

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 أوكرب بلقايد - تلمسنان
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : **HARIR IMENE**
&
GOURI HADJER

Sujet

Conception d'un réseau d'antennes à polarisation circulaire

Soutenu publiquement en 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

M N. BOUKLI HACEN	Professeur	Univ de Tlemcen	Président
M A. ABDELMALEK	Maître de conférences A	Univ de Tlemcen	Examinateur
Mme H. BENOSMAN	Maître de conférences A	Univ de Tlemcen	Encadrante
M M.A. RABAH	Maître de recherche A	CDS/ASAL Oran	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

En introduction à ce mémoire, nous exprimons notre gratitude envers « Allah », qui nous a soutenus, donné patience et courage tout au long de nos années d'études.

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Télécommunication (LTT) du Département de télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, sous la direction de Mme **BENOSMAN Hayet**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen.*

Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour l'encadrement spécifique, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire.

*Nos remerciements s'adressent aussi à notre Co-encadrant Mr **RABAH Mohammed Amine**, et les autres professeurs qui ont toujours fait preuve d'écoute tout au long de la réalisation de ce mémoire spécialement Mme **SELADJI Nawel**. Merci pour votre disponibilité, votre gentillesse et pour la confiance que vous nous avez témoignés.*

*Je remercie vivement Mr **BOUKLI HACENE Noureddine**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je remercie respectueusement Mr **ABDELMALEK Abdelhafid** Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.*

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous nos proches et amis et surtout nos parents, qui nous ont constamment encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

DEDICACE

Dédié à mes parents

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible. Votre bienveillance et votre encouragement m'ont donné la force de poursuivre mes études et d'accomplir ce travail. Ce mémoire est le fruit de vos valeurs transmises et de votre dévouement à mon éducation.

Je vous aime beaucoup chère **Mama** et **Papa**.

Je dédie également ce mémoire à mes chères sœurs **Abir, Soumia, Yasmine, Aya, Israa, Sondosse** et toute ma famille surtout ma grand-mère **Mima** et mes chères tantes **Maliha** et **Djamila** pour votre amour et votre soutien. Merci infiniment

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers mes amis et mes proches **Sarra Selma Saida**, pour leur soutien inébranlable et leur encouragement constant. Votre présence et votre confiance m'ont donné la motivation nécessaire pour franchir chaque étape de ce processus de recherche.

À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur aide, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre contribution a été essentielle à la réussite de ce mémoire.

Et à mon binôme **Gouri Hadjer**

En dédiant ce travail à ceux qui ont joué un rôle si important dans ma vie, je souhaite témoigner de mon profond respect, de ma gratitude éternelle et de ma reconnaissance infinie envers chacun d'entre vous.

IMENE

DEDICACE

Je dédie ce travail

À ma chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Merci beaucoup maman.

À mon cher papa

L'épaule solide, et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments que dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

À mon cher mari LOKMAN

Pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes gratitude

À mon petit fils IMRANE

« Si Dieu le veut, alors que tu as été témoin de ma soutenance et ma remise de diplôme, je témoignerai et me réjouirai de votre succès inshallah et de votre remise des diplômes »

À Ma deuxième mère SALIMA

À mes grand-mères

À mes chers frères

À mes chères Sœurs

À ma belle famille

Mes amours

Yasmine, Alae, Amira, Aya, Meriem, Razan, Hadjer, Doha Et Mohammed

A mon binôme HARIR Imene

Mes amies Sara Siham Naima

À tous ceux qui, ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Merci infiniment

HADJER

RESUME

Les systèmes de communication par satellite jouent un rôle important dans de nombreux services quotidiens tels que la télévision, l'accès à Internet et la communication téléphonique à distance. Plusieurs types d'antennes ont été mis en œuvre pour ces applications. Cependant, aucun de ces types ne parvient à répondre aux contraintes de taille et de gestion de la puissance de manière adéquate. Les réseaux d'antennes microrubans sont un choix idéal pour la conception d'antennes compactes en raison de leur faible encombrement, de leur légèreté, de leur faible coût et de leur nature conformable. Par ailleurs les réseaux d'antennes ayant des caractéristiques double-bande sont généralement nécessaires dans ces systèmes. Avoir une polarisation circulaire (PC) serait un choix idéal en raison de sa capacité à réduire les effets de multi-paths, à éliminer l'effet de rotation de Faraday du signal et à être également insensible à l'orientation de l'antenne. Cela a conduit à une perspective étendue et à une grande importance de recherche concernant les réseaux d'antennes à polarisation circulaire à double bande et à alimentation unique.

Dans ce projet, un nouveau réseau d'antennes microrubans de forme carré à polarisation circulaire en fonctionnement bi bande, destiné pour les systèmes de communication par satellite est conçu et simulé. Le réseau d'antenne présente deux résonances aux fréquences 9 GHz et 10 GHz avec un bon niveau d'adaptation. Il présente aussi de bonnes caractéristiques de rayonnement CP à la fréquence 10 GHz et couvre les besoins en bande passante sur cette bande de fonctionnement des systèmes de communication mobile par satellite. Les structures en réseaux d'antennes conçues seront modélisées et simulées par le logiciel électromagnétiques CST MWS.

Mots clés : antennes microruban, polarisation circulaire, réseau d'antennes, CST MWS.

Abstract

Satellite communication systems play a significant role in various services such as television, internet access, and remote telephone communication. Several types of antennas have been implemented for these applications. However, none of these types adequately meet the requirements for size and power management. Microstrip antenna arrays are an ideal choice for designing compact antennas due to their small footprint, lightweight nature, cost-effectiveness, and conformable characteristics. Additionally, dual-band antenna arrays are commonly required in these systems. Circular polarization (CP) is a preferred option as it can reduce multipath effects, eliminates Faraday rotation, and is immune to antenna orientation. This has led to extensive research and significant importance in the development of dual-band, single-feed CP antenna arrays.

In this project, a new circularly polarized square-shaped microstrip antenna array in dual-band operation, intended for satellite communication systems is designed and simulated. The antenna array presents two resonances at the 9 GHz and 10 GHz frequencies with a good level of adaptation. It also has good CP radiation characteristics at the 10 GHz frequency and covers the bandwidth requirements over this operating band of mobile satellite communication systems. The antenna array structures designed will be modeled and simulated by the CST MWS electromagnetic software.

Keywords: microstrip antennas, circular polarization, arrays antenna, CST MWS.

ملخص

تلعب أنظمة الاتصال عبر الأقمار الصناعية دورًا مهمًا في العديد من الخدمات اليومية مثل التلفزيون والوصول إلى الإنترنت والاتصالات الهاتفية عن بُعد. تم تنفيذ عدة أنواع من الهوائيات لهذه التطبيقات. ومع ذلك، لا يمكن أي من النوعين من تلبية قيود معالجة الحجم والطاقة بشكل كافٍ. تعتبر صفائف الهوائي خيارًا مثاليًا لتصميم الهوائي المضغوط نظرًا لصغر حجمها وخفة وزنها وتكلفتها المنخفضة وطبيعتها المتوافقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن صفائف الهوائي ذات خصائص النطاق المزدوج مطلوبة بشكل عام في هذه خيارًا مثاليًا نظرًا لقدرته على تقليل تأثيرات التصحيح المتعدد، والقضاء على (PC) الأنظمة. سيكون الحصول على استقطاب دائري تأثير دوران فاراداي للإشارة وأيضًا عدم الحساسية لتوجيه الهوائي. وقد أدى ذلك إلى منظور واسع وأهمية بحثية فيما يتعلق بصفائف الهوائيات ثنائية النطاق، أحادية التغذية، ذات الاستقطاب الدائري.

في هذا المشروع، تم تصميم ومحاكاة مجموعة هوائيات ميكروستريب جديدة مستقطبة دائريًا في عملية مزدوجة النطاق، مخصصة لأنظمة الاتصالات عبر الأقمار الصناعية. تقدم صفيف الهوائي رنينين عند ترددات 9 جيجا هرتز و10 جيجا هرتز بمستوى جيد من التكيف. كما أن لها خصائص إشعاع CP جيدة عند التردد 10 جيجا هرتز وتغطي متطلبات عرض النطاق الترددي عبر هذا النطاق التشغيلي لأنظمة الاتصالات الساتلية المتنقلة. سيتم نمذجة هياكل مصفوفة الهوائي المصممة ومحاكاتها بواسطة البرنامج الكهرومغناطيسي CST MWS.

الكلمات المفتاحية: هوائيات، استقطاب دائري، حواجز شبكية.

Table des Matières

Remerciements.....	II
Dédicaces.....	III
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
ملخص.....	VII
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux	XV
Abréviations.....	XVI
Introduction Générale	18

Chapitre I : Les antennes microrubans

I.1 Introduction	21
I.2 Les antennes microrubans.....	21
I.2.1 Historique.....	21
I.2.2 Définition.....	22
I.2.3 Différentes formes des antennes microrubans	22
I.3 Fonctionnement d'une antenne.....	23
I.4 les techniques d'alimentations.....	23
I.4.a Alimentation par ligne microruban.....	23
I.4.b Alimentation par sonde coaxiale.....	24
I.4.c Alimentation par couplage.....	25
I.4.c.1 Alimentation couplée par fente.....	25
I.4.c.2 Alimentation par couplage de proximité.....	25
I.5 Les caractéristique des antennes microrubans.....	26
I.5.1 Le coefficient de réflexion.....	26
I.5.2 Directivité.....	26
I.5.3 Le Gain.....	27
I.5.4 Diagramme de rayonnement.....	28
I.5.5 Impédance d'entrée	29
I.6 Les techniques d'adaptation des antennes microrubans.....	29
I.6.1 Adaptation par encoches.....	29

I.6.2 Adaptation par ligne quart d'onde.....	29
I.7 Domaines d'applications.....	30
I.8 Avantages et Inconvénients.....	30
I.9 Conclusion.....	31
Bibliographie.....	33

Chapitre II : Antennes microrubans à polarisation circulaire

II.1 Introduction	36
II.2 polarisation des antennes.....	36
II.2.1 Définition.....	36
II.2.2 Les différents types de polarisation.....	36
II.2.3 Le rapport axial.....	37
II.2.4 polarisation linéaire.....	38
II.2.5 Polarisation circulaire.....	38
II.2.6 Polarisation elliptique.....	39
II.3 Antenne microruban à polarisation circulaire.....	39
II.3.1 L'intérêt de la polarisation circulaire des antennes	40
II.4 Différentes techniques pour obtenir une polarisation circulaire.....	40
II.4.1 Alimentation unique	40
II.4.1.a Troncature des coins de l'antenne.....	41
II.4.1.b Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant rectangulaire.....	41
II.4.1.c Insertion de stubs.....	42
II.4.1.d Insertion de fente dans l'antenne patch.....	43
II.4.2 Alimentation double.....	44
II.4.2.1 Utilisation d'un diviseur de puissances Wilkinson.....	45
II.4.2.2 Insertion d'un coupleur hybride.....	45
II.5 Les applications de la polarisation circulaire.....	45
II.6 Les avantages et les inconvénients.....	46
II.7 Conclusion.....	47
Bibliographie	48

Chapitre III : Conception et simulation d'un réseau d'antennes polarisé circulairement

III.1 Introduction.....	51
III.2 Les réseaux d'antennes.....	51

III.2.1 Alimentation des réseaux d'antennes.....	52
III.2.1.a dispositifs utilisés dans l'alimentation des réseaux.....	52
III.2.1.a.1 Les déphaseurs à lignes.....	52
III.2.1.a .2 Les diviseurs.....	52
La jonction T.....	52
Diviseur de Wilkinson.....	53
III.2.2 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes.....	53
III.2.2.a Alimentation en série.....	53
III.2.1.b Alimentation en parallèle.....	53
III.3 Description du logiciel CST MWS.....	54
III.4 Conception de l'antenne de base.....	54
III.4 1. Conception de l'antenne polarisée linéairement.....	54
III.4 2. Conception de l'antenne polarisée circulairement à un seul élément.....	57
III .4 2 a. Etude paramétrique sur la longueur des troncatures.....	58
III .4 2 b Résultats de simulation.....	59
III .5 Conception du réseau d'antennes.....	62
III .5.1 Conception d'un réseau d'antennes à deux éléments.....	62
III .5 1.a Géométrie.....	62
III.5.2 Résultats et simulation.....	63
III .5.3 Conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments.....	67
III .5 .3. a Géométrie.....	67
III.5.3.b Etude paramétrique sur la distance	68
III.5 .2.c Etude paramétrique sur la à la largeur w12.....	68
III.6 Conclusion.....	74
Bibliographie.....	75
Conclusion générale.....	78

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : structure d'une antenne microruban.....	22
Figure I.2 : les différentes formes d'antennes patches	22
Figure I.3 : Alimentation par ligne microruban.....	24
Figure I.4: Alimentation par sonde coaxiale	24
Figure I.5 : Alimentation couplée par fente.....	25
Figure I.6 : Alimentation par proximité	26
Figure 1.7 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	29
Figure I.8 : adaptation par les encoches	30
Figure I.9 : adaptation par la ligne quart d'onde.....	30

Chapitre II

Figure II.1 : Rotation d'une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps...36	36
Figure II.2 : Différents types de polarisation.....	37
Figure II.3 : Polarisation linéaire	38
Figure II.4 : Polarisation circulaire gauche et droite.....	39
Figure II.5 : Polarisation elliptique	39
Figure II.6 : Troncature des coins de l'antenne.....	41
Figure II.7 : Alimentation sur la diagonale	42
Figure II.8 : Configuration de l'antenne avec stubs	43
Figure II.9 : Antenne patch avec fente (a) en forme de C, (b) en forme de F, (c) en forme de S et (d) en forme de croix	44
Figure II.10 : Alimentation à double accès (a) par insertion d'une ligne quart d'onde, (b) utilisation du diviseur de puissance Wilkinson, (c) ajout d'un coupleur hybride.....	44

Chapitre III

Figure III. 1 : Diviseur en jonction T	52
Figure III.2 : Diviseur de Wilkinson	53
Figure III.3 : Alimentation d'un réseau d'antenne en série	53
Figure III.4 : Alimentation d'un réseau d'antenne en parallèle	54
Figure III-5 : Géométrie de l'antenne initiale (a) : vue de face, (b) : vue d'arrière	55
Figure III-6 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne carré	56
Figure III-7 : Géométrie de l'antenne initiale avec une ligne quart d'onde	57
Figure III-8 :(a) Coefficient de réflexion S11 et (b) Rapport Axial AR, en fonction de la fréquence.....	57
Figure III-9 : Antenne microruban à coins tronqués	58
Figure III-10 : (a) Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et (b) Rapport axial AR pour différentes valeurs de longueurs x	59
Figure III-11 : Taux d'onde stationnaire (VSWR)	60
Figure III-12 : Diagramme de rayonnement en 2D sur les deux plans	60
Figure III-13 : Diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 10 GHz (a) la directivité, (b) le gain.....	61
Figure III.14: Densité de courant surfacique du patch	62
Figure III-15 : Réseau de deux éléments (a) : alimentation en série (b) alimentation en parallèle.....	63
Figure III-16 : Coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence	64
Figure III-17 : Rapport axial et gain du réseau d'antennes à deux éléments.....	65
Figure III-18 : TOS du réseau d'antennes à deux éléments	65
Figure III-19 : Partie réelle de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à deux éléments...66	
Figure III-20 : Diagramme de rayonnement en 3D du réseau d'antennes à deux éléments (a) la directivité (b) le gain... ..	66

Figure III-21 : Réseau d'antennes conçu de quatre éléments.....	67
Figure III-22 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments pour les différentes valeurs de d	68
Figure III-23 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments pour les différentes valeurs	69
Figure III-24 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes optimisé.....	70
Figure III-25 : Rapport axial en fonction de la fréquence du réseau d'antennes optimisé à quatre éléments	70
Figure III-26 : Variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence	71
Figure III-27 : Taux d'onde stationnaire du réseau d'antennes à quatre éléments.....	71
Figure III-28 : Diagrammes de rayonnement en représentation polaire obtenus par simulation du réseau d'antennes aux fréquences 9 GHz, et 10 GHz au plan E.....	72
Figure III-29 : Diagrammes de rayonnement en 3 D obtenus par simulation du réseau d'antennes aux fréquences a) 9 GHz et b) 10 GHz.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne initiale	56
Tableau III-2 : Paramètres de la jonction T du réseau en parallèle à deux éléments	63
Tableau III-3 : Performances du réseau d'antennes en parallèle à deux éléments	67
Tableau III-4 : Dimensions optimisés du réseau d'antennes à quatre éléments	69
Tableau III-5 : Performances du réseau d'antennes en parallèle à quatre éléments	74

Abréviations

AR Axial Ration

CST Computer Simulation Technology

CP Circulaire Polarisation

dB Décibel

EM Electromagnétique

GPS Global Positioning System

IEEE Institut of Electrical and Electronics Engineers.

LHCP Left Hand Circular Polarization)

NASA National Aeronautics and Space Administration

RADAR Radio Detection and Ranging.

RFID Radio Frequency Identification

RHCP Right Hand Circular Polarization)

S-Parametres Scattering Parameters

WLAN Wireless Local Area Network

UHF Ultra HigRh Frequency

2D deux Dimensions

3D trois Dimensions

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution rapide de la demande en dispositifs hyperfréquences dans les systèmes de communication modernes a poussé les industriels à investir davantage dans ce domaine pour répondre aux tendances du marché. Les systèmes de communication sont de plus en plus multi-bandes pour s'adapter à différents standards de communication, et il est essentiel de réduire leur encombrement. Les antennes jouent un rôle crucial dans les systèmes sans fil, qu'ils soient utilisés dans des applications civiles, militaires, spatiales ou terrestres.

La variété des secteurs d'activité utilisant ces antennes a augmenté la nécessité de développer des antennes multi-standards tout en conservant une forme compacte. Le rayonnement d'une onde à polarisation circulaire est souvent avantageux pour atténuer les effets de la dépolarisation pouvant se produire lors de la propagation.

Différents types d'antennes sont utilisés, tels que les antennes paraboliques, les antennes dipôles, les antennes Yagi et les antennes patch. Ces derniers offrent plusieurs avantages, tels qu'une taille réduite, un faible coût de fabrication et un faible poids. Néanmoins, ce genre d'éléments rayonnants présente certaines limitations, telles qu'une bande passante étroite et un gain faible. Afin de surmonter ces inconvénients et d'améliorer leurs performances, il est nécessaire d'envisager l'utilisation d'un réseau d'antennes patch dans certains types d'applications.

Dans le cadre de notre étude, notre objectif est de concevoir un réseau d'antennes microrubans à polarisation circulaire afin de répondre aux exigences des applications satellitaires. Notre approche de conception repose sur l'utilisation du logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio. Notre travail consiste à utiliser ce logiciel pour calculer plusieurs paramètres clés de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion qui détermine son mode de fonctionnement, le rapport axial qui définit la bande de fréquences pour assurer la polarisation circulaire, ainsi que le gain de l'antenne. Ce document est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à une introduction générale sur les antennes microrubans. Nous aborderons leur structure, leur fonctionnement et les différentes formes géométriques qu'elles peuvent prendre, ainsi que les techniques d'alimentation utilisées. Nous examinerons ensuite les caractéristiques de rayonnement de ces antennes et les méthodes permettant d'assurer une adaptation en impédance adéquate. Enfin, nous discuterons des avantages et des inconvénients associés à ces antennes, ainsi que des divers domaines d'application dans lesquels elles sont largement utilisées.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les antennes microrubans à polarisation circulaire. Tout d'abord, nous examinerons l'intérêt de ce type de polarisation, suivi d'une présentation des différentes techniques permettant d'obtenir une polarisation circulaire. Ces techniques seront classées en fonction de l'utilisation d'un seul accès d'alimentation ou de deux accès d'alimentation pour exciter le patch. Enfin, nous présenterons les avantages et les inconvénients liés à ce type de polarisation.

Le troisième chapitre sera consacré à la conception et la simulation des réseaux d'antennes imprimées. Dans un premier temps, nous aborderons les différentes techniques d'alimentation utilisées dans les réseaux d'antennes. Nous consacrerons également une petite section pour discuter des diviseurs de puissance, en expliquant les raisons qui motivent le choix de la méthode adoptée à notre travail. Nous passons ensuite à la conception d'une antenne à un seul élément à polarisation circulaire qui constitue la structure de base pour former ces réseaux. Nous étudierons alors les configurations d'antennes de 2x1 éléments et 2x2 éléments sous le simulateur CST MWS. Nous présentons en dernier, les résultats de simulation des différentes structures conçues.

