

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de **TECHNOLOGIE**



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : BELKADI AMIRA

CHABANE NIHED

Sujet

Etude et conception des réseaux d'antennes planaires pour les communications mobiles de la cinquième génération

Soutenu publiquement, le 28 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M. Boukli Hacene Noureddine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme. Benmostefa Naima	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. BELHADEF Yamina	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

REMERCIEMENTS

*Ce travail de recherche s'est déroulé au niveau du Département de Télécommunications de la faculté de Technologie de l'université **ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM***

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos sincères remerciements et nos profondes reconnaissances à Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Madame **BELHADEF YAMINA**, Maître de Conférence classe A, pour ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de notre recherche, ses avis éclairés et pour tout le savoir qu'elle nous a transmis.*

*Nos vifs remerciements vont également à monsieur le professeur **N.BOUKLI HACENE** de nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce Travail.*

*Nous exprimons également nos remerciements à Madame **N.BENMOSTEFA**, Maîtres de conférences classe A à l'Université de Tlemcen pour l'intérêt qu'elle a portée à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

Nos vifs remerciements pour l'ensemble des enseignants du département Télécommunications qui ont contribué à notre formation Master en Télécommunications.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes nos familles et nos ami(e)s qui ont participés de près ou de loin à l'exécution de ce travail.

Au Nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux

Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie

À ma très 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 toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles, puisse dieu te protéger.

À ma sœur Amel Qui était et un premier soutien pour moi dans cette vie, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit puisse dieu te protéger.

À mon frère Toufik

À ma deuxième famille (Sedjelmaci et meghabber) qui n'ont pas cessés de m'encourager

À toute ma famille, et mes amis. Sans exception qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible,

Je vous dis merci.

Étudiante : Belkadi Amira

Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie

À mes chers parents, source de vie et d'affection, Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard et qui ont fait tout possible pour m'aider et me soutenir, que dieu vous procure bonne santé et longue vie.

À mes frères et ma sœur, source de joie et de bonheur, qui m'ont encouragé et soutenu durant mes années d'études.

À toute ma famille et mes ami(e)s, pour leur amour sincère et leur soutien.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

Étudiante : Chabane Nihed

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACE.....	II
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES ABREVIATION	XIV
INTRODUCTION GENERAL	1

CHAPITRE 01 : ETAT D’ART SUR LES ANTENNES PATCHES ET LA 5G

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique	4
I.3. Description d’une antenne patch	5
I.4. Différentes formes des antennes patch	5
I.4.1. Antenne patch circulaire	6
I.4.2. Antenne patch rectangulaire	8
I.5. Caractéristiques des antennes patches	9
I.5.1. Impédance d’entrée	9
I.5.2. Bande passante	10
I.5.3. Coefficient de réflexion S11.....	11
I.5.4. Rapport d’onde stationnaire (ROS).....	11
I.5.5. Directivité	11
I.5.6. Gain	12
I.5.7. Rendement.....	12
I.5.8. Polarisation.....	13
I.5.8.1. Polarisation linéaire.....	13
I.5.8.2. Polarisation elliptique.....	13
I.5.8.3. Polarisation circulaire	13

I.5.9. Diagramme de rayonnement	13
I.6. Techniques d'alimentation	14
I.6.1. Alimentation par ligne micro-ruban	15
I.6.2. Alimentation par sonde (câble coaxiale)	15
I.6.3. Alimentation par ouverture (fente)	15
I.6.4. Alimentation par proximité	16
I.7. Technique d'adaptation	16
I.7.1. Adaptation par encoche	16
I.7.2. Adaptation par ligne quart d'onde	17
I.8. Domaines d'applications	17
I.9. Avantages et inconvénients des antennes micro-rubans	17
I.10. Cinquième génération 5G	18
I.10.1. Historique	18
I.10.2. Définition de la 5G	20
I.10.3. Principe de la 5G	20
I.10.4. Objectif	21
I.10.5. Fonctionnement de la 5G	21
I.10.6. Avenir de la 5G et de la cybersécurité	22
I.11. Avantages et inconvénients de 5G	22
I.11.1. Avantages	22
I.11.2. Inconvénients	23
I.12. Conclusion	23

CHAPITRE II : RESEAUX D'ANTENNES ET DIVISEURS DE PUISSANCE

II.1. Introduction	25
II.2. Réseaux d'antennes	25
II.3. Types des réseaux d'antennes	26
II.3.1. Réseaux d'antennes rectilignes [II.3]	26
II.3.1.1. Réseaux d'antennes à 2 éléments	26

II.3.1.2. Réseaux d’antennes rectilignes uniformes à N éléments.....	26
II.3.2. Réseaux plans.....	27
II.3.3. Réseaux circulaires	27
II.4. Techniques d’alimentation d’un réseau d’antennes imprimées	28
II.4.1. Alimentation en parallèle.....	28
II.4.2. Alimentation en série	29
II.5. Domaines d’applications des réseaux d’antennes	29
II.6. Avantages et inconvénients des réseaux d’antennes	30
II.6.1. Avantages	30
II.6.2. Inconvénients	30
II.7.Diviseur de puissance.....	30
II.7.1.Définition d'un diviseur de puissance.....	31
II.7.2. Types de diviseur de puissance	31
II.7.3. Adaptation de la ligne d’alimentation d’un diviseur	33
II.7.4. Paramètres d’un diviseur de puissance	34
II.7.4.1. Pertes d'insertion.....	34
II.7.4.2. Isolation	34
II.7.4.3. Directivité	35
II.7.5. Avantages et inconvénients des différents types de diviseurs de puissance.....	35
II.7.5.1. Avantages	35
II.7.5.2. Inconvénients.....	35
II.8. Conclusion.....	35

CHAPITRE III: CONCEPTION ET SIMULATION D'UN RESEAUX D'ANTENNE POUR UNE APPLICATION 5G

III.1. Introduction.....	37
III.2. Outil de simulation	37
III.2.1. Définitions.....	37
III.2.2Principales caractéristiques de logiciel CST	38

III.2.3 Les avantages et les inconvénients de logiciel	38
III.2.4. Description des modules à réaliser	38
III.2.5. Caractéristiques du substrat	39
III.3. Conception de l'antenne patch pour la 5G (avec un substrat de type FR-4).....	39
III.3.1. Conception de l'antenne patch rectangulaire initial	39
III.3.2. Adaptation de l'antenne initiale	41
III.3.3. Etude paramétrique	42
III.3.3.1 Variation de dimensions des encoches et du patch.....	42
III.3.4. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne initiale	43
III.4. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédente	44
III.4.1. Etude paramétrique sur les dimensions de l'antenne patch.....	46
III.4.2. Résultats après l'étude paramétrique	47
III.5. Réseau d'antenne à deux éléments (à la base de l'antenne modifiée)	49
III.5.1. Etude paramétrique	51
III.5.1.1. Variation de la longueur L_f de la jonction T	51
III.5.1.2. Variation de la longueur L_{f1} de la jonction T	52
III.5.2. Résultats après l'étude paramétrique	52
III.6. Conception de l'antenne patch pour la 5G (avec substrat de type Rogers 5880)	54
III.6.1. Conception de l'antenne patch rectangulaire initial	54
III.6.2. Adaptation de l'antenne initiale	55
III.6.3. Etude paramétrique	56
III.6.3.1. Variation de dimensions du patch et des encoches	57
III.6.3.2. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne initiale	58
III.7. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédent....	60
III.7.1. Variation de la largeur W_1 des encoches	61
III.7.2. Variation de la longueur L du patch.....	62
III.7.3. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne proposée	62
III.8. Réseau d'antenne à deux éléments (à la base de l'antenne modifiée)	65

III.8.1. Variation de la longueur L2 de la jonction T.....	67
III.8.2. Variation de la longueur L3 de la jonction T.....	67
III.8.3. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antennes à 2 éléments	67
III.9. Comparaison des résultats obtenus	70
III.10. Réseau à quatre éléments 4x1 (à la base du réseau d'antennes à deux éléments de Rogers 5880)	70
III.10.1. Variation de la longueur L5 et L6 du diviseur de puissance	72
III.10.2. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antenne à quatre éléments	72
III.11. Réseau à huit éléments 8x1 (à la base du réseau d'antennes à quatre éléments).....	75
III.11.1. Variation de la longueur L8 et L9 du diviseur de puissance	76
III.11.2. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antenne à huit éléments	77
III.12. Comparaison des résultats obtenus.....	79
III.13. Conclusion	79
CONCLUSION GENERALE	81
REFERANCE.....	I
RESUME	IV

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Structure d'une antenne imprimée.	5
Figure I.2: Différentes formes d'antennes micro ruban (patch).	6
Figure I.3: Antenne patch micro-ruban circulaire.	6
Figure I.4: Antenne patch micro-ruban rectangulaire.	8
Figure I.5: Antenne en mode d'émission.	10
Figure I.6: Bande passante à partir du S11.	10
Figure I.7: Types de polarisation.	12
Figure I.8: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.	14
Figure I.9: Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban.	15
Figure I.10: Alimentation par câble coaxiale.	15
Figure I.11: Alimentation par fente.	16
Figure I.12: Alimentation par proximité.	16
Figure I.13: Antenne de la cinquième génération (5G).	18
Figure I.14: Techniques utilisées dans la technologie 5G.	20
Figure I.15: Objectif de la 5G.	21
Figure II.1: Réseau rectiligne à deux éléments.	26
Figure II.2: Réseau uniforme d'antennes.	27
Figure II.3: Structure d'un réseau plans d'antennes.	27
Figure II.4: Géométrie d'un réseau circulaire d'antennes à N éléments.	28
Figure II.5: Alimentation parallèle de 2^2 d'éléments rayonnants.	28
Figure II.6: Alimentation en série.	29
Figure II.7: Différents diviseurs de puissance en jonction T. (a) Guide d'onde T (plan E). (b) Guide d'onde T (plan H). (c) Géométrie à ligne micro ruban.	31
Figure II.8: Diviseur de puissance résistif à trois ports à répartition égale.	32
Figure II.9: Diviseur de Wilkinson à deux voies de puissances égales.	32
Figure II.10: Diviseur de puissance à N voies.	32
Figure II.11: Différentes formes de la jonction T.	33

