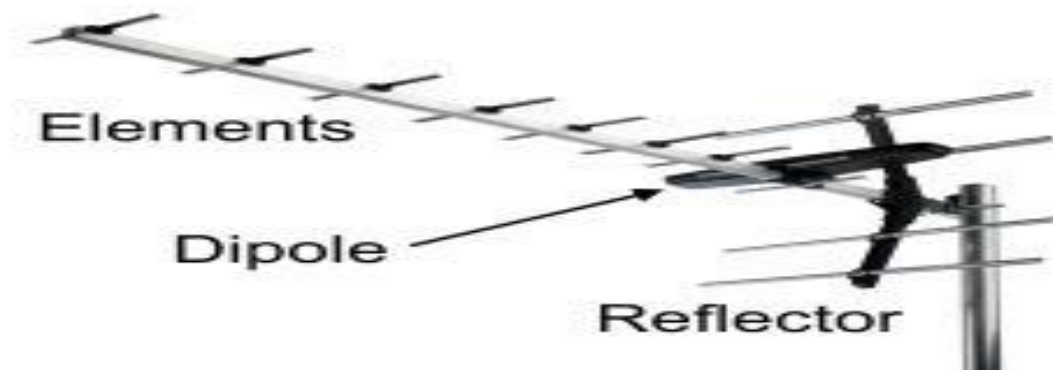


Figure I- 2 : Antenne filaire Yagi [I-38].

I.3.2. Antennes à fentes (demi ou quart d'onde)

L'antenne à fente est un type d'antenne largement utilisé en radiofréquence et en télécommunications pour la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Elle se compose d'une ouverture étroite pratiquée dans une plaque métallique, alimentée par une source de signal.

L'un des principaux avantages de l'antenne à fente réside dans sa capacité à fonctionner sur une large bande de fréquences, ce qui en fait un choix populaire pour les applications nécessitant une large couverture spectrale. De plus, sa conception et son installation sont relativement simples, ce qui facilite sa fabrication et sa mise en place. [I-15].

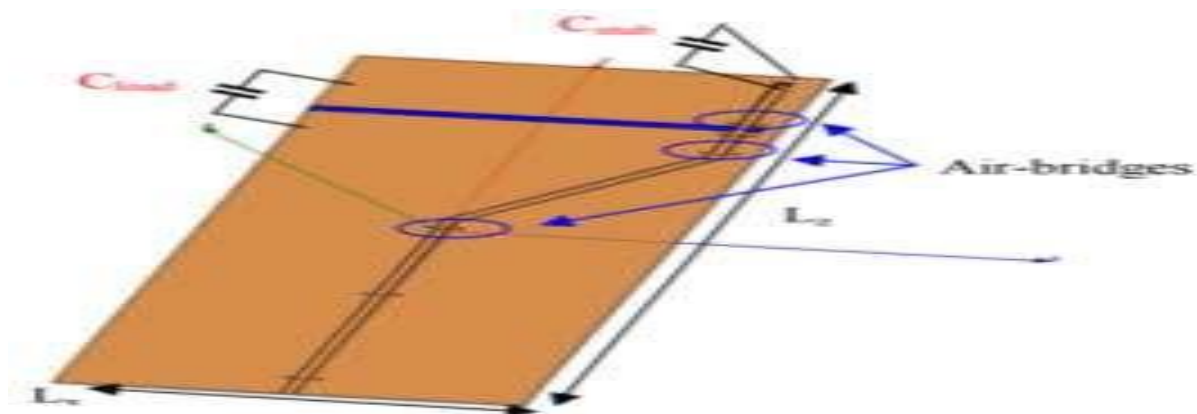


Figure I- 3 : Antenne à fente [I-16]

I.3.3. Antennes à ouverture (cornet)

L'ouverture rayonnante peut être rectangulaire pour la polarisation linéaire ou circulaire pour la polarisation circulaire.

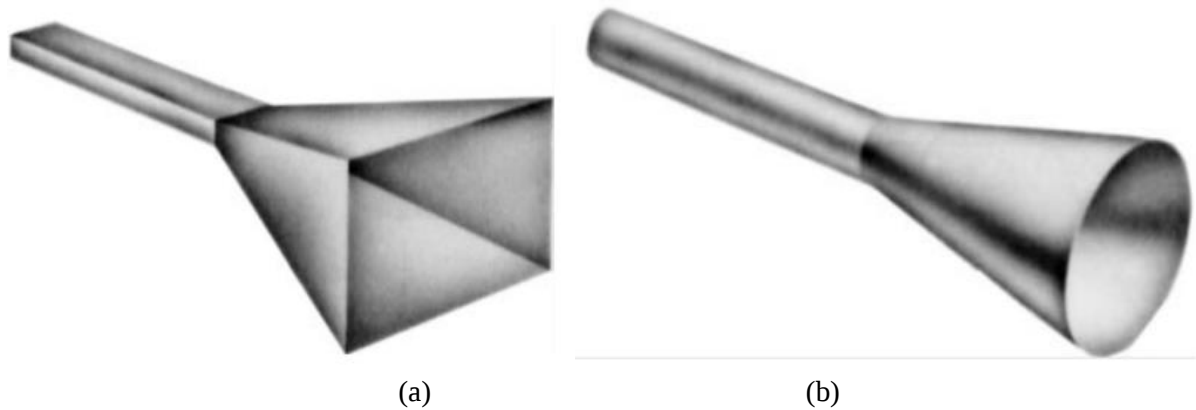


Figure I- 4:(a) Antenne cornet (b) Antenne cylindrique[I-17].

I.3.4. Antennes à réflecteurs (paraboles)

Une antenne à réflecteur est composée d'une source d'émission et d'une partie réfléchissante métallique, généralement de forme parabolique. La source est positionnée au foyer de la parabole, émettant ainsi des ondes vers le réflecteur parabolique. La propriété bien connue de la parabole permet à tous les rayons d'être réfléchis de manière parallèle. Ce type d'antenne est utilisé pour une visée précise dans une direction spécifique, car tous les rayons passant par le foyer se propagent parallèlement. En ajustant la position de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur peuvent être inclinés par rapport à l'axe de la parabole. [I-18]. Les antennes à réflecteur sont largement utilisées pour recevoir des signaux provenant de satellites situés à une distance considérable, et elles sont particulièrement courantes dans les installations de réception télévisuelle. Pour éviter les perturbations causées par des conditions météorologiques telles que la pluie ou la neige, ces antennes sont souvent équipées d'un radôme protecteur. Les antennes exposées aux éléments et utilisées pour les transmissions hertziennes se distinguent par leur forme caractéristique : elles sont paraboliques à l'arrière et coniques à l'avant, résultant de la forme du radôme qui protège la source placée au foyer. Cela permet de préserver la qualité du signal et de garantir des performances optimales, même dans des conditions climatiques difficiles.



Figure I- 5 : Antenne à réflecteur parabolique[I-18].

I.3.5. Antennes patchs (planaires)

L'antenne imprimée, également connue sous le nom d'antenne patch, est un type d'antenne relativement récent qui gagne en popularité tant dans son développement que dans son utilisation. Elle est composée d'un matériau diélectrique avec un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une structure métallique gravée permet de générer des courants de surface responsables du rayonnement électromagnétique, comme illustré dans la figure I.6. Les courants sont acheminés de la source d'alimentation vers l'antenne par le biais d'une ligne micro ruban. [I-19].

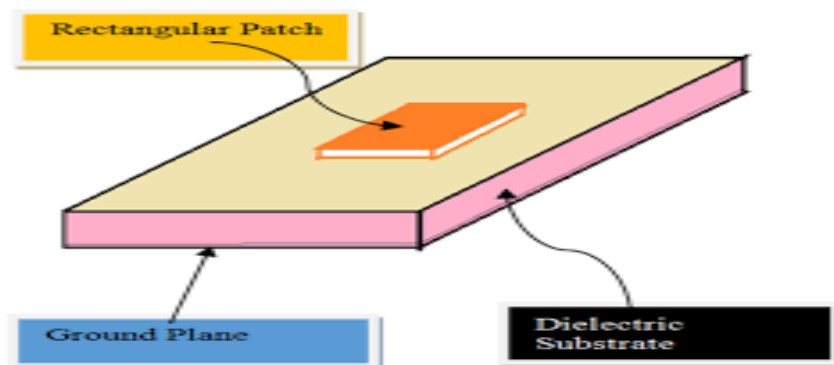


Figure I- 6 : Antenne patch[I-20].

I.4 CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

Les caractéristiques principales d'une antenne sont :

- La polarisation
- Le diagramme de rayonnement
- Directivité
- Le gain
- Le rendement
- Coefficient de réflexion
- La bande passante

I.4.1 La Polarisation

La polarisation d'une antenne est définie par la direction du champ électrique ($\vec{E}$) de l'onde qu'elle émet. Par exemple, un dipôle demi-onde horizontal aura une polarisation horizontale, tandis que d'autres antennes peuvent avoir une polarisation elliptique ou circulaire.

En ce qui concerne la réception terrestre, il est possible de constater qu'une antenne de type Yagi atténue le signal d'un facteur de 10 (soit 10 dB) lorsqu'elle est tournée du mode de réception horizontale au mode de polarisation verticale pour un même émetteur.

Lors de la réception, si la polarisation de l'onde reçue diffère de celle de l'antenne, cela entraîne une atténuation, qui peut être totale si les polarisations sont perpendiculaires. La polarisation circulaire est utilisée lorsque les antennes d'émission et de réception sont orientées de manière aléatoire, comme c'est le cas pour les satellites en mouvement ou non stabilisés..

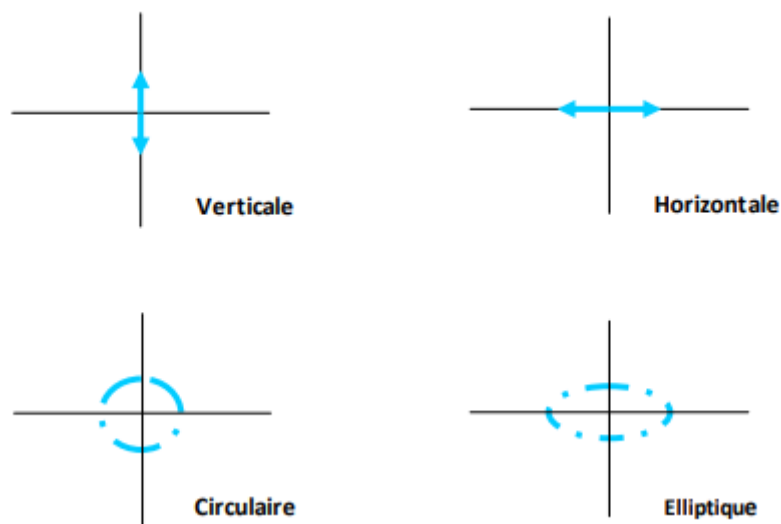


Figure I- 7 : Différents types de polarisation [I-21].

I.4.2 Le diagramme de rayonnement

L'antenne isotrope, qui émettrait de manière égale dans toutes les directions, est un modèle théorique qui ne peut être réalisé exactement dans la pratique. En réalité, l'énergie émise par une antenne est répartie de manière inégale dans l'espace, privilégiant certaines directions spécifiques. Ces directions sont représentées par des "lobes de rayonnement". Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions, que ce soit dans le plan horizontal ou dans le plan vertical en incluant le lobe principal.

Il est important de noter que le sol environnant et les objets conducteurs à proximité de l'antenne peuvent influencer considérablement le diagramme de rayonnement. Ainsi, la conductibilité du sol et la présence d'objets conducteurs peuvent modifier la façon dont l'énergie est rayonnée.

Les mesures des caractéristiques des antennes sont généralement réalisées en espace libre ou en chambre anéchoïque, afin de minimiser les effets indésirables des réflexions et des interférences avec l'environnement.

Le diagramme de rayonnement complet d'une antenne peut être résumé à l'aide de quelques paramètres clés qui sont utiles pour décrire ses performances et son comportement.

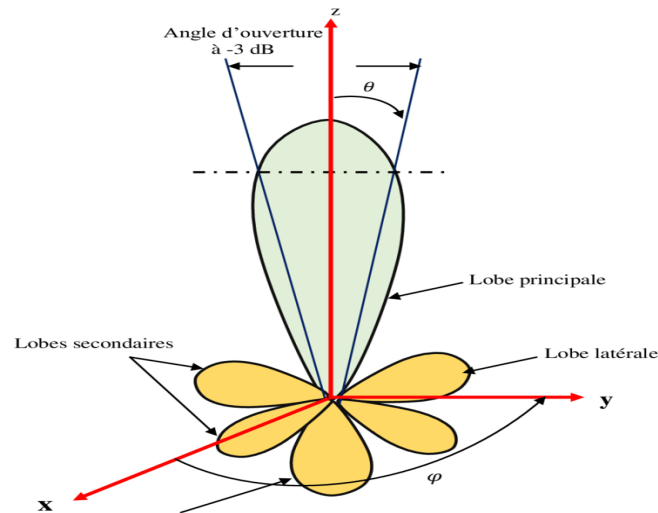


Figure I- 8 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive [I-22].

I.4.3 Directivité

La directivité de l'antenne dans le plan horizontal est un facteur crucial lors du choix d'une antenne. Une antenne équi-directive ou omnidirectionnelle émet de manière uniforme dans toutes les directions du plan horizontal. En revanche, une antenne directive présente un ou deux lobes nettement plus importants que les autres, appelés "lobes principaux". Sa directivité dépendra de la largeur du lobe principal, mesurée entre les angles d'atténuation à 3 dB. La dimension de l'antenne est un paramètre essentiel pour déterminer sa directivité. Les antennes dotées d'une directivité élevée et d'un gain important seront toujours de grande taille par rapport à la longueur d'onde. Il existe des relations mathématiques basées sur la transformation de Fourier qui relient les caractéristiques spatiales d'une antenne à son diagramme de rayonnement.

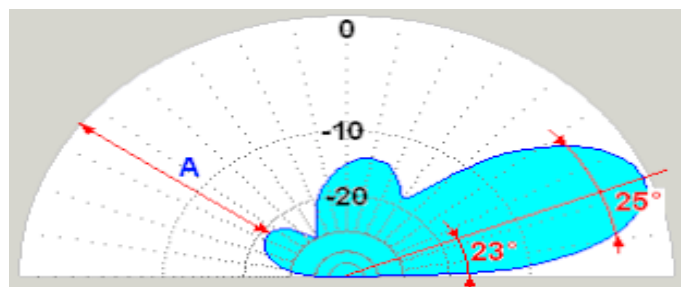


Figure I- 9 : La directivité des antennes-rapport avant-arrière [I-23].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} \quad (I - 1)$$

I.4.4 Gain

Le gain d'une antenne se réfère à l'amplification de la puissance émise ou reçue dans le lobe principal. Ce phénomène est dû à la focalisation de l'énergie dans une direction spécifique, similaire à la concentration de l'énergie lumineuse à l'aide d'un miroir et/ou d'une lentille convergente. Le gain est généralement exprimé en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope). Dans le cas des antennes, un élément réflecteur tel qu'un écran plan ou une parabole peut jouer le rôle du miroir, tandis qu'un élément directeur (par exemple, dans une antenne Yagi) peut agir comme une lentille.

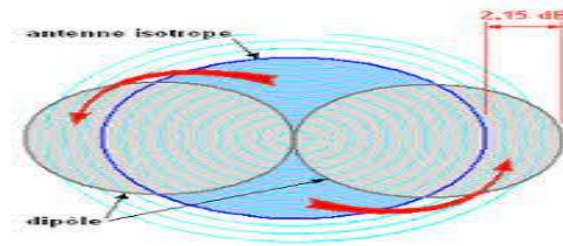


Figure I- 10 : Gain d'une antenne isotrope [I-23].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_t}{4\pi R^2}} = 4\pi R^2 \frac{P(\theta, \varphi)}{\iint P(\theta, \varphi)} \quad (I - 2)$$

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m^2).

P_0 : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m^2).

P_t : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

I.4.5 Le Rendement

La puissance réellement rayonnée par une antenne est la somme des puissances émises dans toutes les directions. Le rendement de l'antenne est défini par le rapport entre cette puissance rayonnée et la puissance fournie par la ligne de transmission. La résistance présentée par l'antenne, qui est la partie réelle de son impédance, a deux composantes principales : la résistance de rayonnement et la résistance de pertes.

La résistance de rayonnement correspond à l'énergie absorbée par l'antenne et rayonnée dans l'espace. En revanche, la résistance de pertes représente l'énergie absorbée par l'antenne et dissipée sous forme de chaleur, soit par effet Joule dans les résistances, soit par pertes dans les diélectriques.

Le rendement de l'antenne dépend du rapport entre ces deux résistances. Une antenne présentera un bon rendement si la résistance de pertes est négligeable par rapport à la résistance de rayonnement. Les antennes telles que le dipôle demi-onde ou le monopole ont généralement une résistance de rayonnement bien plus élevée que leur résistance de pertes, ce qui maintient leur rendement élevé. En revanche, si les dimensions de l'antenne sont réduites par rapport au dipôle demi-onde, la résistance de rayonnement diminuera, ce qui pose un réel problème de rendement. Dans ces cas, il devient important de réduire également la résistance de pertes en améliorant la qualité des surfaces conductrices ou en élargissant les conducteurs.

Lorsqu'on considère la puissance appliquée à l'entrée de la ligne de transmission, le rendement est naturellement plus faible, car une partie de l'énergie est dissipée dans cette ligne. Les pertes de la ligne sont exprimées en décibels par unité de longueur, pour une fréquence spécifique. Si la ligne est mal adaptée, elle peut également générer des ondes stationnaires, ce qui entraînera des pertes supplémentaires.

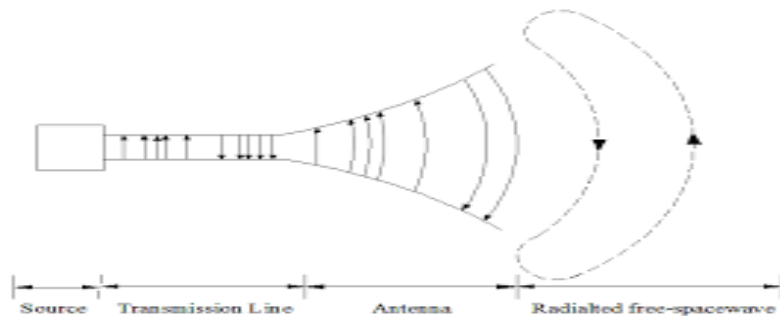


Figure I- 11 : Rayonnement d'une antenne[I-24].

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (I - 3)$$

Où :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (I - 4)$$

I.4.5 Coefficient de réflexion

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle défini par les paramètres S[I-25].

A_1, A_2, B_1, B_2 Sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} B_1 &= S_{11}A_1 + S_{12}A_2 \\ B_2 &= S_{21}A_1 + S_{22}A_2 \end{aligned} \quad (I - 5)$$

Le coefficient S_{11} correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A_2 = 0$.

Le coefficient S_{12} représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque $A_1 = 0$.

Le coefficient S_{21} est le gain du quadripôle lorsque $A_2 = 0$.

Le coefficient S_{22} est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $A_1 = 0$.

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne.

C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation [I-26]

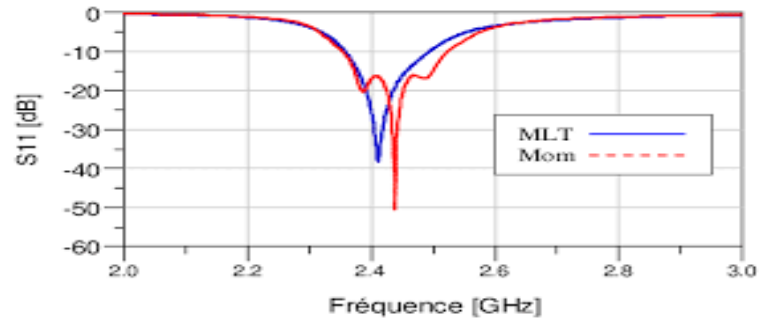


Figure I- 12 :Coefficient de réflexion du réseau d'antennes [I-27].

I.4.6. La bande passante normaliser

La bande passante (BW : BandWidth) est la plage de fréquences déterminée en général à un taux d'onde stationnaire égal à 2 (ce qui est égal à presque -10dB de la courbe du coefficient de réflexion) [I-28].

Le rapport de la bande passante en % est donné par l'expression :

$$\text{Le rapport de la bande passante } BW\% = \frac{F_{Max} - F_{MIN}}{F_R} \times 100 \quad (I - 6) \text{ (GHz)}$$

Pour les antennes reconfigurables :

$$BW\% = \frac{F_{Max} - F_{MIN}}{F_{Max} + F_{MIN}} \times 200 \quad (I - 7)$$

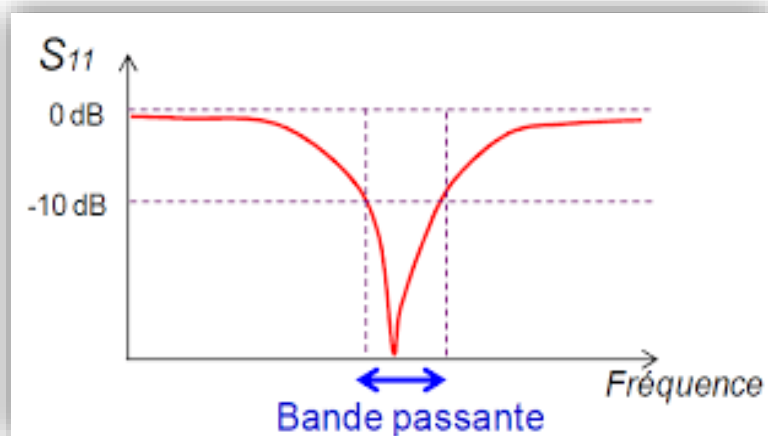


Figure I- 13 : Bande passante[I-29].

I.5. ANTENNE PATCH

I.5.1. Définition

Une antenne patch se compose d'une forme quelconque (rectangulaire, circulaire, rainurée, ou d'autres formes plus complexes) déposée sur la surface d'un substrat diélectrique, émergeant de l'autre côté sous la forme d'un plan conducteur (plan de masse). Parmi les différentes configurations d'antenne patch, la forme rectangulaire est la plus répandue, et nous décrirons en détail sa structure ci-dessous. La taille du patch est généralement choisie pour correspondre à une demi-longueur d'onde, déterminée par la fréquence de résonance souhaitée. Étant donné que le plan de masse ne peut pas être infini, il peut être dimensionné jusqu'à trois ou quatre fois la longueur d'onde, laissant parfois trop d'espace vide. Il est préférable que le substrat présente une constante diélectrique faible et une épaisseur négligeable par rapport à la longueur d'onde, tout en ayant des pertes minimales.