Chapitre I
Généralités sur Les antennes microrubans

Chapitre I : Généralités sur les antennes microrubans

I.1 Introduction

Le domaine des télécommunications a connu des avancées technologiques au cours ces dernières années en raison de la forte demande de la population et de l'industrie. L'un des éléments clés dans ce domaine est l'antenne. Ce sont les éléments de base pour assurer la transmission et la réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. L'antenne est un élément essentiel d'un système radio, mais pas un appareil isolé ! Cela en fait un sujet intéressant et stimulant [1].

L'objectif de ce chapitre est de fournir une brève présentation historique des antennes microrubans, en mettant l'accent sur leur structure géométrique, leur mode de fonctionnement et leurs différentes formes. Nous aborderons également certaines techniques d'alimentation utilisées pour ces antennes, ainsi que leurs avantages qui ont contribué à leur adoption dans divers domaines d'application, tout en soulignant leurs inconvénients.

I.2 Les antennes microrubans

I.2.1 Historique

Les antennes microrubans ont été développées pour la première fois en 1953 par Georges Deschamps aux États-Unis [2]. Cependant, le premier brevet couvrant cette technologie n'a été déposé que trois ans plus tard, en 1956, par Henri Gutton et Georges Baissinot [3]. Il a fallu attendre les années 1970 pour que les antennes micro-rubans deviennent plus courantes. Des améliorations dans les techniques de photo lithogravure pour le cuivre et l'or sur substrat diélectrique, ainsi que des progrès dans la modélisation, ont permis de concevoir des prototypes plus précis [4].

En 1972, John Howell a créé des antennes microrubans à polarisations linéaire et circulaire dans les bandes L et UHF pour la NASA [5]. À la même époque, Robert Munson de Ball Aerospace System a conçu une antenne microruban adaptée à la forme et à la circonférence d'un missile [6].

I.2.2 Définition

Une antenne microruban également connue sous le nom d'antenne patch, consiste en un patch métallique disposé sur un substrat. L'ensemble est déposé sur un plan de masse comme le montre la figure I.1. [1].

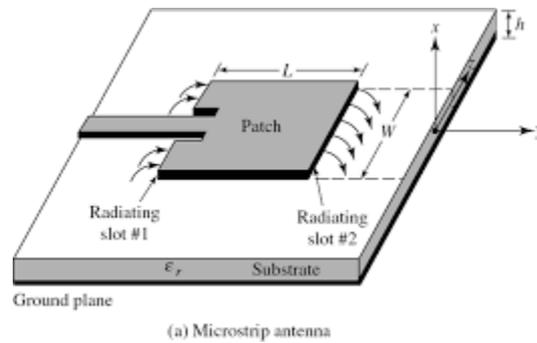


Figure I.1 : Structure d'une antenne microruban .[1]

L'intérêt des antennes microrubans réside dans leur faible coût de fabrication et leur facilité de fabrication. Cela permet une production à grande échelle et une intégration économique dans les systèmes électroniques. De plus, les antennes microrubans peuvent être conçues pour fonctionner sur plusieurs fréquences, ce qui les rend polyvalentes. Elles peuvent être adaptées pour fonctionner dans différentes gammes de fréquence. [7]

I.2.3 Différentes formes des antennes microrubans

Les antennes microrubans sont un type d'antenne populaire en raison de leur profil bas, de leur légèreté et de leur facilité d'intégration avec d'autres composants. Parmi les différents types d'antennes microrubans, les antennes à patch sont couramment utilisées en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leur faible diagramme de rayonnement en polarisation croisée. Les dipôles microrubans, quant à eux, sont connus pour leur large bande passante et leur petite taille, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des réseaux d'antennes. [8]

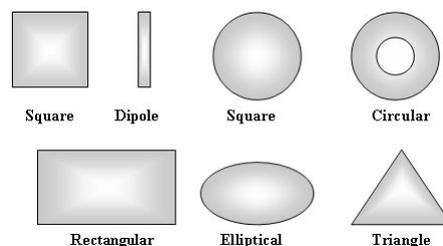


Figure I.2 : Les différentes formes d'antennes patches [8]

I.3 Fonctionnement d'une antenne

Dans son fonctionnement habituel, une antenne imprimée sur un substrat diélectrique peut être approximée comme une cavité résonante imparfaite avec des parois magnétiques verticales à pertes et des parois électriques horizontales. Lorsqu'elle fonctionne à des fréquences de résonance spécifiques, cette cavité stocke de l'énergie électromagnétique dans une série de modes de type TM. Le rayonnement résultant de cette structure entraîne des pertes qui se produisent au niveau des parois magnétiques. Une partie du signal émis est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur, et ainsi de suite. La configuration et l'orientation des lignes de champ entre les bords de la plaque rayonnante et le plan de masse déterminent les directions privilégiées du champ rayonné. En général, le mode fondamental est considéré comme le mode de fonctionnement prédominant de ce type d'antennes. Ce mode transporte la plus grande quantité d'énergie et se caractérise par une répartition du champ électrique en dessous de l'élément rayonnant, dont au moins une dimension est égale à la demi-longueur d'onde. Les courants de surface induits sur l'élément métallique sont dirigés le long de l'axe de symétrie qui passe par le point d'excitation.

I.4 les techniques d'alimentation

L'alimentation est un aspect crucial dans la conception des antennes à microrubans. C'est le processus de fourniture de l'énergie à l'antenne, permettant ainsi la transmission et la réception des ondes électromagnétiques. Les antennes à micro-rubans sont populaires en raison de leur faible profil, de leur légèreté et de leur facilité de fabrication. Elles sont largement utilisées dans les applications de communication sans fil, les radars, les satellites, etc. L'alimentation des antennes à microrubans peut être réalisée de différentes manières, telles que l'alimentation par ligne d'alimentation, l'alimentation par point d'alimentation, l'alimentation par fente d'alimentation, etc. Le choix de la méthode d'alimentation dépend des exigences spécifiques de l'application. Dans cette introduction, nous examinerons les différents aspects de l'alimentation des antennes à microrubans et les considérations à prendre en compte lors de la conception de l'alimentation pour ces types d'antennes.

I.4.a Alimentation par ligne microruban

On peut mettre en place une technique qui consiste à connecter un élément rayonnant à une ligne microruban de 50 ohms, comme illustré dans la figure I.3. La longueur de cette ligne est généralement plus courte que les dimensions du patch. Cette méthode simple permet de réaliser

des structures planes sur un substrat diélectrique, offrant ainsi de nombreux avantages pour la conception de réseaux d'antennes imprimées de différentes formes. [9]

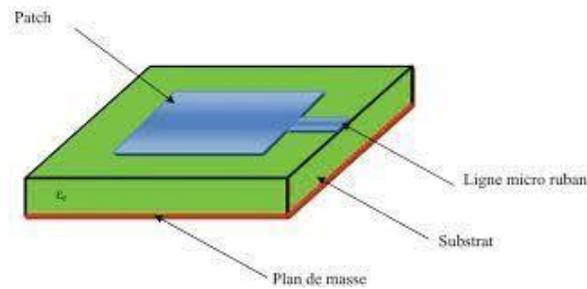


Figure I.3 : Alimentation par ligne microruban [9]

Il est possible d'alimenter une antenne patch en la connectant directement à une ligne microruban dont le point de jonction se situe sur l'axe de symétrie de l'élément ou légèrement décalé pour une meilleure adaptation d'impédance (voir Figure I.3). Selon une étude. [10] l'alimentation axiale avec encoches permet d'obtenir de bons résultats.

I.4.b Alimentation par sonde coaxiale

La technique couramment utilisée pour alimenter les antennes microrubans est l'alimentation coaxiale ou par sonde (voir Figure I.4). Dans ce cas, le conducteur interne du connecteur coaxial traverse le substrat diélectrique pour être soudé directement au patch, tandis que le conducteur externe est relié au plan de masse. Cette méthode d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à adapter, avec un faible niveau de rayonnement parasite. Cependant, elle a l'inconvénient de fournir une bande passante étroite. [11]

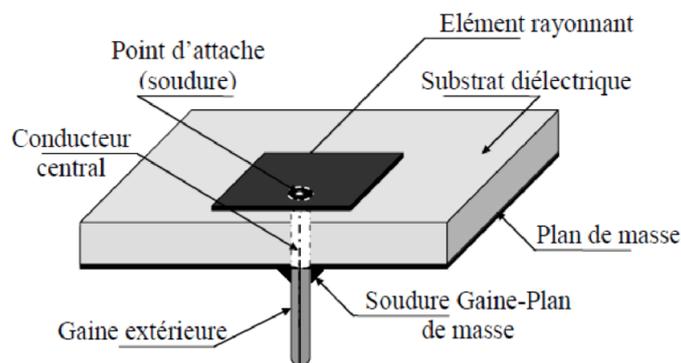


Figure I.4: Alimentation par sonde coaxiale [11]

I.4.c Alimentation par couplage

I.4.c.1 Alimentation Couplée par fente

Pour cette méthode d'alimentation, la ligne de transmission microruban est séparée du patch rayonnant par le plan de masse. La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation est établie grâce à une fente ou une ouverture pratiquée dans le plan de masse, comme illustré sur la figure (I.5).

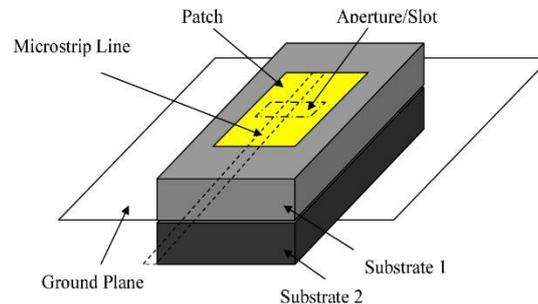


Figure I.5 : Alimentation couplée par fente [12]

Une méthode courante d'alimentation pour les antennes à patch consiste à utiliser une fente ou une ouverture pour coupler la ligne d'alimentation et le patch rayonnant à travers le plan de masse. L'emplacement, la taille et la forme de l'ouverture déterminent la quantité de couplage entre la ligne d'alimentation et le patch. L'utilisation d'un plan de masse permet de minimiser le rayonnement parasite. Les substrats inférieur et supérieur sont généralement choisis en fonction de leur constante diélectrique pour optimiser le rayonnement du patch. Le substrat inférieur est choisi avec une constante diélectrique élevée tandis que le substrat supérieur est épais et possède une constante diélectrique faible. [12]

I.4.c.2 Alimentation par couplage de proximité

En employant la technique d'alimentation par couplage de proximité, la bande passante peut être améliorée jusqu'à 13%, comme démontré dans la Figure I.6. Cette méthode présente l'avantage d'atténuer le rayonnement parasite et de faciliter le couplage, qui peut être optimisé en ajustant les dimensions de la ligne. Cependant, cette technique est considérée comme difficile à mettre en pratique. [13]

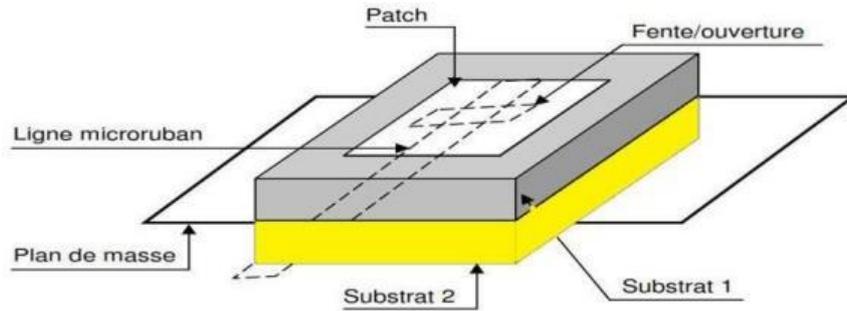


Figure I.6 : Alimentation par proximité. [13]

I.5 Les caractéristiques des antennes microrubans

I.5.1 Le coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est défini comme le rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance de l'extrémité de la ligne et de l'impédance caractéristique de la ligne. La réflectance est ainsi déterminée en considérant ces deux paramètres, et le coefficient de réflexion est exprimé mathématiquement de la manière suivante [14].

$$S_{11} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} \quad 1.1$$

Où :

S₁₁ est le coefficient de réflexion,

Z_r est l'impédance de charge de l'antenne patch.

Z_c L'impédance caractéristique de la ligne de transmission utilisée.

Dans le cas des antennes patches, l'impédance de charge dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille et la géométrie du patch, la fréquence de fonctionnement, les propriétés diélectriques du matériau substrat, et la présence de couches supplémentaires telles que les couches de mise à la masse ou les substrats diélectriques supplémentaires.

I.5.2 Directivité

Lorsqu'on conçoit une antenne, il est souvent important de considérer la directivité de rayonnement. La directivité est une mesure de la capacité d'une antenne à concentrer l'énergie électromagnétique dans une direction préférentielle par rapport à d'autres directions. Dans le

cas des antennes patch, la directivité peut être influencée par plusieurs facteurs tels que la géométrie du patch et le couplage avec la ligne d'alimentation.

Selon [15], la directivité est définie comme le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans une direction de l'espace et la densité de puissance moyenne rayonnée. Une antenne isotrope est considérée comme ayant une directivité de 1, tandis que les antennes directrices ont une directivité supérieure à 1. En outre, la directivité peut également être définie comme le rapport entre l'intensité de rayonnement de l'antenne et l'intensité moyenne rayonnée par une source isotrope. La directivité s'exprime alors par :

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{Prad} \quad 1.2$$

Cette directivité est maximale dans la direction de l'intensité maximale du rayonnement, elle se calcule comme suit :

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{Prad} \quad 1.3$$

D : Directivité (sans dimensions)

θ : Angle d'azimut

Φ : Angle d'élévation.

D0 : La directivité maximale

U : Intensité de rayonnement (Watts / unité d'angle solide)

U_{max} : Intensité de rayonnement maximale (Watts / unité d'angle solide)

U₀ : Intensité de rayonnement moyenne d'une source isotrope (Watts / unité d'angle solide)

Prad : Puissance totale rayonnée par l'antenne (Watts)

1.5.3 Le Gain

Le gain **G** (θ, ϕ) d'une antenne est une mesure de l'efficacité avec laquelle elle peut convertir la puissance reçue en énergie rayonnée dans une direction donnée. Pour une antenne patch, le gain dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de la plaque métallique, l'épaisseur du substrat, la constante diélectrique du substrat, la fréquence de fonctionnement et la forme du patch. [16]

Le gain d'une antenne patch peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$G = 4\pi A/\lambda^2 \quad 1.4$$

$$G(\theta, \phi) = \frac{Pr(\theta, \phi)}{Pr_i} \quad 1.5$$

L'antenne isotrope émet une densité de puissance égale à la puissance d'entrée P_e divisée par l'angle solide de la sphère, qui est de 4π stéradians [17].

L'équation suivante permet de calculer le gain :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{Pr(\theta, \phi)}{P_e} \quad 1.6$$

G est le gain de l'antenne en dBi, A est la surface effective de l'antenne en m^2 , et λ est la longueur d'onde en mètres. Avec :

G : Le gain de l'antenne.

Pr : La densité de puissance rayonnée [Watts/m²]

P_e : Puissance d'entrée ou d'alimentation de l'antenne [Watts]

θ : Angle d'azimut.

Φ : Angle d'élévation.

Le gain est relié à la directivité par la relation suivante :

$$G(\theta, \eta) = \eta \times D \quad 1.7$$

η : étant le rendement de l'antenne. Le gain et la directivité sont souvent exprimés en dB ou en dBi

I.5.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne patch est une représentation graphique de la direction et de l'intensité du rayonnement électromagnétique émis par l'antenne. Il permet de visualiser la répartition spatiale de l'énergie rayonnée dans l'espace. Les antennes patch ont un diagramme de rayonnement bidimensionnel qui présente un maximum dans la direction perpendiculaire au plan de l'antenne et une diminution progressive dans les autres directions. Cette caractéristique est due à la nature de la propagation des ondes électromagnétiques dans le plan de l'antenne. [18]

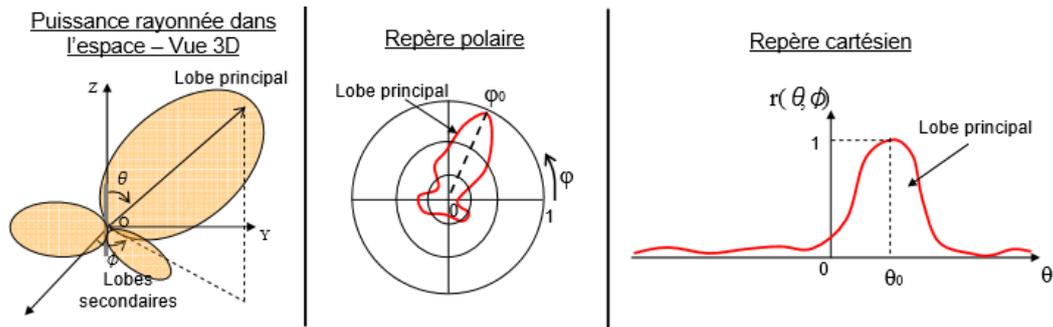


Figure I.7 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.[18]

I.5.5 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation à l'entrée de l'antenne. C'est une fonction complexe dépendant de la fréquence ayant une partie réelle et une partie imaginaire.

Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_e = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad 1.8$$

Z_0 : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S_{11} : Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne. L'impédance d'entrée peut être représentée graphiquement en utilisant l'abaque de Smith

I.6 Les techniques d'adaptation des antennes microrubans

Ces techniques sont utilisées pour optimiser les performances des antennes en termes de bande passante, de rendement, de directivité, et de correspondance d'impédance. Voici quelques techniques couramment utilisées pour l'adaptation des antennes microrubans :

I.6.1 Adaptation par encoches

Cette technique est utilisée pour améliorer l'adaptation d'impédance des antennes microrubans. Les encoches peuvent être introduites le long de la ligne microruban ou à des emplacements stratégiques pour ajuster l'impédance et améliorer les performances de l'antenne. L'ajout d'encoches peut aider à réduire les réflexions d'ondes, à élargir la bande passante et à améliorer la correspondance d'impédance de l'antenne. [19]

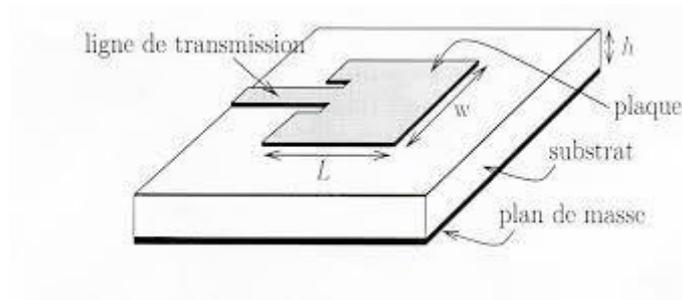


Figure I.8 : Adaptation par les encoches [19]

I.6.2 Adaptation par ligne quart d'onde

Lors de la conception de circuits hyperfréquences, il est courant de rechercher une adaptation d'impédance, c'est-à-dire de parvenir à une impédance différente de celle obtenue à l'extrémité du circuit [20]. Pour renforcer l'adaptation de l'antenne, on peut utiliser un transformateur quart d'onde, qui est positionné entre la ligne microruban et l'extrémité du patch, comme illustré dans figure I.9.