Figure III.1 : Géométrie de l'antenne initiale.	40
Figure III.2: Coefficient de réflexion.	40
Figure III.3: Géométrie de l'antenne initiale avec encoches.	41
Figure III.4: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale avec encoches.	41
Figure III.5: (a) : Variation de la longueur L1 des encoches (b) : Variation de la largeur W1 des encoches, (c) : Variation de la largeur W de patch.	42
Figure III.6: (a):Coefficient de réflexion. (b): Rapport d'onde stationnaire.(c): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H). (d) : Diagramme de rayonnement en 3D.	44
Figure III.7: Géométrie de l'antenne patch modifiée.	45
Figure III.8: Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch modifiée.	45
Figure III.9: (a) : Variation de la longueur L1 des encoches. (b) : Variation de la largeur W1 des encoches. (c) : Variation de la largeur W de patch.	46
Figure III.10: (a) : Coefficient de réflexion, (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réel de l'impédance d'entrée. (d) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H). (e) : Diagramme de rayonnement en 3D.	48
Figure III.11: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments avec une substrat de type FR4.	49
Figure III.12: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments.	51
Figure III.13: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de la longueur Lf de la jonction T.	51
Figure III.14: Coefficient de réflexion avec différentes valeurs de la longueur Lf1 de la jonction T.	52
Figure III.15: (a) : Coefficient de réflexion. (b) : Rapport d'onde stationnaire. (c) : Partie réel de l'impédance d'entrée.(d) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H). (e) : Diagramme de rayonnement en 3D.	54
Figure III.16: Géométrie de l'antenne initiale.	55
Figure III.17: Coefficient de réflexion S11.	55
Figure III.18: Géométrie de l'antenne initiale avec des encoches.	56
Figure III.19: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale avec des encoches.	56
Figure III.20: (a) : Coefficient de réflexion après la variation de la longueur du patch « L ». (b) : Coefficient de réflexion après la variation de la largeur du patch « W ».	57
Figure III.21: (a): Variation de la longueur L1 des encoches. (b) : Variation de la largeur W1 des encoches.	58
Figure III.22: (a): Coefficient de réflexion. (b): Rapport d'onde stationnaire.(c): Gain maximal de l'antenne.	59

Figure III.23: (a): Diagramme de rayonnement en 2D de gain (Plan E et H), (b):Diagramme de rayonnement 3D.....	60
Figure III.24: Géométrie de l'antenne modifiée avec un substrat de type Rogers 5880	61
Figure III.25: Le Coefficient de réflexion.....	61
Figure III.26: Variation de la largeur W1 des encoches de l'antenne modifiée.....	61
Figure III.27: Variation de la longueur L du patch de l'antenne modifiée.....	62
Figure III.28: (a) : Coefficient de réflexion (b) : Rapport d'onde stationnaire.(c) : Gain maximal de l'antenne. (d) : Partie réel de l'impédance d'entrée.....	63
Figure III.29: (a): Diagramme de rayonnement en 2D (Plan E et H).(b):Diagramme de rayonnement 3D...	64
Figure III.30: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments.....	65
Figure III.31: Coefficient de réflexion du réseau d'antenne à 2 éléments.....	66
Figure III.32: Variation de la longueur L2 de la jonction T.....	67
Figure III.33: Variation de la longueur L3 de la jonction T.....	67
Figure III.34: (a): Coefficient de réflexion.(b): Rapport d'onde stationnaire.(c): Partie réel de l'impédance d'entrée.....	68
Figure III.35: (a) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan E).(b) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan H). c) : Diagramme de rayonnement 3D.....	69
Figure III.36: Géométrie du réseau d'antennes à quatre éléments.....	71
Figure III.37: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments.....	71
Figure III.38: (a) : Variation de la longueur L5 du diviseur de puissance. (b) : Variation de la longueur L6 du diviseur de puissance.....	72
Figure III.39: (a):Coefficient de réflexion.(b):Rapport d'onde stationnaire.(c) : Gain maximal de l'antenne.....	73
Figure III.40: (a) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan E). (b) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan H). (c) : Diagramme de rayonnement 3D.....	74
Figure III.41: Géométrie du réseau d'antennes à huit éléments	75
Figure III.42: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments.....	76
Figure III.43: (a) : Variation de la longueur L8 du diviseur de puissance. (b): Variation de la longueur L9 du diviseur de puissance.....	76
Figure III.44: (a):Coefficient de réflexion. (b):Rapport d'onde stationnaire. (c) : Gain maximal de l'antenne.....	78

Figure III.45: (a) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan E). (b) : Diagramme de rayonnement en 2D (plan H). (c) : Diagramme de rayonnement 3D..... **78**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Equations de l'antenne patch circulaire.	7
Tableau I.2: Equations de l'antenne patch rectangulaire.	9
Tableau I.3: Comparaison entre les réseaux mobiles.	19
Tableau III.1: Le cahier de charge	39
Tableau III.2: Les dimensions de l'antenne initiale de substrat FR-4.....	39
Tableau III.3: Les dimensions du diviseur de puissance en jonction T.	51
Tableau III.4: Les dimensions de l'antenne rectangulaire initial.....	54
Tableau III.5: Les dimensions de la jonction T.	66
Tableau III.6: Comparaison des résultats entre les deux substrats.	70
Tableau III.7: Comparaison entre les nouvelles structures proposées avec un substrat de type Rogers5880.....	80

LISTE DES ABREVIATIONS

NASA: National Aeronautics and Space Administration

UHF: Ultra High Frequencies

ROS : Rapport d'onde stationnaire

MMICS: Mobile Medical International Corporation

1G: première génération

2G: Deuxième génération

3G: Troisième génération

4G: Quatrième génération

5G: Cinquième génération

SMS: Short Message System

MMS: Multimedia Message Service

LTE: Long Term Evolution

GSM: Global System for Mobile Communication

DCS: Digital Cellular System

PCS: Personal Communications Service

GPS: Global Positioning System

RF: Radio Frequency

WPD: Wilkinson Power Divider

GPD: Gysel Power Divider

BDP: Bagley Power Divider

HD: Haute Definition

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

CST (MWS): Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO

Introduction Générale

Introduction générale

La nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G) est une technologie évolutive qui prend en charge de nouvelles fonctionnalités et vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fils. Face à ces objectives, la cinquième génération devra combiner plusieurs technologies afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire les différentes exigences. Parmi ces technologies nous pouvons citer : l'utilisation des bandes millimétriques en exploitant les fréquences au-dessus de 6 GHz qui deviennent plus indispensable pour la 5G et facilitera l'intégration de centaines d'éléments rayonnants au niveau de la station de base en profitant de leurs faibles longueurs d'ondes.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans ce contexte. Notre objectif consiste à concevoir et simuler des réseaux d'antennes proposés qui fonctionnent dans la bande de fréquences millimétriques des 28 GHz dans le pour but d'augmenter le gain et qui trouvent leurs applications dans les réseaux mobiles de la 5G en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Le premier chapitre expose, en premier lieu, les antennes patchs en donnant un bref historique et les principales caractéristiques de ces antennes. Par la suite, les techniques d'alimentation, les domaines d'applications des antennes patchs et leurs avantages et inconvénients seront présentés. A la fin, nous allons terminer le premier chapitre par les aspects généraux de la technologie de communication 5G de la téléphonie mobile.

Le deuxième chapitre a pour but d'introduire les généralités sur les réseaux d'antennes en précisant leurs techniques d'alimentations, leurs domaines d'applications ainsi que les principales caractéristiques des diviseurs de puissance.

Le troisième chapitre expose l'objectif de ce travail, nous commencerons dans un premier temps par une simple description sur le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology), Ensuite, nous présenterons la conception de deux antennes patchs proposées de forme rectangulaire avec deux types de substrats différents. De même, une comparaison entre deux réseaux d'antennes à deux éléments rayonnants à base des antennes patchs proposées sera faite afin d'évaluer les performances de la meilleure structure. Enfin, d'autres réseaux d'antennes à quatre et à huit éléments rayonnants sont

conçus dans le but d'augmenter le gain en débutant par l'étude de la distance inter-éléments rayonnants avant la mise en réseau planaire.

A la fin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives qui seront aussi données pour une éventuelle poursuite de ce travail.

Chapitre I
Généralité sur les antennes imprimées

I.1. Introduction

La communication sans fil de tous types a connu un grand essor durant cette dernière décennie. C'est le besoin de communiquer sur des distances de plus en plus importantes, avec une grande capacité de transfert des informations, qui a donné naissance aux nouvelles techniques de télécommunications. Les systèmes de communications sans fils exigent inévitablement de débit très élevé, afin de répondre à l'augmentation exponentielle des quantités de données, notamment pour la vidéo à transmettre que ce soit pour les réseaux fixes ou mobiles.

Le développement du domaine des télécommunications ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants faisant appel à une technologie simple à manipuler. Les systèmes microondes à structure micro-ruban ont été à l'origine de développement des antennes imprimées.

Les antennes imprimées sont les plus utilisées puisqu'elles permettent de répondre à de nombreuses contraintes imposées par le système de transmission. Leurs dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (téléphone portable, avion ...).

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude des antennes imprimées et précisément leurs mécanismes de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients ainsi que les principales caractéristiques. A la fin, nous montrons brièvement l'invention de la cinquième génération, son objectif et son principe de fonctionnement, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

I.2. Historique

Le concept d'antenne imprimée fut pour la première fois imaginé en 1953 par « Georges Deschamps ». Alors que le premier brevet reprenant ce concept fut déposé en 1956 par « Henri Gutton » et « Georges Boissinot. ». Il fallut cependant attendre les années 1970 pour voir apparaître la réalisation des premiers prototypes, notamment grâce à l'amélioration des techniques de photo lithogravure du cuivre et de l'or sur substrat diélectrique, ainsi que des progrès dans la modélisation. [I.1]

En 1972, « John Howell » a réalisé des antennes imprimées à polarisations linéaire et circulaire en bandes *L* et *UHF* pour la *NASA*. À la même période, « Robert Munson » de « Ball Aerospace Systems » conçu une antenne imprimée conformée sur toute la circonférence d'un missile [I.1].

Il n'y a pas, pour le moment, de terme français établi par l'usage pour désigner l'antenne élémentaire dont le nom anglais est « patch » (« pavé » ou « pastille », en français). On utilise le

plus souvent « antenne imprimée » ou « antenne micro ruban » car les premières antennes imprimées rectangulaires étaient constituées par une partie de « ligne micro ruban » rayonnante [I.2].

I.3. Description d'une antenne patch

Une antenne imprimée (appelée micro-ruban ou microstrip) se compose d'une pièce métallique rayonnante (patch) sur un côté du substrat diélectrique, et un plan de masse de l'autre côté comme représentée sur la Figure (I.1).

Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or (à cause de leurs conductivités élevées) et il peut prendre n'importe quelle forme possible, mais on se donne des formes régulières (carré, circulaire) dans le but de simplifier l'analyse de la structure. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photogravés sur le substrat diélectrique [I.3].