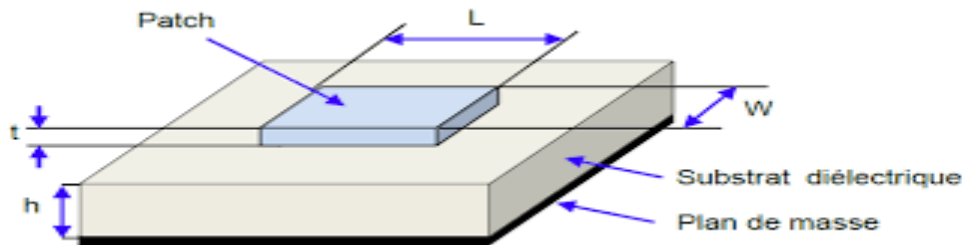


Figure I- 14 : Géométrie d'une antenne patch[I-30].

Paramètres de l'antenne	Équation
Longueur réelle du patch	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
Longueur effective	$L_{eff} = \frac{C}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
L'extension de longueur	$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{w}{h} + 0.8)}$
Constante diélectrique	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12\frac{w}{h})^{-1/2}$
Largeur du patch	$W = \frac{C}{2fr\sqrt{\epsilon_r + 1}}$
Longueur du substrat	$L_g = L + 6h$
Largeur du substrat	$W_g = w + 6h$
Largeur de la ligne	$W_f = \frac{8e^A}{h} \times h$ $A = \frac{Z\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} (\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}) \times (\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \times \ln \frac{4}{\pi})$

Tableau I- 1 : Equations paramétriques d'un patch [I-31].

Avec :

C : vitesse de lumière.

f : fréquence de résonance.

h : la hauteur du substrat diélectrique.

ϵ_r : la permittivité diélectrique du substrat.

I.5.2 Structure d'une antenne patch

La configuration la plus basique d'une antenne imprimée comprend un plan de masse, un substrat diélectrique caractérisé par une permittivité électrique ϵ_r et une perméabilité magnétique μ_r , ainsi qu'un élément rayonnant appelé patch, de forme quelconque.

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les domaines des micro-ondes et des ondes millimétriques. Elles sont généralement composées d'une seule couche de substrat et sont disposées sur un substrat diélectrique et un plan de masse. Les éléments rayonnants peuvent prendre différentes formes telles que carrées, rectangulaires, triangulaires, circulaires, elliptiques, ou d'autres formes plus complexes.

Les antennes imprimées se distinguent par leur faible poids, leur encombrement réduit et leur facilité de fabrication grâce à la technique du circuit imprimé. Ces avantages les rendent particulièrement attrayantes pour les systèmes de télécommunications, les téléphones mobiles, la télédétection et la télémessure (radar embarqué, avions, fusées, missiles, navires, véhicules routiers, etc.). Parmi toutes les formes d'éléments rayonnants, le rectangle est la plus facile à comprendre pour appréhender les mécanismes de rayonnement des antennes microbandes.

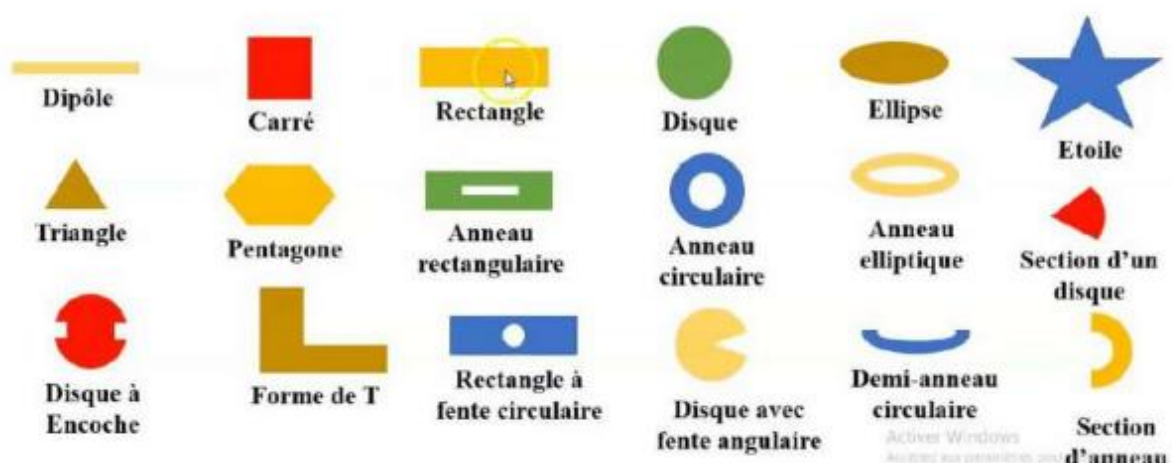


Figure I- 15 : Différentes formes d'antennes patches [I-32].

I.5.3. Techniques d'alimentation

I.5.3.A. Alimentation avec contact

I.5.3.A-1 Alimentation par ligne microruban

Lors de l'étude des antennes imprimées, l'excitation joue un rôle crucial. Elle permet de fournir de l'énergie à l'élément rayonnant d'une manière qui influence directement son rayonnement et permet de modifier ses performances.

L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont celle-ci est intégrée dans le dispositif. Différentes techniques d'alimentation sont utilisées, telles que :

- **Alimentation par une ligne microbande.**
- **Alimentation coaxiale directe.**
- **Alimentation par couplage à ouverture dans le plan de masse.**

L'alimentation par ligne microbande et l'alimentation par câble coaxial sont les techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées [I-33].

L'alimentation de l'antenne peut être réalisée en connectant directement une ligne microbande à l'élément, soit en le reliant sur l'axe de symétrie de l'élément, soit en le décalant par rapport à cet axe afin d'améliorer l'adaptation d'impédance. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et permet une adaptation d'impédance facile, cependant, elle peut générer un rayonnement parasite des lignes, ce qui constitue un inconvénient. [I-34].

L'adaptation est obtenue soit en insérant un transformateur quart d'onde, soit en déplaçant le point d'alimentation.

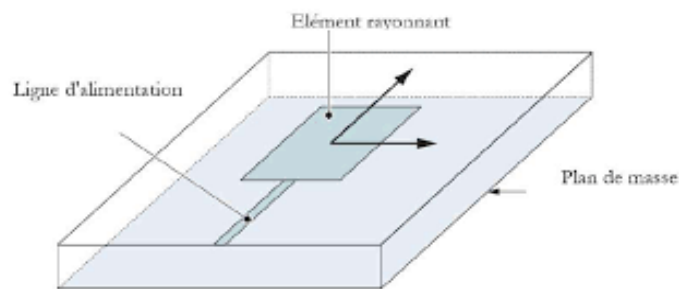


Figure I- 16 : Alimentation par ligne microruban[I-35].

I.5.3.A-2 Alimentation coaxiale directe

L'alimentation de l'antenne peut être réalisée en connectant directement une ligne coaxiale, où le conducteur central est relié à un point situé sur l'axe de symétrie de l'élément rayonnant. La distance de ce point par rapport au bord de l'antenne permet d'adapter les impédances. Cette méthode présente l'avantage majeur de pouvoir être appliquée à n'importe quel emplacement à

l'intérieur du patch, ce qui facilite sa fabrication. Cependant, il existe des inconvénients liés au diagramme de rayonnement. La connexion génère un pic de courant concentré au niveau de l'élément rayonnant, ce qui peut entraîner une asymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent en raison du perçage du plan de masse, du diélectrique et de l'élément plaqué [I-36].

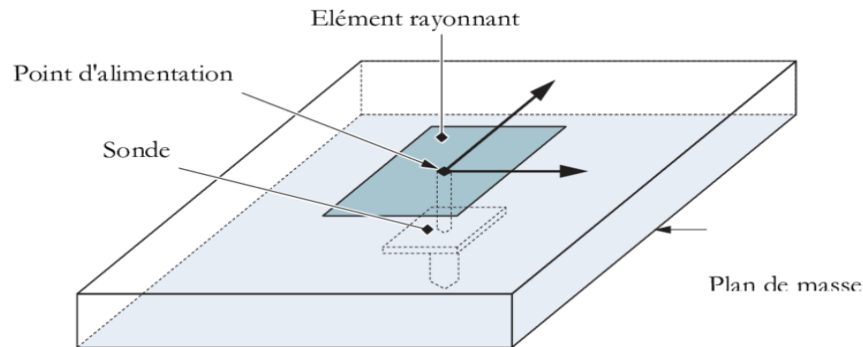


Figure I- 17 : Alimentation coaxiale directe[I-37].

I.5.3.A-3Alimentation à travers une ouverture au plan de masse

La connexion d'une alimentation à travers une ouverture au plan de masse est une méthode largement employée en électronique afin de minimiser les interférences électromagnétiques. Cette approche implique de relier la masse de l'alimentation à travers une petite ouverture dans le plan de masse plutôt que de manière directe.

Cette technique permet de restreindre les boucles de courant entre l'alimentation et la masse, réduisant ainsi les perturbations électromagnétiques susceptibles d'affecter le bon fonctionnement des circuits électroniques.

Il convient de noter que l'utilisation de cette méthode peut engendrer des effets indésirables, notamment une augmentation de la résistance de la connexion entre l'alimentation et la masse, ainsi qu'une diminution de l'efficacité du blindage électromagnétique.

Afin de minimiser ces effets, il est recommandé de positionner l'ouverture de connexion le plus près possible de l'alimentation, de maintenir sa taille aussi réduite que possible, et d'appliquer des techniques de conception appropriées pour atténuer les perturbations électromagnétiques. Il est également primordial de s'assurer que cette méthode est utilisée de manière adaptée à chaque application spécifique, en prenant en considération les exigences de conception et les conditions de fonctionnement.

En conclusion, l'utilisation d'une alimentation à travers une ouverture au plan de masse peut se révéler avantageuse pour réduire les interférences électromagnétiques dans les circuits

électroniques, mais elle doit être employée avec précaution et en prenant en compte les considérations de conception appropriées. [I-38].

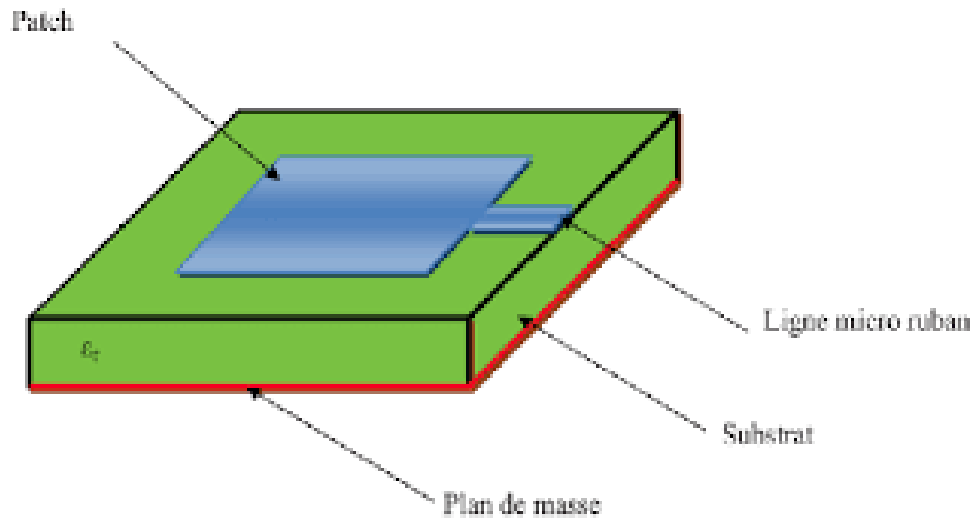


Figure I- 18 : Alimentation coaxiale directe[I-39].

I.5.3.B. Alimentation sans contact (par proximité)

I.5.3.B-1 Alimentation par fente

Pour résoudre le problème de rayonnement de la ligne dans l'alimentation par ligne microruban, une solution consiste à placer l'alimentation sous une seconde plaque de substrat. Le transfert de puissance de la ligne vers l'élément rayonnant se réalise par couplage magnétique à travers une fente. Ce type d'alimentation est connu sous le nom d'alimentation par fente.

Grâce à cette technique, le rayonnement parasite dans la partie supérieure du patch est considérablement réduit, mais un rayonnement arrière apparaît. Cependant, il est difficile d'obtenir un positionnement précis, surtout pour les structures de petites dimensions. L'adaptation de l'antenne à la ligne est également complexe car l'impédance ramenée au plan du patch possède une partie réelle et une partie imaginaire.

Pour parvenir à une adaptation adéquate, il est possible de modifier les dimensions de la fente et la longueur de la ligne. Cela permet de trouver les valeurs appropriées pour minimiser les réflexions et maximiser le transfert de puissance entre la ligne et l'élément rayonnant.[I-40].

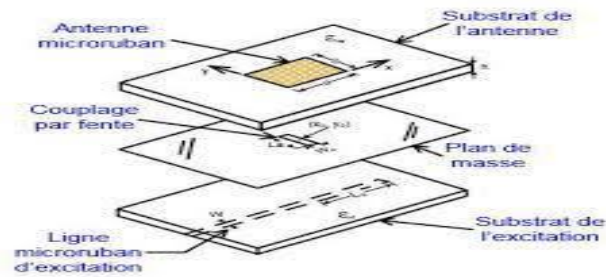


Figure I- 19 : Alimentation coaxiale directe[I-41].

I.3.3.B-2 Alimentation par ligne couplée

Dans cette configuration, la ligne d'alimentation est située entre le patch et le plan de masse, avec deux substrats diélectriques. Le substrat inférieur est mince mais possède une permittivité élevée, tandis que le substrat supérieur est plus épais mais avec une permittivité plus faible. Cette configuration permet de réduire de manière significative le rayonnement de la ligne.

En plaçant la ligne entre ces deux substrats diélectriques, la proximité du substrat inférieur à haute permittivité aide à confiner davantage le champ électromagnétique, réduisant ainsi les pertes par rayonnement. Le substrat supérieur plus épais avec une permittivité plus faible contribue également à limiter le rayonnement en permettant une meilleure propagation des ondes le long de la ligne.

Grâce à cette disposition, le rayonnement indésirable de la ligne est fortement atténué, ce qui améliore les performances de l'antenne en termes de directivité et d'efficacité. Cela permet d'obtenir une meilleure focalisation du rayonnement vers la direction souhaitée.

En résumé, en utilisant deux substrats diélectriques de permittivités différentes et d'épaisseurs appropriées, placés stratégiquement entre le patch et le plan de masse, on parvient à réduire de manière significative le rayonnement de la ligne d'alimentation.

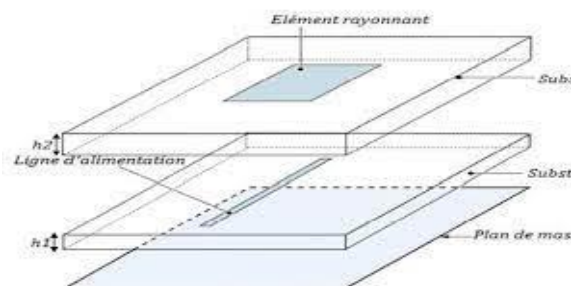


Figure I- 20 :Alimentation par couplage[I-42].

I.6. LA BANDE KU« KURZ-UNTEN »

La bande Ku, également connue sous le nom de Kurz-untten, fait référence à une gamme spécifique de fréquences micro-ondes dans le spectre électromagnétique. Elle s'étend de 12 gigahertz (GHz) à 18 GHz. La bande Ku est largement utilisée pour les transmissions de

télévision par satellite, ce qui en fait la bande de fréquences la plus couramment utilisée dans ce domaine. Elle est principalement attribuée aux services de radiodiffusion par satellite, notamment pour la diffusion de programmes de télévision, de radio et de données informatiques. La popularité de la bande Ku en Europe s'explique en grande partie par le fait que des antennes paraboliques de petite taille peuvent être utilisées pour recevoir les signaux dans cette bande de fréquences. En conclusion, la bande Ku couvre la plage de fréquences micro-ondes de 12 GHz à 18 GHz et est principalement utilisée pour la télévision par satellite. Elle est attribuée aux services de radiodiffusion par satellite et est particulièrement répandue en Europe en raison de la praticité des antennes paraboliques de petite taille nécessaires pour la réception des signaux [I-43].

Bande de fréquence	Plage de fréquence
Ku	12 GHz à 18 GHz

Tableau I- 2 :La bande Ku« Kurz-unten » [I-44].

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé les notions fondamentales des antennes, en mettant l'accent sur les antennes patch. Nous avons examiné leur classification selon plusieurs critères, tels que la fréquence, le diagramme de rayonnement et la polarisation. Cette classification permet de mieux comprendre les caractéristiques et les performances des antennes patch dans différentes applications. Nous avons également discuté des antennes patch reconfigurables, qui offrent une flexibilité et une adaptabilité accrues pour répondre aux normes de plus en plus diversifiées des systèmes de télécommunication. Les antennes reconfigurables restent la solution privilégiée pour relever ces défis, car elles permettent de modifier dynamiquement leurs caractéristiques de rayonnement, de fréquence ou de polarisation en fonction des besoins spécifiques du système.

En conclusion, les antennes patch sont une catégorie importante d'antennes, et leur classification selon la fréquence, le diagramme de rayonnement et la polarisation fournit des informations précieuses pour comprendre leurs performances. De plus, les antennes patch reconfigurables sont devenues essentielles pour répondre aux exigences changeantes des systèmes de télécommunication modernes. Elles offrent une solution flexible et adaptable pour assurer des communications efficaces dans des environnements de plus en plus variés.

Chapitre II :

**Etude de l'antenne patch
reconfigurable**

CHAPITRE II : ETUDE SUR LE ANTENNE PATCH RECONFIGURABLE

II.1 INTRODUCTION

Les antennes reconfigurables sont des antennes qui possèdent la capacité de modifier leur forme, leur fréquence, leur polarisation ou leur direction de rayonnement afin de s'adapter aux divers besoins de communication. Elles offrent ainsi aux systèmes de communication modernes une flexibilité pour s'ajuster rapidement aux changements de l'environnement ou aux exigences spécifiques de communication. Cela les rend extrêmement précieuses dans un large éventail d'applications telles que les domaines militaires, la surveillance, les communications mobiles et par satellite.

Les antennes reconfigurables trouvent des applications dans de nombreux secteurs, y compris les communications sans fil, la surveillance, la navigation, la télédétection, la médecine, la sécurité et l'aérospatiale. Leur capacité à s'adapter aux besoins spécifiques de chaque application les rend polyvalentes et hautement recherchées. Par exemple, dans le domaine des satellites de communication, les antennes reconfigurables sont utilisées pour minimiser le nombre d'antennes nécessaires, ce qui permet de réduire la taille et le poids du satellite.

En résumé, les antennes reconfigurables offrent une flexibilité remarquable en modifiant leur forme, fréquence, polarisation ou direction de rayonnement pour répondre aux besoins changeants des systèmes de communication. Leur utilisation est répandue dans divers domaines, car elles permettent d'optimiser les performances des systèmes de communication tout en offrant une adaptation rapide et efficace aux exigences spécifiques de chaque application [II-1].

Les antennes reconfigurables sont des antennes qui intègrent des composants actifs pour modifier leurs caractéristiques dans le domaine fréquentiel ou spatial. Ces antennes passives sont équipées de dispositifs actifs qui leur confèrent la capacité de modifier et d'ajuster leurs propriétés en réponse aux besoins spécifiques de communication. Ces composants actifs permettent des changements dans la fréquence de fonctionnement, la directivité, la polarisation ou d'autres paramètres, offrant ainsi une flexibilité accrue aux antennes pour s'adapter aux conditions variables ou aux exigences particulières des systèmes de communication. L'intégration de ces composants actifs permet une reconfiguration dynamique des antennes, améliorant ainsi leur efficacité et leur adaptabilité dans différents scénarios d'utilisation.

II-1-1 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Dans tout système qui transporte de l'énergie le long d'une ligne de transmission, il est nécessaire d'assurer une adaptation appropriée. La ligne de transmission effectue une

transformation de l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au niveau de la source. Ainsi, ce que perçoit la source dépend de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de l'impédance caractéristique de celle-ci.

En d'autres termes, pour garantir un transfert optimal de l'énergie, il est essentiel de s'assurer que l'impédance de charge est correctement adaptée à la ligne de transmission. Cela implique de prendre en compte la longueur électrique de la ligne, qui peut avoir un impact sur les réflexions d'impédance et la performance globale du système. De plus, l'impédance caractéristique de la ligne joue un rôle crucial dans l'adaptation et la transmission efficace de l'énergie.

En conclusion, l'adaptation d'impédance est un aspect essentiel de tout système utilisant une ligne de transmission. La ligne de transmission transforme l'impédance de charge pour s'adapter à l'impédance caractéristique de la ligne et à la longueur électrique, afin d'assurer un transfert d'énergie optimal entre la source et la charge. [II-2].

II-1-2- Adaptation par ligne quart d'onde

En construction de circuits hyperfréquences, l'adaptation est souvent recherchée pour obtenir une impédance différente, généralement l'impédance caractéristique, par rapport à celle obtenue à la fin du circuit. Cela permet d'assurer une transmission efficace du signal et de minimiser les réflexions d'impédance. [II-2].

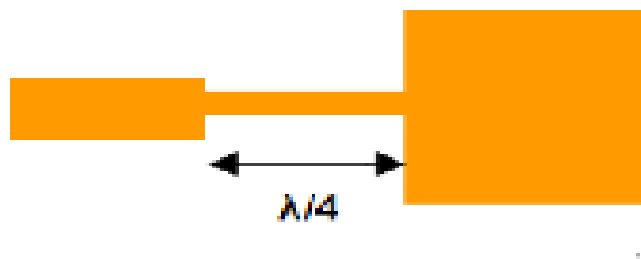


Figure II- 1 : Adaptation par ligne quart d'onde [II-2].

II-1-3 Adaptation par stub

Pour parvenir à l'adaptation d'une charge donnée, une autre approche consiste à utiliser un stub. Un stub peut être réalisé sous la forme d'un circuit ouvert (open stub) ou d'un court-circuit (short stub). Dans ce cas, la méthode préférée est généralement celle qui offre la solution la plus compacte en termes d'encombrement. Il est possible de raisonner en termes d'impédance, mais il est plus pratique de travailler dès le début avec l'admittance pour effectuer la somme des impédances ramenées en parallèle. [II-2].