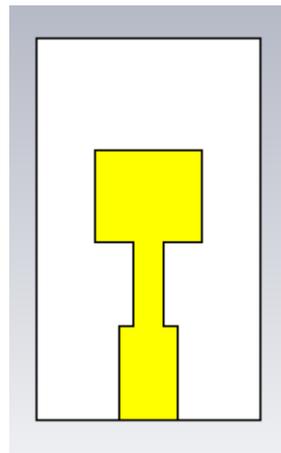


Figure I.9 : Adaptation par la ligne quart d'onde

I.7 Domaines d'applications

Les domaines d'application sont de plus en plus diversifiés, les principales applications sont

- La communication par satellite, comme les systèmes de diffusion (DBS : Direct Broadcast Satellite)
- Les radars
- La téléphonie mobile

- Les télécommunications spatiales
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance
- Paiement sans contact
- Technologie d'identification RFID

I.8 Avantages et Inconvénients

Les antennes imprimées présentent plusieurs avantages par rapport aux autres antennes, comme :

- Un faible poids et un encombrement réduit, faible profil, leur légèreté, leur facilité de fabrication et leur adaptabilité à une grande variété de substrats. [21]
- Un coût de fabrication peu élevé,
- La possibilité de polarisations linéaires et circulaires pour les télécommunications,
- Des réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne. Elles permettent également la réalisation d'antennes multi-bandes et multi-polarisations, ainsi que la construction d'antennes réseaux en regroupant plusieurs patches identiques. De plus, elles s'adaptent facilement aux surfaces planes et non planes.

Cependant, cette technologie présente également des limites telles que : [22] [23]

- Une bande passante étroite et des problèmes de tolérance géométriques et physiques,
- Un gain faible (-6 dB), une efficacité de rayonnement limitée et une pureté de polarisation faible.
- De plus, les antennes imprimées supportent uniquement des faibles puissances (100 W). Ces limitations doivent être prises en compte lors de la conception et de l'utilisation de ces antennes. [14]

I.9 Conclusion

Les antennes imprimées connaissent une popularité croissante parmi les professionnels des télécommunications et les acteurs de l'industrie, qu'elles soient utilisées dans des applications spatiales ou terrestres. Il est essentiel de définir avec précision tous les paramètres des antennes afin de prévoir leur comportement et de garantir leur conformité aux exigences des systèmes. Par conséquent, dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble approfondie des antennes imprimées, en abordant des aspects tels que leur géométrie, leurs

avantages, leurs inconvénients, les techniques d'alimentation, ainsi que leurs caractéristiques et leurs applications.

Comme évoqué dans ce chapitre, les antennes peuvent être polarisées de manière linéaire ou circulaire. La polarisation circulaire offre des avantages particulièrement intéressants. C'est précisément ce sujet que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Bibliographie

- [1] Huang, Y., & Boyle, K. Antennas: From theory to practice. John Wiley & Sons (2008).
- [2] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4ème éd., Wiley, p. 340, 2012.
- [3] J. Huang, Antennas: From Theory to Practice, 3ème éd., Wiley, p. 277, 2019.
- [4] K. C. Gupta, R. Garg, and I. Bahl, Microstrip Lines and Slotlines, 2ème éd., Artech House, p. 1, 1996.
- [5] D. M. Pozar, op. cit., p. 341.1990.
- [6] K. C. Gupta, R. Garg, and I. Bahl, op. cit., p. 2.1996.
- [7] Bhartia, P., Geyi, W., & Bahl, I. Microstrip antennas: the analysis and design of microstrip antennas and arrays. Artech House, (2008).
- [8] Microstrip Antenna Design Handbook" de P. Bhartia, I. Bahl, V. Garg et A. Ittipiboon.
- [9] L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas", IEEE transactions Antennas Propagat, Vol. 49, pp. 45-47, Janvier 2001
- [10] Odile Picon et Coll, "Les Antennes, théorie, conception et applications," Dunod, Paris, 978-2- 10-051989-7, 2009
- [11] K. BOUFELDJA" Modélisation et Synthèse de réseaux périodiques et non périodiques d'antennes microrubans par l'application d'un Algorithme Génétique-Flou" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen, Février 2011.
- [12] C. A. Balanis, "Antenna theory—analysis and design", 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, 1997
- [13] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. Microstrip antenna design handbook. Artech House (2001).
- [14] C. A. Balanis, "Antenna theory", New York: 3rd edition, John Wiley, 2005.
- [15] A. S. Omar et al., "Recent Advances in Microstrip Antennas," in Microstrip Antennas: Advanced Topics and Applications, InTech, 2011.
- [16] Balanis, C. A. Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). Wiley (2016).

- [17] L. MOUSTAFA, "Conception d'antennes à Bande Interdite Electromagnétique large bande et multi bandes à base de méta surfaces," Université de Limoges, Thèse de doctorat 22 septembre. 2009
- [18] C. A. Balanis," Antenna Theory: Analysis and Design", Wiley, chapitre5, 2016
- [19] Pozar, D. M. Microwave engineering. Wiley. (2012).
- [20] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley, chapitre 5, 2016
- [21] Saini, A., & Kumar, G. Review on Advantages and Disadvantages of Microstrip Antenna. International Journal of Current Engineering and Technology, 7(1), 255-257, (2017).
- [22] Balanis, C. A. Antenna theory: analysis and design (3rd ed.). John Wiley & Sons. (2005).
- [23] Pozar, D. M. Microstrip antennas. Proceedings of the IEEE, 80(1), 79-91. (1992).

Chapitre II

Antennes microrubans à polarisation circulaire

II.1 Introduction

La polarisation des antennes est un sujet fascinant dans le domaine des communications sans fil. Elle fait référence à l'orientation du champ électromagnétique généré par une antenne par rapport à la surface terrestre ou à un plan de référence. La compréhension de la polarisation des antennes est essentielle pour optimiser la performance des systèmes de communication sans fil tels que les réseaux de téléphonie mobile, les réseaux sans fil locaux (WLAN) et les systèmes de communication par satellite. [1]

II.2 Polarisation des antennes

II.2.1 définition

La polarisation d'une onde électromagnétique rayonnée est définie par l'orientation du champ électrique de l'onde. Elle se présente sous la forme d'une figure tracée dans le temps, représentant la position de l'extrémité du vecteur champ électrique à un emplacement fixe dans l'espace, ainsi que la direction dans laquelle elle est tracée, telle qu'observée le long de la direction de propagation. [2]

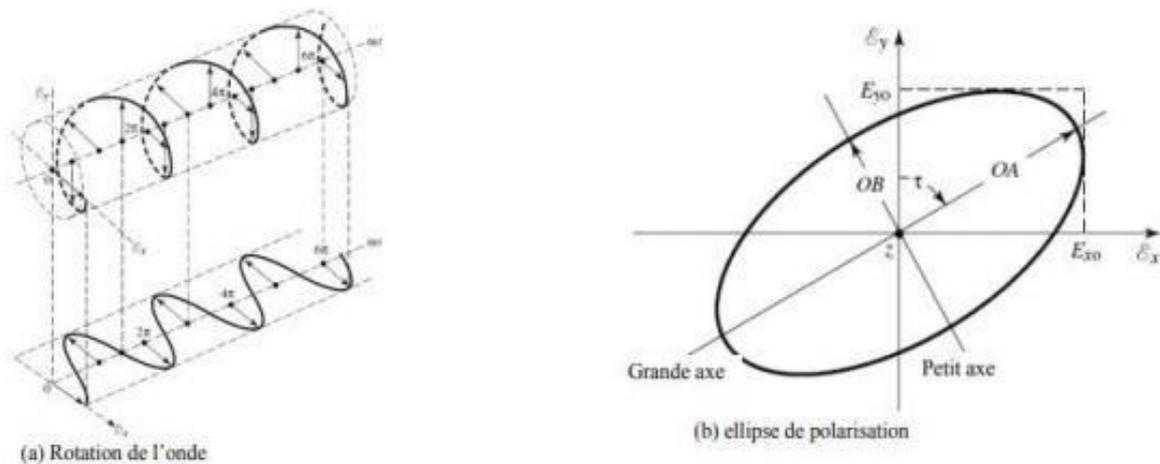


Figure II.1 : Rotation d'une onde plane et son ellipse de polarisation en fonction du temps. [2]

II.2.2 Les différents types de polarisation

En physique, la polarisation se réfère à l'orientation des oscillations d'une onde électromagnétique générée ou reçue par l'antenne par rapport à la surface de la Terre ou à un plan de référence comme la lumière. La polarisation peut être classifiée en trois types principaux : linéaire, circulaire et elliptique (**Figure II.2**). En général, la figure tracée est une ellipse, ce qui indique une polarisation elliptique du champ. Les polarisations linéaire et circulaire sont des cas spécifiques de la polarisation elliptique. [3]

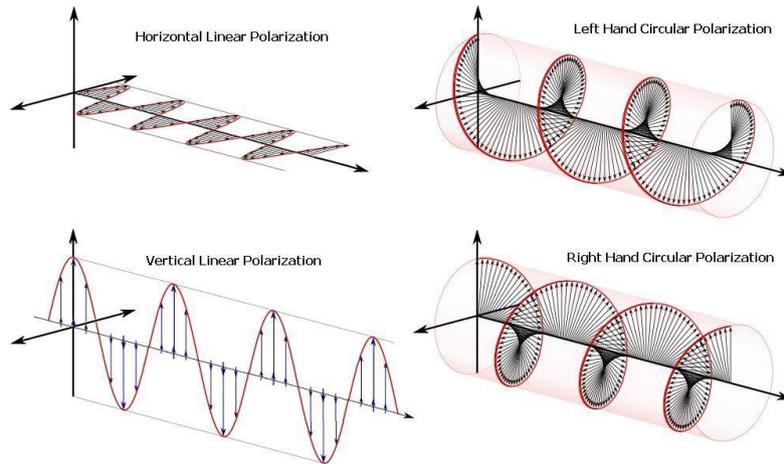


Figure II.2 : Différents types de polarisation. [3]

II.2.3 Le rapport axial (AR : Axial Ratio)

Le rapport axial également connu sous le terme de taux d'ellipticité est un paramètre utilisé pour évaluer la qualité de la polarisation d'antennes selon la définition du standard IEEE. Il mesure la différence entre les composantes du champ électrique ou magnétique dans deux directions orthogonales et il représente le rapport entre les axes majeur et mineur de l'ellipse pour une polarisation elliptique donnée (figures II.1.b). [4]

On peut définir ce rapport comme suit :

$$AR = \frac{\text{Axe majeur}}{\text{Axe mineur}} = \frac{O}{OB} \quad \text{Avec } 1 \leq AR < \infty \quad 2.1$$

En théorie, pour obtenir une polarisation circulaire parfaite, le rapport axial devrait être égal à 1 (0 dB). Cependant, en pratique, il est impossible d'atteindre une polarisation circulaire parfaite où le rapport axial est exactement égal à 0 dB. Dans ce contexte, on considère qu'une polarisation est circulaire lorsque la valeur du rapport axial se situe entre 0 et 3 dB. Si le rapport axial se situe entre 3 et 10 dB, on parle alors de polarisation elliptique. Au-delà de cette valeur, la polarisation est considérée comme linéaire.

Le rapport axial peut être exprimé en dB comme suit :

$$AR (dB) = 20 \log \left(\frac{OA}{OB} \right) \quad \text{Avec } 0 \leq AR < \infty \quad 2.2$$

II.2.4 Polarisation linéaire

En polarisation linéaire, l'orientation des lignes de champ électrique par rapport à la surface de la Terre détermine le type de polarisation. Lorsque les lignes de champ électrique sont parallèles à la surface de la terre, on parle de polarisation horizontale, tandis que lorsque les lignes de champ électrique sont perpendiculaires à la surface de la terre, on parle de polarisation verticale. Le rapport axial, qui est le rapport de la plus grande valeur à la plus petite valeur du champ électrique dans une antenne, est infini pour une polarisation linéaire pure. [3]

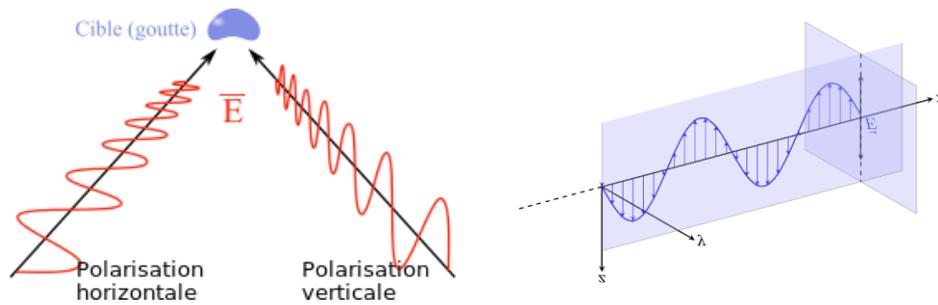


Figure II.3 : Polarisation linéaire.[3]

II.2.5 Polarisation circulaire

La polarisation circulaire est un type de polarisation d'antenne dans lequel l'orientation du champ électromagnétique varie de manière cyclique au fur et à mesure que l'onde se propage.

Le champ électrique ou magnétique présente deux composantes linéaires orthogonales avec la même amplitude et une différence de phase multiple impaire de 90° . Les rapports axiaux sont souvent utilisés pour évaluer la qualité de la polarisation circulaire, avec une valeur idéale de 0 dB. La polarisation circulaire est caractérisée par une rotation du vecteur de champ électrique dans le temps, soit dans le sens des aiguilles d'une montre (dextrogyre) c'est une polarisation circulaire droite ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (lévogyre) c'est une polarisation circulaire gauche. [3]

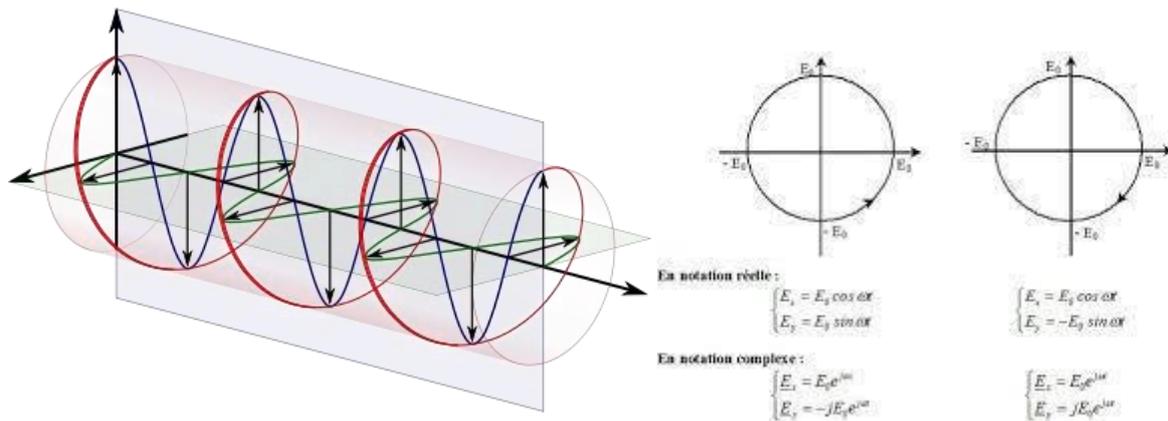


Figure II.4 : Polarisation circulaire gauche et droite. [3]

II.2.6 Polarisation elliptique

La polarisation elliptique est un type de polarisation d'antenne dans lequel le champ électrique ou magnétique décrit une trajectoire elliptique en variant dans le temps. Elle peut être caractérisée par une combinaison de composantes linéaires et circulaires du champ électromagnétique. La trajectoire elliptique peut être inclinée par rapport à l'axe de propagation de l'onde et peut avoir des rapports axiaux différents de 0 dB. [5]

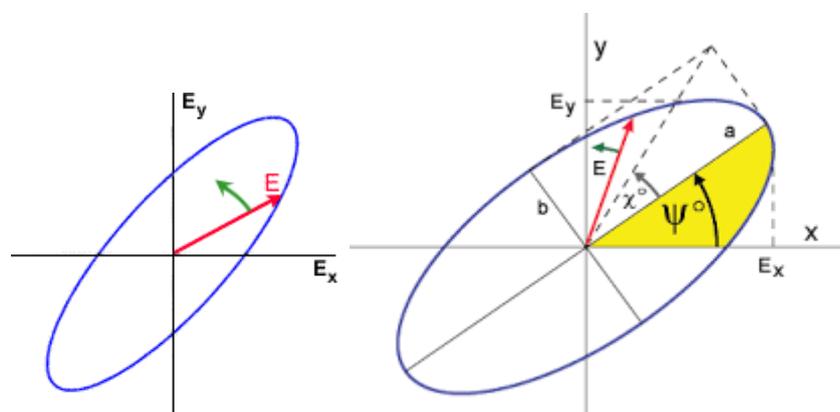


Figure II.5 : Polarisation elliptique.[5]

II.3 Antennes microrubans à polarisation circulaire

Les antennes microrubans à polarisation circulaire sont utilisés dans les communications sans fil et les systèmes de radar. On trouve leurs applications dans la communication satellite, une

téledétection, une navigation par satellite, ou dans les applications de télémétrie et de télécommande

Les antennes microrubans à polarisation circulaire offrent plusieurs avantages, particulièrement leur compacité, leur légèreté, leur faible coût de fabrication et leur large bande passante. Elles sont largement utilisées dans les applications nécessitant une communication fiable et robuste, notamment dans les communications par satellite, les systèmes de téledétection, les applications de navigation par satellite et les réseaux de communication sans fil. [6]

II.3.1 L'intérêt de la polarisation circulaire des antennes

Tout d'abord, elle permet de réduire la sensibilité aux signaux polarisés linéairement, ce qui améliore la qualité du signal en rejetant les interférences indésirables. De plus, la polarisation circulaire aide à atténuer les effets de l'affaiblissement de polarisation, offrant ainsi une meilleure stabilité du signal et une réception plus fiable dans des environnements complexes. Les antennes microrubans à polarisation circulaire peuvent également fournir une couverture omnidirectionnelle, permettant des communications sans fil dans toutes les directions sans nécessiter d'ajustement d'orientation précis. [7]

II.4 les différentes techniques pour l'obtention de la polarisation circulaire

Les méthodes permettant à une antenne imprimée de produire un rayonnement à polarisation circulaire peuvent être classées en deux catégories principales. La première catégorie implique l'alimentation de l'antenne par un seul accès, où la polarisation circulaire est obtenue en perturbant l'élément rayonnant par l'ajout de fentes, d'encoches, de tronçatures ou de stubs.

La deuxième catégorie utilise deux ou plusieurs sources d'alimentation, ce qui nécessite généralement un réseau d'alimentation créant un déphasage de 90° entre les ports d'excitation de l'antenne. Dans ce qui suit, nous examinerons les méthodes fréquemment utilisées, tout en accordant une attention particulière à la compacité des antennes étudiées. [2]

II.4.1 Alimentation unique

Lorsqu'une antenne imprimée est alimentée en un seul point, elle est capable de générer une polarisation circulaire en excitant deux modes orthogonaux dégénérés avec des amplitudes égales et en déphasage de 90 degrés. Cela peut être réalisé en perturbant l'élément rayonnant

et/ou en choisissant judicieusement la position du point d'alimentation. L'alimentation d'une antenne avec une seule source d'excitation reste la solution idéale pour faciliter l'intégration des composants antennaires au sein des dispositifs électroniques. Cette partie aborde quelques techniques permettant d'obtenir une polarisation circulaire à partir d'une seule source d'excitation.