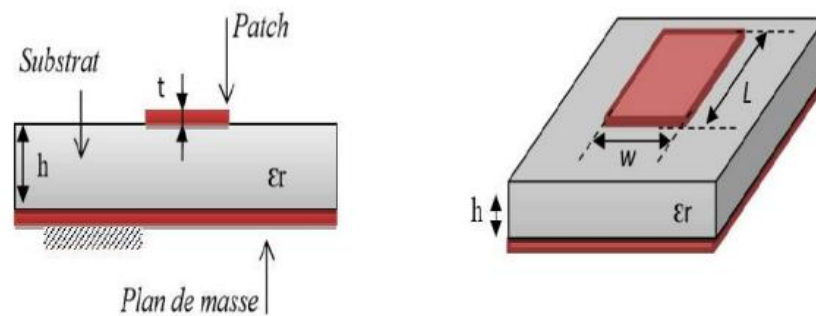


Figure I.1 : Structure d'une antenne imprimée.

Avec :

W = Largeur de l'élément rayonnant.

L = Longueur de l'élément rayonnant.

H = Epaisseur du substrat.

I.4. Différentes formes des antennes patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant. La figure suivante montre ces différentes formes [I.4].

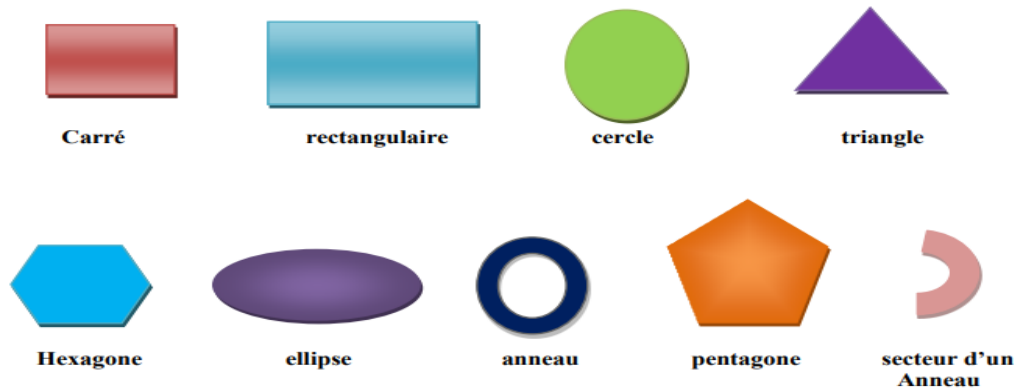


Figure I.2 : Différentes formes d'antennes micro ruban (patch).

I.4.1. Antenne patch circulaire

Dans la figure I.3, on représente une antenne patch micro-ruban circulaire.

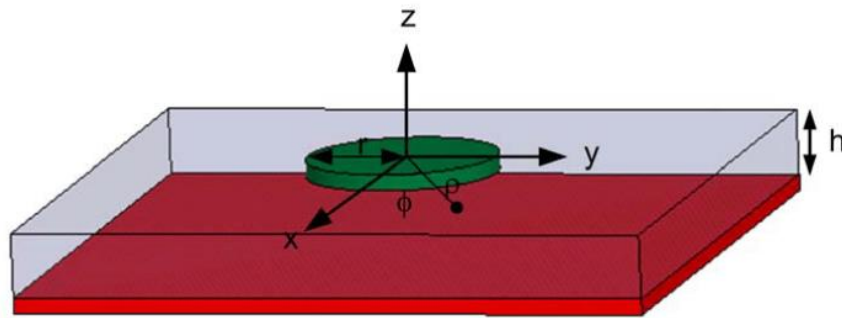


Figure I.3: Antenne patch micro-ruban circulaire.

La fréquence de résonance de l'antenne patch circulaire qui est en fonction de l'épaisseur de substrat h , du rayon a et de la permittivité relative ϵ_r , en son mode dominant TM_{010} est donnée par la formule suivante :

$$f_{r)110} = \frac{1,2412 c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.1})$$

Où $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ est la vitesse de la lumière dans l'espace libre, et a_e est le rayon effectif de l'antenne.

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{I.2})$$

Sur le tableau I.1, on donne les équations de l'antenne patch circulaire.

Paramètres d'antenne patch circulaire		Equations
Le rayon réel		$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726\right]}\right\}^{1/2}}$ $F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$
Fréquence de résonance		$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
Constant diélectrique (ϵ_{eff})		$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w}\right]^{-\frac{1}{2}}$
La longueur		$L = L_{eff} - 2\Delta L$
L'extension de la longueur (ΔL)		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8\right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_{gs} = L_{1s} + 2a + 6 \times h$
	La largeur	$w_{gs} = 2a + 6 \times h$
La longueur de la ligne d'alimentation	simple	$L_{1s} = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	quart d'onde	$L_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
L'impédance caractéristique de la ligne micro-ruban		

Tableau I.1 : Equations de l'antenne patch circulaire.

Avec :

W : Largeur de la ligne micro-ruban.

ϵ_r : Permittivité relative.

h : Epaisseur du substrat diélectrique.

ϵ_{eff} : Permittivité effective.

I.4.2. Antenne patch rectangulaire

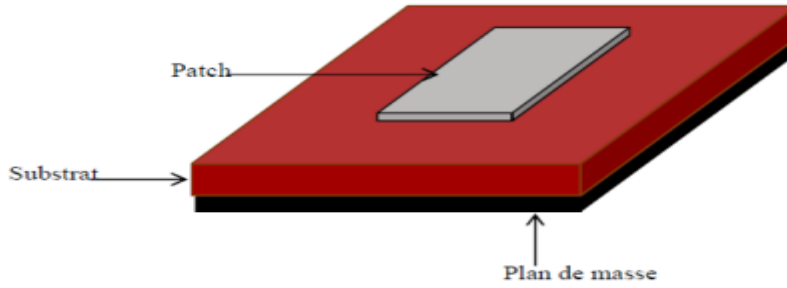


Figure I.4: Antenne patch micro-ruban rectangulaire.

Une antenne imprimée rectangulaire ou antenne patch rectangulaire (Figure I.4) est largement utilisée dans les différentes applications de télécommunications. Sa fréquence de résonance est en fonction de la permittivité effective et la longueur effective du patch, son mode TM_{010} est donnée

$$\text{par : } f_r = \frac{c}{2L_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (\text{I.3})$$

Sur le tableau (I.2), on donne les équations de l'antenne patch rectangulaire [I.5].

Paramètres de l'antenne patch rectangulaire		Equations
La largeur		$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Fréquence de résonance		$f_r = \frac{c}{2L_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$
Constant diélectrique (ϵ_{eff})		Pour $w/h > 1$: $\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
La longueur		$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L$
L'extension de la longueur (ΔL)		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_g = L_a + L + 6 \times h$
	La largeur	$w_g = w + 6 \times h$

La longueur de la ligne d'alimentation	Simple	$L_a = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	quart d'onde	$L_a = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
L'impédance caractéristique de la ligne micro-ruban		

Tableau I.2 : Equations de l'antenne patch rectangulaire.

Avec :

L_{eff} : Longueur effective du patch.

L : Longueur du patch.

ϵ_{reff} : Permittivité effective.

ϵ_r : Permittivité relative.

h : Epaisseur du substrat.

w : Largeur du patch, pour une bon efficacité de rayonnement. Elle joue un rôle sur l'impédance d'entrée de l'antenne et la bande passante.

I.5. Caractéristiques des antennes patches

I.5.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes [I.6].

Les bornes d'entrées de l'antenne sont entre les points (a et b), comme le montre la figure (I.5) suivante:

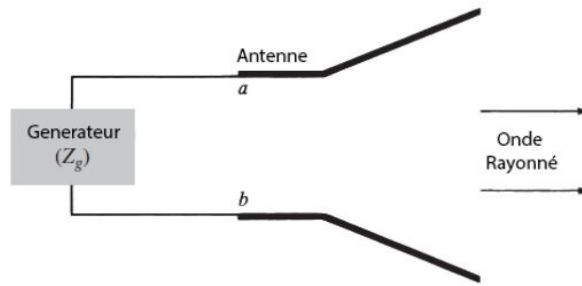


Figure I.5: Antenne en mode d'émission.

L'impédance d'entrée Z_e est donnée comme suit :

$$Z_e = R_e + jX_e \text{ (I.4)}$$

Où :

R_e : Partie réelle qui représente la résistance d'entrée de l'antenne aux bornes a et b.

X_e : Partie imaginaire qui représente la réactance d'entrée de l'antenne aux bornes a et b.

Généralement l'impédance d'entrée de l'antenne est de 50Ω (partie imaginaire est nulle) pour obtenir un rendement optimal.

I.5.2. Bande passante

La bande passante d'une antenne est définie comme étant la gamme de fréquences dans laquelle les performances de l'antenne, en ce qui concerne certaines caractéristiques, sont conformes à une norme spécifiée [I.7].

La largeur de bande d'une antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 et un coefficient de réflexion qui est inférieur à (-10dB).

$$|BP| = f_2 - f_1 \text{ (I.5)}$$

Le coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne est représenté dans la figure suivante en fonction de la fréquence :

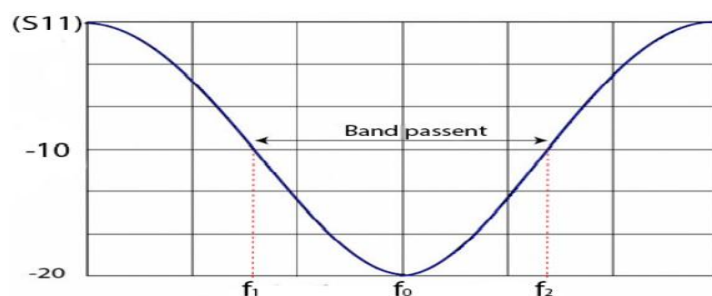


Figure I.6 : Bande passante à partir du S_{11} .

I.5.3. Coefficient de réflexion S11

Le coefficient de réflexion S11 exprime le transfert d'énergie par cette antenne et à l'entrée de l'antenne. Le S11 varie en fonction de la fréquence comme le montre la figure I.6.

Le coefficient de réflexion en tension |S11| est donné par la formule (I.6) ci-dessous et exprimé en décibels.

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (\text{I.6})$$

C'est le rapport de la tension réfléchie sur la tension transmise, sa valeur varie entre 0 (aucune réflexion) à 1 (réflexion totale) [I.8].