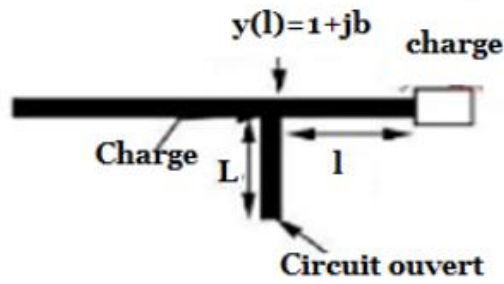


Figure II- 2 :Stub en circuit ouvert [II-2].

II-1-4 Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch Les dimensions des encoches [II-2].

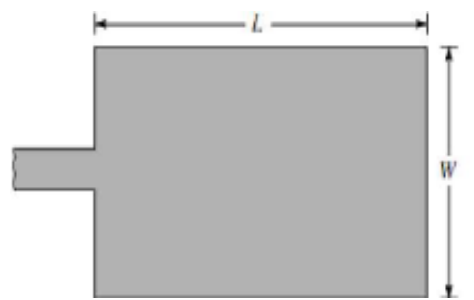


Figure II- 3 : Patch rectangulaire [II-2].

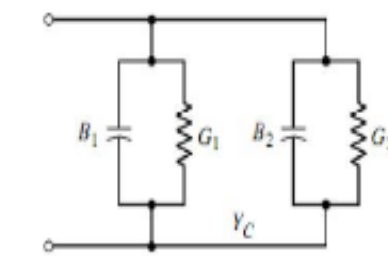


Figure II- 4 : L'équivalence en circuit [II-2].

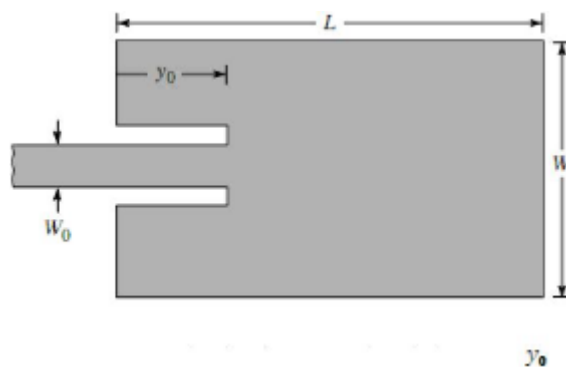


Figure II- 5 : Patch adapté par encoches de longueur [II-2].

II.2 LES ANTENNES RECONFIGURABLES AGILES

L'origine des antennes reconfigurables agiles remonte aux années 1960, lorsque les forces militaires ont commencé à développer des antennes capables de s'adapter rapidement à différents environnements de communication. Les premières antennes reconfigurables étaient basées sur des techniques de commande de phase et de commutation d'éléments. Au fil du temps, les méthodes de reconfiguration des antennes ont évolué pour inclure la modification de la structure de l'antenne et la reconfiguration du substrat.

Dans les années 1990 et 2000, les antennes reconfigurables agiles ont trouvé des applications dans divers domaines. Les progrès technologiques ont permis de concevoir des antennes reconfigurables agiles plus compactes, légères et efficaces, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités d'utilisation. Les antennes reconfigurables agiles ont également évolué pour répondre aux besoins de communications de plus en plus complexes. Par exemple, les antennes adaptatives sont capables de surveiller leur environnement et d'ajuster automatiquement leurs paramètres de reconfiguration pour s'adapter à des conditions changeantes.

En résumé, l'histoire des antennes reconfigurables agiles remonte aux années 1960, et elles ont depuis connu des avancées significatives en termes de techniques de reconfiguration et de miniaturisation. Ces antennes jouent un rôle essentiel dans divers domaines d'application et continuent d'évoluer pour répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication[II-3].

II.3 Les techniques d'agilités (reconfigurations)

Une antenne reconfigurable est capable de modifier une ou plusieurs de ses caractéristiques même après avoir été fabriquée. La reconfiguration de l'antenne peut être réalisée à l'aide de différentes techniques disponibles :

II.3.1 Les diodes PIN

La diode PIN, un semi-conducteur largement utilisé dans les applications micro-ondes, peut être reconfigurée en fonctionnement en appliquant une polarisation directe ou inverse. Lorsqu'elle est polarisée directement, la diode PIN est activée et présente une impédance extrêmement faible, se comportant essentiellement comme un court-circuit. En inversant la polarisation, la diode PIN passe à l'état "OFF", ce qui entraîne une impédance très élevée. Cette caractéristique en fait un composant précieux pour les techniques de reconfiguration en fréquence, offrant une solution abordable, facile à intégrer et nécessitant une faible tension de polarisation. [II-4].

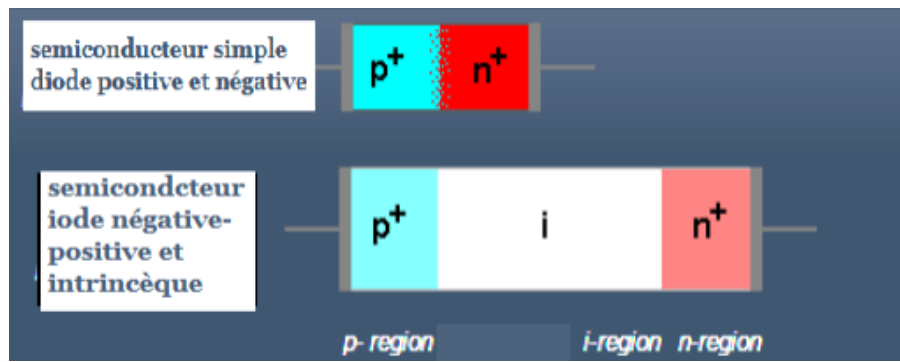


Figure II- 6 :Schéma d'une diode PIN [II-5].

II-3.2 Les diodes avec capacitatives variables

La diode varicap ou varactor (condensateur variable) agit comme un condensateur lorsqu'elle est polarisée en inverse, avec sa capacité qui varie en fonction de la tension appliquée. Contrairement aux diodes PIN qui offrent une variation discrète, la diode varicap permet une variation continue de la capacité en fonction de la tension de polarisation. Dans la pratique, la combinaison de diodes PIN et de diodes varicap est souvent utilisée pour obtenir une large plage de chevauchement de fréquences, ce qui est largement documenté dans la littérature spécialisée. [II-6]. MEMS (Système Micro électromécanique)

un microsystème électromécanique (MEMS) est un système miniature comprenant des composants mécaniques interagissant avec des éléments électriques (et/ou électroniques) dans une relation fonctionnelle. Les MEMS sont des objets de petite taille qui intègrent harmonieusement des aspects électriques et mécaniques pour atteindre un objectif spécifique. [II-7].

Les "switchs RF" sont des composants qui utilisent un mécanisme de mouvement pour créer un court-circuit ou un circuit ouvert sur une ligne de transmission. Ces composants sont caractérisés par leur consommation d'énergie très faible et leur temps de réponse rapide. [II-5].

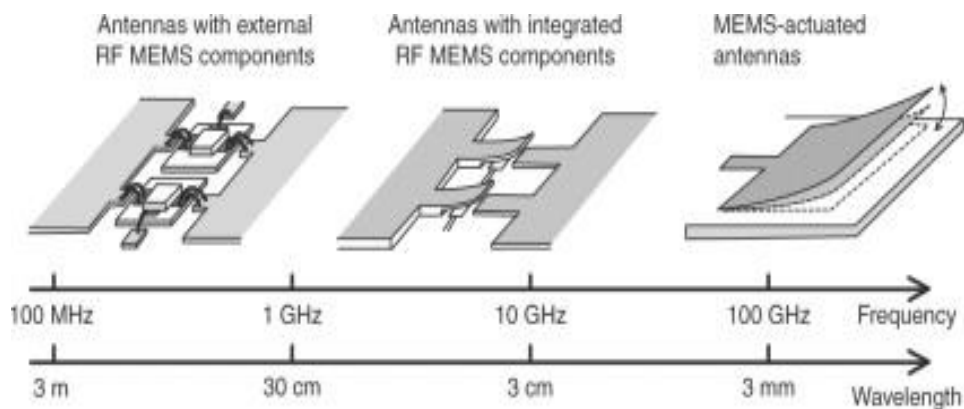
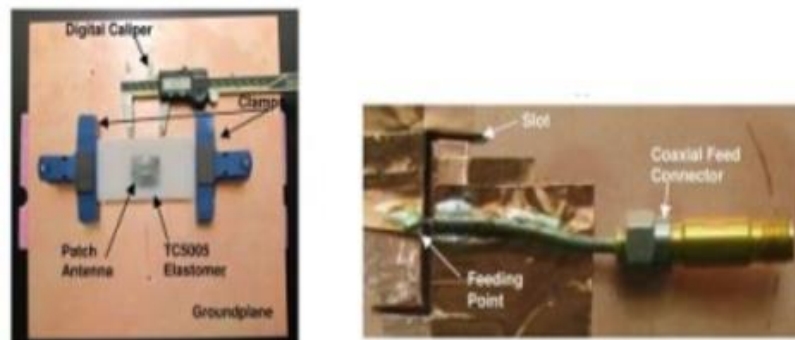


Figure II- 7 : Antennes RF MEMS pour applications sans fil[II-8].

II.3.3 Matériaux Agiles

Les matériaux "agiles" ou "intelligents" sont souvent utilisés comme substrat pour les antennes reconfigurables. Ces matériaux ont la capacité de modifier leurs propriétés électromagnétiques, telles que la permittivité et/ou la perméabilité, en réponse à une commande externe telle qu'un champ électrique ou magnétique. Cela permet d'obtenir des antennes agiles et flexibles. Différents types de matériaux ont été étudiés, notamment les matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques et les cristaux liquides. Ces matériaux présentent l'avantage d'être compacts et de plus en plus faciles à intégrer. Cependant, rendre ces matériaux agiles n'est pas une tâche facile, car ils nécessitent des dispositifs de commande complexes, une tension élevée, et ils peuvent présenter des pertes importantes et des temps de réponse plus longs. Dans cette étude, une antenne reconfigurable en fréquence a été réalisée en utilisant un substrat en silicone extensible de type TC5005. [II-9].

Le patch extensible est créé en injectant un alliage de métal liquide dans un réservoir carré Galinstan qui est incorporé dans le substrat en élastomère de silicone. Lorsque le patch est étiré, sa longueur électrique varie en conséquence. Cette variation permet d'ajuster la fréquence de fonctionnement de l'antenne dans une plage allant de 1.3 à 3 GHz. De plus, des mesures ont démontré une efficacité maximale de rayonnement de l'antenne atteignant 80%. [II-10].



**Figure II- 8 : (a) Prototype de l'antenne utilisant un substrat de silicone extensible TC5005.
(b) Vue de dessus et vue de dessous [II-11].**

II.3.4 Classification des antennes reconfigurables

Il existe plusieurs critères pour classer les antennes reconfigurables, selon la fonctionnalité nous distinguons trois grandes familles :

- Antennes agiles en fréquence.
- Antennes agiles en diagramme de rayonnement.
- Antennes agiles en polarisation.

La combinaison de deux fonctionnalités ou plus reste possible (hybride) [II-12].

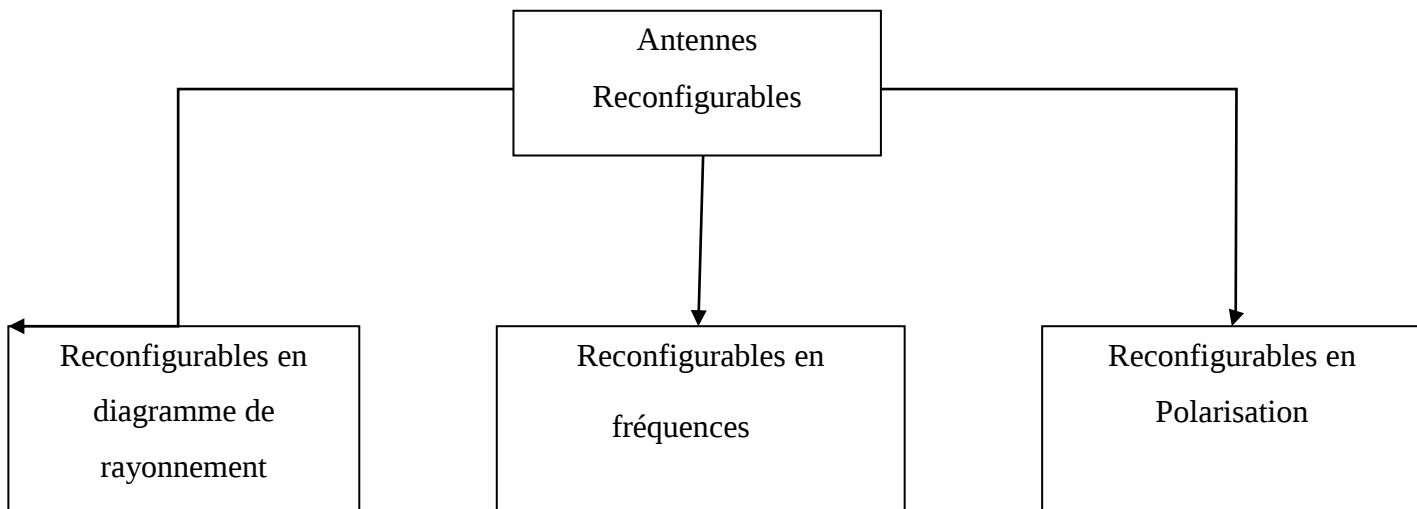


Figure II- 9 : Schéma des types d'antennes reconfigurables [II-12].

II.3.4.A Reconfiguration fréquentielle

La reconfiguration en fréquence offre la possibilité de modifier les fréquences de fonctionnement d'une antenne, que ce soit de manière discrète ou continue. La commutation permet à l'antenne de passer d'une bande à une autre en utilisant des interrupteurs tels que des diodes PIN. D'autre part, les antennes accordables en fréquence utilisent des composants comme les diodes varicap pour ajuster en continu une ou plusieurs fréquences de résonance.

Un exemple concret illustrant l'utilisation des antennes reconfigurables en fréquence est celui du WIFI à 2,4 GHz (norme 802.11g). Ce service comprend plusieurs canaux de fréquences ISM. Ainsi, une antenne miniature reconfigurable en fréquence destinée à l'application WIFI doit être conçue pour couvrir l'ensemble de ces canaux par commutation. Elle doit également posséder une bande passante suffisamment large pour couvrir chaque canal individuellement, tandis que l'agilité fréquentielle permet de passer d'un canal à un autre en toute fluidité [II-13].



Figure II- 10 : Prototype de l'antenne reconfigurable en fréquence: (a) vue de dessus et (b) vue de dessous [II-14].

La reconfiguration en fréquence d'une antenne peut être réalisée en ajustant la longueur électrique de l'élément rayonnant. Cette méthode est couramment utilisée et implique l'intégration d'un ou plusieurs interrupteurs tels que des diodes PIN ou des RF-MEMS à l'élément rayonnant.

La Figure II.11 présente un exemple d'antenne reconfigurable en fréquence à diodes PIN qui exploite cette variation de longueur électrique [II-15]. L'antenne décrite est une antenne reconfigurable quasi-Yagi avec un dipôle replié. La fréquence centrale de l'antenne peut être réglée électroniquement en ajustant la longueur électrique efficace du dipôle replié à l'aide de diodes PIN (Macom MA4AGBL912). Lorsque les diodes 1 et 2 sont activées et les autres diodes désactivées, la longueur du dipôle est raccourcie, ce qui permet à l'antenne de fonctionner dans la plage de fréquences de 6,4 à 8 GHz. En revanche, lorsque les diodes 1 et 2 sont désactivées et les diodes 3 à 6 activées, la bande passante de l'antenne s'étend de 5,3 à 6,6 GHz. Ainsi, cette antenne offre la possibilité de choisir entre deux bandes passantes distinctes en fonction de la configuration souhaitée.

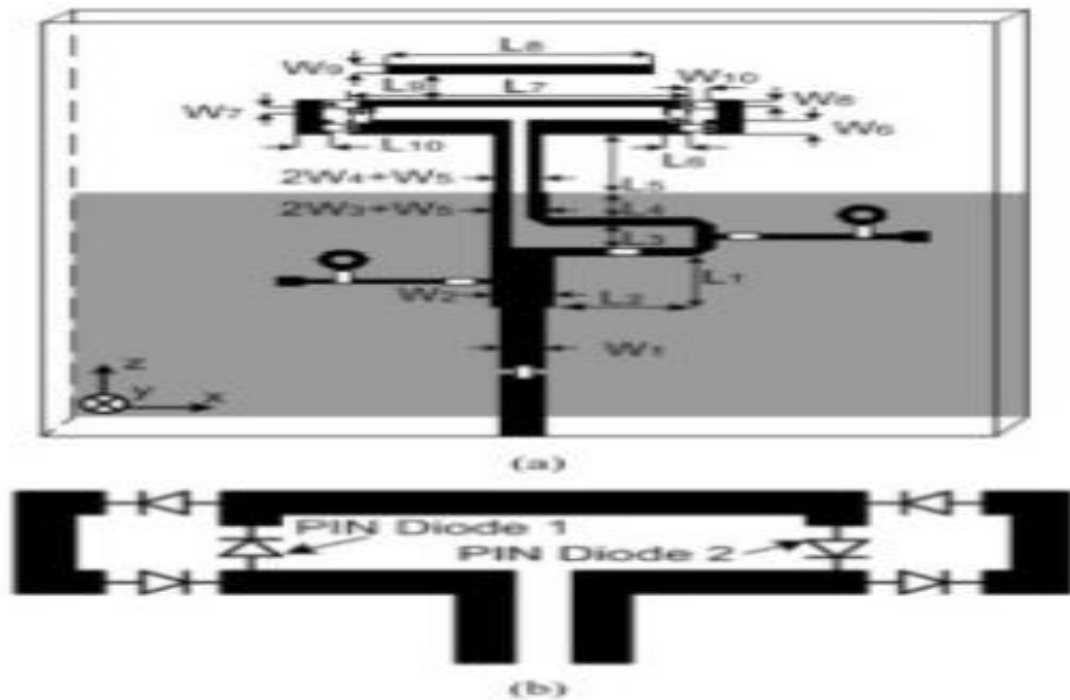


Figure II- 11 : Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence [II-16].

II.3.4.B Reconfiguration du diagramme de rayonnement

Dans une antenne reconfigurable en rayonnement, son diagramme peut être modifié d'une manière ou d'une autre en dynamique. Celui-ci peut être modifié en fonction de sa forme, de son ouverture ou de la directionnalité du faisceau, gain, pointage (balayage d'angle), prise en charge

de certaines directions, dépend des caractéristiques requises, et l'autre caractéristique restant inchangé fonctionnement (fréquence, polarisation, etc....).

Par exemple, prenons un réseau Linéaire uniforme de 4 sources (points sur la Figure II-12) espacées $d = 0.5 \lambda_0$. Si on désigne par β la différence de phase entre deux sources successives, la direction de pointage θ_0 du réseau sera donnée par la relation:

$$\beta = kd \sin(\theta_0) \quad (II - 1)$$

avec, un dépointage de 30° peut être obtenu avec l'application d'une différence de phase de 90° entre les sources du réseau [II-17].

Cependant, il est encore compliqué de modifier les paramètres d'antenne sans affecter la structure de l'antenne, cela modifiera les performances recherchées par la présence d'éléments parasites et effectuez une sorte de reconfiguration[II-18].

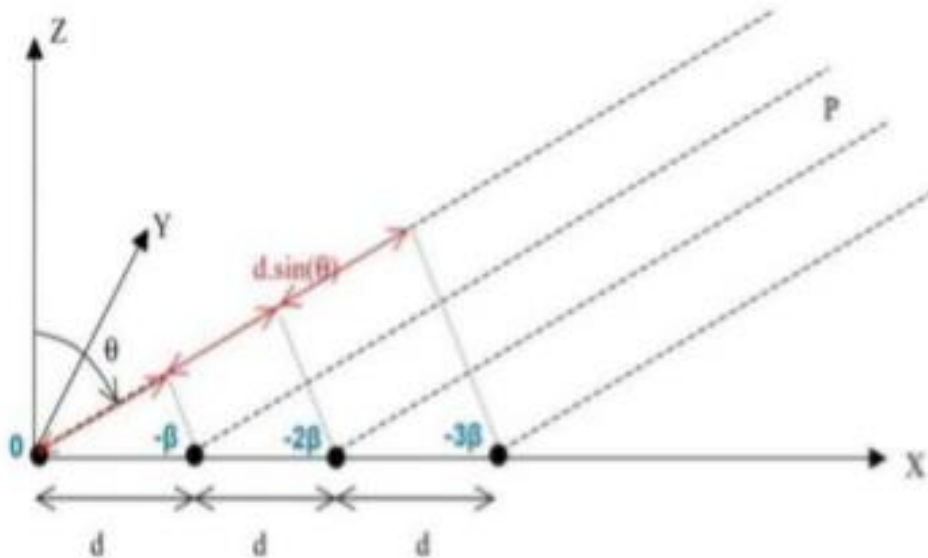


Figure II- 12 : Réseau d'éléments déphasés pointant dans la direction (θ_0) [II-17].

II.3.4.C Reconfiguration de la polarisation

La reconfiguration de polarisation est un type d'agilité qui permet de modifier la direction du champ électrique sans changer la fréquence, le fonctionnement ou les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. La polarisation du champ électrique est directement liée à la direction du courant circulant sur les éléments rayonnants de l'antenne. Pour obtenir une reconfiguration de polarisation, il est nécessaire de modifier la structure de l'antenne, les propriétés du matériau ou la configuration de l'alimentation de manière à changer la circulation du courant sur l'antenne. L'intégration d'antennes reconfigurables en polarisation est largement utilisée dans les communications par satellite, les applications civiles et militaires, car elle permet de compenser les effets des trajets multiples et de contourner les problèmes d'alignement entre le récepteur et

l'émetteur. Différentes techniques et méthodes ont été étudiées pour réaliser cette reconfiguration. Une méthode courante consiste à modifier le circuit d'alimentation de l'antenne, par exemple en utilisant deux ports en quadrature de phase pour exciter un patch carré, ce qui permet d'obtenir une reconfiguration de polarisation (Figure II.13 (a)). [II-19], Pour obtenir différentes polarisations, il existe différentes méthodes. Une méthode consiste à utiliser deux ports d'alimentation en quadrature de phase pour exciter des polarisations linéaires horizontale et verticale (Figure II.13 (a)). Une autre méthode consiste à introduire des perturbations sur l'élément rayonnant de l'antenne pour obtenir une polarisation circulaire (Figure II.13 (b)). Pour rendre l'antenne reconfigurable en polarisation, ces perturbations doivent être positionnées aux coins opposés du patch et connectées à l'élément rayonnant via des diodes PIN (Figure II.13 (c)). En contrôlant les états (ON/OFF) des diodes et en utilisant différents ports d'alimentation, il est possible de modifier la polarisation entre quatre états distincts autour de 5,8 GHz..