II.4.1.a Troncature des coins de l'antenne

La troncature des coins est une technique de conception d'antenne patch à polarisation circulaire qui consiste à couper les deux coins du patch carré pour réduire les pertes de mode supérieur et améliorer les performances de l'antenne. Ce qui crée un chemin de courant asymétrique le long de la diagonale. Cette technique permet d'obtenir une meilleure symétrie et une réponse en fréquence plus large et d'exciter directement un mode tandis que l'irrégularité géométrique du patch excite l'autre mode. La direction de polarisation est déterminée par les coins tronqués. Des techniques ont été proposées pour permettre la reconfiguration de la polarisation en masquant ou découvrant les coins tronqués

Une étude approfondie de cette technique de conception d'antenne est présentée dans l'article "Circularly Polarized Square Microstrip Antenna with Truncated Corners" par Garg et al. Publié dans le journal IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Dans cette étude, les auteurs ont montré que la troncature des coins peut améliorer la symétrie de l'antenne et réduire les pertes de mode supérieur, ce qui permet d'obtenir une réponse en fréquence plus large et une polarisation circulaire plus pure. [8]

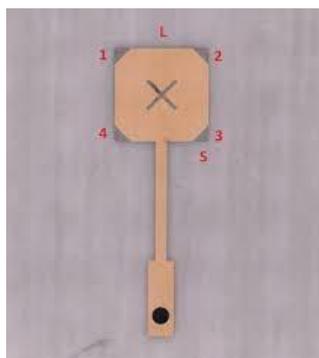


Figure II.6: Troncature des coins de l'antenne.[8]

II.4.1.b Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant Légèrement rectangulaire

L'alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant légèrement rectangulaire est une technique utilisée pour obtenir une polarisation circulaire. Cette méthode consiste à alimenter

l'antenne à partir d'un point situé sur la diagonale de l'élément rayonnant rectangulaire, Pour exciter deux modes sur un patch légèrement rectangulaire, La différence de phase est obtenue grâce à une légère différence entre la longueur et la largeur du patch, ce qui provoque une résonance à des fréquences légèrement différentes pour les deux modes. Cette différence doit être ajustée en fonction du facteur de qualité Q de l'antenne, pour garantir une bande passante d'impédance plus large que celle d'un patch équivalent polarisé linéairement. Cependant, la bande passante du rapport axial est étroite et également liée inversement au facteur de qualité Q , Puisque le facteur de qualité est toujours inversement proportionnel à la bande passante, il est important de trouver un compromis entre la largeur de bande passante et le rapport axial étroit. [9]

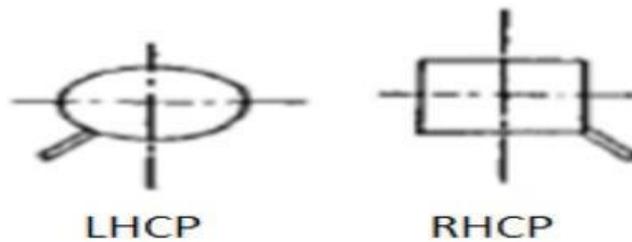


Figure II.7: Alimentation sur la diagonale. [9]

II.4.1.c Insertion de stubs

L'insertion de stubs est une technique courante utilisée en conception d'antennes pour améliorer les performances de rayonnement et les caractéristiques d'impédance. Les stubs sont des structures courtes et ouvertes qui sont insérées sur la ligne d'alimentation de l'antenne, En les ajoutant à la structure d'une antenne à patch, on peut exciter deux modes orthogonaux et obtenir un rayonnement à polarisation circulaire, créant ainsi des points de résonance pour modifier les caractéristiques d'impédance de l'antenne. Cette technique permet également de réduire les pertes par rayonnement et d'augmenter la directivité de l'antenne. [10]

La différence de longueur entre les stubs est utilisée pour réaliser la polarisation circulaire CP. L'article a également souligné que la position du stub (paramètre d) influence la fréquence de résonance du coefficient de réflexion S_{11} , tandis que la position du système d'alimentation (paramètre s) affecte directement la fréquence pour laquelle on obtient un rapport axial minimal.

Ces deux fréquences ne sont pas forcément les mêmes, mais en choisissant judicieusement la largeur du stub (w), il est possible de les faire coïncider. [11-12]

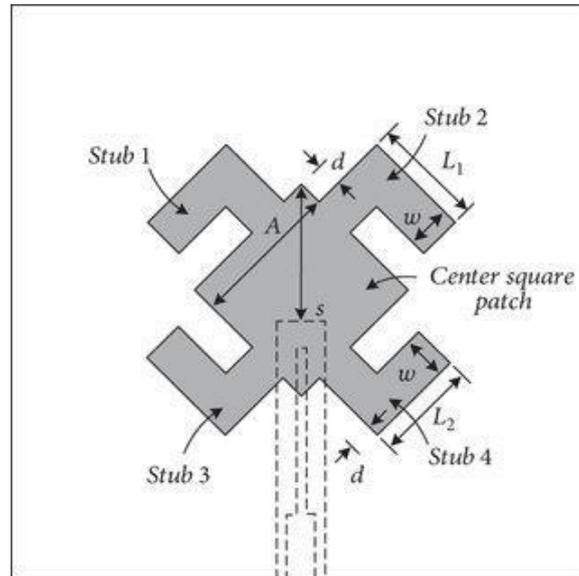


Figure II.8: Configuration de l'antenne avec stubs.[10]

II.4.1.d Insertion de fente dans l'antenne patch

La perturbation requise pour produire une polarisation circulaire dans une antenne patch micro-ruban peut être obtenue en insérant une ou plusieurs fentes de formes arbitraires. Pour atteindre cet objectif, il est recommandé de placer ces fentes sur les diagonales de l'antenne micro-ruban carrée. Par ailleurs, la forme et les dimensions de la fente découpée peuvent contribuer à élargir la bande passante et à réduire la taille de l'antenne. [13]

De plus, la forme et les dimensions de la fente peuvent également permettre d'élargir la bande passante et de réduire la taille de l'antenne. Différentes formes de gravure ont été proposées dans la littérature pour produire une polarisation circulaire, notamment une fente en forme de C [14], une fente en forme de F [15], une fente en forme de S [16] ou encore une fente en forme de croix [17]. Des études ont montré que le paramètre relatif au périmètre des fentes affecte directement la bande de fréquence de fonctionnement de l'antenne et son rayonnement à polarisation circulaire.

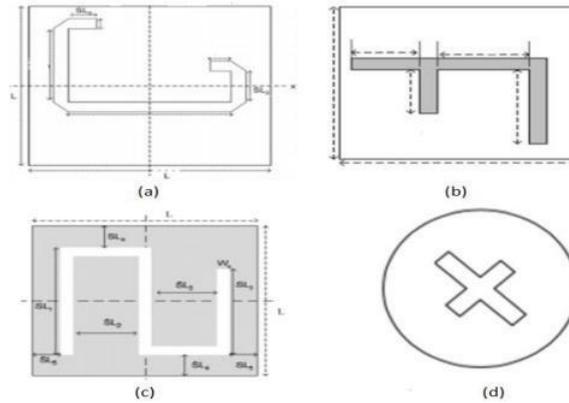


Figure II.9: Antenne patch avec fente (a) en forme de C, (b) en forme de F, (c) en forme de S et (d) en forme de croix. [14-17]

II.4.2 Alimentation double

La configuration à deux accès repose sur le principe de déphasage entre les deux ports de l'antenne, ce qui permet d'exciter simultanément les deux modes orthogonaux et de générer un rayonnement à polarisation circulaire. Comparée à la méthode d'alimentation à un seul accès, cette technique offre généralement une bande passante plus large. Cependant, son inconvénient majeur réside dans la taille du plan de masse nécessaire pour accueillir le réseau d'alimentation et les pertes qui en découlent. Ainsi, un compromis doit être établi entre les performances de l'antenne et sa compacité. Les techniques les plus couramment citées dans la littérature pour obtenir deux modes d'amplitudes égales avec un déphasage de 90 degrés incluent l'ajout d'une ligne quart d'onde, l'utilisation d'un diviseur de puissance de Wilkinson et l'insertion d'un coupleur hybride. Comme illustre la **Figure II.9**. [8]

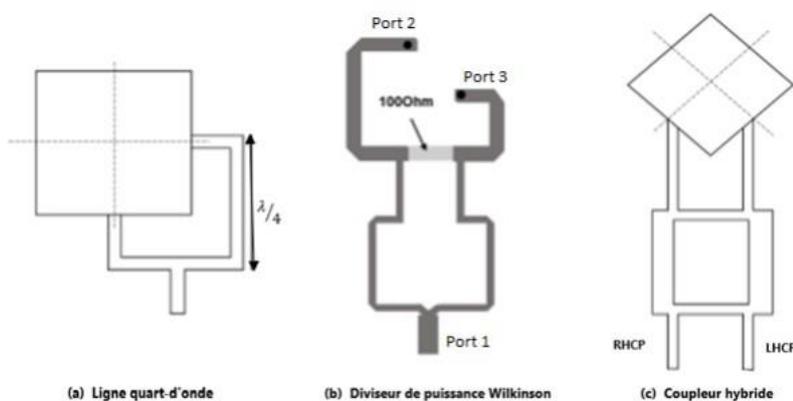


Figure II.10: Alimentation à double accès (a) par insertion d'une ligne quart d'onde, (b) utilisation du diviseur de puissance Wilkinson, (c) ajout d'un coupleur hybride. [8]

II.4.2.1 Utilisation d'un diviseur de puissances Wilkinson

Le diviseur de puissance de Wilkinson est un dispositif à trois ports, comme illustré dans la **Figure II.9.b**. Il est supposé que tous les ports sont correctement adaptés et que l'isolation entre les deux ports de sortie est suffisante. Lorsqu'un signal est introduit dans le port 1, il est divisé en deux signaux de même amplitude et de même phase aux ports 2 et 3. Grâce à la symétrie du dispositif, chaque borne de la résistance d'isolation est maintenue au même potentiel, ce qui empêche tout courant de la traverser. Ainsi, la résistance est découplée de l'entrée. Les diviseurs de puissance de type Wilkinson classiques ont généralement une faible bande passante et une phase en quadrature, ainsi qu'une isolation satisfaisante entre les deux ports de sortie [18].

II.4.2.2 Insertion d'un coupleur hybride

Les coupleurs hybrides (**Figure II.9.c**) sont couramment utilisés en hyperfréquences pour distribuer la puissance également entre les signaux en phase quadrature de leurs ports de sortie. Cette quadrature de phase est obtenue grâce à une sélection minutieuse des longueurs de ligne et des impédances caractéristiques. Pour générer une polarisation circulaire, le coupleur hybride est préférable à d'autres techniques telles que les irrégularités dans le patch ou la géométrie d'alimentation. Cela permet d'obtenir une large bande passante et une polarisation circulaire robuste, réduisant ainsi la sensibilité de l'antenne aux variations de fabrication et aux écarts de fréquence causés par la courbure de l'antenne [19].

II.5 Les applications de la polarisation circulaire

La polarisation circulaire trouve de nombreuses applications dans le domaine des antennes et des systèmes de communication sans fil. Voici quelques exemples d'applications de la polarisation circulaire :

Communications par satellite : Les satellites de communication utilisent souvent des antennes à polarisation circulaire pour établir des liens de communication avec des antennes au sol. La polarisation circulaire à besoin un gain élevé pour les applications satellitaires.

Radiodiffusion, Télémétrie et télédétection, Systèmes de navigation : Les systèmes de navigation par satellite, tels que le GPS, Systèmes sans fil : Les réseaux sans fil, tels que le Wi-Fi et le Bluetooth, peuvent bénéficier de la polarisation circulaire pour améliorer la qualité et la fiabilité des connexions. La polarisation circulaire offre une meilleure immunité aux interférences et aux perturbations, ce qui se traduit par des communications plus stables et une meilleure couverture. [3]

II.6 Les avantages et les inconvénients

La polarisation circulaire présente plusieurs avantages et inconvénients dans les applications d'antennes. Voici une liste des principaux points à considérer :

-Avantages de la polarisation circulaire

Meilleure immunité aux interférences : La polarisation circulaire offre une meilleure résistance aux effets de dégradation dus aux obstacles, aux réflexions et aux multi-trajets. Elle peut maintenir une communication plus stable dans des environnements perturbés, tels que les zones urbaines denses ou les intérieurs.

Meilleure capacité de pénétration : La polarisation circulaire est plus efficace pour traverser les obstacles solides, tels que les murs, les arbres et les bâtiments, par rapport à la polarisation linéaire. Cela peut être bénéfique dans les communications sans fil à l'intérieur des bâtiments ou dans des scénarios urbains où il y a des obstacles entre l'émetteur et le récepteur.

Moins de sensibilité à l'orientation : Les signaux de polarisation circulaire ne sont pas sensibles à l'orientation relative entre les antennes émettrice et réceptrice. Cela signifie que les communications restent robustes même si les antennes sont mal alignées ou tournées.

-Inconvénients de la polarisation circulaire

Complexité de conception et coûts : Les antennes circulaires nécessitent des conceptions et des structures plus complexes par rapport aux antennes à polarisation linéaire. Cela peut entraîner une augmentation des coûts de fabrication et de mise en œuvre.

Perte de gain : En général, les antennes à polarisation circulaire ont un gain légèrement inférieur par rapport aux antennes à polarisation linéaire, ce qui peut entraîner une portée réduite ou une sensibilité plus faible dans certaines situations.

Interférences avec les signaux polarisés linéairement : Les antennes à polarisation circulaire peuvent rencontrer des problèmes de compatibilité avec les antennes polarisées linéairement, en particulier si les deux types d'antennes sont utilisés dans le même système. Cela peut entraîner une dégradation de la qualité du signal.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients de la polarisation circulaire peuvent varier en fonction des applications spécifiques et des conditions d'utilisation. Par conséquent, il est essentiel de considérer attentivement les exigences et les contraintes de chaque scénario avant de choisir la polarisation appropriée pour une application donnée. [20]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les antennes microrubans à polarisation circulaire. Nous avons commencé par discuter des avantages de ce type d'antennes, puis nous avons exploré en détail les différentes techniques permettant d'obtenir une polarisation circulaire. Ces techniques ont été présentées en fonction de l'utilisation d'un seul accès d'alimentation ou de deux accès d'alimentation pour exciter le patch. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du réseau d'antennes microrubans conçues sous environnement CST sur les quelles des techniques permettant d'assurer un rayonnement à polarisation circulaire sont appliquées

Bibliographie

- [1] Balanis, C. A. Antennes Théorie : Conception et Applications. (2005)
- [2] Jemmeli, S. Conception d'antennes miniatures, multi-bandes et à polarisation circulaire à base de matériaux ferrites polarisés (Thèse de doctorat). Université de Limoges, ED 610 - Sciences et Ingénierie des Systèmes, Mathématiques, Informatique (SISMI), XLIM UMR CNRS- Axe Systèmes RF- Equipe Antennes & Signaux. (2021)
- [3] Balanis, C. A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons. (2016).
- [4] Stutzman, Warren L., and Gary A. Thiele. "Antenna Theory and Design." 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2012.
- [5] Mailloux, R. Phased Array Antenna Handbook (2nd Edition). Artech House. (2015)
- [6] "Microstrip Antenna Design Handbook" par Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, et Apisak Ittipiboon
- [7] Bhartia, P., Geyi, W., & Bahl, I. Microstrip antennas: the analysis and design of microstripantennas and arrays. Artech House. (2008).
- [8] Garg, Ramesh, Bhartia, Prakash, Bahl, Inder, and Ittipiboon, Apisak. "Circularly Polarized Square Microstrip Antenna with Truncated Corners." IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, no. 10, pp. 1593-1597, October 2000.
- [9] K. F. Lee, K. M. Luk, K. F. Tong, Y. L. Chow, and R. Q. Lee, "Circularly polarized aperture-coupled stacked patch antenna," EE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 9, pp. 1411-1417, September 1999.
- [10] Faraji-Dana, N. and Attari, A. R., "Design and Analysis of a Wideband Printed Dipole Antenna with Stubs", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1299-1302, 2015.
- [11] S. B. Vignesh, Nasimuddin and A. Alphones, "Stubs-Integrated-Microstrip Antenna Design for Wide Coverage of Circularly Polarised Radiation," IET Microwave Antennas & Propagation, vol. 11, no. 4, pp. 444-449, 2016.
- [12] Y.Sung, "Axial Ratio-Tuned Circularly Polarized Square Patch Antenna with Long Stubs", International Journal of Antenna and Propagation, 2018.

- [13] Marwa Shakeeb "Circularly Polarized Microstrip Antenna "CONCORDIA UNIVERSITY SCHOOL OF GRADUATE STUDIES", Dec 2010.
- [14] Nasimuddin, Z.N.Chen, Xianming Qing, "Single Fed Circularly Polarized Microstrip Antenna with C-Slot," in proceedings of the Microwave Conference, pp. 1-4. 2008.
- [15] Nasimuddin, Y. Yong, Z.N. Chen, A. Alphones, "Circularly Polarized F Shaped Slot Microstrip Antenna with Wide Beamwidth," in proceedings of the European Microwave Conference, EuMC , pp. 1531–1534. 2009.
- [16] H. Iwasaki; "A Circularly Polarized Small-Size Microstrip Antenna with a CrossSlot", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, issue. 10, pp. 1399-1401. 1996.
- [17] J.-S. Row, C.-Y. Ai "Compact Design of Single-Feed Circularly Polarised Microstrip Antenna" IEEE Electronics Letters, vol.40, issue: 18, pp. 1093-1094, 2004.
- [18] A. Hassan, F. Elhefnawi, A. Z. Elsherbeni, M. Hendi and S. Elramly, "Compact Dual Circularly-Polarized Microstrip Antennas," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1-4, Toronto, 2010.
- [19] A. Dierck, H. Rogier, and F. Declercq, "A Wearable Active Antenna for Global Positioning System and Satellite Phone," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 2, pp. 532-538, February 2013.
- [20] Pozar, D. M. Microwave Engineering. Wiley. (2012).

Chapitre III

Conception et simulation d'un réseau d'antennes à polarisation circulaire

III. 1 Introduction

Les antennes microrubans sont utilisées dans de nombreux domaines tels que les communications par satellite et les applications sans fil. Parmi les avantages de ces antennes, on retrouve leur faible profil, leur petite taille, leur légèreté, leur faible coût et leur facilité de fabrication [1-6]. Ces types d'antennes conviennent aux appareils mobiles et sont faciles à intégrer aux composants micro-ondes actifs et passifs. Cependant, ils présentent quelques inconvénients comme la bande passante étroite et le gain faible, ce qui mène à trouver une solution pour l'amélioration du gain. L'utilisation d'un réseau d'antennes [7-12] est l'une des solutions possibles permettant d'obtenir une directivité plus élevée. Ainsi des réseaux d'antennes ayant des caractéristiques bi-bandes sont généralement requis dans les systèmes de communication par satellite. D'autre part, Avoir une polarisation circulaire (PC) de l'antenne serait un choix idéal afin d'éviter toute perte ou perturbation des ondes transmises et pour plus de flexibilité d'orientation angulaire entre l'émetteur et le récepteur. Cela a conduit à un large perspectif et à une grande importance pour la recherche de réseau d'antennes PC à double bande et à alimentation unique.

L'objectif de ce chapitre est de concevoir un réseau d'antennes en fonctionnement bi-bande avec une polarisation circulaire destiné pour les systèmes de communication par satellite. Ceci est réalisé lorsque le rapport axial AR est inférieur à 3 dB. La bande de fréquence de fonctionnement de l'antenne est bien évidemment déterminée lorsque le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10 dB. Le logiciel de simulation CST (compter simulation technologie) a été utilisé pour la conception du réseau d'antennes. Les différentes sections de ce chapitre seront organisées comme suit :

La première section abordera la conception de l'élément d'antenne qui sera utilisé pour définir le réseau d'antennes. La deuxième section portera sur les différentes étapes suivies pour la conception de réseau d'antennes à deux éléments, et à quatre éléments avec une présentation et discussion des résultats de simulation obtenus.

III.2 Les réseaux d'antennes :

Pour améliorer les performances des antennes imprimées, on les associe souvent en forme de réseau, car l'utilisation d'un seul élément rayonnant est insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées par une application donnée.

Un réseau d'antennes est donc un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patches ...) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière. Le

rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande.

III.2.1 Alimentation des réseaux d'antennes

L'objectif principal de l'alimentation du réseau d'antennes est d'assurer une bonne excitation en amplitude et en phase de tous les éléments qui constituent le réseau.

III.2.1.a Dispositifs utilisés dans l'alimentation des réseaux

Etant donné que les éléments de réseau sont excités en amplitude et en phase, l'utilisation des déphaseurs et des diviseurs de puissance sont la base de l'alimentation du réseau d'antennes [7]. On peut citer :

III.2.1.a.1 Les Déphaseurs à lignes

Ils sont constitués d'un ensemble de lignes de longueurs différentes. Des commutateurs permettent d'insérer l'impédance de chaque tronçon de ligne selon la phase désirée.

III.2.1.a .2 Les Diviseurs

Ils sont utilisés pour assurer l'alimentation du réseau d'antennes, un chemin doit être branché en utilisant un ou plusieurs diviseurs de puissance permettant de faire une jonction entre une entrée d'une seule voie avec la sortie de plusieurs voies. Parmi les diviseurs utiliser en distingue :

La jonction T :

C'est un modèle facile à concevoir mais l'absence de l'isolation entre les deux ports de sortie peut donner lieu à un couplage entre deux éléments adjacents qui influe sur le diagramme de rayonnement du réseau. Ce couplage peut être compensé par la suppression d'une section triangulaire de la ligne comme le montre la figure III.1 [5].