La mesure du coefficient de réflexion sert à déduire l'impédance d'entrée Ze.

$$Z_e = Z_c * \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (\text{I.7})$$

I.5.4. Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le rapport d'onde stationnaire R.O.S quantifie le niveau d'adaptation (ou plus exactement de désadaptation). Ce rapport tend vers 1 lorsque la chaîne est parfaitement adaptée, à l'infini lorsque la chaîne est totalement désadaptée.

Afin d'assurer une meilleure transmission d'énergie, plusieurs techniques d'adaptation se présentent telles que l'adaptation simple stub, double stub et quart d'onde [I.9]. Il est donné par la relation suivante :

$$ROS = \frac{(+V)+(-V)}{(+V)-(-V)} \quad (\text{I.8})$$

Il peut s'exprimer en fonction du coefficient de réflexion comme ce suit :

$$ROS = \frac{1+r/}{1-r/} \quad (\text{I.9})$$

I.5.5. Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, φ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [I.10].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{p} \quad (\text{I.10})$$

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure, ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope.

I.5.6. Gain

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée.

Le gain d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation [I.10]. Il est exprimé par :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_o(\theta, \varphi)} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{pa} \tag{I.11}$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi) \tag{I.12}$$

I.5.7. Rendement

Le rendement est donné par la relation entre le gain et la directivité d'une antenne par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \tag{I.13}$$

I.5.8. Polarisation

La polarisation d'une antenne est la caractéristique d'une antenne traduisant son adaptation à l'orientation du champ électrique de l'onde reçue [I.11]. Les différents types de polarisation d'antenne sont représentés dans la Figure I.7 suivante :

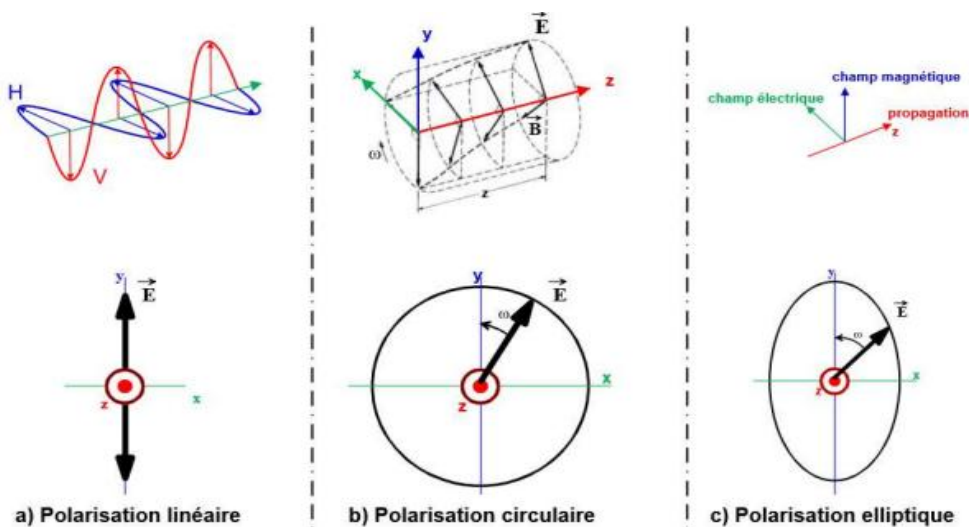


Figure I.7 : Types de polarisation.

I.5.8.1. Polarisation linéaire

Une onde est polarisée linéairement, si son champ électrique garde la même direction au cours du temps par rapport à un observateur fixe. Cette polarisation peut être horizontale (pour les communications terrestres de longues distances en raison des réflexions au sol) et aussi verticale (pour les communications en ville car elle augmente les réflexions multiples sur les parois) [I.12].

Le champ électrique s'écrit alors :

$$E_x = E_{x_0} \cos(kz - \omega t) \quad (\text{I.14})$$

$$E_y = E_{y_0} \cos(kz - \omega t) \quad \text{Avec : } \frac{E_x}{E_y} = cst \quad \text{et } \varphi = 0.$$

I.5.8.2. Polarisation elliptique

Une onde est dite polarisée elliptiquement, si son champ électrique E décrit une ellipse dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Dans le cas général, lorsque les composantes du champ électrique varient sans relations particulières entre eux [I.12].

I.5.8.3. Polarisation circulaire

La polarisation circulaire d'un rayonnement électromagnétique est une polarisation où la norme du vecteur du champ électrique ne change pas alors que son orientation change selon un mouvement de rotation.

I.5.9. Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de «diagramme de rayonnement». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné.

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : **le plan E** (plan vertical) et **le plan H** (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales [I.13]. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées ce sont les lobes de rayonnement.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la Figure I.8.

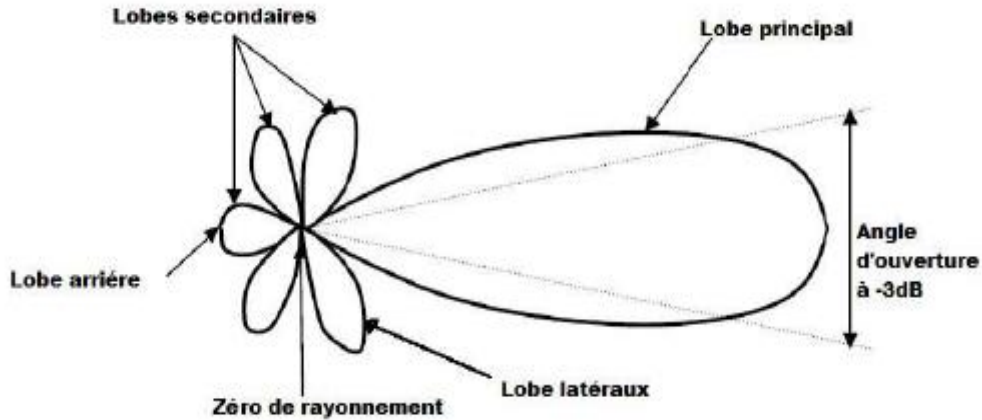


Figure I.8: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

- **Un lobe principal** : C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Un angle d'ouverture** : C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- **Des lobes secondaires** : Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- **Un lobe arrière** : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à 180° du lobe principal.

I.6. Techniques d'alimentation

Les antennes patch peuvent être alimentées par une diversité de techniques qui peuvent être classifiées en deux catégories : avec contact et sans contact. Dans les méthodes avec contact, la plaque rayonnante est directement alimentée en utilisant un élément de connexion comme une ligne microstrip et dans les méthodes sans contact le transfert de la puissance entre la ligne microstrip et le patch rayonnant est assuré par le couplage de champ électromagnétique [I.14].

Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microbande, la sonde coaxiale (techniques avec contact), le couplage par fente (ou ouverture) et le couplage par proximité (techniques sans contact).

I.6.1. Alimentation par ligne micro-ruban

Avec une ligne micro-ruban l'alimentation peut se faire par connexion directe où le point de jonction se trouve sur l'axe de symétrie de l'élément selon la figure I.9, ou décalé par rapport à cet axe de symétrie (car cela permet une bonne adaptation d'impédance).

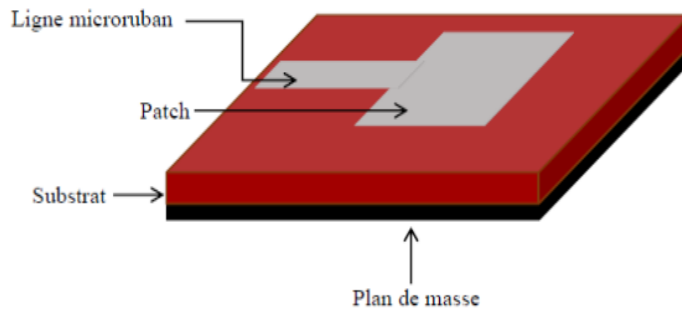


Figure I.9 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban

I.6.2. Alimentation par sonde (câble coaxiale)

C'est une technique très employée pour l'alimentation des antennes. Le conducteur extérieur du connecteur coaxial est relié au plan de masse et le conducteur intérieur est soudé avec le patch et il étend via le diélectrique comme le montre la figure I.10:

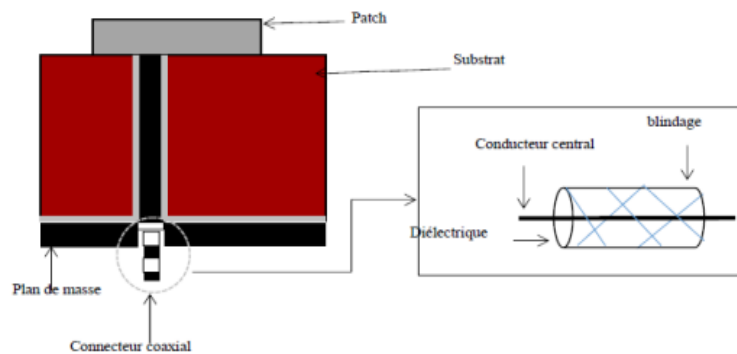


Figure I.10 : Alimentation par câble coaxiale.

I.6.3. Alimentation par ouverture (fente)

Dans cette alimentation, le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente dans le plan de masse. Ainsi que l'élément rayonnant (patch) et la ligne microbande sont séparés par le plan de masse, comme représentés dans la figure I.11.

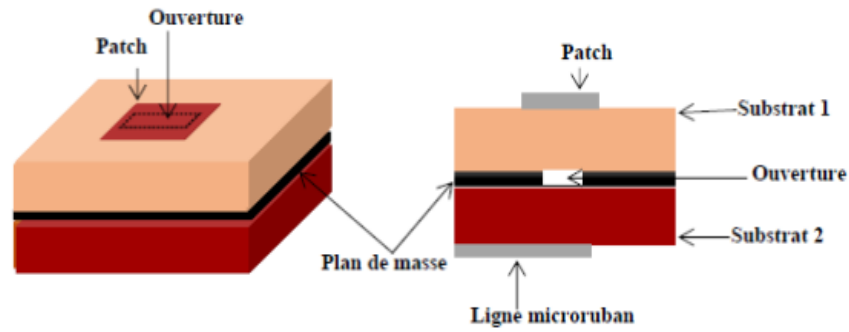


Figure I.11 : Alimentation par fente.

I.6.4. Alimentation par proximité

Ce mode d'alimentation est reconnu aussi par le nom « couplage électromagnétique ».

Cette technique emploie deux substrats diélectriques et une ligne d'alimentation qui est située entre les deux substrats, montrée dans la figure I.12. Le plan de masse est placé en bas du substrat [I.15].