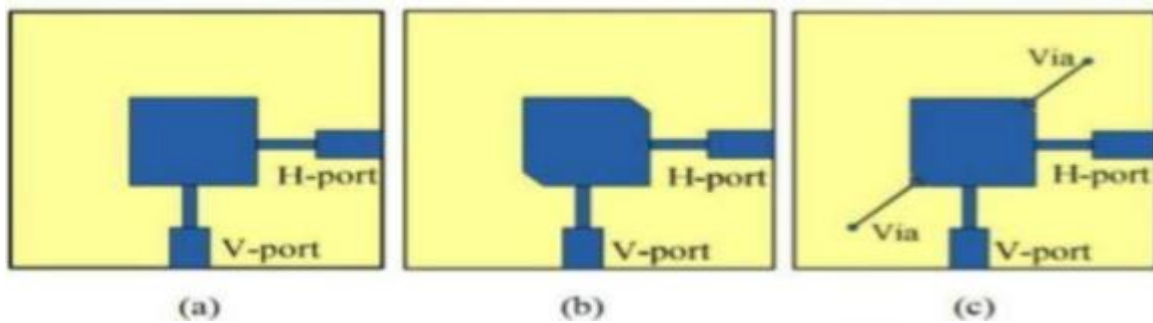


Figure II- 13 : Antenne patch reconfigurable avec quatre états de polarisation [II-20].

I.3.4.D La reconfiguration hybride

La reconfiguration hybride ou composite implique la capacité de modifier simultanément plusieurs paramètres de l'antenne. L'un des cas les plus fréquents de reconfiguration composite consiste à combiner la flexibilité en fréquence avec le balayage du faisceau pour améliorer l'utilisation spectrale. Cette reconfiguration composite est réalisée en intégrant différentes techniques de reconfiguration dans une même structure pour un seul paramètre ou en permettant une déformation dynamique d'une surface de pixels [II-21].

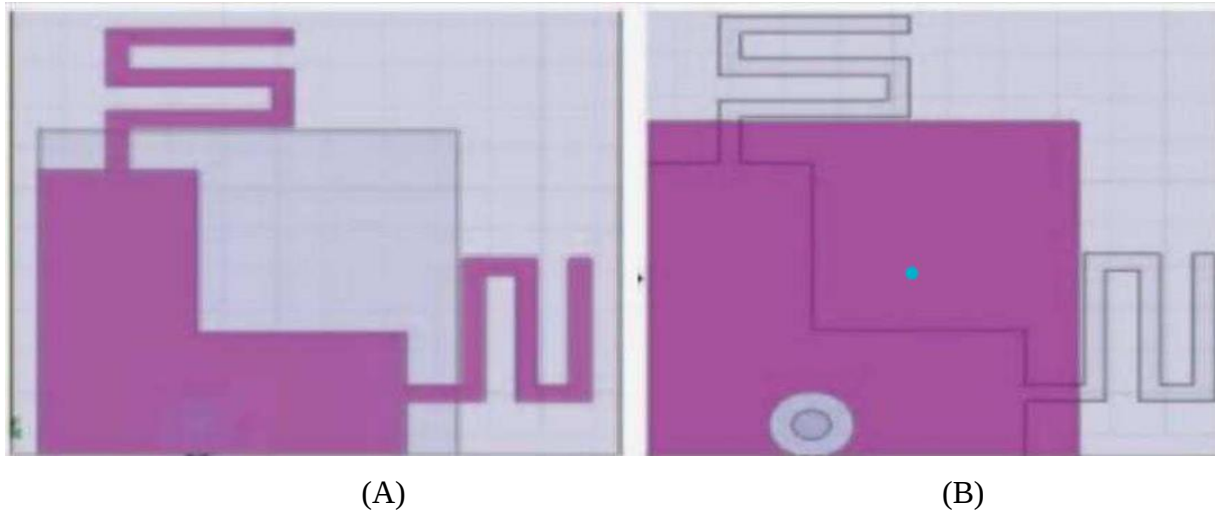


Figure II- 14 : Géométrie de l'antenne Méandre optimisée vue du dessus en (A) et en dessus en (B) [II-22].

I.4 NECESSITE DE LA RECONFIGURABLE

Les avancées technologiques touchent de nombreux domaines, notamment les communications sans fil, où les antennes jouent un rôle essentiel. Elles sont responsables de la réception et de la transmission des ondes électromagnétiques, en les convertissant en signaux électriques et vice versa. Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les dispositifs de communication mobile tels que les téléphones portables, les tablettes et les ordinateurs portables. Cependant, ces antennes sont généralement conçues pour fonctionner dans une seule gamme de fréquences, ce qui limite leur capacité à prendre en charge divers services tels que le WiFi, le WLAN, le GSM, etc. L'utilisation de plusieurs antennes pour un seul appareil n'est souvent pas possible. Une solution à ce problème est l'utilisation d'antennes reconfigurables capables de modifier leur bande de fonctionnement en fonction des besoins de l'utilisateur. Cela ouvre la voie à la notion de reconfigurabilité. Les antennes reconfigurables offrent plus de flexibilité que les antennes patch classiques dont les paramètres et les caractéristiques sont fixes et immuables. Ces antennes reconfigurables permettent de régler la fréquence de fonctionnement, de modifier la bande d'exploitation, de filtrer les signaux indésirables et d'orienter le lobe principal dans une direction privilégiée. Cela améliore la capacité du réseau mobile en exploitant la diversité spatiale offerte par ce type d'antennes [II-23].

I.4.1 Applications des antennes reconfigurables

Avec la croissance rapide de la technologie des télécommunications et la poursuite des recherches scientifiques sur les antennes imprimées, ainsi que les demandes multiples dans le domaine des communications, l'utilisation des antennes micro-ondes conventionnelles ne suffit

plus à répondre à ces exigences. Par conséquent, les antennes microruban ont pris le relais des antennes traditionnelles dans de nombreuses applications. Parmi ces applications, on peut mentionner :

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et contrôle.
- Les équipements portatifs.
- La télémessure par missile.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine :
- Les réseaux mobiles (GSM 900, DCS 1800, UMTS, ...).
- Réseaux sans fils (WLAN, BLUETOOTH, WIFI,...).
- Les récepteurs satellite de navigation [II-24].

I.4.2 Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables

I.4.2.A Avantages

Les antennes reconfigurables offrent la possibilité d'améliorer les performances des systèmes de communication et de télédétection en fournissant des fonctionnalités supplémentaires et des degrés de liberté supplémentaires. Elles permettent de changer la bande d'opération, de filtrer les interférences et d'accorder la fréquence de résonance pour s'adapter à de nouveaux environnements. Ces antennes sont particulièrement avantageuses dans les domaines où la durée d'exploitation des infrastructures et des équipements est longue. Elles offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes composés de plusieurs éléments spécialisés, tels que la réduction du volume, du poids, des frais de maintenance et une meilleure durabilité grâce à leur capacité d'adaptation aux nouveaux standards. L'objectif des antennes reconfigurables est non seulement de fournir les fonctionnalités nécessaires, mais aussi de les intégrer de manière efficace, peu complexe et économique dans des systèmes complets [II-25].

I.4.2.B Inconvénients

Toute technologie d'antenne reconfigurable présente des pertes qui ont un impact direct sur le gain et l'efficacité radiative, et ces pertes ont tendance à augmenter avec la fréquence. De plus, le coût des antennes reconfigurables est généralement plus élevé que celui des antennes classiques. Ce surcoût est principalement dû à l'ajout de composants actifs sur l'antenne, parfois de haute performance, ainsi qu'à une industrialisation plus complexe, impliquant des structures plus compliquées, des composants à souder sur l'antenne ou des procédés de fabrication

intrinsèquement plus coûteux, comme la gravure de composants semi-conducteurs ou MEMS directement sur l'antenne.

La principale limitation des antennes reconfigurables réside dans leur complexité, ce qui entraîne plusieurs problèmes. Tout d'abord, la complexité de l'antenne, notamment en termes de structures de polarisation, conduit à une fragilité matérielle et à des coûts supplémentaires. De plus, la complexité géométrique, en particulier l'intégration de composants actifs dans la structure rayonnante, pose des défis conceptuels et de simulation, notamment en ce qui concerne les calculs électromagnétiques et la consommation énergétique.

Les antennes patch présentent également certaines limitations, telles qu'une efficacité relativement faible à basse fréquence, ce qui restreint leur utilisation dans certaines applications. Elles sont souvent conçues pour une polarisation spécifique, ce qui limite leur flexibilité dans des applications nécessitant une polarisation différente. De plus, les antennes patch ont généralement un gain relativement faible par rapport à d'autres types d'antennes, ce qui peut limiter leur portée et leur capacité à communiquer avec des dispositifs distants. Enfin, les antennes patch peuvent être sensibles aux effets de sol, notamment lorsqu'elles sont utilisées à proximité de surfaces métalliques ou d'autres objets conducteurs [II-26].

II.5 CONCLUSION

En résumé, le chapitre sur la théorie des antennes reconfigurables met en évidence le développement en cours de ces antennes en raison de leurs nouvelles fonctionnalités. Les antennes reconfigurables permettent d'ajuster leurs caractéristiques de fonctionnement, telles que la fréquence, la polarisation et le diagramme de rayonnement, offrant ainsi une adaptabilité et une flexibilité accrues dans différentes applications.

Les technologies de reconfiguration abordées comprennent la reconfiguration de fréquence, la reconfiguration de polarisation et la reconfiguration de diagramme. La reconfiguration de fréquence permet à l'antenne de fonctionner sur différentes plages de fréquences, répondant ainsi aux besoins de communication avec des systèmes utilisant des bandes de fréquences différentes. La reconfiguration de polarisation permet de changer la polarisation de l'onde électromagnétique émise ou reçue par l'antenne, ce qui s'adapte aux conditions de propagation et améliore la qualité de la réception. Quant à la reconfiguration de diagramme, elle permet de modifier la direction du rayonnement de l'antenne, offrant ainsi des possibilités d'ajustement de la couverture spatiale et d'amélioration de la directivité.

Ces avancées dans les antennes reconfigurables ouvrent de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines tels que les communications sans fil, les systèmes radar, les réseaux de capteurs et la télédétection. La flexibilité et l'adaptabilité offertes par ces antennes permettent

d'optimiser les performances dans différents environnements et scénarios d'utilisation. La recherche continue dans ce domaine favorise l'émergence de nouvelles technologies et applications, contribuant ainsi à l'évolution des communications et des systèmes sans fil.

En conclusion, les antennes reconfigurables représentent une avancée significative dans le domaine des antennes en offrant des fonctionnalités adaptatives et flexibles. La compréhension des différentes technologies et types de reconfiguration présentés dans ce chapitre constitue une base solide pour exploiter les possibilités offertes par ces antennes innovantes. L'étude et le développement des antennes reconfigurables joueront un rôle clé dans la conception et l'optimisation des systèmes de communication modernes.

Chapitre III :

Résultats et

Discussions

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION DE SIMULATION ANTENNE PATCH RECONFIGURABLE

III.1. INTRODUCTION

Les antennes patch reconfigurables sont très répandues dans les systèmes de communication sans fil en raison de leur capacité à ajuster de manière dynamique leurs caractéristiques de rayonnement. Elles jouent un rôle crucial dans les applications de communication par satellite, les réseaux de diffusion directe par satellite (DBS) et d'autres systèmes de communication dans la bande Ku, qui couvre la plage de fréquences de 12 à 18 GHz..

La simulation des antennes patch reconfigurables dans la bande Ku est un élément essentiel pour la conception et l'optimisation de ces antennes afin de répondre aux exigences spécifiques des systèmes de communication dans cette plage de fréquences. Parmi les outils de simulation électromagnétique couramment utilisés, le logiciel CST (Computer Simulation Technology) est largement reconnu pour sa capacité à modéliser et analyser les performances des antennes dans différentes configurations.

Dans ce chapitre, nous avons développé une antenne patch rectangulaire à substrat alimentée par une ligne micro ruban avec des encoches, que nous avons utilisée pour les réseaux d'antennes. Nous avons comparé différentes structures dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques pour ces réseaux d'antennes, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO dans le domaine fréquentiel.

III.2. PRESENTATION DU LOGICIEL CST MICROWAVE STUDIO

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécifique de simulation électromagnétique tridimensionnelle (3D) et de conception de composants haute fréquence [III-1]. Le logiciel CST (Computer Simulation Technology) simplifie le processus de modélisation en fournissant une interface de modélisation graphique puissante et robuste qui simplifie la capture de la structure et la définition des dispositifs. Une fois le composant modélisé, la méthode de maillage automatique peut être utilisée avant de lancer la simulation. CST MICROWAVE STUDIO est un module logiciel intégré de CST STUDIO SUITE qui offre un ensemble de solveurs adaptés à différents

types d'applications.

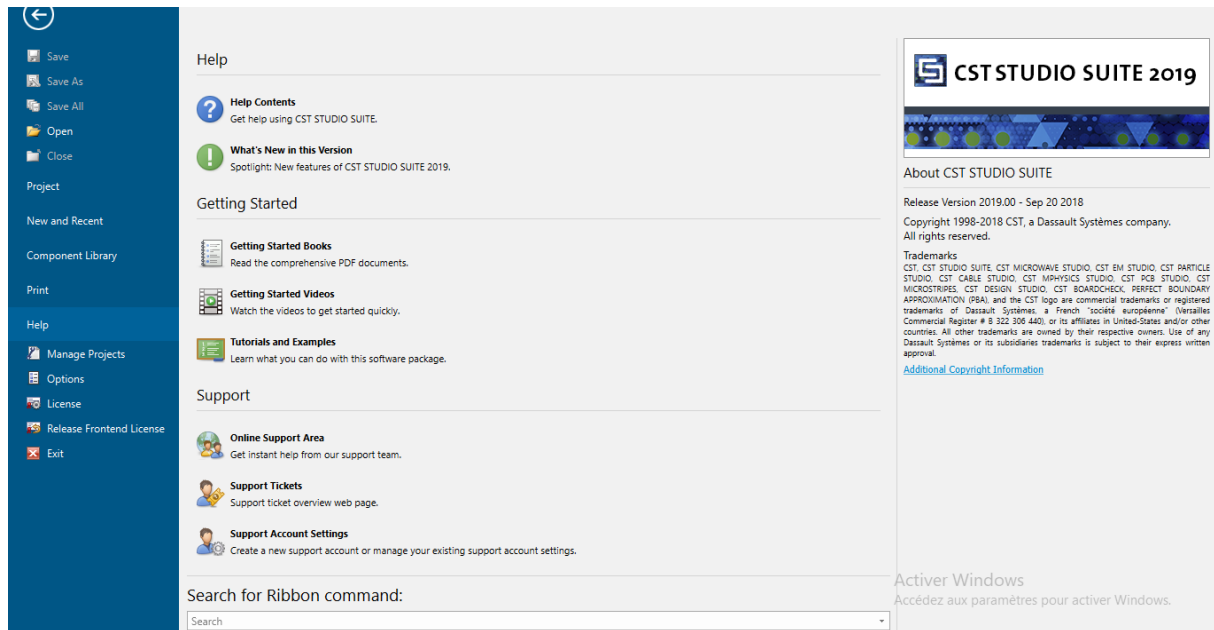


Figure III- 1 : Outil de simulation CST Studio Suite 2019.

III.2.1 Description générale de l'interface CST

Une fois le projet est créé, on accède à l'interface d'utilisateur du CST

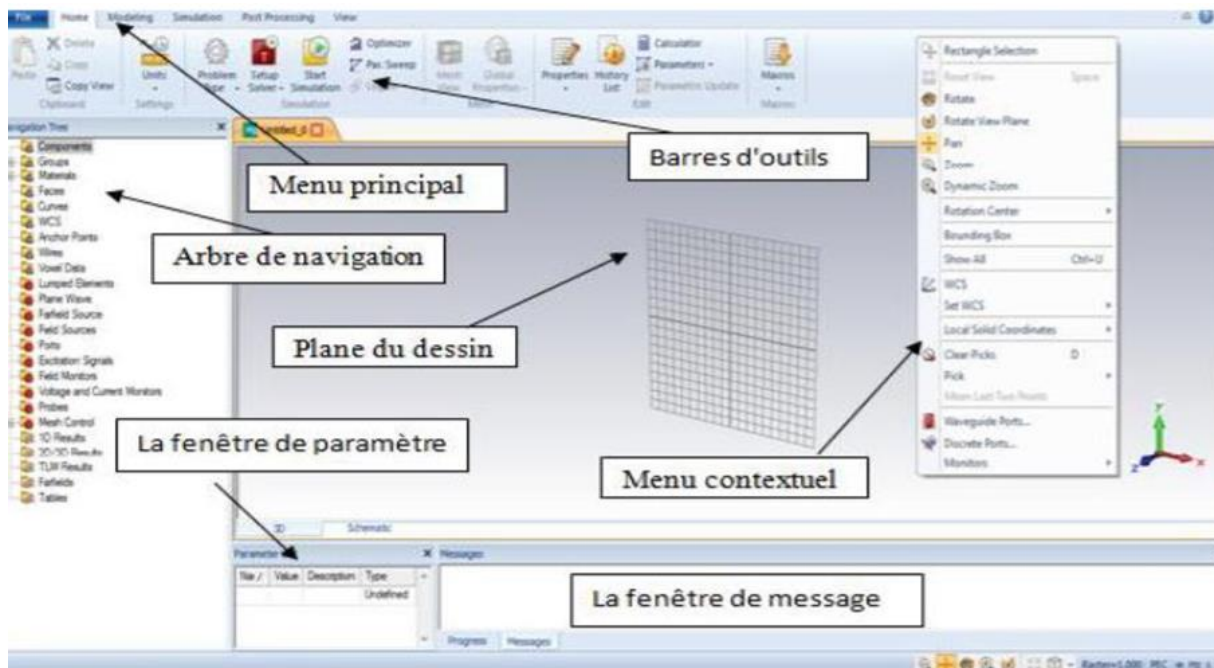


Figure III- 2 : Interface du CST[III-2].

- En haut de l'interface, on trouve une barre d'outils qui regroupe des raccourcis de la barre de menu.
- À gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation qui permet d'accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation [III-3].

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

- Au centre de l'interface se trouve le plan de travail où la structure est représentée en 3D.
- En bas de l'interface, nous avons :

La liste des paramètres qui contient les variables utilisées pendant la simulation.

Le message qui indique si chaque étape a été simulée avec succès. En cas d'erreur, un message d'erreur apparaît [III-4].

III.3. CONCEPTION ET STRUCTURE DE L'ANTENNE

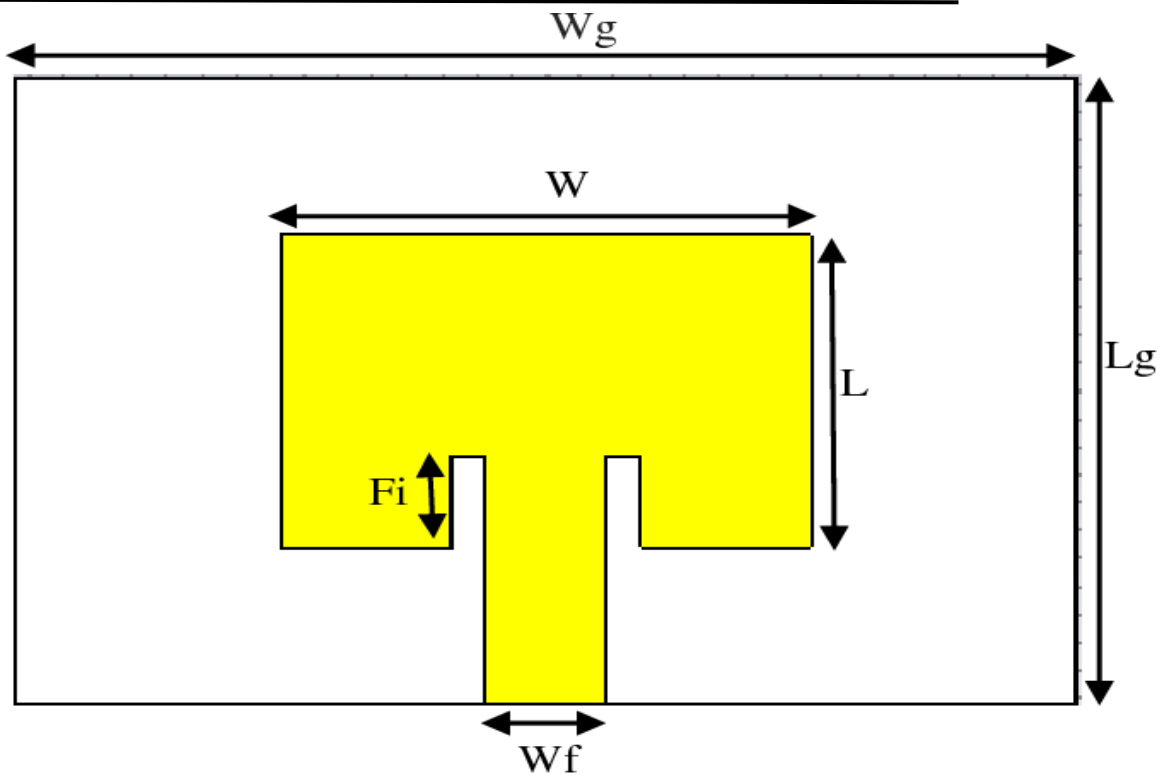
L'antenne proposée est une antenne patch rectangulaire qui se compose d'un patch rectangulaire ($WP \times LP$) adapté à une impédance d'entrée de 50Ω . Elle utilise un substrat ($W \times L$) en FR-4 (LOSSY) avec une permittivité relative de $\epsilon_r = 4.3$ et une épaisseur de $Z = 1.6$ mm.

Le plan de masse ($WG \times LG$) est fabriqué à partir du même matériau que le patch (PEC) et possède la même épaisseur de $Z_1 = 0.035$ mm. Le facteur de remplissage est de $W_f = 3.11$.

Les résultats après calculs sont mentionnés dans le Tableau III-1:

Les paramètres	Les dimensions en (mm)
W_g	20
L_g	20
W	7.366
L	5.002
W_f	3.112
Z	1.6
Z_1	0.035

Tableau III- 1 : Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.