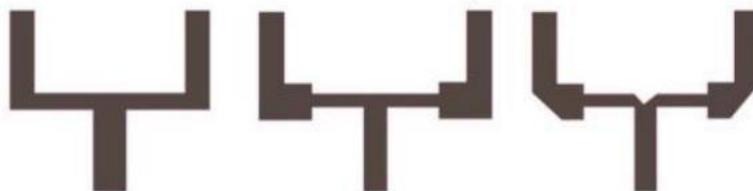


Figure III. 1 : Diviseur en jonction T.

L'exemple représenté sur la figure ci-dessus est le plus simple. L'impédance d'entrée du diviseur présente une adaptation à 50 ohm, et les impédances de sorties sont terminées avec valeur double de celle de l'impédance d'entrée qui est égale à 100 ohm. L'avantage de ce diviseur est qu'il permet d'augmenter le mouvement du courant dans les coudes de celui-ci, et qui permet aussi la division symétrique de la puissance d'entrée à l'extrémité des coudes.

Diviseur de Wilkinson

C'est un circuit qui isole les ports de sortie entre eux tout en conservant l'adaptation d'impédance sur tous les ports (figure III.2). Ce circuit peut être utilisé pour combiner deux signaux car il est constitué de composants passifs et est donc réciproque.

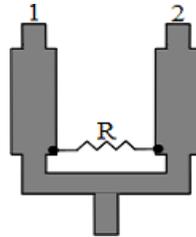


Figure III.2 : Diviseur de Wilkinson

III.2.2 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération. On distingue plusieurs alimentations pour ramener la puissance d'entrée de la source au réseau, les plus répandus sont :

- L'alimentation en série, et l'alimentation en parallèle ;

III.2.2.a Alimentation en série

Dans cette configuration, Les éléments rayonnants sont disposés linéairement et sont reliés les uns aux autres par des tronçons de ligne micro-ruban, Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur. Ce type d'alimentation est présenté dans la figure III.3 [1.3].



Figure III.3 : Alimentation d'un réseau d'antenne en série

III.2.1.b Alimentation en parallèle

Cette alimentation consiste à alimenter N éléments rayonnants par (N-1) diviseurs de puissance (figure III.4). Cette puissance est répartie également à chaque liaison. Ce type d'alimentation présente l'inconvénient d'avoir plusieurs pertes par rayonnement à cause de la discontinuité de la configuration en parallèle [1.3].

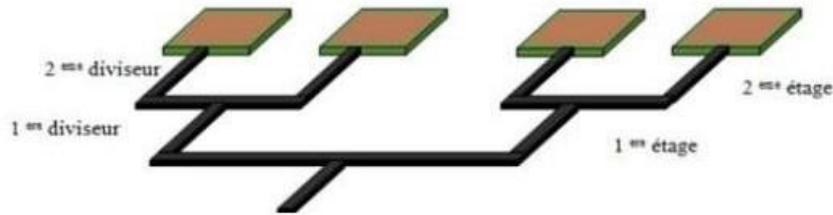


Figure III.4 : Alimentation d'un réseau d'antenne en parallèle

III .3 Description du logiciel CST MWS

CST (Computer Simulation Technology) est un logiciel de simulation électromagnétique qui permet de concevoir et de simuler des antennes et des circuits RF (radiofréquences) avec une grande précision. Le logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de Maxwell et permet ainsi de visualiser le comportement des champs électromagnétiques dans les structures étudiées. CST offre une interface graphique conviviale et une bibliothèque de modèles prédéfinis, ce qui facilite la conception des structures étudiées. Il est largement utilisé dans l'industrie des télécommunications et de l'électronique pour la conception de dispositifs RF tels que des antennes, des filtres, des amplificateurs et des circuits intégrés [13].

III .4 Conception de l'antenne de base

III .4 1. Conception de l'antenne polarisée linéairement

Nous avons choisi dans ce travail d'étudier et de simuler une antenne patch de forme carré opérant à la fréquence 10 GHz de la bande X [8-12 GHz]. Cette antenne est alimentée par une ligne microruban et est déposée sur un substrat diélectrique de type RO5880, ayant une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 2.2$, une tangente de pertes $\tan\delta = 0.009$ et une hauteur $h = 1.58$ mm. Un plan de masse total recouvre toute la face arrière du substrat telle que le montre la figure III.5.

Les dimensions de cette antenne, à savoir sa longueur L et sa largeur W sont calculées de façon à exciter le premier mode de résonance TM_{10} à la fréquence 10GHz. La détermination des paramètres géométriques d'une antenne imprimée carré se fait grâce à des formules simplifiées qui nécessitent la connaissance de la constante diélectrique du substrat (ϵ_r), son épaisseur h et la fréquence de résonance (f_r) de l'antenne.

$$f_r \cong \frac{c_0}{2l_e \sqrt{\epsilon_{r\text{eff}}}}$$

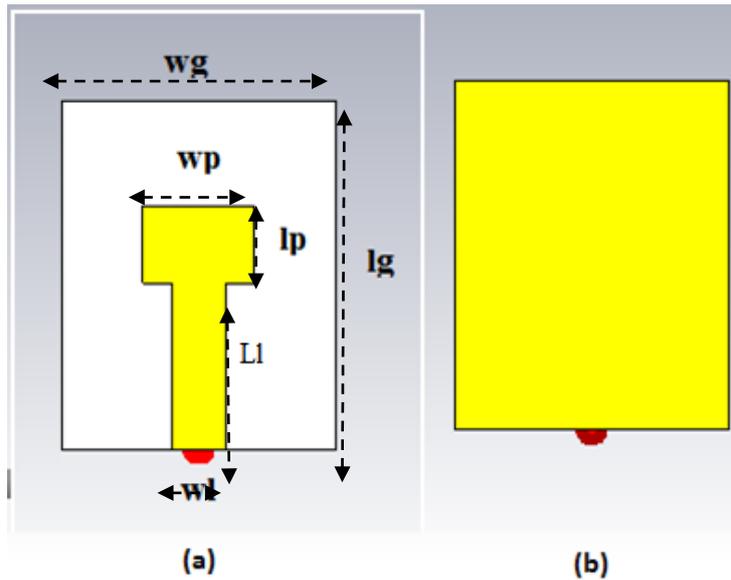


Figure III-5 : Géométrie de l'antenne initiale (a) : vue de face, (b) : vue d'arrière.

Où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

l_e : Représente la longueur effective de l'antenne, qui prend en considération les effets de bords au niveau des extrémités du patch, elle peut être calculée par :

$$l_e = l_p + 2\Delta l$$

l_p : la longueur du patch

Avec Δl : l'extension de longueur à chaque extrémité.

Le milieu étant inhomogène, nous définissons une constante diélectrique effective, donnée par :

$$\epsilon_{\text{reff}}(W) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{1 + 12 \frac{h}{W}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Lorsque } \frac{W}{h} > 1$$

h et ϵ_r représentent respectivement la hauteur du substrat et sa permittivité relative. La formule de Hammerstad qui permet de déterminer la longueur de l'extension est :

$$\Delta l = 0.412 \times h \frac{\epsilon_{\text{reff}} + 0.3}{\epsilon_{\text{reff}} - 0.258} \times \frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.8}$$

La largeur du patch est ensuite extraite de l'expression suivante :

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Le tableau suivant résume les différents paramètres de l'antenne.

Les paramètres	Les dimensions (mm)
Wg	18.78
Lg	36.48
Wp	10
Lp	7
wl	4.86
Ll	15

Tableau III-1 : Dimensions de l'antenne initiale

La simulation sous CST MWS de cette antenne nous permet de définir le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence dans la bande située entre 2 et 12 GHz et est illustrée sur la figure III.6.

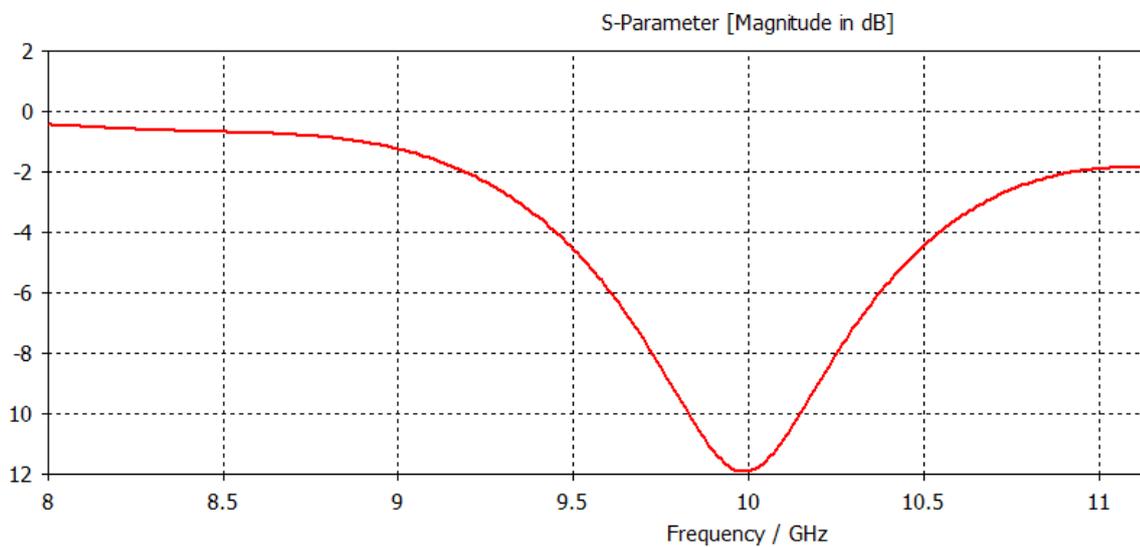


Figure III.6. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne carré.

On remarque que l'antenne présente un coefficient de réflexion S_{11} proche de -12 dB à la fréquence 10 GHz. Pour une meilleure adaptation, on introduit un transformateur quart d'onde de longueur **12** et de largeur W_t égale à **7mm** et **2.5mm** respectivement comme le montre la

figure III.7. Ces valeurs ont été optimisés pour avoir une bonne adaptation à la fréquence de travail.

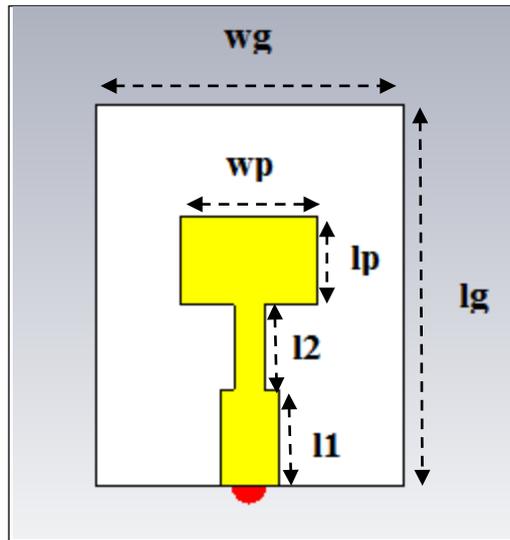


Figure III-7 : Géométrie de l'antenne initiale avec une ligne quart d'onde.

La **Figure III.8.a** fait apparaître une résonance à 10 GHz avec un niveau S_{11} de -45 dB. La bande passante mesurée à -10 dB est de 493.7 MHz. Cependant, nous remarquons que le rapport axial reste à 40 dB ce qui est veut dire que l'antenne est à polarisation linéaire.

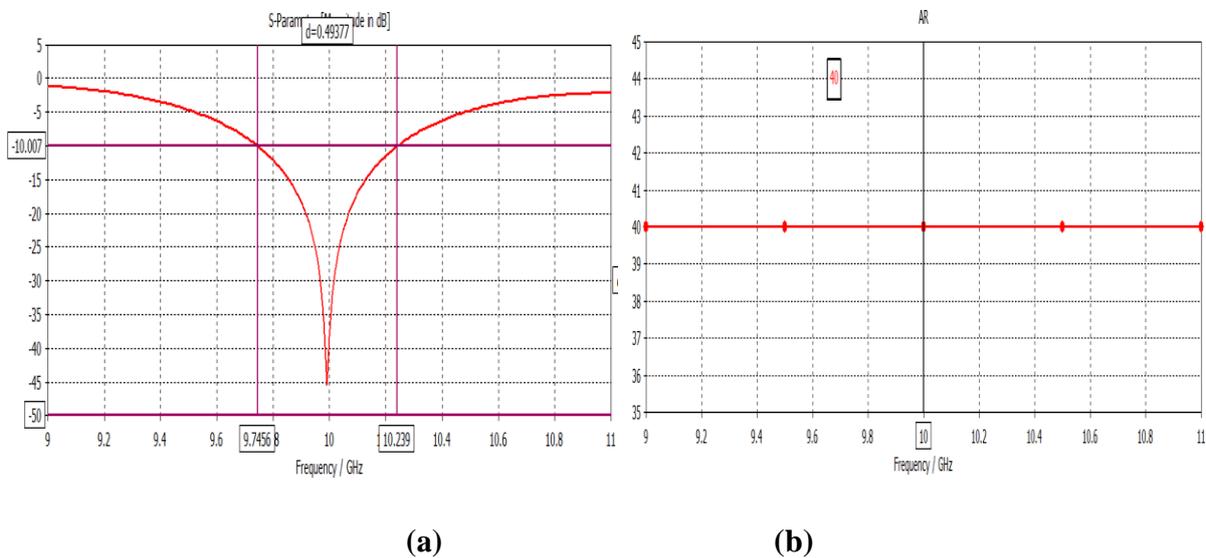


Figure III-8 : (a) Coefficient de réflexion S_{11} et (b) Rapport Axial AR, en fonction de la fréquence.

III .4 2. Conception de l'antenne polarisée circulairement à un seul élément

L'antenne patch carré à coins tronqués est l'une des premières techniques de base pour générer une polarisation circulaire. En apportant des modifications sur les deux extrémités du

patch de l'antenne initiale, on obtient la structure illustrée sur la figure III.9. Après simulation, nous avons remarqué que la fréquence de résonance a été décalée vers une fréquence plus élevée, ce qui nous a menés à augmenter les dimensions de l'antenne pour revenir vers la résonance d'origine qui est 10 GHz. Les nouveaux paramètres géométriques sont : **$L_p=8.1\text{mm}$** et **$W_p=9.3\text{ mm}$** .

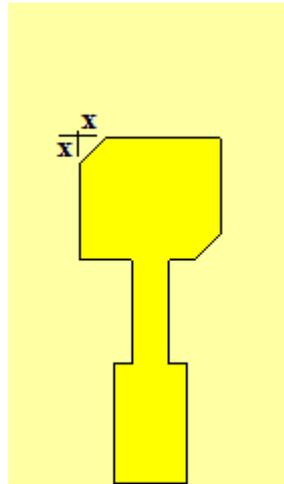
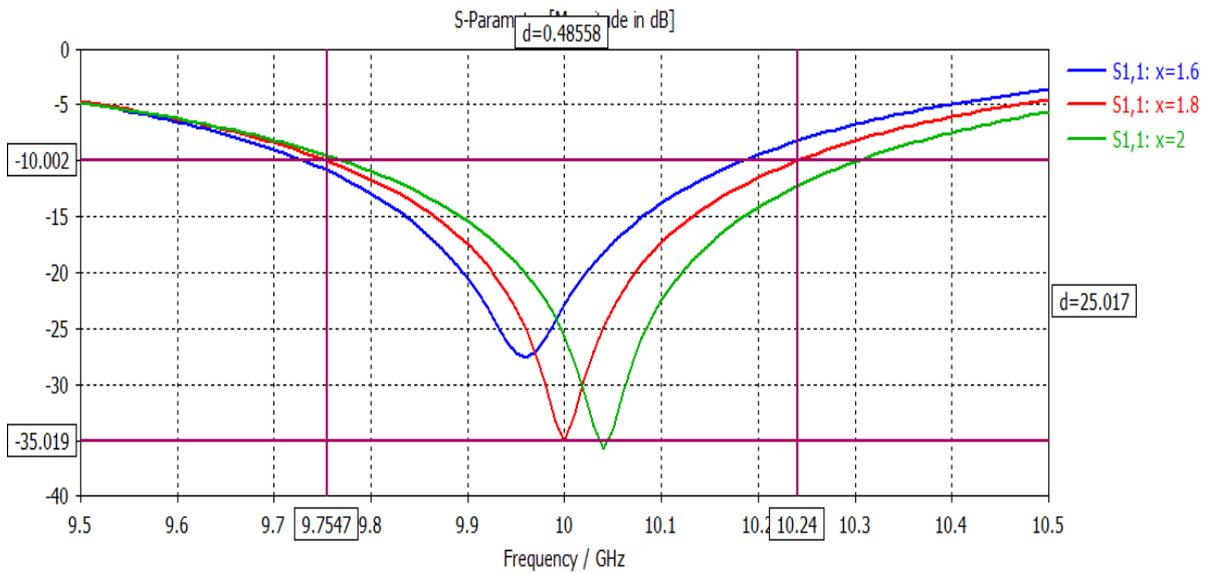


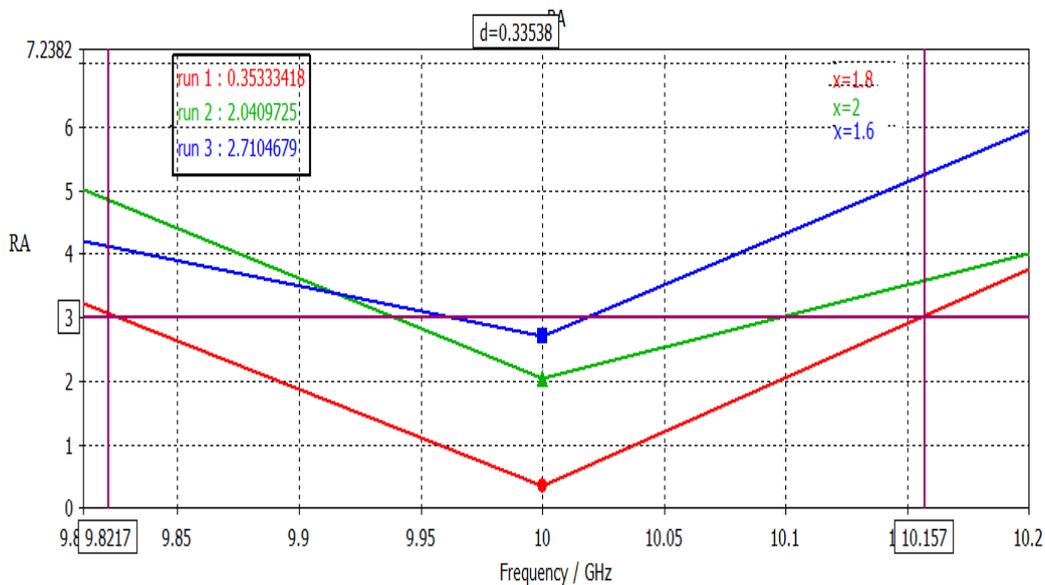
Figure III.9: Antenne microruban à coins tronqués

III .4 2 a. Etude paramétrique sur la longueur des troncatures

L'influence de la longueur des troncatures (x) appliquée sur les deux extrémités du patch sur le fonctionnement de l'antenne est présentée dans cette section. L'étude paramétrique est réalisée pour des longueurs de $x = 1.6\text{mm}$, 1.8mm et 2mm respectivement. Les résultats du coefficient de réflexion ainsi que le rapport axial en fonction de la fréquence pour chaque variation sont présentés sur la figure III.10



(a)



(b)

Figure III.10 (a) Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et **(b) Rapport axial** AR pour différentes valeurs de longueurs x

III .4 2 b Résultats de simulation

Nous pouvons constater que la variation de la longueur des troncatures x influe sur la fréquence de résonance de l'antenne. Une bonne adaptation de l'antenne à la fréquence de travail est observée pour une longueur $x=1.8\text{mm}$. A cette valeur, le coefficient de réflexion atteint un niveau de -35 dB . La bande passante à -10 dB de cette antenne est de 485 MHz allant de 9.82 à 10.15 GHz comme indiquée sur la figure III.10 (a).

D'autre part, et d'après la Figure III.11(b), un rapport axial minimal est obtenu lorsque la longueur est égale à 1.8mm et cela à la fréquence 10 GHz désirée. Pour les autres valeurs, la valeur du rapport axial devient plus élevée. La bande de fréquence dans laquelle nous avons une meilleure polarisation circulaire mesurée à 3 dB est de 335 MHz (de 9.82 GHz à 10.15 GHz).