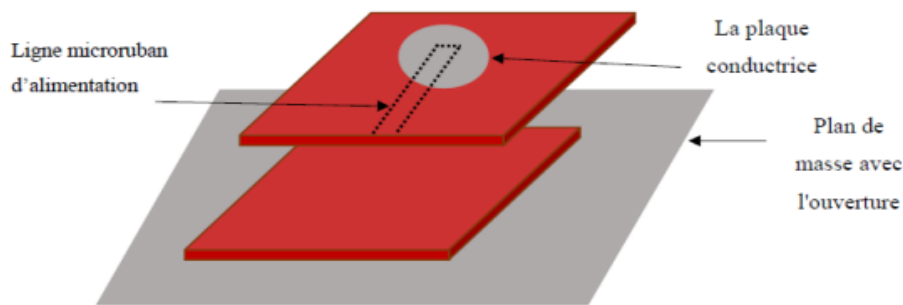


Figure I.12 : Alimentation par proximité.

I.7. Technique d'adaptation

I.7.1. Adaptation par encoche

L'adaptation par encoche consiste à réaliser une encoche dans le patch et insérer la ligne d'alimentation d'une impédance caractéristique de 50 Ohms à une profondeur ou l'impédance de l'antenne est égale à 50 ohms. Les dimensions des encoches sont données par la relation suivante [I.16].

$$Y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos \left(\frac{R_{\text{désiré}}}{R_{\text{in}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.15})$$

Où:

$R_{\text{désiré}}$: Résistance d'entrée désirée (50 Ω dans notre cas).

$$R_{\text{in}}: \text{Résistance d'entrée au bord du patch } (\Omega), \text{ elle est donnée par : } R_{\text{in}} = \frac{1}{2G} \quad (\text{I.16})$$

Où G représente la conductance d'une des fentes rayonnantes (en Siemens), elle s'écrit en fonction de nombre d'onde k , la largeur de patch W et l'épaisseur du substrat h comme suit :

$$G = \frac{w}{120 \lambda^0} \left[1 - \frac{(k h)^2}{24} \right] \quad (\text{I.17})$$

I.7.2. Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est-à-dire se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue à la fin de circuit [I.17].

I.8. Domaines d'applications

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont :

- La téléphonie mobile,
- Les radars,
- Les télécommunications spatiales,
- La télémétrie des missiles et la télésurveillance,
- Guidage des missiles et télédétection.

I.9. Avantages et inconvénients des antennes micro-rubans

L'antenne micro-ruban présente de nombreux avantages par rapport aux antennes microondes classiques, on peut citer entre autres :

- Faible poids, encombrement réduit, faible profile et structure plane.
- S'adapte facilement aux surfaces planes et non planes.
- Facile à fabriquer en masse en utilisant les techniques des circuits imprimés dont le faible coût.
- Facile à intégrer avec les circuits MMICS sur un même substrat.
- Polarisation linéaire et circulaire possibles.
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Antenne multi-bandes et multi polarisations possibles.

Toutefois, elle présente certains inconvénients limitant son efficacité à savoir :

- Faible gain.
- Supporte uniquement des faibles puissances.
- Faible efficacité de rayonnement.
- Faible pureté de polarisation.

Pour y remédier à ces inconvénients plusieurs travaux de recherches ont été mené pour aboutir à des progrès considérables améliorant les performances de ces antennes.

I.10. Cinquième génération 5G

La 5G est une nouvelle génération de la téléphonie mobile. Cette technologie réduira la distance entre les personnes et permettra de généraliser des applications futuristes (voitures autonomes, usines automatisées, robots intelligents.etc...).

La 5G a recours à des ondes millimétriques, à savoir un réseau très cher, constitué d'un très grand nombre d'antennes très haut débit mais à faible portée [I.18].

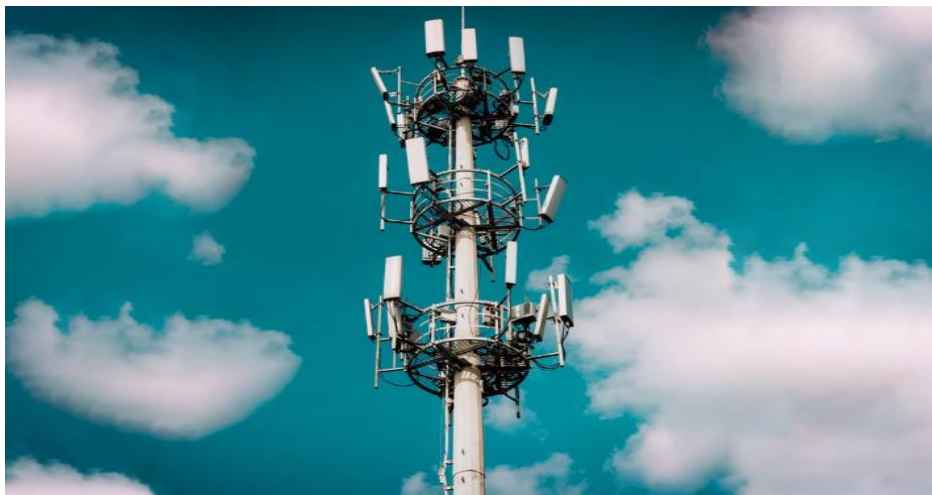


Figure I.13 : Antenne de la cinquième génération (5G).

I.10.1. Historique

Parmi ces informations, notre intérêt a été piqué par un petit historique rappelant le chemin parcouru les prédécesseurs de la 5G dans le domaine de la communication mobile sans-fil [I.19]:

- **1982** aux années **1990** (1G analogique) :La 1G n'est compatible qu'avec les appels vocaux avec une bande passante de 1,9 kbps

- Années **1990** (2G numérique (internet arrive en **1991**)) : La 2G permet d'envoyer des textes, des images et messages multimédia (SMS, MMS), ainsi que le débit évolue de 14,4 kbps à 384 kbps.
- Années **2000** (3G, l'ère du smartphone) : Les réseaux 3G permettent de transférer des vidéos de haute qualité, et de communiquer à l'international avec 2Mbps.
- **2010** (4G, l'ère du streaming) :4G et LTE sont compatibles avec le streaming vidéo HD et le débit évolue de 2 Mbps à 1 Gbps.
- **2019** et au-delà... (5G) :La 5G arrive d'abord en Corée, puis en Chine. Les USA, le Royaume-Uni et l'Allemagne viennent ensuite, suivis par le reste du monde avec un débit qui évolue de 1Gbps à 10 Gbps [I.17].

<i>Génération</i>	<i>1G</i>	<i>2G</i>	<i>3G</i>	<i>4G</i>	<i>5G</i>
<i>Année de Déploiement</i>	1981	1992	2000	2010	2020
<i>Débit indicatif (download) en bit /s</i>	Analogique	GSM : 9.05kbit/s	UMTS : 144kbit/s (Rural)	LTE : 150Mbit/s	10Gbit
<i>Fréquence</i>	900 Mhz	Etats-Unis (bande de fréquence 850Mhz et 1900Mhz) Europe (bandes de fréquence 900Mhz et 1800 Mhz)	Les bandes de fréquences 900Mhz et 2100Mhz	700Mhz 800Mhz 1.8Ghz 2.1Ghz 2.6Ghz	28Ghz 37Ghz 39Ghz 64Ghz_71Ghz
<i>Description Fonctionnelle générale</i>	Téléphones cellulaires analogique	Téléphones cellulaires numériques (GSM/CDMA)	Première bande passante mobile utilisant des protocoles IP(WCDMA 2000)	Le haut débit mobile sur un standard unifié (LTE)	Internet tactile -Améliorer le réseau de communication M2M

Tableau I.3 : Comparaison entre les réseaux mobiles.

I.10.2. Définition de la 5G

La 5G est la cinquième génération. Elle a une multitude de fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre plusieurs problèmes de notre vie quotidienne moderne. La 5G ne s'intéresse pas seulement aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives de la future. Elle permet la coexistence d'applications et d'utilisations très diverses, unifiés dans une même technologie pour faciliter l'arrivée à une société complètement connectée [I.20].

La 5G ouvre de nouvelles perspectives pour augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Selon certaines estimations, la transmission des données sur les connexions hautes débits de cette technologie peut atteindre une vitesse de 20 Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires.

I.10.3. Principe de la 5G



Figure I.14 : Techniques utilisées dans la technologie 5G.

La 5G utilise des fréquences de diffusion ultra-hautes (UHF entre 6-300 GHz) avec des techniques très avancées pour transférer rapidement d'énormes quantités de données (Figure I.14).

- **Les ondes millimétriques** : sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz.
- **Les micros-celles** : le micro-celle est un dispositif qui offre l'augmentation de l'efficacité spectrale de la zone d'une part et d'autre part la réduction de la taille de la cellule où le nombre réduit d'utilisateurs par cellule peut augmenter la capacité du réseau.
- **MIMO Massif** : Ce concept il fait référencer au grand nombre d'antennes utilisées dans un réseau MIMO.
- **Beamforming** : pour adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un certain modèle.

- **Full-Duplex** : caractérise une connexion série où réseau qui permet la réception et l'émission de données simultanément.

I.10.4. Objectif

La 5G est la technologie qui permet les connexions et les téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, la future de la technologie 5G n'y fera pas exception en se concentrant sur l'internet des objets. La 5G vise à [I.21] :

- L'amélioration de la vitesse de transmission des données.
- Un temps de latence plus court donne l'impression que le réseau est très réactif (1 milliseconde de latence).
- 100% de couverture.
- 90% de réduction en utilisation énergie du réseau.
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie.
- 1000 fois plus de bande passante par unité de la surface.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface.
- La vitesse de transmission des données est double par rapport à 4G.



Figure I.15 : Objectif de la 5G.

I.10.5. Fonctionnement de la 5G

La 5G est déployée sur les bandes actuelles de la 4G mais aussi sur de nouvelles bandes. Deux groupes peuvent être définis. D'un côté, nous avons les bandes sub-6 (fréquence inférieure à 6 GHz) et de l'autre, les bandes mmWave (ondes millimétriques avec une fréquence supérieure à 24 GHz).

Pour faire simple, les premières ont une plus grande portée mais un plus faible débit à l'inverse des secondes. Étant donné les problèmes de portée et d'interférence, les opérateurs utilisent les bandes basses fréquences sub-6 pour aider à transporter la 5G sur de plus grandes distances et à travers les murs, ainsi que d'autres obstacles.

I.10.6. Avenir de la 5G et de la cyber sécurité [I.22]

Le cyber sécurité de la 5 G a besoin de quelques améliorations significatives pour éviter les risques de piratage toujours plus importants. Une meilleur cyber sécurité est essentielle pour notre avenir dans le cadre de la 5G, pour cela les concepteurs de technologies devront être particulièrement attentifs à la sécurité de la 5G.