III.3.1. La structure de l'antenne patch

Premièrement, on remplit la liste des paramètres en insérant leurs valeurs numériques :

III.3.1.A Dessiner le substrat

Pour réaliser cette opération, il vous suffit de choisir l'option "brick" dans le logiciel, puis d'utiliser la touche "ESC" du clavier. Cela va ouvrir une fenêtre de dialogue où vous pourrez spécifier les coordonnées du substrat. Une fois les coordonnées définies, le substrat sera affiché à l'écran en fonction de vos paramètres :

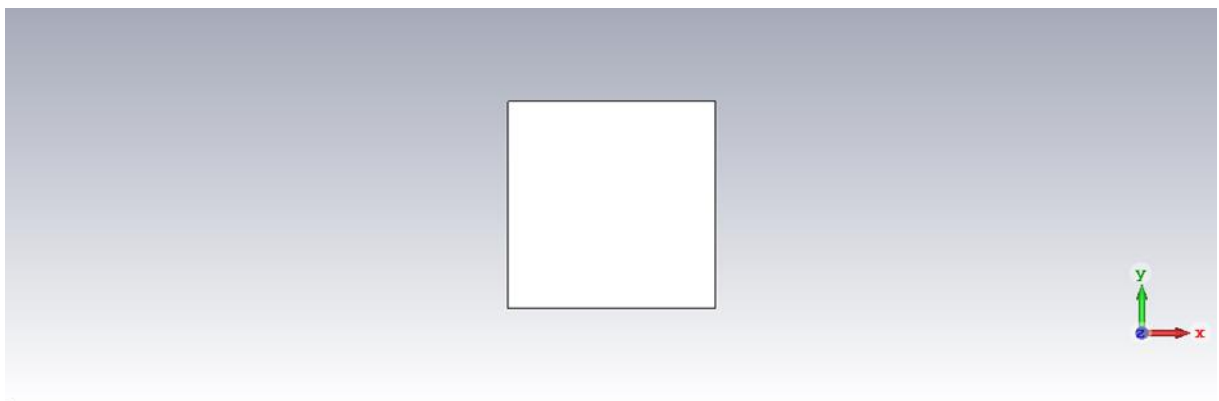


Figure III- 3: La structure du substrat.

III.3.1.B Dessiner le plan de masse

Après avoir sélectionné la face pour la deuxième fois, vous pouvez accéder à l'option "Extrude face". En cliquant dessus, une boîte de dialogue s'affiche, vous permettant de définir les coordonnées et le matériau à utiliser. Une fois que vous avez saisi ces informations, il suffit de cliquer sur le bouton "OK" pour confirmer votre choix.

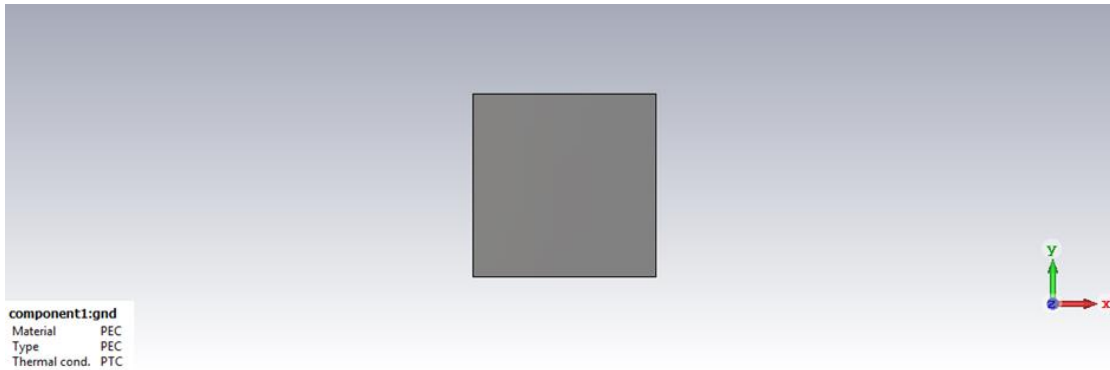


Figure III- 4 : La structure de la masse.

III.3.1.C Dessiner le patch

Pour créer la structure du patch, la première étape consiste à sélectionner l'option "Brick". Ensuite, en utilisant la touche "ESC" du clavier, une boîte de dialogue apparaît, où vous pouvez entrer les coordonnées et le matériau souhaités pour le patch. Une fois ces informations saisies, vous pouvez valider vos choix. La structure du patch est alors créée selon les paramètres spécifiés, comme illustré dans la figure ci-dessous :

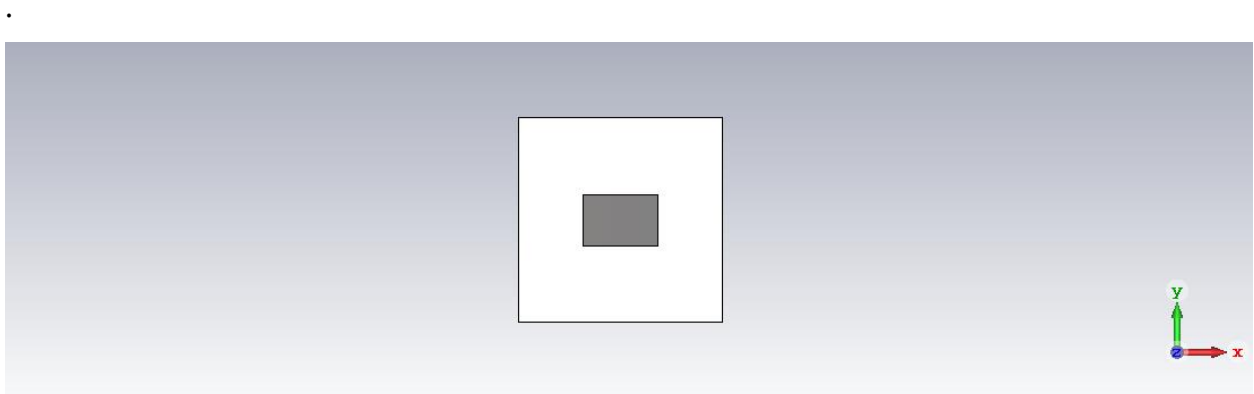


Figure III- 5 : La structure du patch.

III.3.1.D La ligne microruban

Pour créer la ligne d'alimentation, la première étape consiste à sélectionner l'option "Brick". Ensuite, en utilisant la touche "ESC" du clavier, une boîte de dialogue s'affiche, vous permettant de spécifier les coordonnées et le matériau à utiliser pour la ligne d'alimentation. Après avoir

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

entré ces informations, vous pouvez procéder à la création de la ligne d'alimentation. Le résultat obtenu est illustré dans la figure suivante.

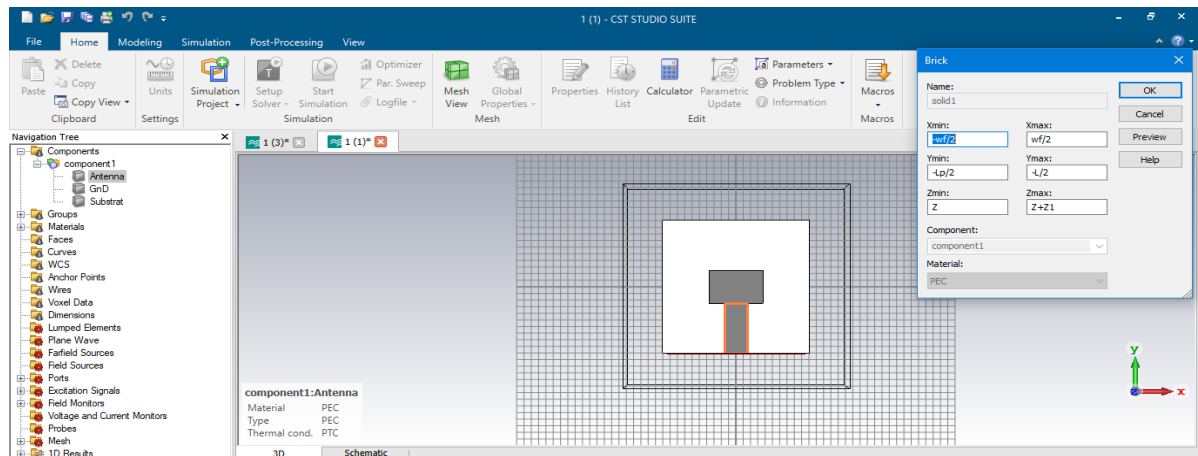


Figure III- 6: Structure d'un patch rectangulaire simple.

III.3.1.E Le port de polarisation

Dans la barre d'outils, nous choisissons l'icône appropriée pour cette étape spécifique. Ensuite, nous utilisons l'outil "pick" pour sélectionner la face que nous désirons. Ensuite, nous cliquons sur l'icône correspondante pour accéder aux paramètres requis, et finalement, nous confirmons notre choix en cliquant sur "OK". Le résultat de cette opération est visible dans l'image ci-dessous :

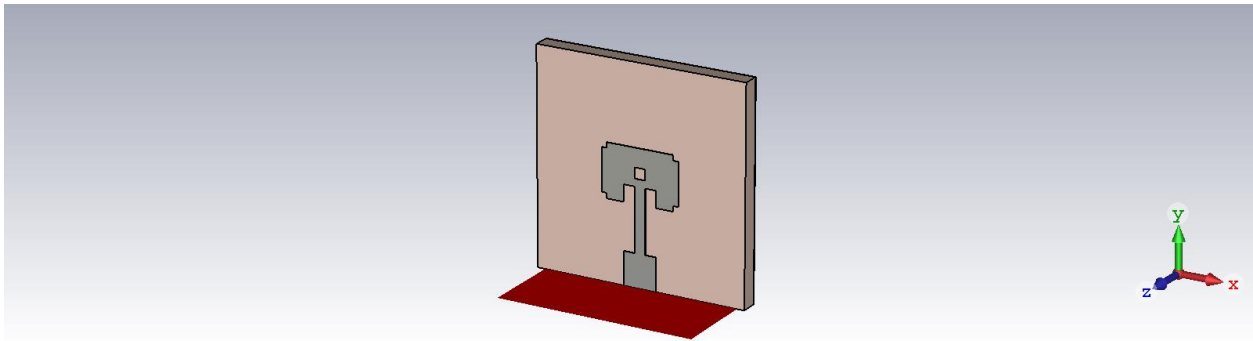


Figure III- 7 : Structure d'une antenne patch alimentée par une ligne micro ruban.

III-4 RESULTAT ET DISCUSSION

III-4-1 Antenne patch propose

III-4-1-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avant adaptation

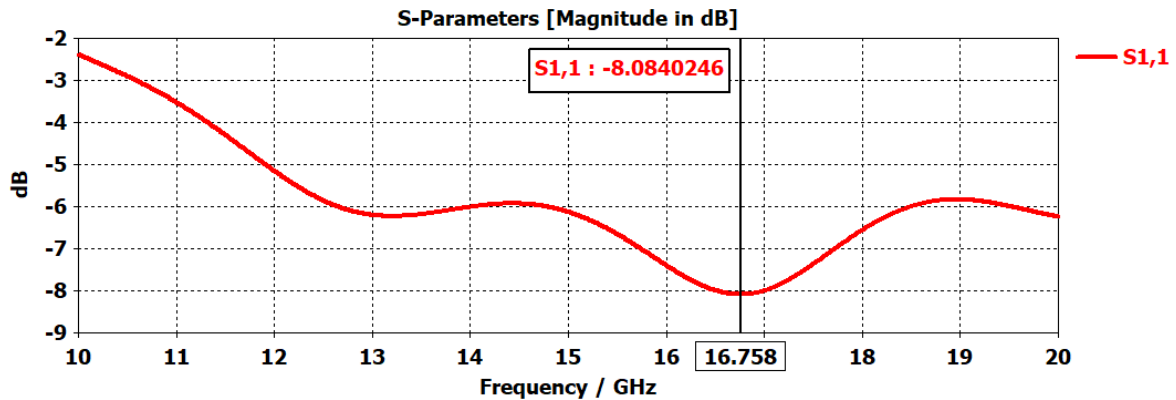


Figure III- 8 : Le coefficient de réflexion de l'antenne.

La figue III-8 présente le résultat de la simulation du coefficient de réflexion S_{11} de -8.084 dB à la fréquence 16.758 GHz, nous voyons bien que l'antenne n'est pas encore adaptée à la fréquence désirée qui est de 12.5 GHz.

III-4-1-B Adaptation de l'antenne

À cette étape, notre objectif est de régler la fréquence de notre antenne afin qu'elle corresponde à celle souhaitée. Pour atteindre cet objectif, nous avons apporté des modifications au patch en y ajoutant des encoches.

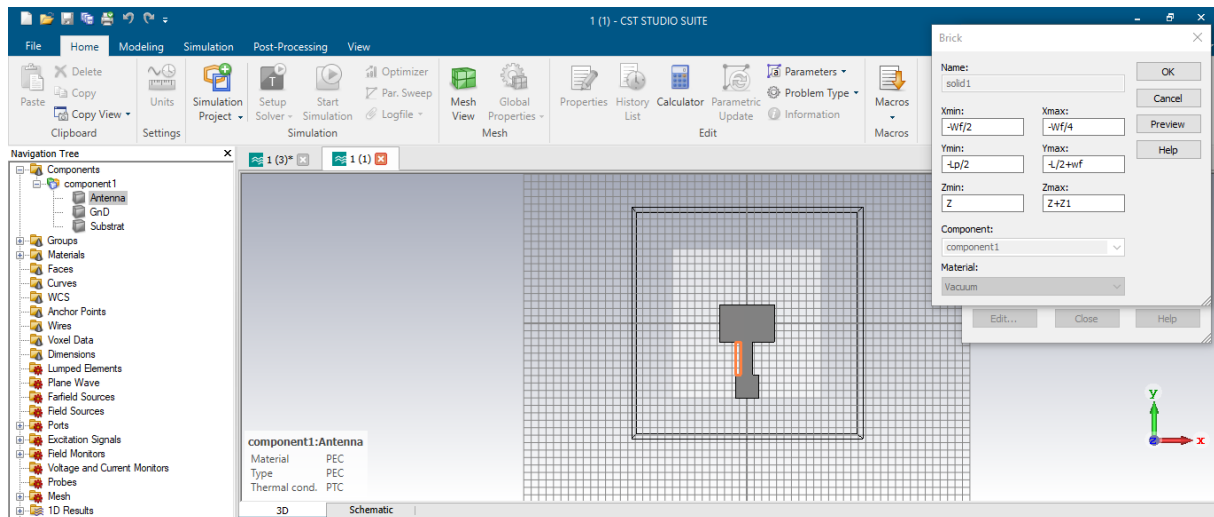


Figure III- 9 : Forme de l'antenne adaptée.

III-4-1-C Nouvelle structure de l'antenne

Dans cette étape, nous avons ajusté notre antenne à la fréquence souhaitée en ajoutant des encoches sur le patch, ainsi qu'une ouverture (slot) à cet endroit précis. Cette configuration est illustrée dans la figure III-10.

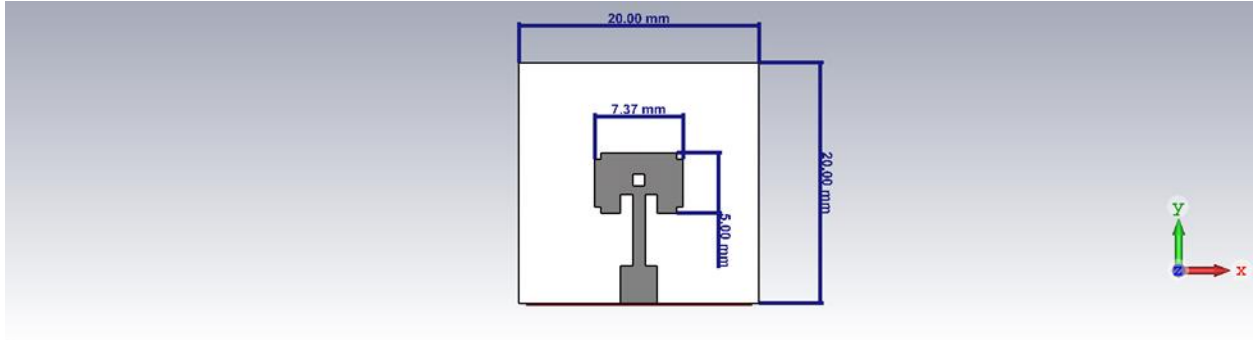


Figure III- 10 : La nouvelle structure de l'antenne.

III-4-1-D Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch après adaptation

Dans la figure III-11 le coefficient de réflexion de notre antenne adapter et proposer :

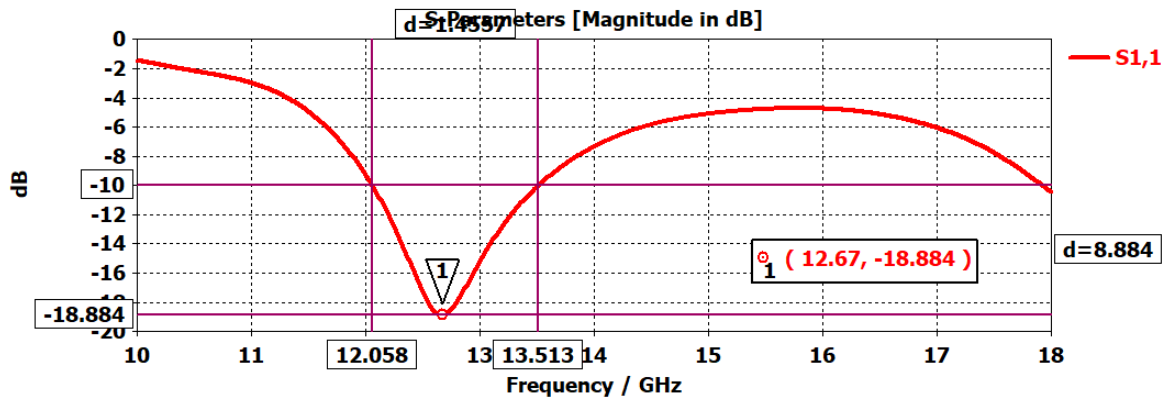


Figure III- 11 : Coefficient de réflexion S_{11} .

Les résultats du paramètre S_{11} montrent une faible réflexion du signal (dB) sur toute la plage de fréquences étudiée, indiquant une bonne adaptation d'impédance et une transmission efficace à travers l'interface.

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de $F_C=12.67$ GHz avec un coefficient de réflexion égale à -18.884 dB. Et une bande passante BP= 11.48%.

$$BP = \frac{F_{Max} - F_{Min}}{F_C} \times 100 \quad \text{III} - 1$$

III-4-1-E Taux d'Onde Stationnaire (VSWR)

D'après la figure ci-dessous, le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) est inférieur à 2, ce qui indique que l'antenne est correctement adaptée à la fréquence désirée.

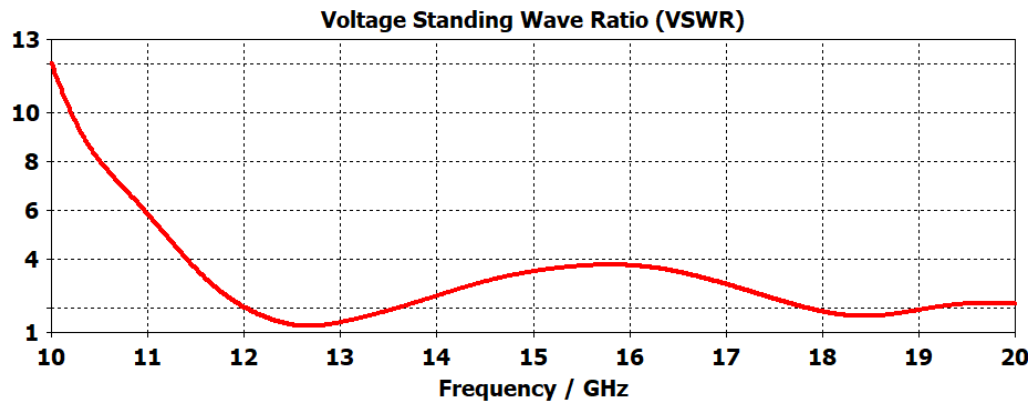


Figure III- 12 : VSWR de l'antenne patch.

Les résultats du paramètre (VSWR) révèlent une adaptation d'impédance optimale avec une valeur basse inférieur à 2. Cela indique une transmission efficace du signal électromagnétique à travers l'interface, ce qui se traduit par une faible réflexion et une performance supérieure du notre antenne dans notre fréquence désirée.

III-4-1-F Le gain

La représentation de cette antenne a montré que le gain dans la figure III-13.

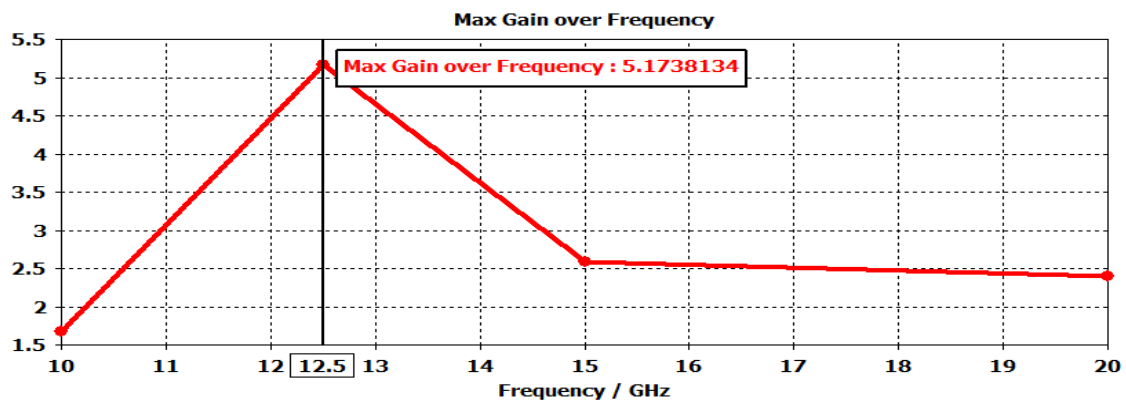


Figure III- 13 : Le gain à 12.5 GHz.

Les résultats du gain à 5.17 dB démontrent une augmentation significative de la puissance du signal à différentes fréquences étudiées. Ces résultats indiquent une performance supérieure du système en termes d'amplification du signal, ce qui peut conduire à une meilleure portée et une réception améliorée dans notre fréquence étudiée.

III-4-1-G Le diagramme de rayonnement

Grâce au logiciel CST MWS, il est possible de visualiser les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne. Ces diagrammes fournissent des informations sur le gain et la directivité de l'antenne. Ils offrent la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire, ce qui donne une indication sur l'angle d'ouverture de l'antenne [III-5].