Nous avons également examiné le rapport d'onde stationnaire de l'antenne (TOS) qui est compris entre 1 et 2, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission (Figure III.11).

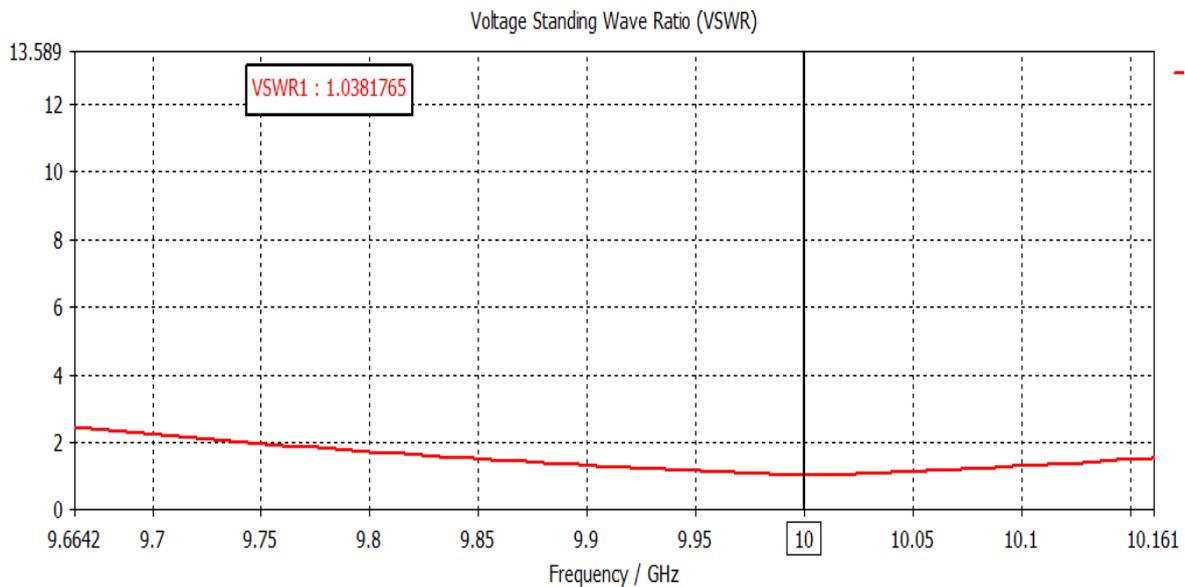


Figure III-11 : Taux d'onde stationnaire (VSWR).

- **Diagramme de rayonnement et Gain**

Le logiciel CST MWS permet de visualiser les diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne simulée. C'est une représentation qui nous informe sur le gain et la directivité de l'antenne. Il nous donne la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire ; ceci nous donne une idée sur l'angle d'ouverture. Les résultats des diagrammes en 2D de l'antenne simulée sont présentés sur la **Figures III.12** au niveau des deux plans principaux, où on remarque que le rayonnement est quasi-omnidirectionnel est observé. Le gain de l'antenne à la fréquence 10 GHz est de 6.2 dB, tel que le montre la **Figure III.13**.

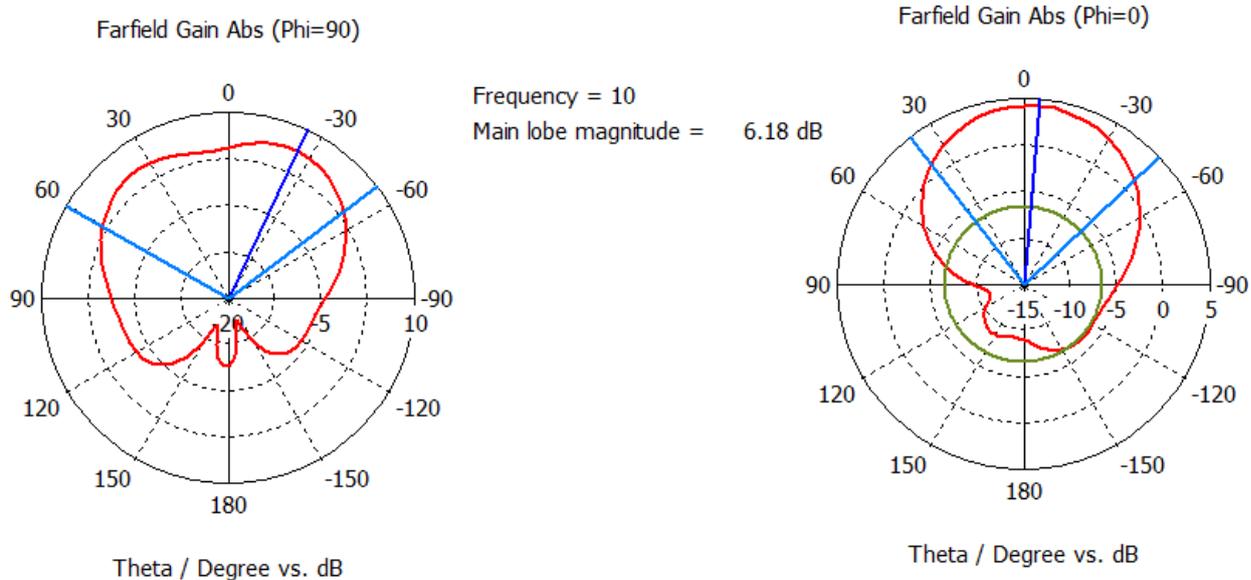
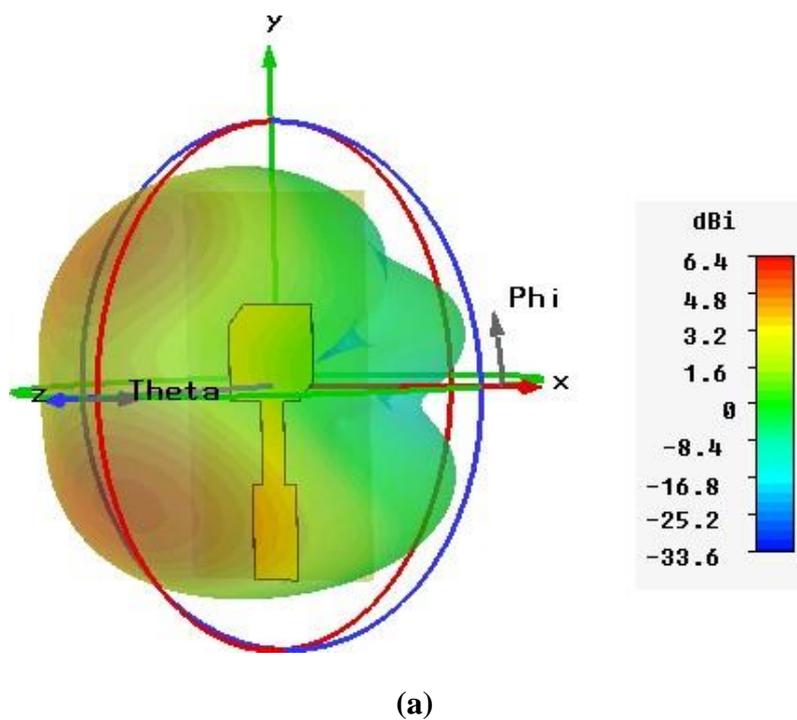
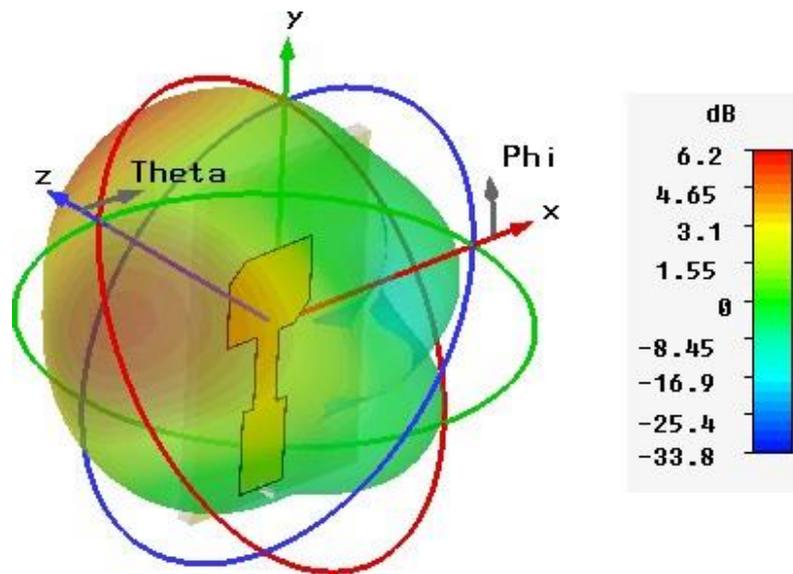


Figure III.12: Diagramme de rayonnement en 2D sur les deux plans :(a) $\phi=90^\circ$ et (b) $\phi=0^\circ$





(b)

Figure III.13: Diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 10 GHz (a) la directivité, (b) le gain

- **Efficacité**

Par définition le rendement est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, en d'autre terme c'est le rapport entre le gain (G) et la directivité (D).

$$\eta = G(\theta, \varphi) / D(\theta, \varphi)$$

Dans notre cas, le gain = 6.2 dB et la directivité D = 6.4 dBi donc : $\eta = G / D = 6.2 / 6.4 = 0.968$

- **Densité de courant**

La figure III.14 illustre la distribution du courant de l'antenne à polarisation circulaire à la fréquence 10 GHz. On remarque que le courant de surface est plus concentré sur la ligne d'alimentation de l'antenne. Un maximum de 20 A/m peut-être atteint, l'antenne envoie un rayonnement d'une manière acceptable.

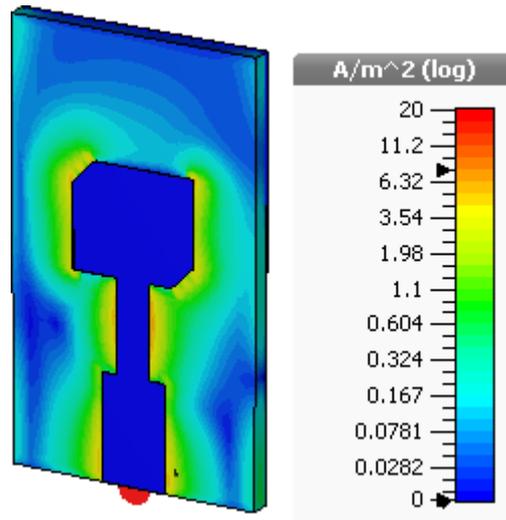


Figure III.14: Densité de courant surfacique du patch.

III .5 Conception du réseau d'antennes

III .5.1 Conception d'un réseau d'antennes à deux éléments

III .5 1.a Géométrie

Dans cette section, nous nous intéressons tout d'abord à la conception d'un réseau d'antennes à deux éléments pour l'amélioration du gain, et cela à partir de l'antenne initiale à PC étudiée précédemment. Nous optant pour deux méthodes d'alimentation, la première est une alimentation série utilisant un transformateur quart d'onde et la deuxième est une alimentation parallèle par le biais d'un diviseur de puissance sous forme d'une jonction T excité par une impédance d'entrée égale à 50Ω . Cette jonction permet d'augmenter le mouvement du courant dans les coudes de celle-ci, qui engendre une consommation de ce courant dans le réseau, et qui permet aussi la division symétrique de la puissance d'entrée à l'extrémité des coudes pour la réflexion des ondes.

Pour la conception d'un tel diviseur de puissance, nous sommes appelés à définir les valeurs de la jonction à savoir sa longueur et sa largeur imposées par les équations suivantes :

$Z_0 = 50\Omega$. L'impédance d'entrée de la première alimentation.

$Z_1 = 100\Omega$ avec : $Z_1 = n Z_0$. n représente le nombre d'éléments.

Pour faciliter les calculs de la longueur et de la largeur de chaque ligne d'alimentation de la jonction du diviseur, on a utilisé l'application « Microstrip Line Calculator » défini dans CST MWS. La configuration des deux structures est illustrée sur la figure III.15.

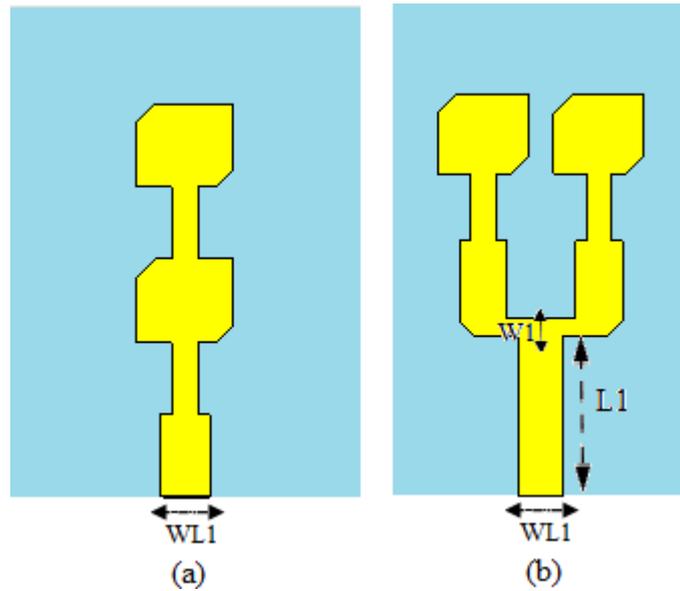


Figure III-15 : Réseau de deux éléments (a) : alimentation en série (b) alimentation en parallèle

Les deux réseaux d'antennes sont constitués de deux patches identiques disposés sur le même type du substrat (RT5880) de dimensions $33.7 \times 49 \times 1.58 \text{ mm}^3$ pour la première configuration (**figure III.15(a)**) et $30.6 \times 49 \times 1.58 \text{ mm}^3$ pour la deuxième structure (**figure III.15(b)**). Les éléments rayonnants de la structure réseau en parallèle sont espacés d'une distance $\lambda/4 = 7.5 \text{ mm}$. Les paramètres de la jonction T ainsi que les valeurs optimisées sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Les paramètres	Les dimensions (mm)
W1 (100 Ω)	1.8
W11 (50 Ω)	4.65
L1 (50 Ω)	16.44

Tableau III-2 : Paramètres de la jonction T du réseau en parallèle à deux éléments.

III .5.2 Résultats de simulation

Les résultats obtenus après simulation pour les deux cas de figures en fonction de la fréquence sont représentés par la figure III.16. A partir de cette courbe, nous pouvons constater que, le réseau d'antenne dans sa configuration en série présente une résonance à la fréquence **11.12 GHz** qui n'est pas adéquate à notre fréquence de travail. Dans le second cas où la mise en réseau est en parallèle, nous remarquons la présence d'une résonance à **10 GHz** avec un niveau du paramètre S_{11} de -36.21 dB. La bande passante s'étale de 9.79 GHz à 10.17 GHz (soit de 377 MHz).

La structure du réseau d'antenne optimisée est celle en parallèle. Elle présente un bon rapport axial égal à 1.91dB, donc l'antenne présente toujours un fonctionnement en polarisation circulaire.

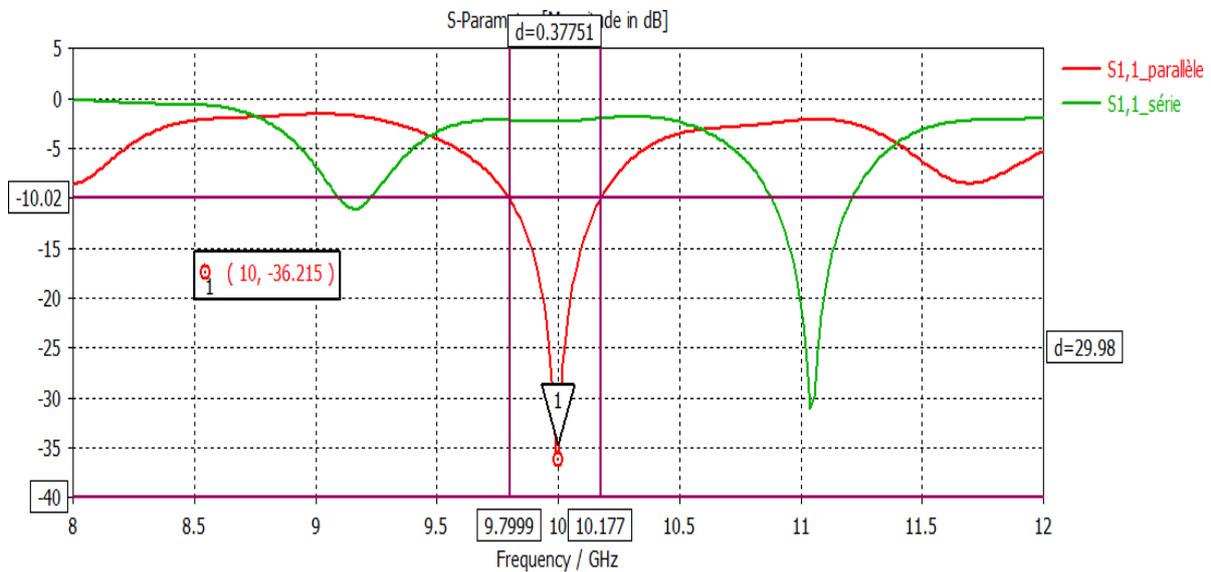


Figure III-16 : Coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence

La bande passante AR mesurée à 3 dB est de 233 MHz (9.84-10.079 GHz). Par ailleurs le gain devient plus intéressant, il est de l'ordre de 8 dB à la fréquence de résonance de 10 GHz comme présenté sur la figure III.17, donc l'augmentation de la valeur du gain est proportionnelle au nombre d'éléments qui constitue le réseau d'antenne.

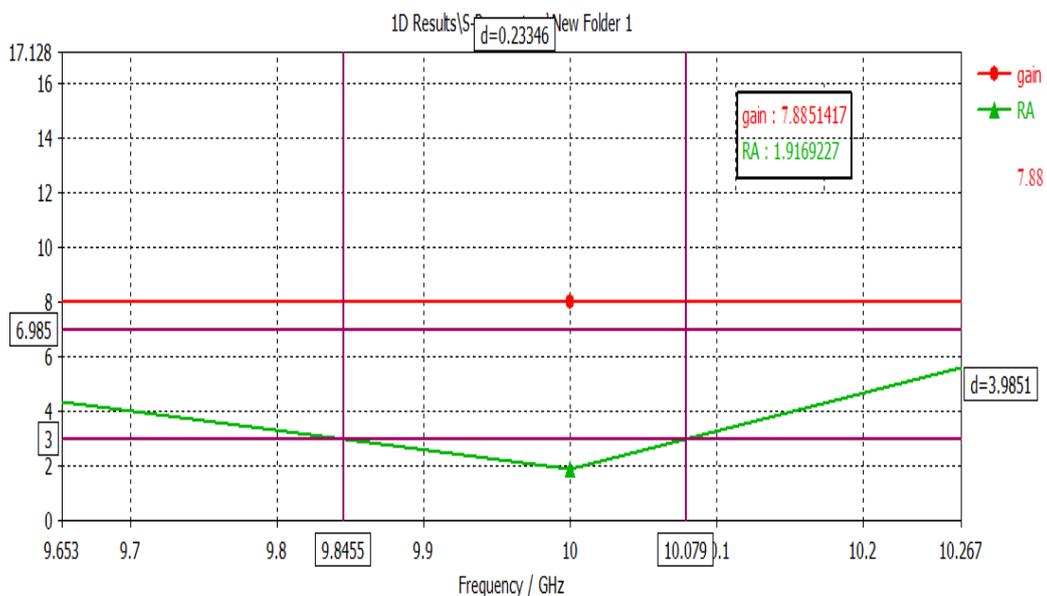


Figure III-17 : Rapport axial et gain du réseau d'antennes à deux éléments

Nous avons également examiné le rapport d'onde stationnaire de l'antenne (TOS) qui égal à 1.03 à la fréquence du travail ($1 < \text{TOS} < 2$). Ceci implique une bonne adaptation qui mène à un transfert maximal de la puissance entre l'alimentation et la partie du réseau.