- Les fondations de la sécurité de la 5G sont d'abord nécessaires au niveau des réseaux donc les fournisseurs de réseaux vont commencer à se concentrer sur les protections logicielles pour couvrir les risques liés à la 5G.
- Pour intensifier les efforts des fournisseurs de réseaux en matière de sécurité, les fabricants doivent y être incités. -à- dles coûts liés au développement et à la mise en œuvre de technologies sécurisées n'incitent pas tous les fabricants à se concentrer sur la cyber sécurité seulement s'ils retirent des avantages qui compensent leurs pertes pour renforcer la protection des consommateurs.
- Les consommateurs n'ont aucun moyen de déterminer facilement le degré de sécurité des appareils connectés, En outre, ils convient d'enseigner aux utilisateurs l'importance de sécuriser tous les appareils connectés à Internet au moyen de mises à jour logicielles qui sont déployés pour renforcer la protection des appareils.

I.11. Avantages et inconvénients de 5G

I.11.1. Avantages [I.23]

- Vitesse de connexion rapide : La 5G devrait permettre d'obtenir des vitesses de connexion plus rapide qu'en 4G. Ainsi, le débit pourrait théoriquement atteindre les 1 Gb/s en réception et 500 Mb/s en émission.
- Temps de latence réduite : Une autre promesse de la 5G est la réduction du temps de latence, il devrait passer de 10 ms en 4G à 1ms en 5G. Cette amélioration de la réactivité offre de nouvelle prescriptive aux utilisateurs.

- Les vidéos streaming pourront être vus avec une meilleure qualité (4K et 8K notamment). Aussi la réduction du temps de latence favorisera l'usage de la réalité augmentée et l'apparition de nouveaux types d'objets connectés.
- Appareils connectés : un autre gros avantage de la 5G est le support d'une plus grande densité d'appareils connectés c.-à-d. l'ultra connectivité de la 5G pourraient prendre en charge au minimum un mille d'appareils connectés par mètre carré.

I.11.2. Inconvénients [I.24]

- La 5G sera beaucoup plus chère à déployer que les précédentes technologies mobiles, car elle est plus complexe et nécessite une couverture plus dense des stations de base pour fournir la capacité attendue.
- La couverture de toutes les zones urbaines et des principaux réseaux routiers avec une communication sans fil ininterrompue de cinquième génération ne pourra être possible qu'en créant un réseau très dense d'antennes et d'émetteurs. Cela peut causer un danger sur notre santé car les fréquences plus élevées et les milliards de connexions supplémentaires auront des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement.
- La Commission européenne n'a pas encore réalisé d'étude sur les risques potentiels pour la santé de la technologie 5G mais les fabricants et les organismes de normalisation doivent intégrer les spécifications aux normes de la future 5G.

I.12. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale, la description sur l'antenne imprimée avec une bref historique, les différentes formes des antennes patchs et leurs caractéristiques principales.

La deuxième partie du chapitre a été consacrée aux polarisations des antennes imprimées, les différentes techniques d'alimentation ainsi que les domaines d'application de ces types d'antennes et leurs avantages et inconvénients.

A la fin, nous avons terminé notre chapitre par la technologie de la cinquième génération, son objectif et son principe de fonctionnement ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré aux réseaux d'antennes imprimées et les diviseurs de puissance.

Chapitre II
Réseaux d'antennes et diviseurs de
puissances

II.1. Introduction

Les réseaux d'antennes sont utilisés comme méthode d'envoi d'informations sur de plus longues distances sans avoir besoin d'utiliser plus de puissance. Ils sont des systèmes qui utilisent le traitement du signal et le balayage du signal pour transmettre des informations.

Ainsi, ils sont capables d'envoyer des données efficacement avec une puissance minimale requise. Ils peuvent être utilisés dans les secteurs de la radiodiffusion tels que les télécommunications et le secteur des ingénieurs pour la télévision, la radio ou l'accès à Internet.

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre est consacrée en général sur les réseaux d'antennes, leurs types et les techniques d'alimentation ainsi leurs avantages et inconvénients.

Dans cette même partie, nous présentons des généralités sur les diviseurs de puissance et les différentes formes en jonction T utilisés pour alimenter les réseaux d'antennes.

II.2. Réseaux d'antennes

Un réseau d'antennes est 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 [II.1].

Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunications récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [II.2].

Le réseau d'antenne contient plusieurs conditions comme :

- L'espacement entre les éléments du réseau est assez petit qu'il n'y a aucune variation d'amplitude entre les signaux reçus aux différents éléments.
- Il n'y a aucun couplage manuel entre les éléments.
- Tous les champs d'incidences peuvent être décomposés en nombre discret d'ondes planes. C'est-à-dire, il y a un nombre fini de signaux.
- La largeur de bande du signal incident sur le réseau est petite par rapport à la fréquence porteuse.

II.3. Types des réseaux d'antennes

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau rectiligne (ou linéaire), réseau circulaire, et réseaux plans.

II.3.1. Réseaux d'antennes rectilignes [II.3]

Un réseau rectiligne ou linéaire est un ensemble des antennes identiques, régulièrement espacées et alimentées par des courants dont les amplitudes sont toutes identiques, et de phase nulle ou linéairement décalée.

II.3.1.1. Réseaux d'antennes à 2 éléments

Les 2 éléments sont séparés par une distance et alimentés par des courants de mêmes intensités mais déphasés l'un par rapport à l'autre comme le montre la figure suivante :

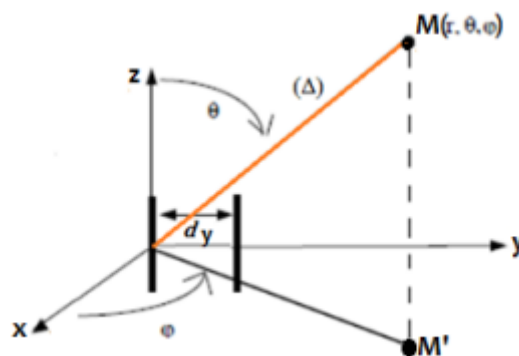


Figure II.1 : Réseau rectiligne à deux éléments.

II.3.1.2. Réseaux d'antennes rectilignes uniformes à N éléments

La structure d'un réseau rectiligne (ou linéaire) uniforme est considérée comme la structure la plus simple. Ce réseau comporte un certain nombre d'éléments rayonnants, On considère le réseau d'antennes de la figure II.2. Il contient N éléments verticaux parallèlement les uns aux autres et espacés de d_y .

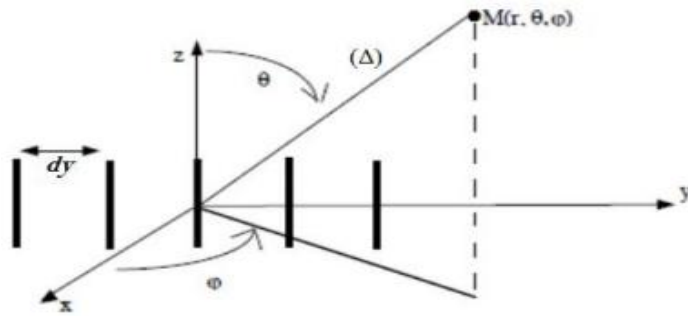


Figure II.2 : Réseau uniforme d'antennes.

II.3.2. Réseaux plans

Dans ce type de réseau d'antennes, les sources ont été disposées dans une configuration géométrique bidimensionnelle. La Figure II.3 illustre l'architecture d'un réseau plan composé de $N \times M$ éléments rayonnants dont les M éléments forment un réseau linéaire uniforme dans l'axe x et les N autres éléments rayonnants dans l'axe y [II.4].

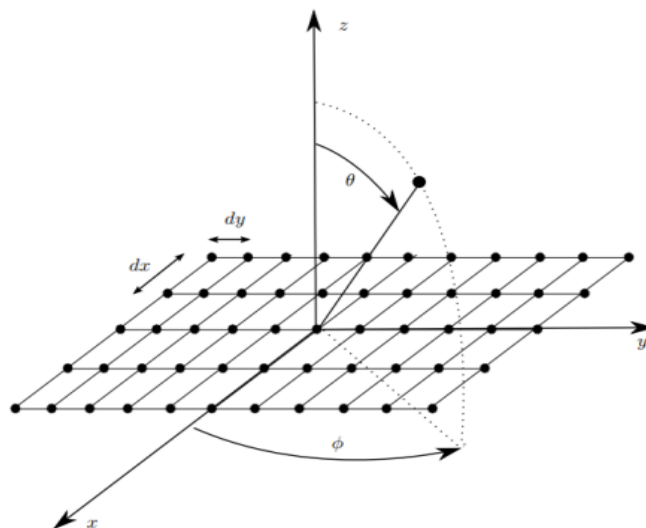


Figure II.3 : Structure d'un réseau plans d'antennes.

II.3.3. Réseaux circulaires

Pour ce type de réseaux d'antennes, les éléments élémentaires sont placés autour d'un cercle de rayon a . La Figure II.4 présente la géométrie d'un réseau d'antennes circulaire [II.5].

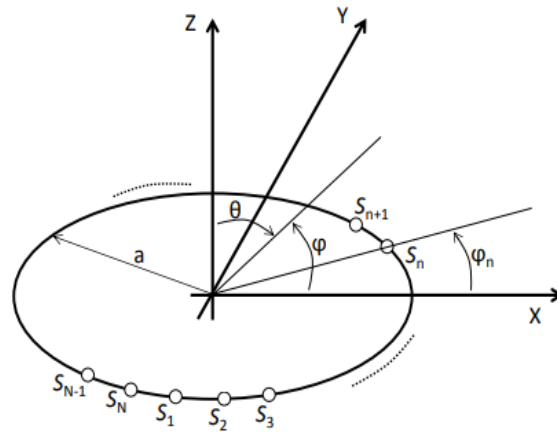


Figure II.4 : Géométrie d'un réseau circulaire d'antennes à N éléments.

II.4. Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées

La synthèse d'un réseau consiste à trouver les bons coefficients de pondération en amplitude et en phase qui permettent d'approcher au mieux le besoin. Pour cela, l'alimentation d'un réseau d'antennes s'effectue à travers un réseau d'alimentation qui assure la répartition d'énergie sur différentes antennes élémentaires. Nous montrons sur la Figure II.5 et la Figure II.6 deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes :

II.4.1. Alimentation en parallèle

Pour l'alimentation en parallèle, 2^n éléments rayonnants sont alimentés en parallèle par n étages de 2^{m-1} diviseurs de puissance à chaque étage [II.6]. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément.