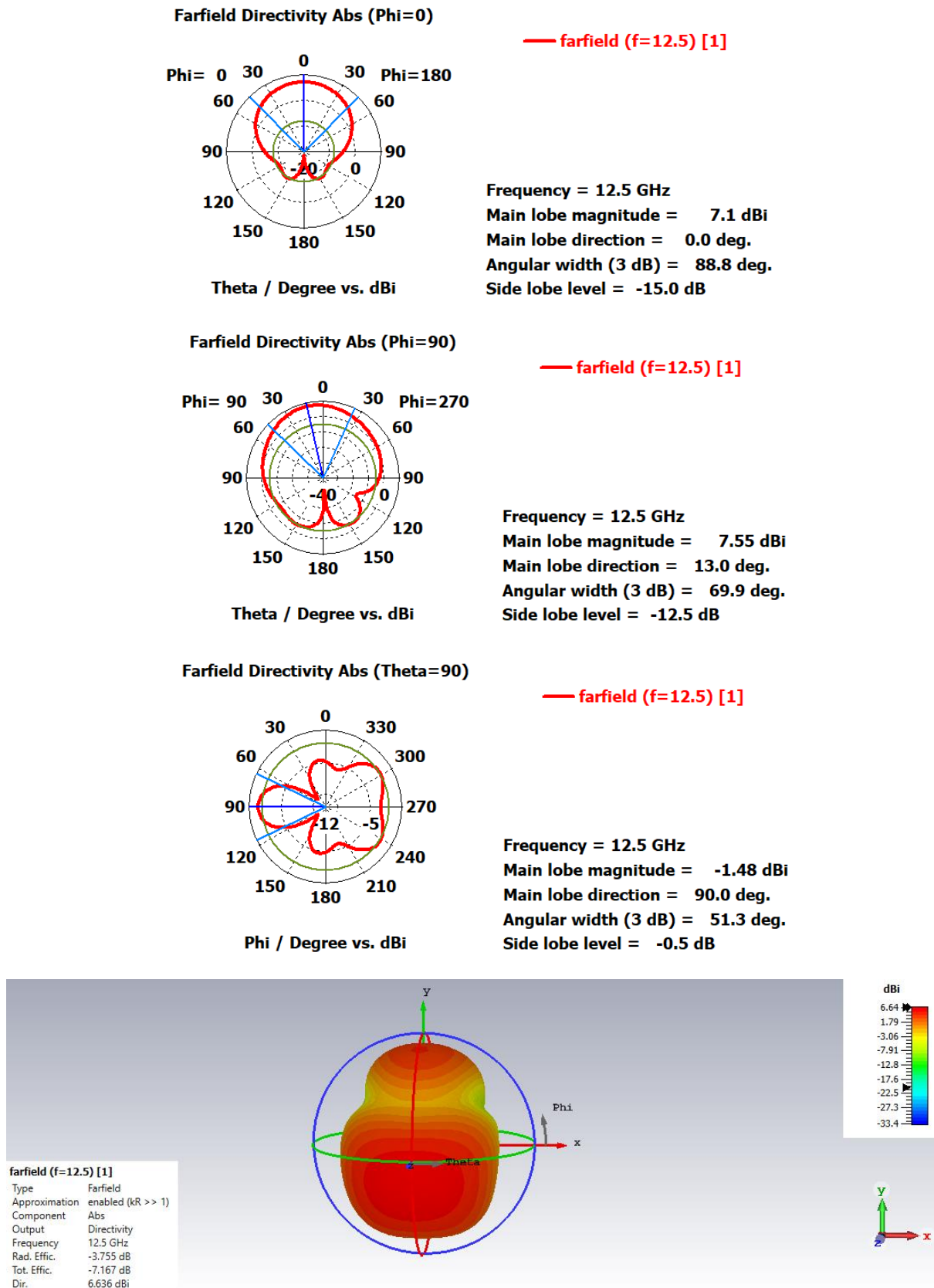


Figure III- 14 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à 12.5GHz en 3D et polaire.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Le diagramme de rayonnement permet de visualiser les lobes dans deux dimensions, dans le plan horizontal ($\phi=0^\circ$) ou dans le plan vertical ($\phi=90^\circ$) incluant le lobe le plus important et aussi pour ($\theta=90^\circ$). Notre étude sera sur le plan horizontal. Les résultats du diagramme de rayonnement pour les deux principaux plans en 2D pour une fréquence de résonance 12.5 GHz. Le rayonnement de l'antenne est Omnidirectionnel avec angle d'ouverture (88.8° , 69.9° et 51.3°).

III.4.2 Les différents matériaux utilisés dans l'antenne patch

Les antennes patch font usage d'une gamme de matériaux différents pour leurs substrats diélectriques. Parmi ces matériaux, on trouve le FR-4, les substrats céramiques et des matériaux spécifiques tels que le Rogers. Chaque matériau possède des caractéristiques uniques en termes de propriétés diélectriques, de coût et de performances électriques. Le choix du matériau approprié revêt une importance capitale pour garantir une bonne adaptation d'impédance, une stabilité thermique et des performances optimales de l'antenne patch.

III.4.2 A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avec différents matériaux

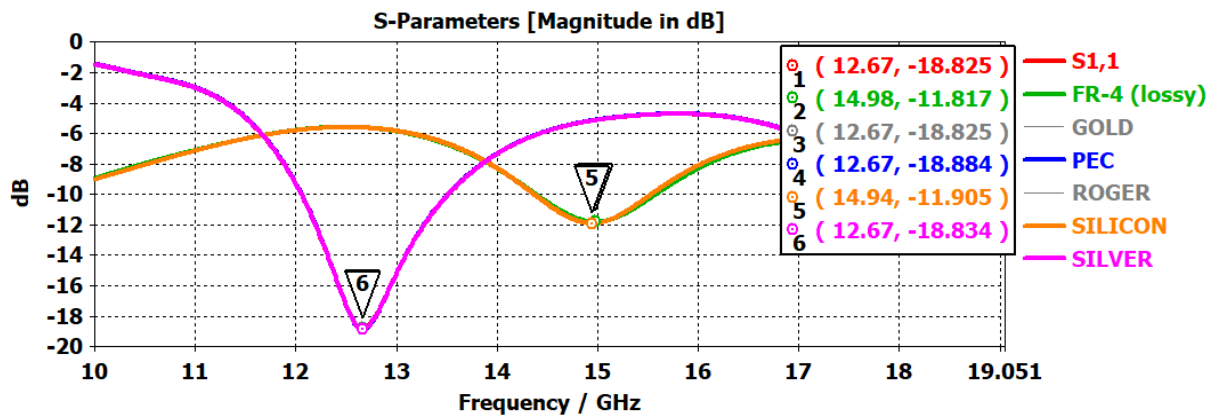


Figure III- 15 : Coefficient de réflexion S_{11} pour les différents matériaux.

Le tableau suivant montre les différents matériaux utilisés dans l'antenne patch et leur fréquence de résonance et la bande passante après simulation.

Matériaux	Fréquence en (GHz)	Bande passante
PEC	12.67	[12.05-13.51]
SILICON	14.94	[14.35-15.53]
GOLD	12.64	[12.20-13.26]
SILVER	12.66	[12.06-13.50]
ROGER	14.97	[14.38-15.56]

Tableau III- 2 : Les résultats des différents matériaux utilisés.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

On remarque que notre antenne reste bien adaptée lorsqu'on a utilisé les matériaux (PEC, GOLD, SILVER) on a presque la même fréquence de résonance 12.5GHz et la même bande passante au contraire lorsqu'on a utilisé (FR-4, SILICON, ROGER) la fréquence de résonance à augmenter jusqu'à environ 15 GHz.

III.4.3.Les diodes PIN

L'antenne suivant contient une diode PIN au niveau de la ligne micro ruban

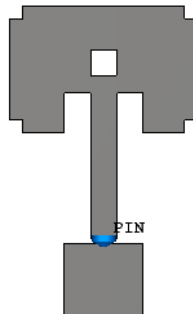


Figure III- 15 : Antenne patch avec une diode PIN.

L'intégration d'une diode PIN dans une antenne patch permet une reconfiguration rapide des caractéristiques, offrant une flexibilité précieuse pour les communications sans fil. Cependant, une conception précise de la diode et de l'antenne est essentielle pour garantir des performances optimales. Cette approche présente un potentiel prometteur pour les antennes adaptatives dans les systèmes de communication.

III-4-3-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avec diode PIN

Dans la figure III-16 on remarque que dans l'état ON l'antenne fonctionne contrairement que dans l'état OFF.

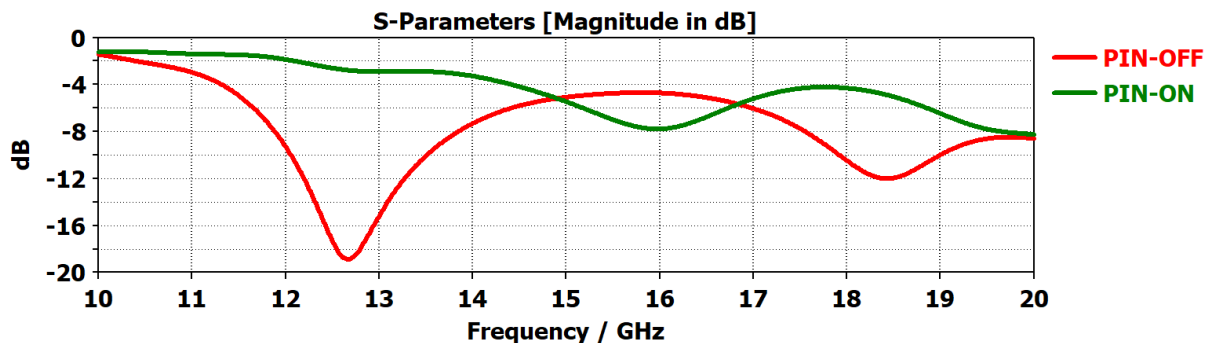


Figure III- 16 : Coefficient de réflexion de la diode dans état ON et OFF.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Le coefficient de réflexion de la diode PIN varie entre les états ON et OFF. En état ON, le coefficient de réflexion est faible, permettant une transmission efficace des signaux à travers l'antenne. En état OFF, le coefficient de réflexion est plus élevé, ce qui peut entraîner des réflexions d'ondes et des pertes d'énergie. Cette variation du coefficient de réflexion offre la possibilité de reconfigurer les propriétés de l'antenne en fonction des besoins de communication.

III-4-3-B Taux d'Onde Stationnaire (VSWR) d'antenne patch avec diode PIN

D'après la figure ci-dessous, le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) de l'état ON est inférieur à 2, ce qui indique que l'antenne est correctement adaptée à la fréquence désirée contrairement à l'état OFF.

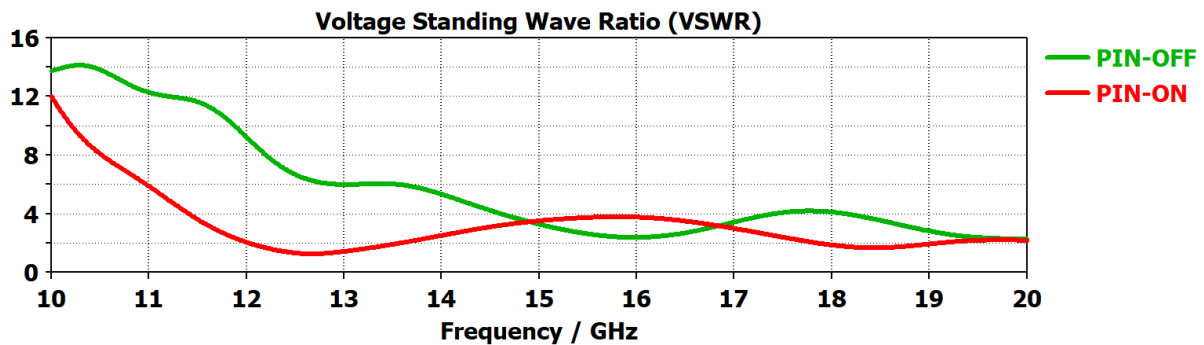


Figure III- 17 : VSWR de la diode dans état ON et OFF.

Les résultats du paramètre Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) de l'antenne avec une diode PIN en état "OFF" et en état "on" montrent des différences significatives en termes d'adaptation d'impédance et de réflexion du signal. En état "ON", une meilleure adaptation d'impédance est observée, avec des valeurs de VSWR plus faibles sur l'ensemble de la plage de fréquences étudiée. Cependant, en état "OFF", une augmentation du VSWR est constatée, indiquant une réflexion accrue et une moins bonne adaptation d'impédance à certaines fréquences.

III-4-3-C Le gain d'antenne patch avec diode PIN

La représentation 3D de cette antenne a montré que le gain égal à 2.88 dBi.

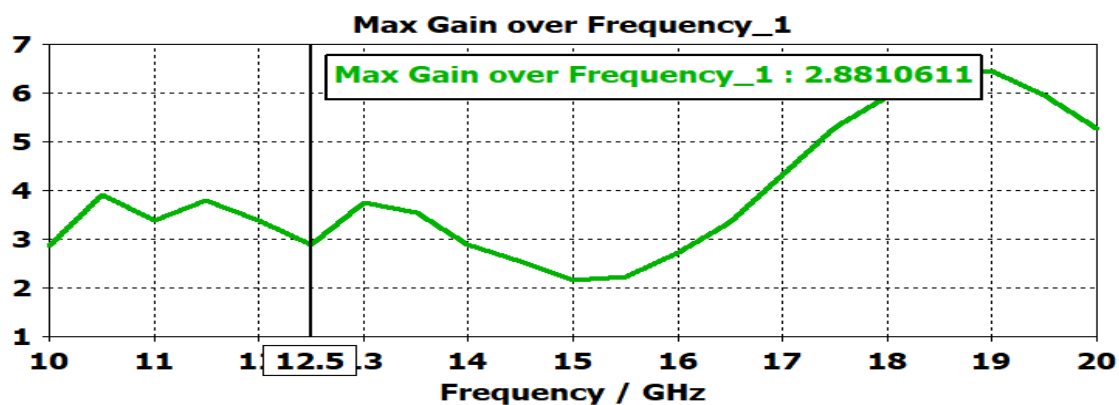


Figure III- 18 : Le gain dans l'état de diode OFF.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Les résultats du gain de l'antenne avec une diode PIN en état "OFF" révèlent une diminution significative de la puissance du signal à travers le système à différentes fréquences étudiées. Cela indique une réduction de l'amplification du signal et suggère une détérioration de la portée et de la réception de l'antenne dans la plage de fréquences spécifiée en raison de la désactivation de la diode PIN.

La représentation 3D de cette antenne a montré que le gain égal à 2.14 dBi

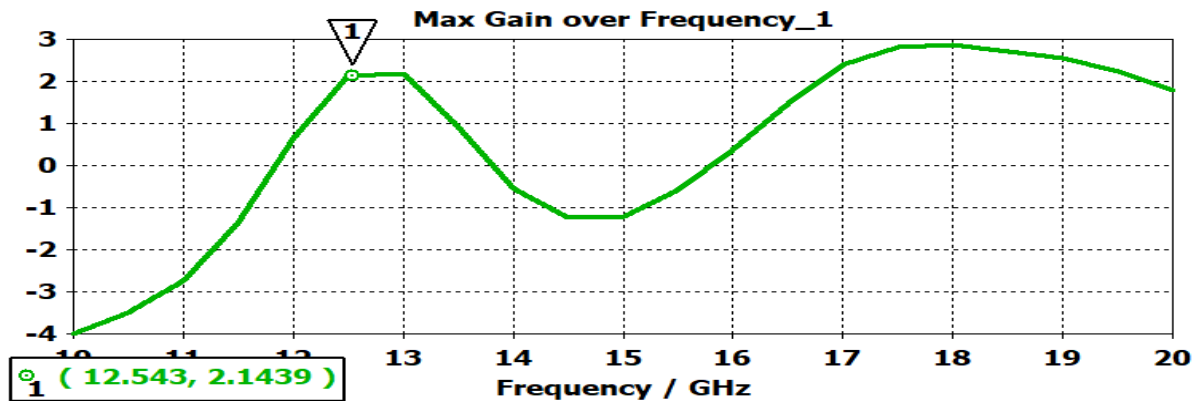
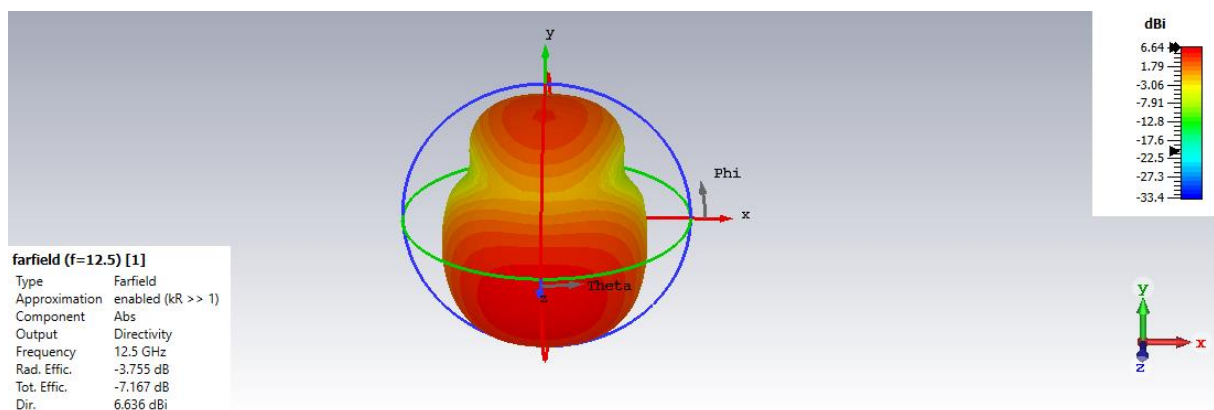


Figure III- 19 : Le gain dans l'état de diode ON.

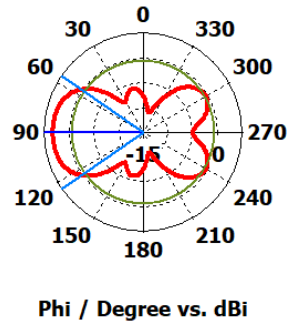
Les résultats du gain de l'antenne avec une diode PIN en état "ON" démontrent une augmentation significative de la puissance du signal à travers le système à différentes fréquences étudiées. Cela indique une performance supérieure de l'antenne en termes d'amplification du signal et suggère une amélioration de la portée et de la réception dans la plage de fréquences spécifiée.

III-4-3-D Le diagramme de rayonnement d'antenne patch avec diode PIN

La représentation 3D de cette antenne a montré que la directivité est égale à 6.636 dB avec un gain égal à 2.88 dB.



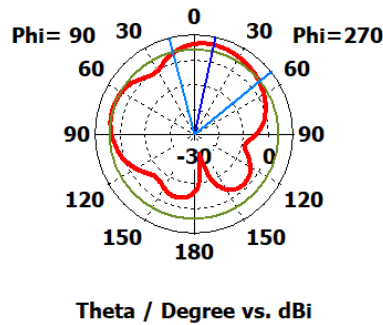
Farfield Directivity Abs (Theta=90)



— farfield (f=12.5) [1]

Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 3.16 dBi
Main lobe direction = 90.0 deg.
Angular width (3 dB) = 68.9 deg.
Side lobe level = -3.7 dB

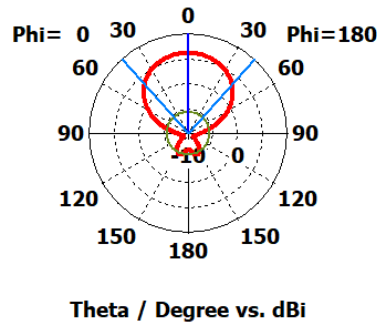
Farfield Directivity Abs (Phi=90)



— farfield (f=12.5) [1]

Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 6.65 dBi
Main lobe direction = 12.0 deg.
Angular width (3 dB) = 65.5 deg.
Side lobe level = -2.3 dB

Farfield Directivity Abs (Phi=0)



— farfield (f=12.5) [1]

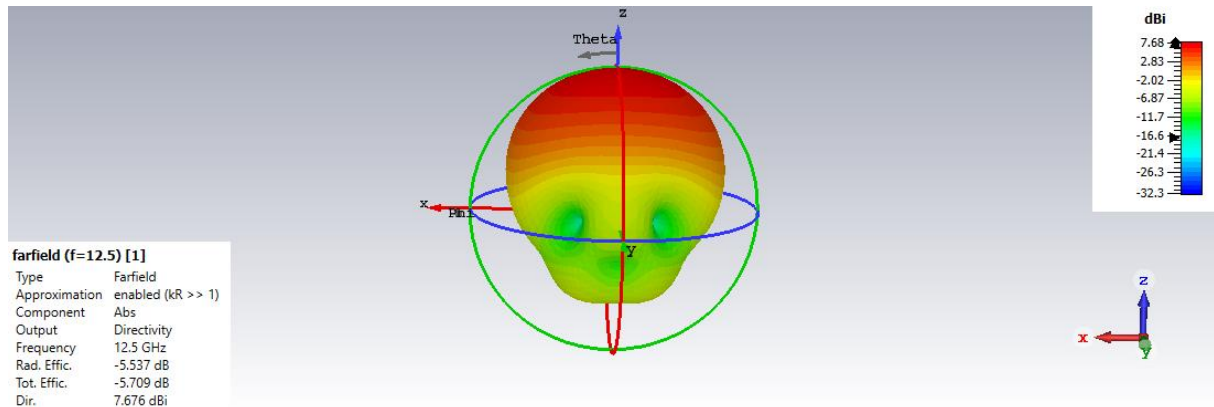
Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 6.12 dBi
Main lobe direction = 0.0 deg.
Angular width (3 dB) = 84.4 deg.
Side lobe level = -11.6 dB

Figure III- 20 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état diode PIN OFF en 3D et polaire.

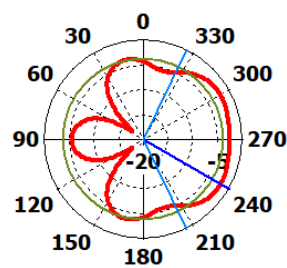
Les résultats du diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec diode PIN dans l'état OFF montrent une dispersion du faisceau et une réduction de la directivité. Le rayonnement est moins concentré dans une direction spécifique, ce qui indique une diminution de la performance de l'antenne en termes de couverture et de gain directionnel. Ces résultats suggèrent que l'activation de la diode PIN dans l'antenne patch peut avoir un impact négatif sur le rayonnement directionnel précis, entraînant une dispersion du signal dans différentes directions.