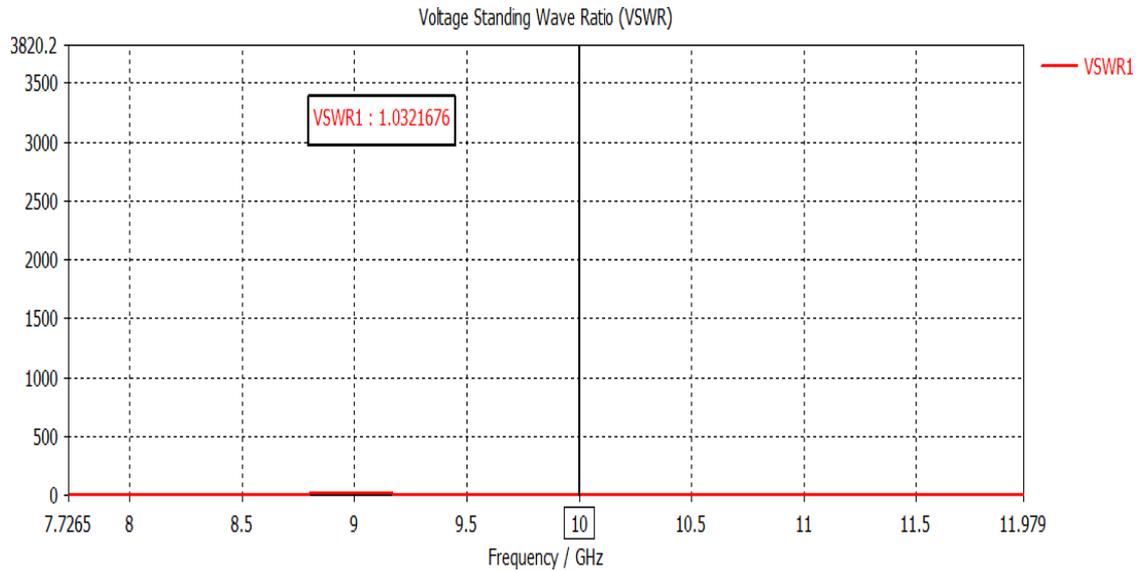


Figure III-18 : TOS du réseau d'antennes à deux éléments

La figure (III.19) montre la partie réelle de l'impédance d'entrée de notre réseau. Nous observons une bonne adaptation qui est autour de 50 ohms à la fréquence 10 GHz.

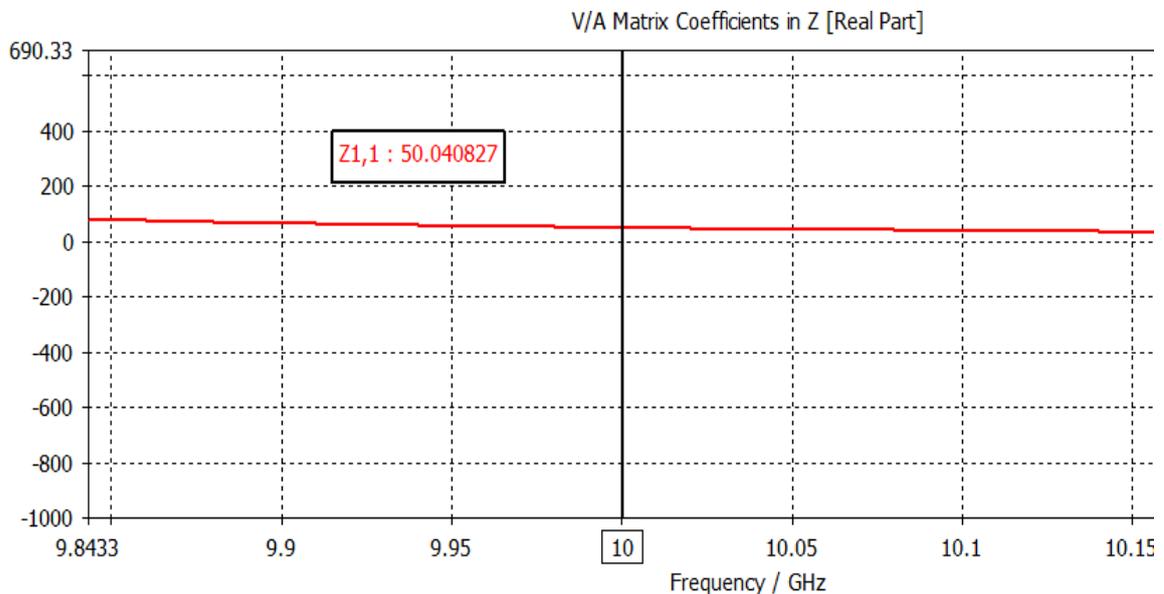


Figure III-19 : Partie réelle de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à deux éléments.

La présentation du diagramme de rayonnement en 3D du réseau d'antenne patch à deux éléments est illustrée sur la figure III.20. On peut remarquer d'après cette figure que le gain du réseau d'antenne proposé est de 7.89 dB, alors que celui de l'antenne initiale était de 6.2 dB. La directivité maximale = 8dB. Cette amélioration du gain s'explique notamment par la mise en réseau de l'antenne ainsi que la technique d'alimentation utilisée.

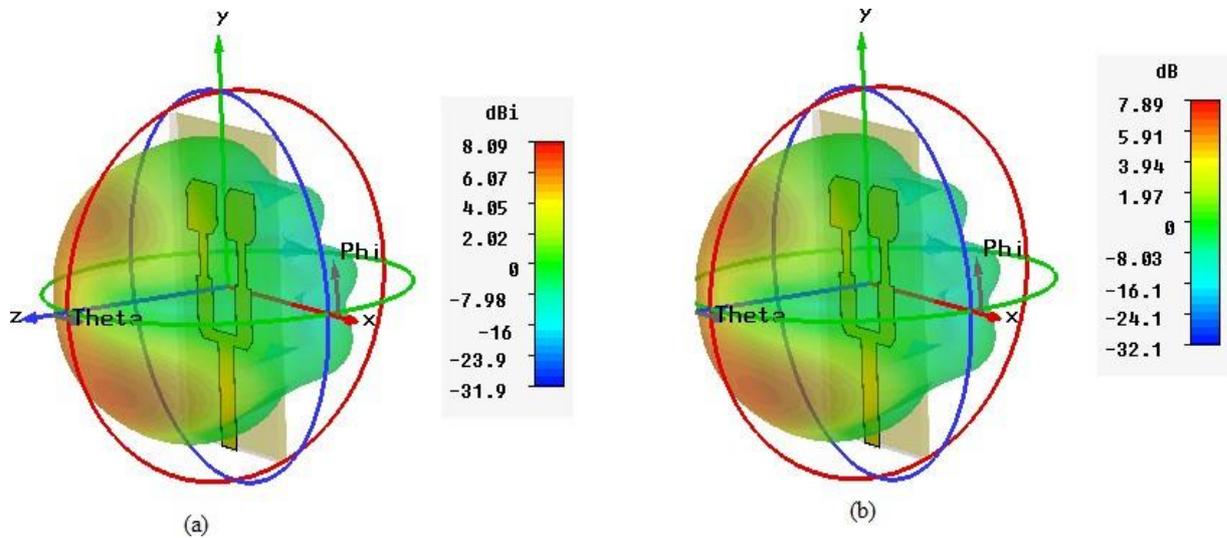


Figure III-20 : Diagramme de rayonnement en 3D du réseau d'antennes à deux éléments (a) la directivité (b) le gain.

Les performances du réseau d'antennes proposé en termes d'adaptation, de CP, de gain et de bande passantes à la fréquence 10 GHz sont résumées dans le tableau III.3.

Paramètres	Antenne patch PC	Réseau d'antennes PC à deux éléments
Fréquence (GHz)	10	10
Dimensions (mm ³)	18.8×32.5×1.58	30.6×49×1.58
S ₁₁ (dB)	-35	-36.21
RA	0.35	1.91
Bande passante (MHZ)	485	377
Gain (dB)	6.2	7.89
Directivité (dBi)	6.4	8.09

Tableau III-3 : Performances du réseau d'antennes en parallèle à deux éléments.

III.5.3 Conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments

III .5 .3. a Géométrie

Dans la présente section, nous nous intéressons à la conception et simulation du réseau d'antennes constitué de quatre éléments dans le but d'augmenter d'avantage la directivité et le gain. Dans ce cas, le réseau étudié dans la section précédente est doublé pour former un réseau de quatre éléments comme illustré sur la **figure III.21**. Les dimensions des paramètres qui constituent le réseau étudié précédemment sont maintenues constantes. La distance (**d**) entre les deux réseaux est de l'ordre de λ .

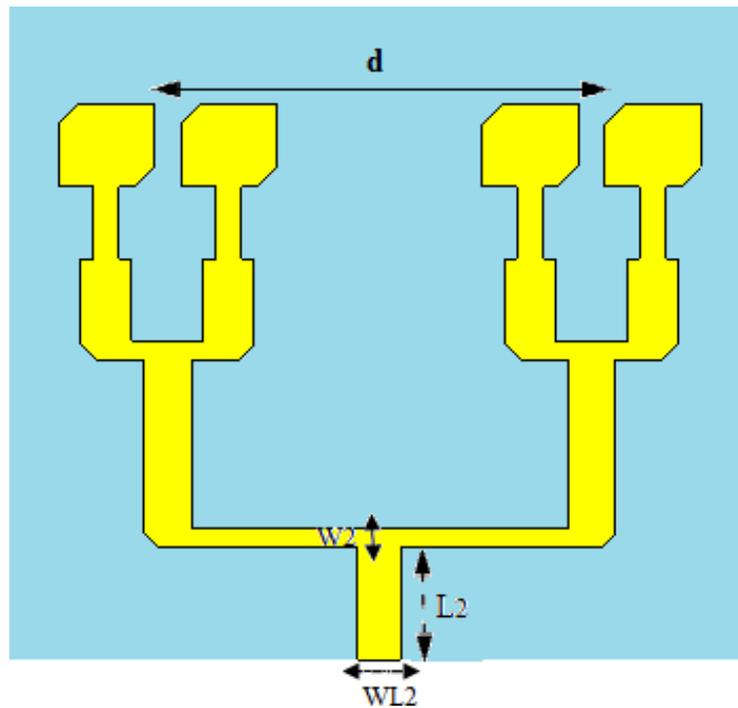


Figure III-21 : Réseau d'antennes conçu de quatre éléments

III .5 .3.b Etude paramétrique sur la distance (**d**) entre les deux réseaux

En premier lieu, une étude paramétrique a été menée sur la distance (**d**) qui caractérise l'espacement entre les deux réseaux, et cela pour adapter l'antenne à la fréquence du travail. L'étude a été réalisée pour des distances de λ , 1.2λ , 1.33λ , et 1.46λ mm qui correspondent à des valeurs de 30 mm, 36 mm, 41 mm, et 44 mm respectivement. Sur la **figure III.22**, on présente le module du coefficient de réflexion pour les différentes valeurs de **d**. Nous constatons une meilleure adaptation d'impédance pour une valeur de **d** égale à **41 mm**, avec un coefficient de réflexion de -30dB à la fréquence 10 GHz.

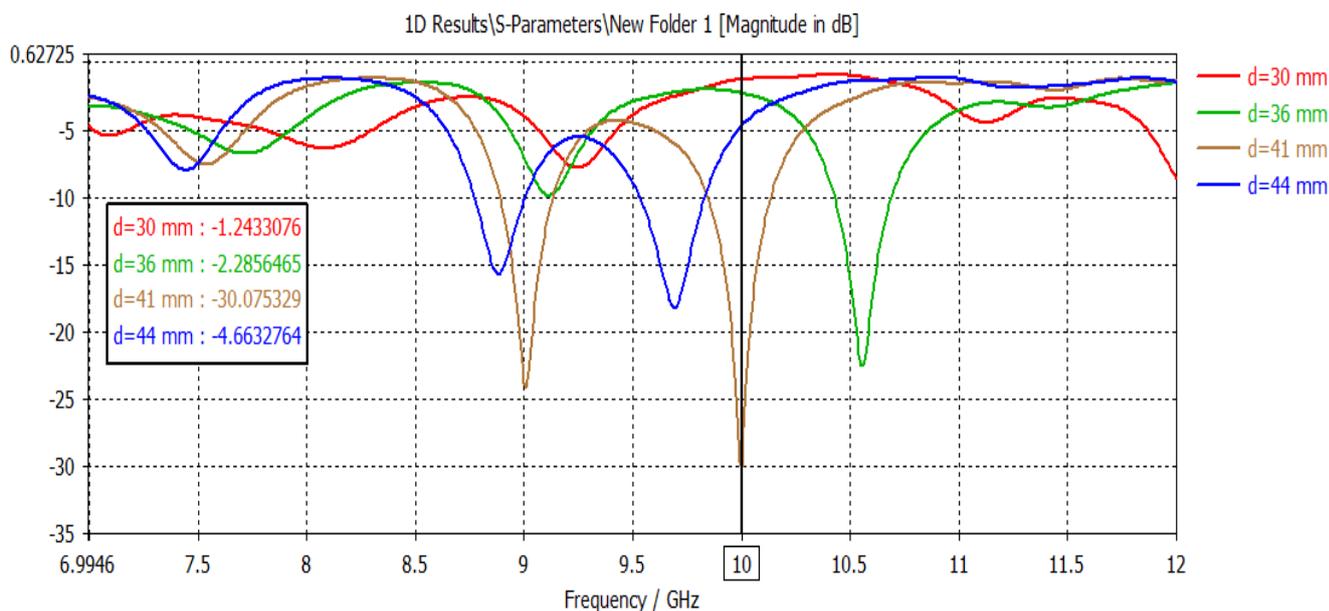


Figure III-22 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments pour les différentes valeurs de d .

III .5 .3. c Etude paramétrique sur la à la largeur w_2

En second lieu, une étude paramétrique par rapport à la largeur w_2 de la jonction T caractérisant le réseau a été effectué. La figure III.22 montre l'influence de la variation de la largeur w_2 en gardant la valeur de d à 41 mm. Sur la **figure III.23**, on illustre le module du coefficient de réflexion pour l'ensemble des résultats simulés. Une meilleure adaptation d'impédance pour une valeur de w_2 égale à 4.2 mm est obtenue, avec un coefficient de réflexion de -35.6 dB à la fréquence 10 GHz.

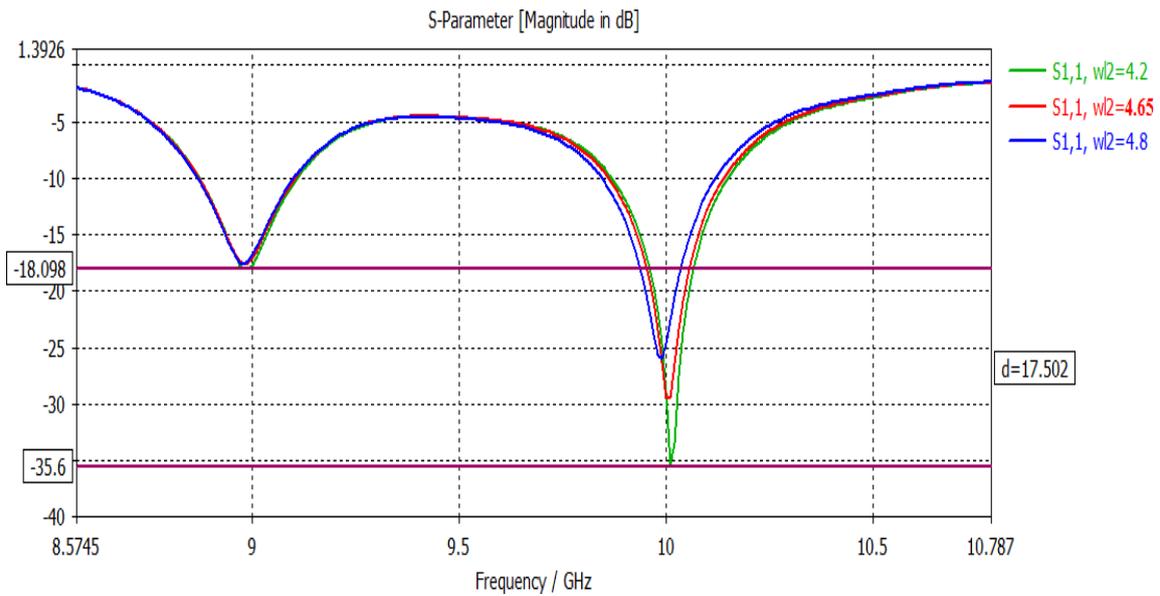


Figure III-23 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes à quatre éléments pour les différentes valeurs de W_{12} .

Les paramètres du réseau d'antennes optimisé pour un fonctionnement dans la bande X autour de la fréquence 10 GHz sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Les paramètres	Les dimensions optimisées (mm)
D	41
W2 (100 Ω)	1.8
L2 (50 Ω)	11
W_{L2} (50 Ω)	4.2

Tableau III-4 : Dimensions optimisés du réseau d'antennes à quatre éléments.

Le coefficient de réflexion du réseau d'antennes est illustré par la figure III.24.

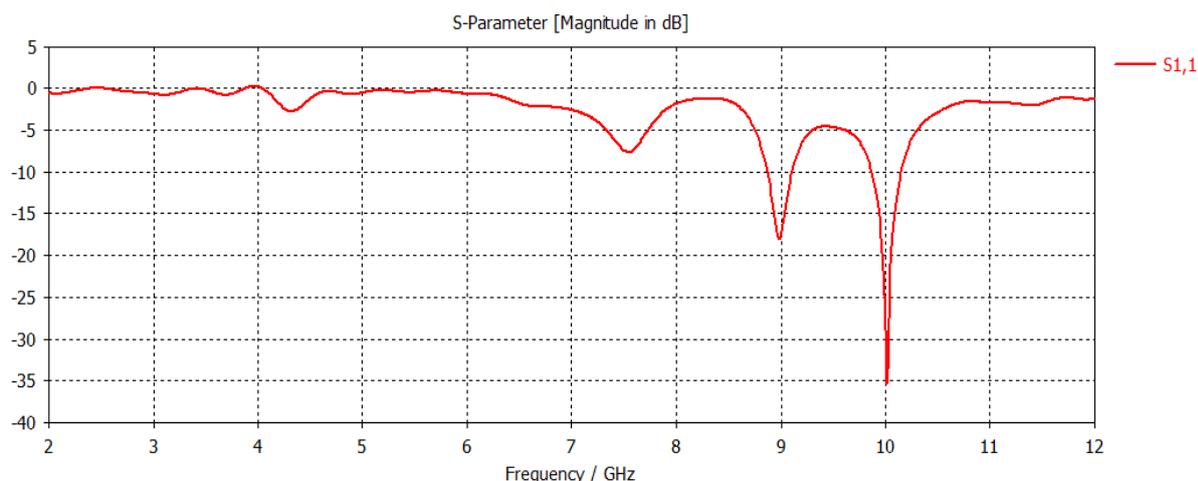


Figure III-24 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence du réseau d'antennes optimisé

Nous pouvons observer que le réseau d'antennes conçu présente un caractère bi bandes, deux résonances aux fréquences 9 GHz, et 10 GHz sont obtenues avec des niveaux du paramètre S_{11} de -17.3 dB, et -35 dB respectivement. Les bandes passantes obtenues autour de ces résonances sont 233 GHz (8.86 à 9.09 GHz), et 276 GHz (9.84 à 10.12 GHz) respectivement.

Par ailleurs, la plage de fréquence dans laquelle nous avons le fonctionnement en polarisation circulaire mesurée à 3 dB de la réponse du rapport axial en fonction de la fréquence est de 170 MHz (de 9.953 GHz à 10.124 GHz) autour de la fréquence 10 GHz. Par contre, à la première résonance, le réseau d'antennes n'a plus le caractère à polarisation circulaire puisque le rapport axial mesuré à la fréquence 9 GHz est de 5.47 dB comme indiqué sur la figure III.25.