Le principal inconvénient de l'alimentation parallèle c'est qu'elle souffre de plusieurs pertes ohmiques vu que les structures utilisées pour l'alimentation en parallèle occupent plus d'espace.

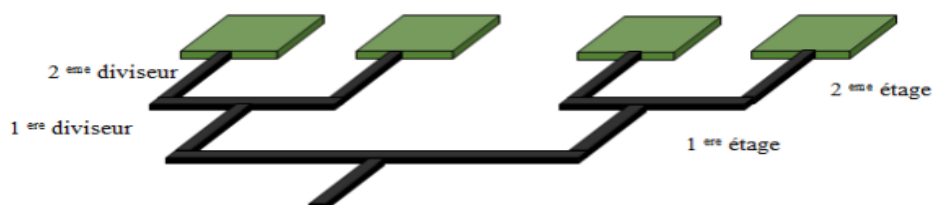


Figure II.5 : Alimentation parallèle de 2^2 d'éléments rayonnants.

II.4.2. Alimentation en série

Dans une alimentation en série, les éléments rayonnants sont reliés en chaîne les uns aux autres par des tronçons de ligne micro ruban, entre les deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée.



Figure II.6 : Alimentation en série.

L'alimentation en parallèle et l'alimentation en série sont différentes dans de nombreux aspects, d'abord l'alimentation parallèle fournit une largeur de bande passante plus grande, généralement 10 % de la fréquence de fonctionnement, tandis que l'alimentation en série fournit une bande passante du 1 à 3 % [II.7][II.8].

II.5. Domaines d'applications des réseaux d'antennes

Pour que la communication entre deux points distants puisse être effectuée et pour que le récepteur puisse distinguer le signal émis du bruit, les réseaux d'antennes, et grâce à leurs robustesses par rapport à une antenne élémentaire, sont utilisés dans plusieurs applications [II.9] [II.10] :

➤ **Télécommunication :**

- Téléphonie mobile (terminaux portatifs GSM, DCS, PCS, etc.)
- Antennes sur les stations de bases.

➤ **Satellites :**

- Télévision directe domestique ou embarquée sur les véhicules.
- Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable.
- Systèmes de radiolocalisation par GPS, Galileo, Glonass.

➤ **Aéronautique :**

- Communication, navigation, altimètres, systèmes d'atterrissages.
- Radars de poursuite monopulse ou synchrone.

II.6. Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes [II.11]

II.6.1. Avantages :

Les avantages des réseaux d'antennes sont nombreux comme nous venons de le voir :

- Un faible coût de fabrication.
- La possibilité de les imprimer sur des surfaces non-planes dans le cas de substrats.
- La possibilité d'améliorer la directivité.
- La possibilité de les intégrer dans des appareils électriques.
- Elles sont légères et peu encombrantes (en quelque mm² jusqu'à quelque cm² de la surface).
- Le choix de déphasage régulier entre les éléments fixes, une orientation de faisceaux dans l'espace dans certaines limites d'angles.

II.6.2. Inconvénients

Malheureusement, les antennes présentent également un certain nombre d'inconvénients qui peuvent limiter leurs domaines d'applications, on peut noter :

- Une bande passante limitée (de 1 à 5%).
- Un faible gain (de l'ordre de 5dB).
- Une pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Des puissances transportées faibles en comparaison à des antennes traditionnelles.
- Problème de choix de technique d'excitation.

II.7. Diviseur de puissance

Les tendances modernes relatives au déploiement de services de communications sans fils (LTE, 5G) nécessitent des émetteurs/récepteurs *RF* polyvalents capables de les prendre en charge. Chaque système de communication sans fil comprend des circuits micro-ondes passifs et actifs tels que les coupleurs, les filtres et les diviseurs de puissance.

II.7.1. Définition d'un diviseur de puissance [II.12]

Les diviseurs de puissance sont l'un des circuits passifs les plus répandus dans les applications RF et micro-ondes. Ces diviseurs sont largement utilisés dans (les réseaux d'antennes, les amplificateurs équilibrés, les mélangeurs, les multiplicateurs de fréquences, ...etc.), En tant que combineurs ou diviseurs de puissance.

En particulier, ces diviseurs sont utilisés pour assurer une alimentation d'un réseau d'antennes, un chemin doit être branché en utilisant un ou plusieurs diviseurs de puissance (matrice de Butler) ce qui permet de faire une jonction entre une entrée d'une seule voie avec la sortie de plusieurs voies.

II.7.2. Types de diviseur de puissance

Il existe plusieurs types des diviseurs de puissance. Parmi les diviseurs les plus utiles dans les systèmes de communications sans fils, on peut citer

- **Des réseaux à trois ports prennent la forme d'une jonction T** : Le diviseur de puissance en jonction T est un simple réseau à trois ports qui peut être utilisé pour la division ou la combinaison de puissance, et il peut être implémenté pratiquement en utilisant les différents types des lignes de transmission, On peut classifier le diviseur en jonction T sur deux types (avec pertes et sans pertes).

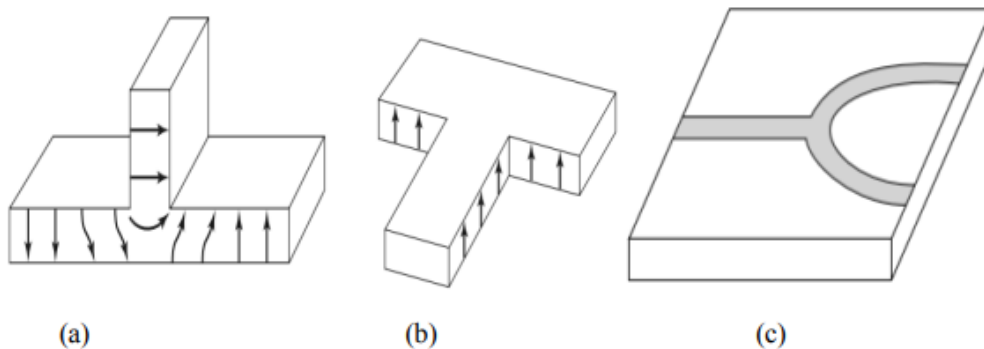


Figure II.7 : Différents diviseurs de puissance en jonction T. (a) Guide d'onde T (plan E). (b) Guide d'onde T (plan H). (c) Géométrie à ligne micro ruba

- **Diviseur résistif** : Un diviseur résistif est un diviseur qui contient des composants avec pertes (résistances) à ses trois ports. Ces trois ports peuvent être adaptés. Les deux ports de sortie ont la possibilité d'être non isolés, Ce diviseur répartit la puissance d'une manière égale entre les deux ports (-3 dB), mais des rapports inégaux de division de puissance sont possibles.

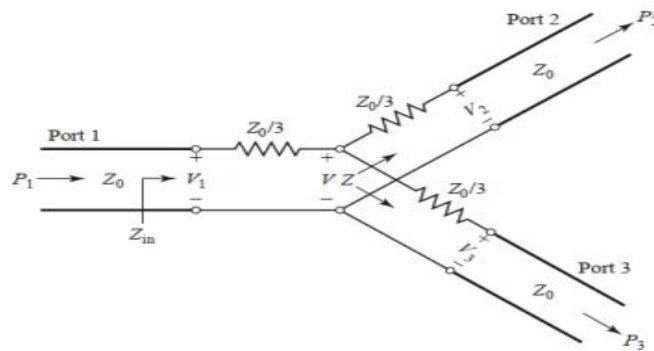


Figure II.8 : Diviseur de puissance résistif à trois ports à répartition égale.

- **Diviseur de Wilkinson (WPD : Wilkinson Power Divider) :** Le diviseur de puissance de Wilkinson (WPD) est un réseau à trois ports avec pertes, on suppose que tous les ports sont adaptés, avec une bonne isolation entre les deux ports de sortie.

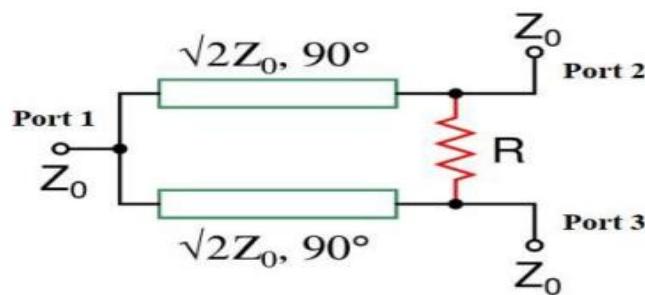


Figure II.9: Diviseur de Wilkinson à deux voies de puissances égales.

- **Diviseurs de puissance à N voies :** Ce diviseur peut être utilisé comme un combineur qui fournit une combinaison de puissances provenant des N sources de signal. Ici, l'impédance d'entrée des lignes de transmission N_i (connectées en parallèle) avec l'impédance caractéristique de Z_0 est égale à Z_0/N .

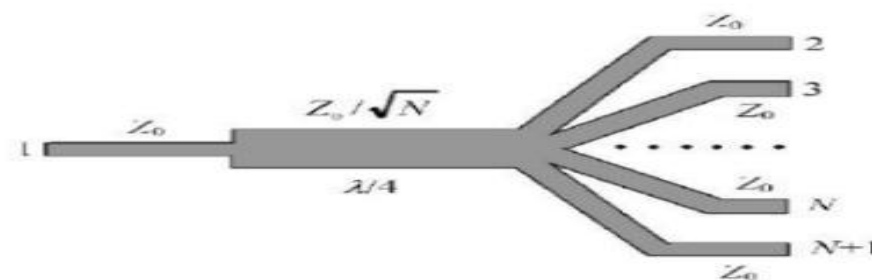


Figure II.10 : Diviseur de puissance à N voies.

II.7.3. Adaptation de la ligne d'alimentation d'un diviseur

L'adaptation de la ligne d'alimentation à 50 ohms est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement de l'antenne. Pour alimenter un réseau d'antenne à deux éléments, on utilise une jonction de forme T. Il existe plusieurs configurations de la jonction T avec différentes méthodes de calculs. La Figure II.11 donne une idée sur les différentes formes de la jonction T [II.13].