La représentation 3D de cette antenne a montré que la directivité est égale à 7.676 dB avec un gain égal à 2.14 dB.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable



Farfield Directivity Abs (Theta=90)

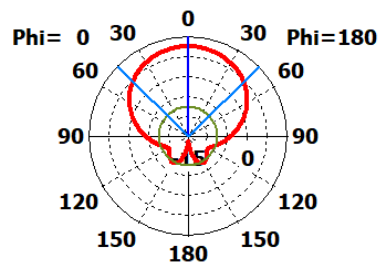


Phi / Degree vs. dBi

— farfield (f=12.5) [1]

Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = -2.12 dBi
Main lobe direction = 240.0 deg.
Angular width (3 dB) = 128.0 deg.
Side lobe level = -1.6 dB

Farfield Directivity Abs (Phi=0)

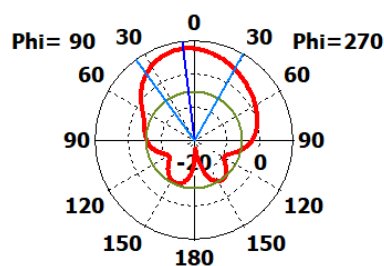


Theta / Degree vs. dBi

— farfield (f=12.5) [1]

Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 7.54 dBi
Main lobe direction = 0.0 deg.
Angular width (3 dB) = 91.1 deg.
Side lobe level = -14.9 dB

Farfield Directivity Abs (Phi=90)



Theta / Degree vs. dBi

— farfield (f=12.5) [1]

Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 7.69 dBi
Main lobe direction = 7.0 deg.
Angular width (3 dB) = 65.3 deg.
Side lobe level = -13.1 dB

Figure III- 21 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à l'état diode PIN ON en 3D et polaire.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Les résultats du diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec diode PIN dans l'état ON démontrent une directivité et une focalisation du faisceau optimales. Le rayonnement est bien concentré dans une direction spécifique, ce qui indique une meilleure performance de l'antenne en termes de couverture et de gain dans cette direction. Ces résultats suggèrent que l'antenne patch avec diode PIN en état ON peut être utilisée efficacement pour des applications nécessitant un rayonnement directionnel précis.

III-4-3-E La distribution de courant d'antenne patch avec diode PIN

On remarque que dans l'état OFF le courant ne propage pas dans l'antenne

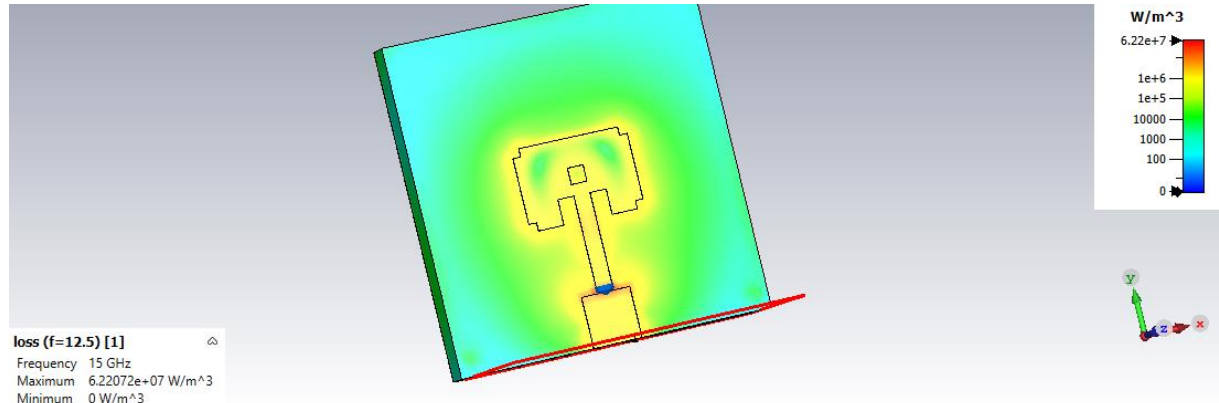


Figure III- 22 : La distribution de courant de la diode PIN dans l'état OFF.

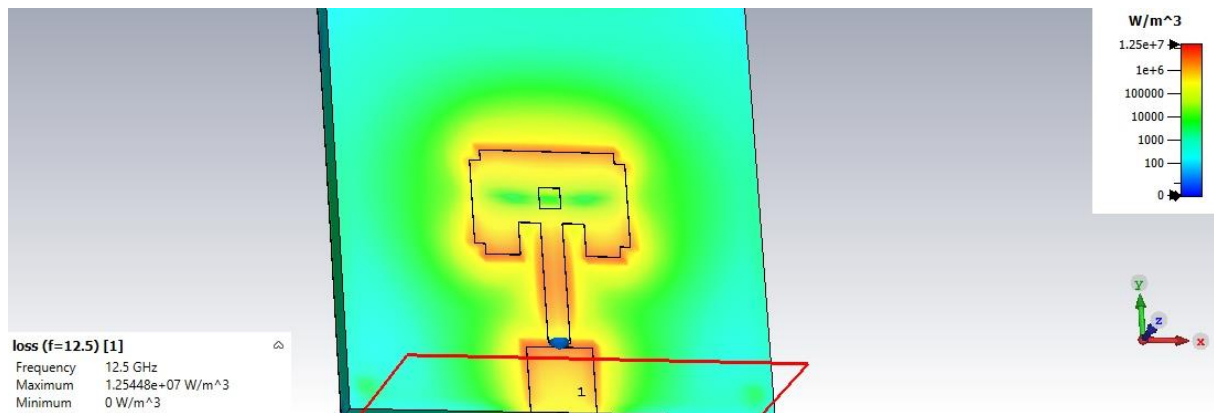


Figure III- 23 : La distribution de courant de la diode PIN dans l'état ON.

La distribution du courant dans une antenne patch avec une diode à l'état ON et OFF joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'antenne.

Lorsque la diode est à l'état ON, le courant circule à travers la piste conductrice de l'antenne, créant ainsi un champ électromagnétique qui rayonne des ondes électromagnétiques. Cette distribution de courant est maximale le long de la ligne d'alimentation et décroît progressivement vers les bords de l'antenne patch.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Lorsque la diode est à l'état OFF, le courant est interrompu, entraînant une distribution de courant négligeable le long de l'antenne. Comprendre cette distribution de courant est essentiel pour concevoir des antennes patch efficaces et optimiser leur performance lors de la commutation de la diode.

III.4.4. DIODE VARICAP

Les systèmes de communication sans fil nécessitent des antennes capables de fonctionner sur différentes fréquences. Pour répondre à cette exigence, les antennes reconfigurables sont utilisées, ce qui permet de réduire l'utilisation de matériel complexe et donc les coûts du système.

Dans notre concept, nous proposons une antenne à reconfiguration fréquentielle qui utilise une diode varicap. Cette diode possède une capacité variable qui peut être ajustée dans la bande Ku, couvrant une plage de [0.001pF à 0.33pF].

La figure III-24 présente l'emplacement de la diode varicap sur le patch de l'antenne.

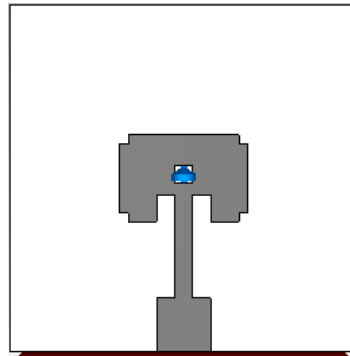


Figure III- 24 : Antenne rectangulaire avec diode varicap.

L'intégration d'une diode varicap dans une antenne rectangulaire permet un réglage flexible de la fréquence de résonance. Cette approche offre une adaptabilité précieuse pour les applications sans fil. Cependant, une conception précise est nécessaire pour optimiser les performances de l'antenne et garantir un fonctionnement efficace.

III-4-4-A Paramètre de réflexion S_{11} d'antenne patch avec diode varicap

La figure III-25 montre la variation de la valeur de la capacité de la diode varicap en fonction de la fréquence.

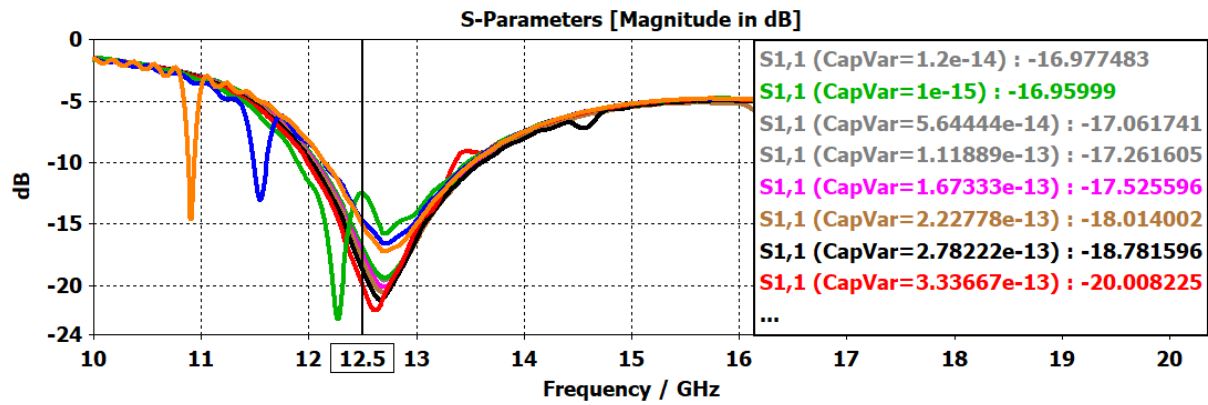


Figure III- 25 : Coefficient de réflexion de la diode varicap.

III-4-4-B Paramètre VSWR d'antenne patch avec diode varicap

D'après la figure ci-dessous, le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) est inférieur à 2.

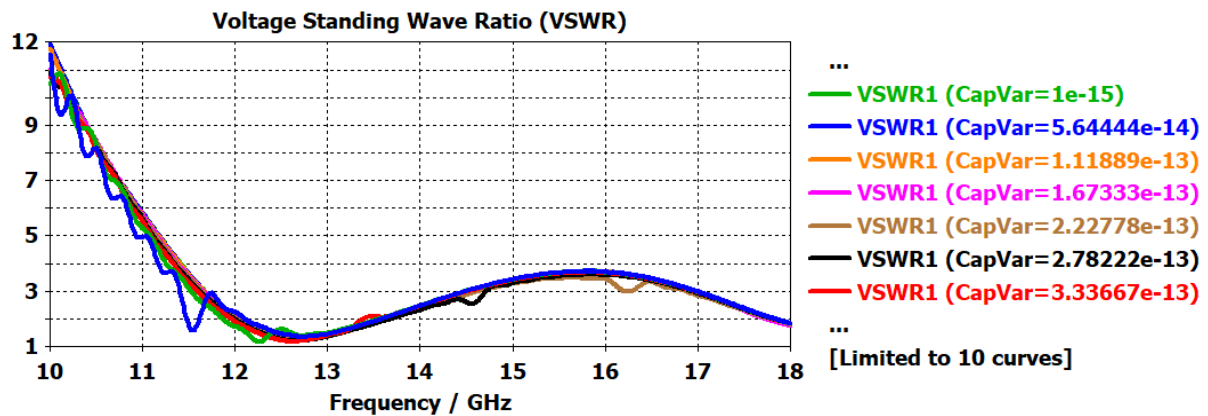


Figure III- 26 : VSWR de la diode varicap.

Les résultats du paramètre Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) de la diode varicap dans l'antenne patch révèlent une adaptation d'impédance satisfaisante, indiquant une transmission efficace du signal et une réduction de la réflexion.

Ces résultats confirment que la diode varicap contribue à une bonne adaptation d'impédance dans l'antenne patch, ce qui favorise une performance optimale du système.

III-4-4-C Le Gain d'antenne patch avec diode varicap

La variation du gain en fonction de la fréquence, en modifiant la valeur de la capacité des diodes Varactor, est illustrée dans la figure III-27..

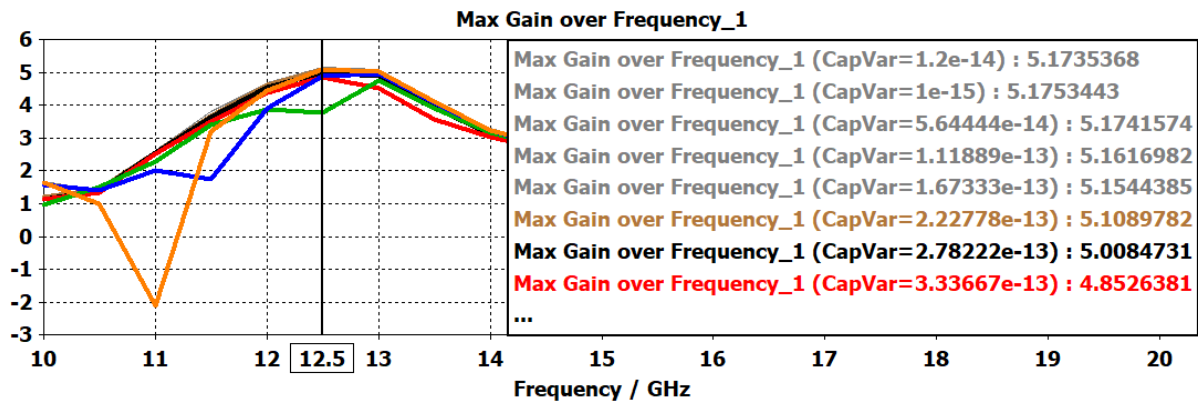


Figure III- 27 : La variation du gain d'une antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.

L'effet de la diode varicap sur l'antenne patch dans le paramètre S_{11} peut être observé lorsque la valeur de capacité de la diode varie. La capacité de la diode varicap influence directement l'impédance de l'antenne et, par conséquent, le paramètre S_{11} . En augmentant la valeur de capacité, l'impédance de l'antenne peut être modifiée, ce qui peut se traduire par un décalage dans la fréquence de résonance de l'antenne et une modification de la largeur de bande. Par conséquent, le paramètre S_{11} peut montrer une variation correspondante, reflétant les changements d'adaptation d'impédance et de réflexion d'ondes électromagnétiques.

Comprendre cet effet est crucial pour optimiser la conception de l'antenne patch avec diode varicap et garantir une performance optimale dans différentes conditions de fonctionnement et pour différentes valeurs de capacité.

Le tableau suivant montre les résultats des fréquences et de bande passante en fonction de la valeur de la capacité :

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

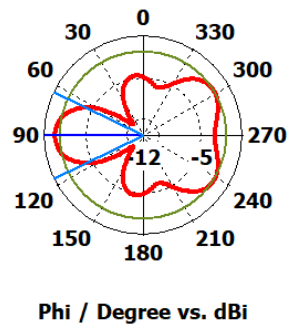
C en (fF)	S₁₁ (dB)	La fréquence (GHz)	Bande passante (GHz)	Gain (dB)	VSWR
0.1	-16.95	12.70	[12.08-13.57]	5.175	1.9
1.2	-16.97	12.71	[12.08-13.57]	5.173	1.8
5.6	-17.06	12.71	[12.07-13.57]	5.174	1.7
11.1	-17.26	12.69	[13.07-13.58]	5.16	1.6
16.7	-17.52	12.70	[12.06-13.59]	5.15	1.5
22.2	-18.01	12.69	[12.05-13.60]	5.10	1.4
27.8	-18.78	12.66	[12.03-13.60]	5.00	1.3
33.3	-20	12.61	[11.99-13.35]	4.85	1.2

Tableau III- 3 : Les résultats des fréquences et de bande passante en fonction de la valeur de la capacité.

Les valeurs de S₁₁ diminuent progressivement à mesure que la valeur de la capacité (C) augmente. Cela indique une meilleure adaptation d'impédance entre l'antenne et la source d'alimentation, ce qui entraîne une réduction des réflexions d'onde. Les valeurs de VSWR diminuent également avec l'augmentation de la valeur de C. Cela signifie une amélioration de l'adaptation d'impédance, indiquant une réduction des réflexions et une meilleure transmission de l'énergie. Le gain de l'antenne semble rester relativement constant dans la plage de valeurs de C fournies dans le tableau. Cela suggère que la variation de la capacité n'a pas d'impact significatif sur le gain de l'antenne.

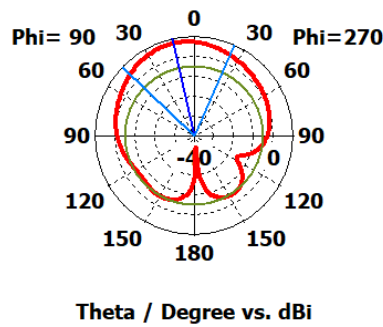
III-4-4-D Le diagramme de rayonnement d'antenne patch avec diode varicap

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



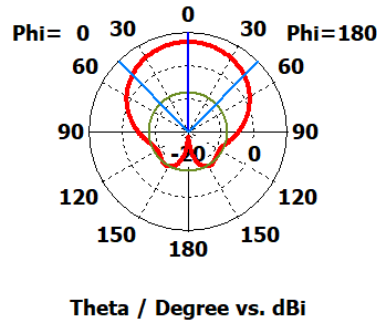
Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = -1.36 dBi
Main lobe direction = 90.0 deg.
Angular width (3 dB) = 51.7 deg.
Side lobe level = -0.6 dB

Farfield Directivity Abs (Phi=90)



Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 7.54 dBi
Main lobe direction = 13.0 deg.
Angular width (3 dB) = 70.2 deg.
Side lobe level = -12.4 dB

Farfield Directivity Abs (Phi=0)



Frequency = 12.5 GHz
Main lobe magnitude = 7.07 dBi
Main lobe direction = 0.0 deg.
Angular width (3 dB) = 88.7 deg.
Side lobe level = -15.0 dB

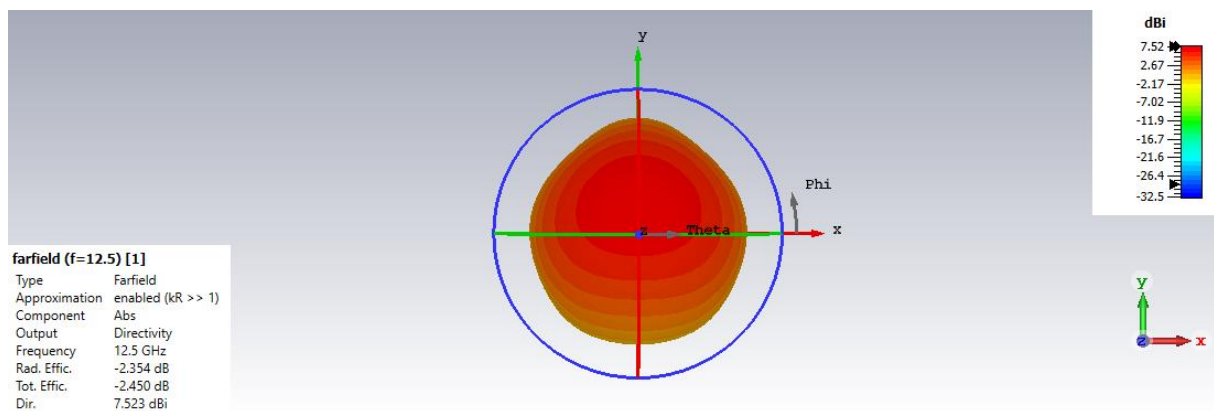


Figure III- 28 :Diagramme de rayonnement de l'antenne diode varicap en 3D et polaire.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Le résultat du diagramme de rayonnement de l'antenne diode varicap en 3D et polaire met en évidence la directivité et la répartition spatiale du rayonnement. Cette visualisation scientifique permet d'évaluer avec précision les performances de l'antenne, en identifiant les lobes principaux, les lobes secondaires et la puissance rayonnée dans différentes directions. Ces informations sont cruciales pour optimiser la couverture et la portée de l'antenne dans des systèmes de communication spécifiques.

III-4-4-E La densité de courant d'antenne patch avec diode varicap

On remarque que le courant se propage dans l'antenne

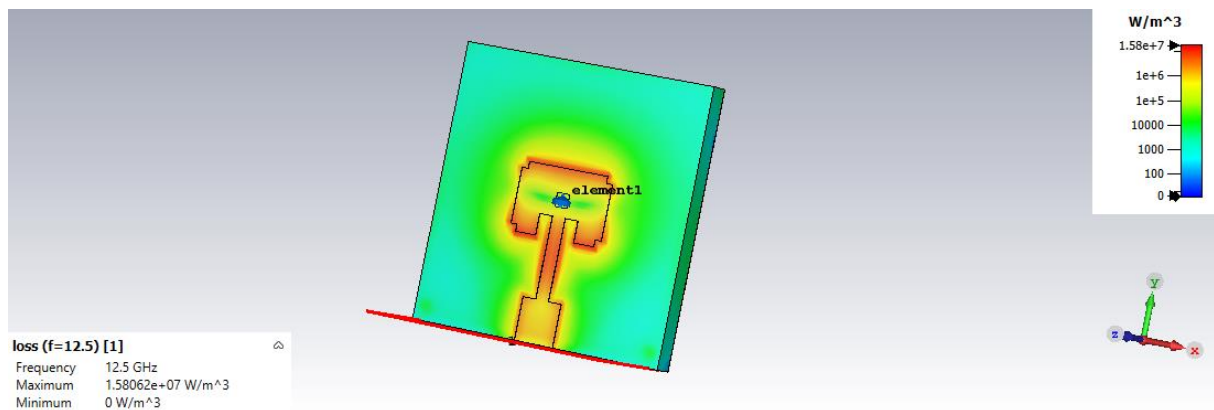


Figure III- 29: La distribution de courant de la diode varicap.

Les résultats de la distribution de courant de la diode varicap dans l'antenne patch mettent en évidence une répartition uniforme et optimale du courant à travers la diode. Cette distribution homogène indique une bonne efficacité de fonctionnement de la diode varicap, assurant ainsi une réponse précise et cohérente du système. Ces résultats confirment que la diode varicap est capable de gérer efficacement le courant dans l'antenne patch, ce qui contribue à une performance optimale et stable du système dans différentes conditions.

Comparaison des travaux similaires sur la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku

Le tableau ci-dessus présente une comparaison des travaux similaires récents axés sur la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. Les travaux similaires ont été analysés en termes de méthodologie de conception, de techniques de reconfiguration, de performances évaluées et de références. Cette comparaison permet de mettre en évidence les différentes approches, techniques et résultats obtenus dans les travaux similaires, OFFrant ainsi un aperçu des avancées récentes dans ce domaine de recherche.