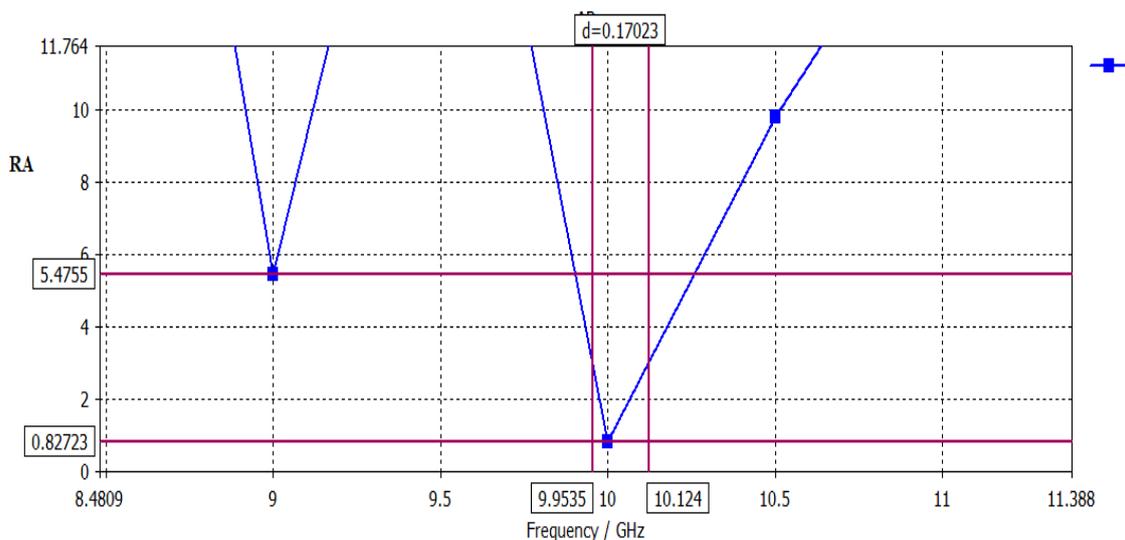


Figure III-25 : Rapport axial en fonction de la fréquence du réseau d'antennes optimisé à quatre éléments

La variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes en fonction de la fréquence est illustrée sur la figure III.26 à la fréquence 10 GHz. Une bonne adaptation d'impédance est observée qui varie autour de 50 Ohm sur toute la bande passante. D'autre part, le résultat de simulations du taux d'onde stationnaire simulé du réseau d'antennes optimisé, est présenté sur la figure III.27. Ce résultat montre que le réseau optimisé couvre une large bande passante autour de 10 GHz ($TOS < 2$). Ce ci indiquent que le réseau de 4 éléments a de bonnes performances en termes de taux d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée et d'efficacité à la fréquence 10 GHz.

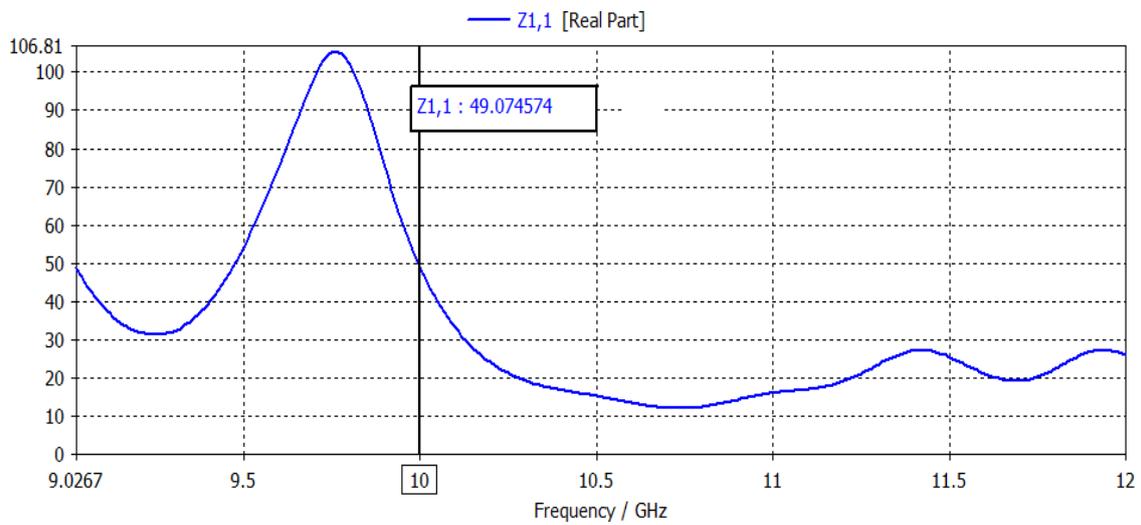


Figure III-26 : Variation de l'impédance d'entrée du réseau d'antennes à quatre éléments en fonction de la fréquence

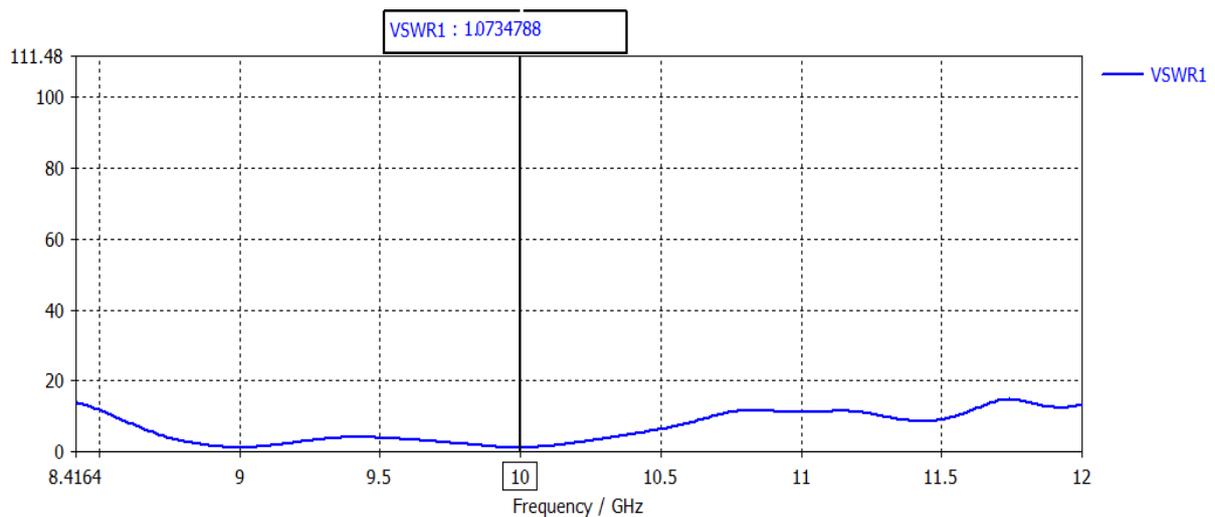


Figure III-27 : Taux d'onde stationnaire du réseau d'antennes à quatre éléments

Les diagrammes de rayonnement pour ces deux fréquences de résonance au niveau du plan E sont illustrés par la figure III.28. Nous observons un rayonnement omnidirectionnel. La direction du lobe principal est à 20° , et 35° avec des gains de 11.6 dB, et 9.17 dB respectivement pour les deux fréquences de résonance correspondantes. Les largeurs du faisceau sont de 23° , et 28.7° respectivement. Le rayonnement à trois dimensions de ce réseau est représenté dans la **Figure III.29**. Des gains maximaux de 11.6 dB, et de 9.17 sont réalisés avec ce réseaux aux fréquences 9 GHz, et 10 GHz respectivement.

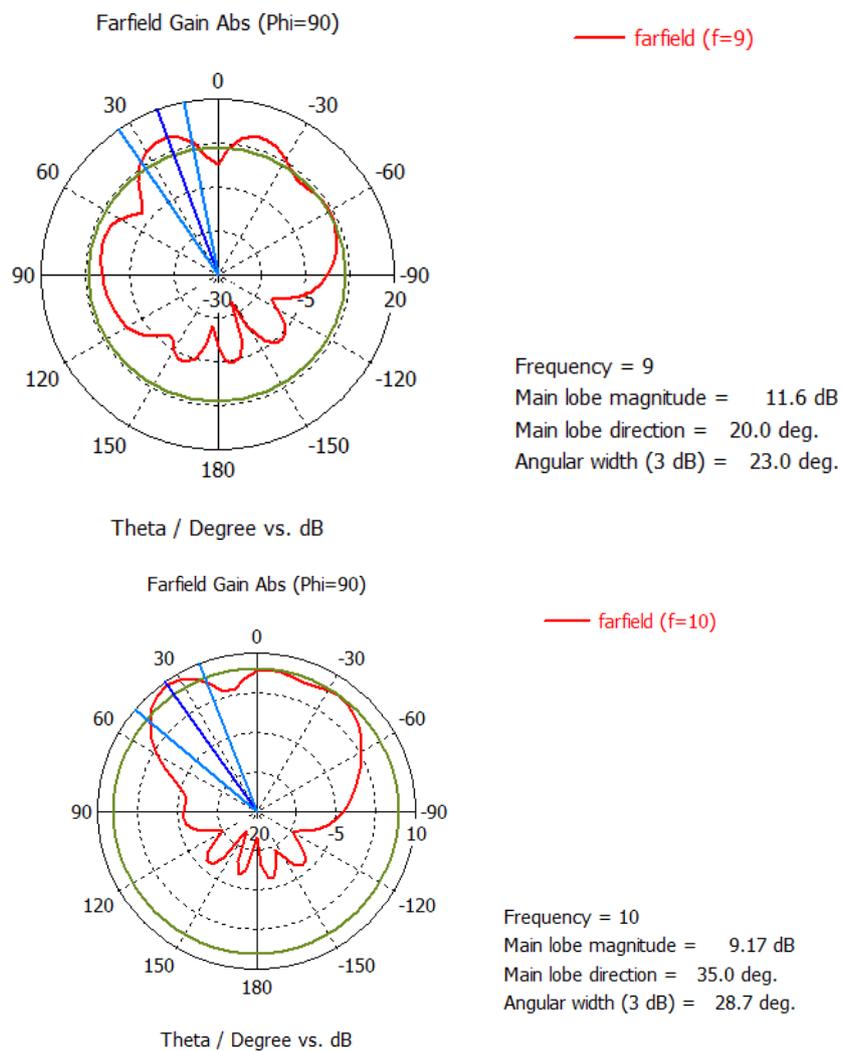
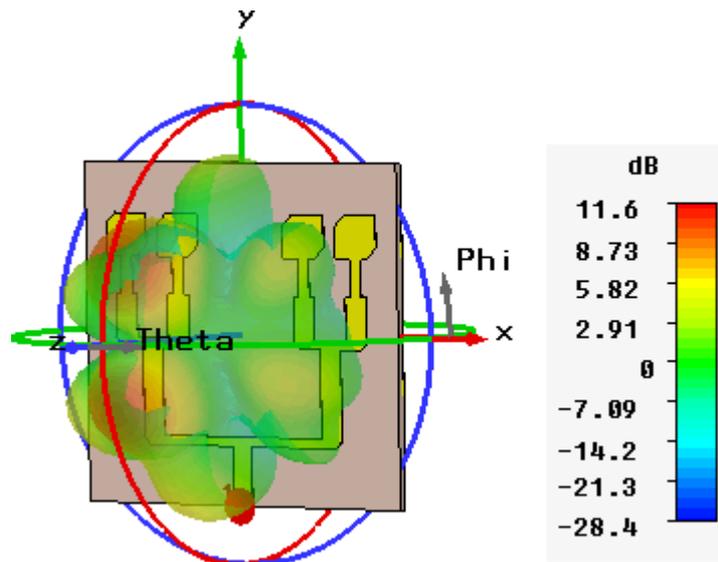
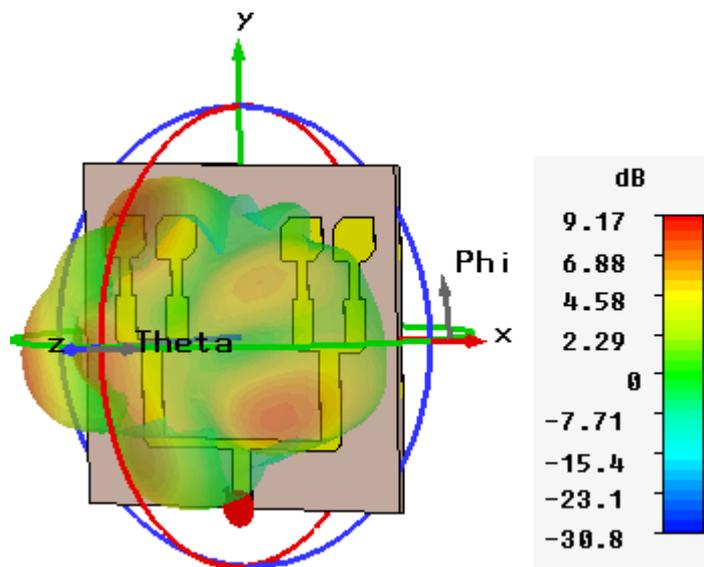


Figure III-28 : Diagrammes de rayonnement en représentation polaire obtenus par simulation du réseau d'antennes aux fréquences 9 GHz, et 10 GHz au plan E



(a)



(b)

Figure III-29 : Diagrammes de rayonnement en 3 D obtenus par simulation du réseau d'antennes aux fréquences **a) 9 GHz** et **b) 10 GHz**.

Les caractéristiques du réseau d'antennes à quatre éléments proposé en termes d'adaptation, de CP, de gain et de bande passantes aux deux fréquences sont résumées dans le tableau III.5.

Paramètres	Réseau d'antennes à quatre éléments	Réseau d'antennes à quatre éléments
Fréquence (GHz)	9	10
S₁₁ (dB)	-23.53	-30.2
RA	5.47	0.82
Bande passante (MHZ)	/	170
Gain (dB)	11.6	9.2
Directivité (dBi)	11.9	9.41

Tableau III-5 : Performances du réseau d'antennes en parallèle à quatre éléments.

D'après ces figures, il apparaît clairement que plus nous augmentons le nombre d'éléments du réseau d'antennes, plus le gain devient élevé. Il en est de même pour la directivité, comme nous avons pu le constater.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une structure d'un réseau d'antennes micro rubans bi bandes à polarisation circulaire a été conçue et simulée répondant aux exigences des applications satellitaires qui nécessitent un gain élevé. Dans ce contexte, une antenne patch carré à coins tronqués et à alimentation unique présentant une polarisation circulaire été utilisée comme élément de réseau. Le réseau d'antenne simulé présente deux résonances aux fréquences 9 GHz et 10 GHz avec un bon niveau d'adaptation. Les gains mesurés à ces fréquences sont de l'ordre de 11.6 dB et 9.17 dB respectivement. Le réseau d'antennes proposées présente de bonnes caractéristiques de rayonnement CP à la fréquence 10 GHz et couvre les besoins en bande passante sur cette bande de fonctionnement des systèmes de communication mobile par satellite. Le caractère en polarisation circulaire de la deuxième bande [8.86 GHz à 9.09 GHz] autour de la fréquence 9 GHz pourrait faire l'objet d'une future recherche dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat ou par d'autres étudiants en master.

Bibliographies

- [1] ZAAKRI Safa, ZENKOUAR Lahbib, BRI Seddik, “Conception of Bi-band Rectangular Microstrip Array Antenna”, Journal of microwaves, optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol.12, pp.23-36, No. 1, June 2013.
- [2] Bancroft, R. “Microstrip and Printed Antenna Design”, Noble Publishing 2004, chapter 2-3.
- [3] Chandan Kumar Ghosh, Susanta Kumar Parui, “Design, Analysis and Optimization of A Slotted Microstrip Patch Antenna Array at Frequency 5.25 GHz for WLAN-SDMA System”, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, vol 2, pp.102-112, no. 2, May 2010.
- [4] Muhammad Mahfuzul Alam, Md. Musta-zur Rahman Sonchoy, ad Md. Osman Goni, “Design and Performance Analysis of Microstrip Array Antenna”, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, pp. 1837-1842, 2009.
- [5] Otman Oulhaj, Naima A. Touhami, Mohamed Aghoutane, Antonio Tazon, “A Miniature Microstrip Patch Antenna Array with Defected Ground Structure”, IJMOT, vol. 11, no. 1, January 2016.
- [6] Md. Maruf Ahamed, Kishore Bhowmik, Md. Shahidulla, Md. Shihabul Islam, Md. Abdur Rahma, “Rectangular Microstrip Patch Antenna at 2GHZ on Different Dielectric Constant for Pervasive Wireless Communicatio”, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 2, no. 3, June 2012, pp. 417-424
- [7] M. T. I. Huque, et al., “Design and Simulation of a Low-cost and High Gain Microstrip Patch Antenna Arrays for the X-band Applications,” International Conference on Network Communication and Computer, New Delhi, India, March 21-23, 2011.
- [8] D. M. Pozar, D. H. Shcaubert, “Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays,” IEEE Press. Chapter 6, pp. 269-273. 1995.
- [9] J.G. Vera-Dimas, M. Tecpoyotl-Torres, P. Vargas-Chable, J. A. Damián-Morales, J. Escobedo-Alatorre, S. Koshevaya, “Individual patch Antenna and Antenna Patch Array for Wi-Fi Communication,” Programación Matemática y Software, vol. 2, no. 1, June 30, 2010.

- [10] M. Tecpoyotl-Torres, J. G. Vera Dimas, R. Castañeda-Sotelo, R. Cabello-Ruiz, “Rectangular Patch Antenna Array with Defect Ground Structure for Wi-Fi”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* vol. 3, no. 5, November 2013
- [11] Abdin, A. M., “Design of Dual-polarization Stacked Arrays for Wireless Communications,” *Progress in Electromagnetics Research, PIERS Online*, vol. 4, no. 4, pp. 409-412, 2008.
- [12] S.K. Bodhe , B.G. Hogade, Shailesh D. Nandgaonkar, “Beamforming Techniques for Smart Antenna using Rectangular Array Structure”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 4, no. 2, April 2014, pp. 257-264
- [13] Michael Grelier, “Miniaturisation des antennes large bande à l’aide de matériaux artificiels,” *Thèse de doctorat en Electronique et communication, Télécom Paris Tech*, 2011.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les avancées technologiques dans le domaine des télécommunications ont conduit au développement des dispositifs constituant un système de liaison radiofréquence, notamment les antennes. Ces composants essentiels jouent un rôle crucial dans les communications sans fil. Parmi les types d'antennes les plus répandus de nos jours, les antennes microrubans ou antennes imprimées se sont imposées grâce à leurs caractéristiques attrayantes et leur faible encombrement.

Dans le cadre de cette étude, notre attention s'est portée sur la conception et la simulation d'un réseau d'antennes microrubans à polarisation circulaire. Ces antennes ont été conçues et simulées à l'aide du logiciel électromagnétique CST.

Le premier chapitre présente une introduction générale sur les antennes, en mettant ensuite l'accent sur les antennes microrubans, leurs différentes formes, leur structure et leur mode de fonctionnement. Différentes techniques d'alimentation et d'adaptation sont également abordées, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. Les antennes microrubans, en raison de leurs caractéristiques de rayonnement, sont largement utilisées dans divers domaines des télécommunications, tels que les applications satellitaires.

Le deuxième chapitre se concentre sur les antennes microrubans à polarisation circulaire. Il explique d'abord l'intérêt de ce type de polarisation. Différentes techniques permettant d'obtenir une polarisation circulaire sont détaillées, que ce soit par une seule alimentation ou par deux alimentations. Ensuite, les avantages et les inconvénients de la polarisation circulaire sont exposés, suivis d'une brève conclusion.

Le troisième chapitre aborde la simulation et la conception d'un réseau d'antennes microrubans à polarisation circulaire. Nous avons commencé par une introduction sur les réseaux d'antennes, suivie par une présentation de leurs techniques d'alimentation où nous avons opté pour le type de réseau en jonction en T en raison de sa simplicité de conception.

Nous nous sommes intéressés par la suite à la conception d'un réseau d'antennes microrubans à polarisation circulaire. Ceci nous a permis de nous familiariser avec le logiciel CST MWS. Nous avons d'abord effectué des simulations pour une antenne à un seul élément, puis nous avons étendu ces simulations à des antennes à deux éléments et quatre éléments.

Une étude paramétrique sur certaines dimensions géométriques a permis de montrer l'impact de chaque paramètre sur le fonctionnement du réseau d'antennes et de l'optimiser afin de servir les exigences des applications satellitaires fonctionnant à la fréquence 10 GHz. Les performances et les caractéristiques de ces réseaux ont été illustrées et comparés. Les résultats de la simulation révèlent qu'une augmentation du nombre d'éléments rayonnants a entraîné une amélioration en gain et en directivité.