CHAPITRE III : Résultats et discussion de simulation antenne patch reconfigurable

Thème	S_{11} (dB)	Gain (dBi)	Bande passante (MHz)	Références
Réseaux d'antenne patch pour application spatial	-22.8	4.62	820	[III -6]
Conception d'une antenne miniature pour communication sans fil	-31.6	2.82	86	[III -7]
Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using RF MEMS Technology	-33	5.2	1500	[III -8]
Simulation d'une antenne Imprimée agile Pour les applications satellitaires	-21.11	2.54	550	[III -9]
Ku-band Wideband Pattern Reconfigurable Microstrip Patch Antenna with RF MEMS Switches	-21	9.2	1001	[III -10]
Nos résultats	-18.88	5.17	1510	-

TABLEAU III- 4: COMPARAISON DES TRAVAUX SIMILAIRES SUR LA CONCEPTION DES ANTENNES RECONFIGURABLES ULB POUR LA RECEPTION DE LA BANDE KU.

III.5. CONCLUSION

Le but de ce chapitre était de simuler une antenne patch reconfigurable, à laquelle certaines modifications ont été apportées pour s'adapter à la fréquence 12,5 GHz, en insérant une diode varicap pour introduire le concept de reconfiguration de fréquence et ainsi atteindre notre objectif, à savoir une antenne patch reconfigurable. pour les applications satellitaires en bande Ku.

A l'aide du logiciel CST, nous avons créé une antenne patch reconfigurable.

Les diagrammes de rayonnement montrent que cette antenne a également la capacité de reconfigurer le diagramme à différentes fréquences pour différentes combinaisons de commutation. Toutes les réflectivités sont inférieures à -10 dB et les gains dépassent 5.17 dB. L'antenne change de fréquence dans la bande Ku lorsque la capacité de la diode change. L'antenne patch reconfigurable a un grand potentiel pour devenir une partie intégrante du futur système de télécommunications.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, ce mémoire s'est penché sur la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. L'objectif principal de cette recherche était de proposer une approche novatrice et efficace pour la conception de telles antennes, en exploitant les avancées technologiques récentes et en comparant les travaux similaires.

La méthodologie de conception adoptée dans cette étude s'est appuyée sur une approche basée sur l'optimisation, en utilisant des algorithmes avancés pour optimiser les paramètres clés de l'antenne. Différentes techniques de reconfiguration, telles que la reconfiguration en amplitude, en phase, en fréquence ou en polarisation, ont été explorées pour évaluer leur pertinence et leurs performances dans le contexte de la bande Ku.

L'analyse comparative des travaux similaires récents a permis de mettre en évidence les avancées et les tendances dans le domaine de la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. Cette analyse a permis d'identifier les principales approches, les techniques de reconfiguration utilisées et les performances évaluées dans ces travaux similaires.

Les résultats de cette recherche ont démontré l'importance de la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku, en offrant une flexibilité accrue dans des environnements de communication en constante évolution. Les antennes reconfigurables ULB permettent une adaptation dynamique des caractéristiques du faisceau, ce qui permet d'optimiser des paramètres clés tels que le gain, la directivité et la bande passante.

En outre, cette recherche a identifié certaines lacunes et opportunités d'amélioration dans le domaine de la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. Des défis tels que la complexité de conception, les contraintes de coût et les performances limitées dans certaines conditions spécifiques ont été abordés.

Dans l'ensemble, ce mémoire contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine de la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. Les résultats et les analyses présentés fournissent des informations précieuses pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant sur les systèmes de communication par satellite.

Pour des travaux futurs, il est recommandé de poursuivre la recherche dans le développement de nouvelles techniques de reconfiguration, d'explorer des approches hybrides et d'intégrer des considérations de performance énergétique dans la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku. De plus, une attention particulière devrait être accordée à la validation expérimentale des conceptions proposées afin de confirmer les performances simulées.

Conclusion générale

En somme, la conception des antennes reconfigurables ULB pour la réception de la bande Ku Offre de vastes possibilités d'amélioration et de développement, contribuant ainsi à l'optimisation des systèmes de communication par satellite dans la bande Ku et à l'amélioration de la connectivité mondiale.

.

RÉFÉRENCES

- [1] BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & sons, 2016.
- [2] STUTZMAN, Warren L. et THIELE, Gary A. Antenna theory and design. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] Collin, R. E . Antennas and Radiowave Propagation. McGraw-Hill Education. . (2012).
- [4] GARG, Ramesh, BAHL, Inder, et BOZZI, Maurizio. Microstrip lines and slotlines. Artech house, 2013.
- [5] James, J. R., & Hall, P. S. Handbook of Microstrip Antennas. Peter Peregrinus Ltd. (2015).
- [6] BOSE, T. et GUPTA, N. Design of an aperture-coupled microstrip antenna using a hybrid neural network. IET microwaves, antennas & propagation, 2012, vol. 6, no 4, p. 470-474.
- [7] Lyke, J. C., C. G. Christodoulou, G. A. Vera, and A. H. Edwards, “An introduction to reconfigurable systems,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 3, 291–317, Mar. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2397832.
- [I-1]. Oliveri, G., D. H. Werner, and A. Massa, “Reconfigurable electromagnetics through metamaterials — A review,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 7, 1034–1056, Jul. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2394292.
- [I-2]. Motovilova, E. and S. Y. Huang, “A review on reconfigurable liquid dielectric antennas,” *Materials*, Vol. 13, 1863, 2020.
- [I-3]. Bernhard, J. T., “Reconfigurable antennas,” *Synthesis Lectures on Antennas*, Vol. 2, No. 1, 1–66, Jan. 2007, doi: 10.2200/S00067ED1V01Y200707ANT004.
- [I-4]. Christodoulou, C. G., Y. Tawk, S. A. Lane, and S. R. Erwin, “Reconfigurable antennas for wireless and space applications,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 7, 2250–2261, Jul. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2188249.
- [I-5]. OjaroudiParchin, N., H. Jahan bakhsh Basherlou, Y. I. A. Al-Yasir, A. M. Abdulkhaleq, and R. A. Abd-Alhameed, “Reconfigurable antennas: Switching techniques — A survey,” *Electronics*, Vol. 9, No. 2, 336, Feb. 2020, doi: 10.3390/electronics9020336.
- [I-6]. Haupt, R. L. and M. Lanagan, “Reconfigurable antennas,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 55, No. 1, 49–61, Feb. 2013, doi: 10.1109/MAP.2013.6474484.
- [I-7]. Joodaki, H., H. Valiee, and M. Bayat, “Reconfigurable dual frequency microstrip MIMO patch antenna using RF MEMS switches for WLAN application,” *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 3254–3258, Guiyang, China, May 2013, doi: 10.1109/CCDC.2013.6561508.
- [I-8]. Soltani, S., P. Lotfi, and R. D. Murch, “A port and frequency reconfigurable MIMO slot antenna for WLAN applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64, No. 4, 1209–1217, Apr. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2522470.
- [I-9]. Yuan, X., et al., “A parasitic layer-based reconfigurable antenna design by multi-objective optimization,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, No. 6, 2690–2701, Jun. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2194663.
- [I-10]. Abdulraheem, Y. I., et al., “Design of frequency reconfigurable multiband compact antenna using two PIN diodes for WLAN/WiMAX applications,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 11, No. 8, 1098–1105, Jun. 2017, doi: 10.1049/iet-map.2016.0814.

Références

- [I-11]. Panagamuwa, C. J., A. Chauraya, and J. C. Vardaxoglou, "Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 54, No. 2, 449–454, Feb. 2006, doi: 10.1109/TAP.2005.863393.
- [I-12]. Benaid Katia, "Etude des antennes planaires avec le modèle de la cavité et le modèle de la ligne de transmission", Mémoire de Master, 2013.
- [I-13]. Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th Edition). Wiley.
- [I-14]. A. S. Omar, M. A. Abdul Aziz, M. F. Ain, and S. S. A. Rahim, "Design of Ultra Wideband (UWB) Antenna with Dual Band-Notch Characteristics," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 54, pp. 1-8, 2014.
- [I-15]. C. Lach, L. Rudant, C. Delaveaud and A. Azoulay, "A new miniaturized antenna for ISM 433 MHz frequency band," *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 2010, pp. 1-5.
- [I-16]. Gabriel Cormier (UdeM) GELE5222 Chapitre 7 Hiver 2012 19 / 26.
- [I-17]. J. ROGER, « Antennes Techniques », *Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique*, E3284.
- [I-18]. Soltane Samia «étude et caractérisation d'antennes imprimées pour system ultralarge bande», 17/11/2015
- [I-19]. I. J. Bahl and P. E. Bhartia, *Microstrip Antennas*. Dedham, MA : Artech House, 1980.
- [I-20]. C. Paulus, *Filtrage de données sismiques multicomposantes et estimation de la polarisation*, Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [I-21]. Kamil, Adil. *Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz)*. Diss. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2011.
- [I-22]. THES Braham Chaouche, Youcef 2019/09/16 *Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande* 10.13140.2.2.33568.92163
- [I-23]. H. Chorfi, *Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique*, Mémoire Présenté À L'université Du Québec À Chicoutimi Comme Exigence Partielle De La Maîtrise En Ingénierie. Mai 2012.
- [I-24]. K. Benislmane et H. Bettayeb, « Modélisation d'une antenne multifréquence par ligne de transmission », *Master en Systèmes des télécommunications*, Université KasdiMebah-Ouargla-, 2017-2018.
- [I-25]. Adeniran, A. O. "Design and Performance Analysis of Printed Bow-Tie Antenna for UHF (GOTV and STARTIMES) Reception in Nigeria." *Design and Performance* 1.2 (2015).
- [I-26]. M. Messaoudene et M. Abri, *Conception des Réseaux d'antennes à encoche par Modèle Equivalent à trois ports pour système Bluetooth*, Laboratoire de Télécommunications Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen BP 230, Pôle Chetouane, 13000 Tlemcen-Algérie, 2015.

Références

- [I-27]. F.Chetouah, « Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques », Thèse de doctorat Electronique, Université Ferhat Abbas SETIF-1, 10.2018
- [I-28]. H.Pues, A.V.D. Capelle Accurate Transmission-Line Model for the Rectangular Microstrip Antenna Proc. IEE, vol. 131,Part. H, No 6, p. 334-340. 1984.
- [I-29]. Ait TamlihatMalak,BelmahiHajar,El Kaissi Yousra, Ibriz Sara « Antennes patch Master Matière et Rayonnement,Module » : Antenne et Microondes
- [I-30]. GARG, Ramesh, BHARTIA, Prakash, BAHL, Inder J., et al. Microstrip antenna design handbook. Artech house, 2001.
- [I-31]. M.Braham, Y.Chaouche,Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande,Thèse De Doctorat 3ème Cycle, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj,2019.
- [I-32]. BENCHIDI, Radhia, TECHOUKETCH, Samia, et MIMENE, Bakhti. Etude et Simulation des réseaux d'antennes à deux et quatre patches à la fréquence de résonance 2.4 GHZ. 2022.
- [I-33]. K.F. Lee, "Principles of antennas theory", John Wiley& Sons,U.S.A,1984.
- [I-34]. Dr. Djamel Khedrouche, D. Belguellaoui, « Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire », Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA,juin2016.
- [I-35]. [I-36] C.A.Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", Second Edition. United States of America. John Wiley& Sons, pp. 734, 1997.
- [I-36]. Doct.Tel.BahloulMedSalim, Étude Et Conception De Réseaux D'antennes Imprimées Larges Bandes À Polarisation Diverse Par L'utilisation D'architectures Log Périodiques, Thèse Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES , Université Abou BakrBelkaïd – Tlemcen –,2017.
- [I-37]. EricBogatin "Signal and Power Integrity - Simplified",Prentice Hall, 2009.
- [I-38]. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley& Sons.
- [I-39]. G.Kossiavas, A. Papiernik, R. Staraj, C. Luxey Antennes imprimées - Bases et principes Dossier E 3310, Antenne, Techniques de l'Ingénieur, 2012. doct.tel.bahloul med salim ,étude et conception de réseaux d'antennes imprimées larges bandes à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques ,theseprésentée pour l'obtention du grade de docteur en sciences , université abou bakrbelkaïd – tlemcen – ,2017.
- [I-40]. Radio Regulations: Articles, Appendices, Preambles, Resolutions, and Recommendations. Genève: UIT. InternationalTelecommunication Union (2016).
- [I-41]. Satellite Communications Systems:Systems, Techniques and Technology" de Gerard Maral et Michel Bousquet. Ce livre couvre les aspects techniques des systèmes de communication par satellite, y compris les bandes de fréquences utilisées et les normes de transmission. Il OFFre également une perspective historique sur le développement des systèmes de communication par satellite.

Références

- [I-42]. RadioRegulations: Articles, Appendices, Preambles, Resolutions, and Recommendations. Genève : UIT. InternationalTelecommunication Union (2016).
- [II-1]. "Reconfigurable Antennas:Overview and Future Directions" par Hao Xin et Yang Hao, publié dans le journal IEEE Transactions on Antennas and Propagation en 2010.
- [II-2]. Fouad Benamrane, « Conception d’une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.
- [II-3]. "Reconfigurable Antennas: An Overview" par J. Anguera, C. Puente, and C. Borja.
- [II-4]. MohamadRAMMAL,«Développementd’antennesagilesenfréquenceintégrant unCondensateurferroélectrique»,ThèsedeDoctorat,ÉcoleDoctoraleScienceset IngénieriePour l’Information, Mathématiques (ED 521), décembre 2017.
- [II-5]. Adda SekraneKheira et Cherier Ouissam, « Etude et conception d’antenne reconfigurables pour radiocommunications », d’Ingénieur d’Etat en Télécommunications, Institut National des Télécommunications et des Technologies de l’Information et de la Communication, 2016- 2017.
- [II-6]. NACHOUANE,Hamza.Contributionàlaconception etàlaréalisation d’antennesReconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitiveDelaquatrième génération.2017.Thèsededoctorat.InstitutNationaldesPostes etTélécommunications.
- [II-7]. Boudjella SABRIA, « étude et simulation des microsystèmes à base de la technologie mems », MAGISTER en Microélectronique et Nanoélectronique, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,2014.
- [II-8]. Kocaman, E. et al. (2018). RF MEMS Patch Antennas for Wireless Communication Systems. In MEMS-Based Integrated Navigation (pp. 211-236). Springer, Cham. ISBN: 978-3-319-64692-9.
- [II-9]. S. JalaliMazlouman, X. J. Jiang, A. Mahanfar, C. Menon and Rodney G. Vaughan, "A Reconfigurable Patch AntennaUsingLiquidMetal Embedded in a Silicone Substrate," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 12, pp. 4406-4412, December 2011.
- [II-10]. I. Ben Trad, “Antennes Agiles pour les Télécommunications Multistandards, ” Thèse soutenue publiquement le 29.10.2014, Université de Rennes.
- [II-11]. S.Loizeau ,’Conception et Optimisation d’antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande’’, Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2009.
- [II-12]. ADJILA FATIMA, M. N. « Etude et conception d’une antenne fractale reconfigurable en frequence », Mémoire présenté pour l’obtentionDu diplôme de Master Académique, systèmes des télécommunications, 2019.
- [II-13]. "Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications" par Albert Sabban
- [II-14]. Publié dans "Wireless Communications and Mobile Computing", Volume 7, Numéro 2, pp. 147-164, Février 2007.DOI: 10.1002/wcm.363
- [II-15]. Imen BEN TRAD, « Antennes Agiles pour les Télécommunications Multistandards » docteur de l’INSA de rennes en Electronique et Télécommunications, école doctorale : matisse laboratoire : ietr /innov’com, 29.10.2014.

Références

- [II-16]. Pei-Yuan, Q., et al., "Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, issue 8, pp. 2742-2747, 2010.
- [II-17]. S. DAKHLI, "Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par métamatériaux", Thèse soutenue à Supélec Paris le 15 Juin 2015, Université de Rennes.
- [II-18]. P. Vaudon, « XI : Réseaux d'antennes ». [En ligne]. Disponible sur :
- [II-19]. <http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/analyse.pdf>.
- [II-20]. Jehison LEON VALDES | Thèse de doctorat | Université de Limoges | 2020
31 Licence CC BY-NC-ND 3.0.
- [II-21]. Xue-Xia Yang, Bing-Cheng Shao, Fan Yang, A. Z. Elsherbeni, et Bo Gong, « A Polarization Reconfigurable Patch Antenna With Loop Slots on the Ground Plane », *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, p. 69-72, 2012, doi : 10.1109/LAWP.2011.2182595.
- [II-22]. X.-X. Yang, B. Gong, G. Tan, et Z. Lu, « Reconfigurable patch antennas with four polarization states agility using dual feed ports », *PIER B*, vol. 54, p. 285-301, 2013, doi : 10.2528/PIERB13073104.
- [II-23]. K. Adda Sekran, O. Cherier, « Etude et conception d'antenne reconfigurable pour radiocommunication », pour l'obtention de diplôme d'ingénieur d'état en Télécommunications. Institut Nationale de Télécommunications, 2016-2017.
- [II-24]. R. S. Kadam and A. V. Kulkarni, "Polarization and frequency reconfiguration using meander antenna," *International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, India, May 2015.
- [II-25]. "Reconfigurable Antennas" par Evren Ertin et Kazimieras Gaigeotis
- [II-26]. Publié dans "Antennas and Propagation Magazine", IEEE, Volume 49, Numéro 1, pp. 19-34, Février 2007. DOI: 10.1109/MAP.2007.369330
- [II-27]. B. Khattar, A. Boubossela, « Antenne reconfigurable pour des applications satellitaires », mémoire master en Télécommunications, Université Ain Temouchent, 01.7.2020.
- [II-28]. H. Legay, R. Gillard, J. Citerne, Gerard, « Effet d'un trou métallisé sur les caractéristiques de rayonnement d'une antenne plaque microruban alimentée par une ligne coaxiale à travers le plan de masse », *Ann. Télécommunication*, vol. 46, no. 7-8, 1991.
- [II-29]. M. Parveen, A. F. M. Zain, M. R. K. Akhtar "Recent advances in patch antenna technology: A review", et al. Dans la revue IEEE Access en 2022.
- [III-1]. CST MICROWAVE STUDIO Web
page <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [III-2]. Dominique Garnier, "Antenne et propagation radio" (GEL 202/ GEL7019), hiver 2016.
- [III-3]. Silvaco. [Online]. Available: <http://www.silvaco.com/examples/tcad/index.html>.
- [III-4]. Djamel. Bennjima et Tarek. Rahmani "Etude, conception et réalisation d'un réseau d'antennes patches", Institut supérieur des études technologique en communication de Tunis, 2002.
- [III-5]. Nora, B., & Akila, G. *Etude paramétrique et simulation de l'antenne patch sous CST* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri). (2017).

Références

- [III-6]. Benchrif yasmina ,bouguenina fadhia, Reseaux d'antenne patch pour application spatial, satellitaires Université –Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib Faculté des Technologie Année Universitaire 2020/2021.
- [III-7]. Khaled imene, houalef manel Conception d'une antenne miniature pour communication sans fil Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen Faculté de TECHNOLOGIE année 2020/2021.
- [III-8]. Erdil, Emre; Topalli, Kagan; Unlu, Mehmet; Civi, Ozlem Aydin; Akin, Tayfun IEEE Transactions on Antennas and Propagation volume 55, issue 4 (2007)
- [III-9]. B Marwa ,CHOUIREF Jahida Simulation d'une antenne Imprimée agile Pour les applications satellitaires Université –Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib Faculté des Technologie Année Universitaire 2021/2022.
- [III-10]. Deng, Z. L., Hong, M. Z., & Yao, Y. D. Ka-Band Wideband Pattern Reconfigurable Microstrip Patch Antenna with RF MEMS Switches. Applied Mechanics and Materials, 39, 146–150. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.39.146 (2010).

Résume

Résumé

Les antennes UWB à réconfiguration offrent de nombreuses possibilités d'utilisation, notamment dans le domaine spatial. L'application d'antenne qui doit être proposée en termes de fonctionnalités (détecteur de spectre à large bande et communication à bande étroite réglable) est excellente pour les satellites et les stations terriennes. La possibilité de changer en continu la largeur de bande de l'antenne, autour d'une fréquence centrale, d'une plage très étroite à une plage Ku, rend cette dernière réglable, ce qui donne une antenne dotée d'un comportement extrêmement flexible et compatible avec les futures méthodes de communication par satellite.

De plus, pour obtenir des caractéristiques plus précises, ou du moins plus cohérentes avec la réalité, pour le composant étudié en ce qui concerne les performances de l'antenne, l'utilisation de techniques d'optimisation est susceptible d'être bénéfique, et les caractéristiques les plus régulières sont efficaces.

Mots clés

: satellite, bande Ku, large bande, antenne adaptative, studio CST.

Abstract

UWB reconfigurable antennas offer numerous possibilities for use, especially in the aerospace field. The proposed antenna application in terms of functionalities (ultra-wideband spectrum sensing and adjustable narrowband communication) is an excellent fit for satellite and ground station use. The ability to continuously change the antenna's bandwidth, around a central frequency, from a very narrow range to a Ku-band range, which can be adjusted, results in an antenna with highly flexible behavior and perfect compatibility with future satellite communication methods.

Furthermore, to obtain more accurate properties or at least properties that align better with reality for the studied component regarding antenna performance, the use of optimization techniques is likely to be beneficial, and the most regular characteristics are highly efficient.

Keywords: Satellite, Ku band, Ultra-wide band, Patch antenna, CST Studio.

تلخيص

توفر هوائيات UWB القابلة لإعادة التشكيل العديد من الاحتمالات للاستخدام لا سيما في مجال الفضاء. يعد تطبيق الهوائي الذي يجب تقديمه من حيث الوظائف (كاشف الطيف عريض النطاق للغاية والاتصال على نطاق ضيق قابل للضبط)، مرشحًا ممتازًا لمجال القمر الصناعي ومحطة العميل. إمكانية التغيير المستمر لعرض نطاق الهوائي، حول تردد مركزي، من نطاق ضيق جدًا إلى نطاق Ku. ثم يكون الأخير قابلاً للضبط، نحصل على هوائي يتمتع بسلوك مرن للغاية، ومكيف تمامًا مع الأساليب المستقبلية للاتصال عبر الأقمار الصناعية.

Résume

بالإضافة إلى ذلك، للحصول على خصائص أكثر دقة، أو على الأقل أكثر انسجاماً مع الواقع، للمكون المدروس. فيما يتعلق بأداء الهوائي، من المرجح أن يكون استخدام عمليات التحسين مفيداً، كما قد تكون الخصائص الأكثر انتظاماً فعالة.

*****الكلمات المفتاحية***:** القمر الصناعي، نطاق Ku، نطاق عريض للغاية، هوائي تصحيح، استوديو CST.