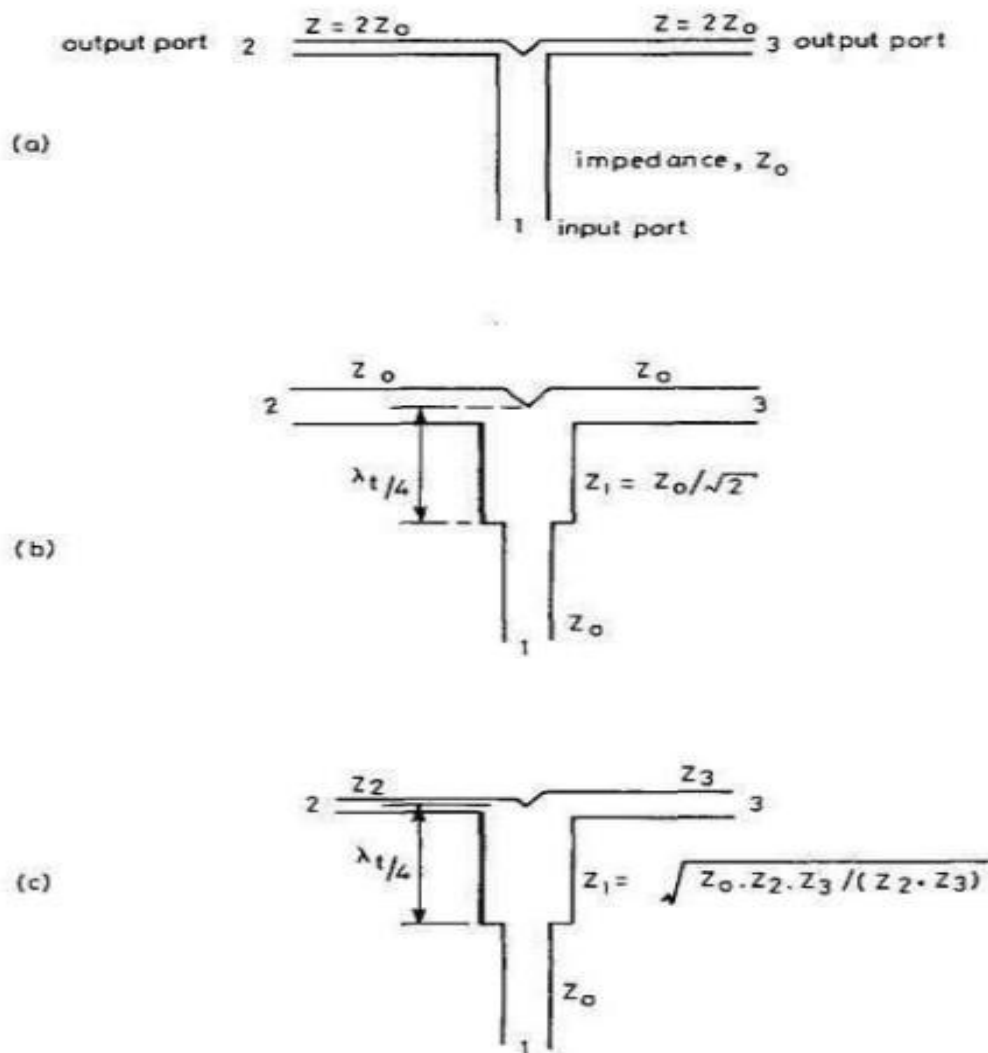


Figure II.11 : Différentes formes de la jonction T [II.13].

L'exemple montré dans la figure II.11 (a) est le plus simple car l'impédance d'entrée est adaptée, par contre, les impédances de sorties sont terminées avec la double valeur de l'impédance d'entrée. Dans ce cas, la valeur de l'impédance d'entrée est de 50 Ω , alors l'impédance de sortie aura la valeur de 100 Ω . En ce qui concerne l'exemple de la figure II.11 (b), tous les ports ont la même impédance de 50 Ω .

Pour avoir cette égalité au niveau des impédances caractéristiques, on utilise un adaptateur Quart-d'onde ($\lambda_g/4$).

La valeur de la longueur d'onde effective λ_g est:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.1})$$

Avec: λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et ϵ_r est la permittivité du substrat.

II.7.4. Paramètres d'un diviseur de puissance

Il existe plusieurs paramètres qui permettent de caractériser les performances d'un diviseur de puissance, tel que :

II.7.4.1. Pertes d'insertion

Les pertes de puissance dans un signal, au sein d'une ligne de transmission, à cause de l'insertion d'un dispositif sont connues par les pertes d'insertion et généralement exprimées en décibels (dB). Comme tout élément microonde, l'insertion d'un diviseur de puissance dans une matrice d'alimentation va atténuer le signal transmis à l'antenne. Cette atténuation a deux origines :

- Des pertes, de même nature que celles introduites par un connecteur,
- La puissance réfléchiée et due au couplage.

Les pertes d'insertion sont définies comme un rapport de la puissance de sortie à la puissance d'entrée.

$$IL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec : P_e et P_s sont les puissances d'entrée et de sortie, respectivement.

II.7.4.2. Isolation

L'isolation est désignée pour un coupleur directionnel et peut être définie comme une différence dans les niveaux des puissances en dB entre le port d'entrée et le port d'isolé quand les deux ports de sorties sont adaptés et on écrit :

$$I(\text{dB}) = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right) \quad (\text{II.3})$$

II.7.4.3. Directivité

La directivité d'un coupleur est liée à l'isolement entre les deux ports P_3 et P_4 . La directivité est une mesure de la capacité du coupleur à isoler les ondes transmises et réfléchies, tout comme l'isolation :

$$D(dB) = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_3}{P_4} \right) \quad (II.4)$$

II.7.5. Avantages et inconvénients des différents types de diviseurs de puissance [II.14]

Comme on vient de mentionner plus tôt les différents types de diviseurs de puissance existent qui dépendent de la technologie de fabrication, ces types présentent des certains bénéfices et des désavantages aussi :

II.7.5.1. Avantages

- Les bonnes isolations entre les Pons de sortie.
- Une efficacité élevée.
- Des pertes modérées.

II.7.5.2. Inconvénients

- Les grandes pertes.
- Une puissance supportée faible.
- La grande taille du circuit qui cause une difficulté d'intégration.

II.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de regrouper les différents types des réseaux d'antennes imprimées, de voir leurs techniques d'alimentation et leurs domaines d'application ainsi que ses avantages et ses inconvénients. A la fin nous avons passé aux diviseurs de puissance, leurs types et ses techniques d'alimentation, puis l'adaptation de la ligne d'un diviseur de puissance qui prend la forme en jonction T.

Le chapitre suivant est consacré à la conception des réseaux d'antennes pour les systèmes mobiles 5G à la fréquence de résonance 28GHz par le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Chapitre III
***Conception et simulation d'un réseau
d'antenne pour une application 5G***

III.1. Introduction

La cinquième génération (5G) de la téléphonie mobile est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications sans fils. Cette avancée devrait fournir un très grand service en termes de rapidité, de diversité et de facilité. Cette technologie vise à répondre à toutes les exigences des clients qui aspirent à des fonctionnalités avancées dans les téléphones mobiles. La technologie 5G exige des antennes avec des nouvelles fonctionnalités [III.1].

Les futures générations d'équipements vont faire appel à des antennes de plus en plus performantes et fonctionnant dans la bande 5G. Ce chapitre sera consacré à l'étude et à la conception d'antennes imprimées fonctionnant dans la bande 5G à l'aide du logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Dans cette partie, nous présenterons en premier lieu le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (MWS), après nous définirons notre cahier de charge et nous aborderons la description des différents modules à réaliser. Ensuite dans un second lieu, nous étudions l'influence de quelques paramètres importants qui affectent les performances des réseaux d'antennes imprimées afin d'avoir une bonne conception des réseaux d'antennes proposés.

III.2. Outil de simulation

III.2.1. Définitions

Le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. Le CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliquée à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clés de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [III.2].

III.2.2 Principales caractéristiques de logiciel CST

Les principales caractéristiques de logiciel CST Microwave Studio sont :

- Une mémoire technique efficace d'intégration finie.
- La structure peut être vue soit comme un modèle 3D ou un schéma.
- Très bonne performance en raison de rapprochement frontière Perfect (PBA).
- Caractéristique hybride a base de modélisation permet les changements structurels rapides
- Importation d'un ensemble de données modèle humain visible ou d'autres ensembles de données.
- L'importation de modèles 2D et 3D.
- Paramétrages des fichiers de CAO importés.
- Base de données des matériaux.
- Modèles de structure pour la description du problème simplifié.

III.2.3 Les avantages et les inconvénients de logiciel

Ce logiciel présente les avantages et les inconvénients principaux suivants :

- C'est une option très intéressante pour la conception d'antenne en micro ruban.
- L'optimisation du modèle afin que celui-ci présente les divers critères de performance, de sorte que le VSWR soit limité entre 1 et 2 à la fréquence de résonance désirée.
- Offre plusieurs graphiques différents pour faciliter l'analyse de notre modèle.
- Il est possible de créer des variables qui pourront être utilisées pour spécifier les dimensions d'une composante.
- La durée de la simulation est proportionnellement croissante par rapport au volume du projet, (plus le projet est grand la durée de simulation est grande).

III.2.4. Description des modules à réaliser

Pour une première structure nous calculons les dimensions d'antenne (patch, ligne d'alimentation) en fonction des caractéristiques de substrat (permittivité relative ϵ_r , l'épaisseur h) et le choix de la fréquence de résonance (28 GHz), et pour l'alimentation nous avons choisi l'alimentation par ligne (micro ruban).

III.2.5. Caractéristiques du substrat

Ce projet consiste à réaliser une antenne patch microstrip pour l'application 5G à une fréquence de 28 GHz. Les valeurs des différents éléments de l'antenne sont présentées dans le cahier de charge Tableau (III.1).

Le type de matériaux	Les composants d'antenne	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
FR-4	Substrat1	1.6	4.3
Rogers 5880	Substrat 2	0.508	2.2
Copper	Plan de masse et le patch	0.035	

Tableau III.1: Le cahier de charge

III.3. Conception de l'antenne patch pour la 5G (avec un substrat de type FR-4)

III.3.1. Conception de l'antenne patch rectangulaire initial

D'abord pour une conception d'antenne patch alimentée par une ligne micro ruban, nous avons calculé la longueur et la largeur de l'antenne patch rectangulaire à partir des équations théoriques qui sont mentionnées précédemment (Chapitre I, **Tableau I.2**). Les dimensions de l'antenne initiale sont mentionnées dans le tableau III.2 suivants :

Les éléments de l'antenne	Dimensions (mm)	
	Longueur	Largeur
Patch	1.692	3.29
Plan de masse et substrat 1	16.652	12.89
Ligne d'alimentation	5.36	3.137

Tableau III.2: Les dimensions de l'antenne initiale de substrat FR-4.

La figure III.2 représente la structure de l'antenne initiale sous CST MICROWAVE STUDIO, Cette structure est composée d'un élément rayonnant de longueur L et de largeur W,

alimenté par une ligne micro ruban. Il est déposé sur un substrat diélectrique de type FR-4 et le plan de masse recouvre toute la face arrière du substrat.

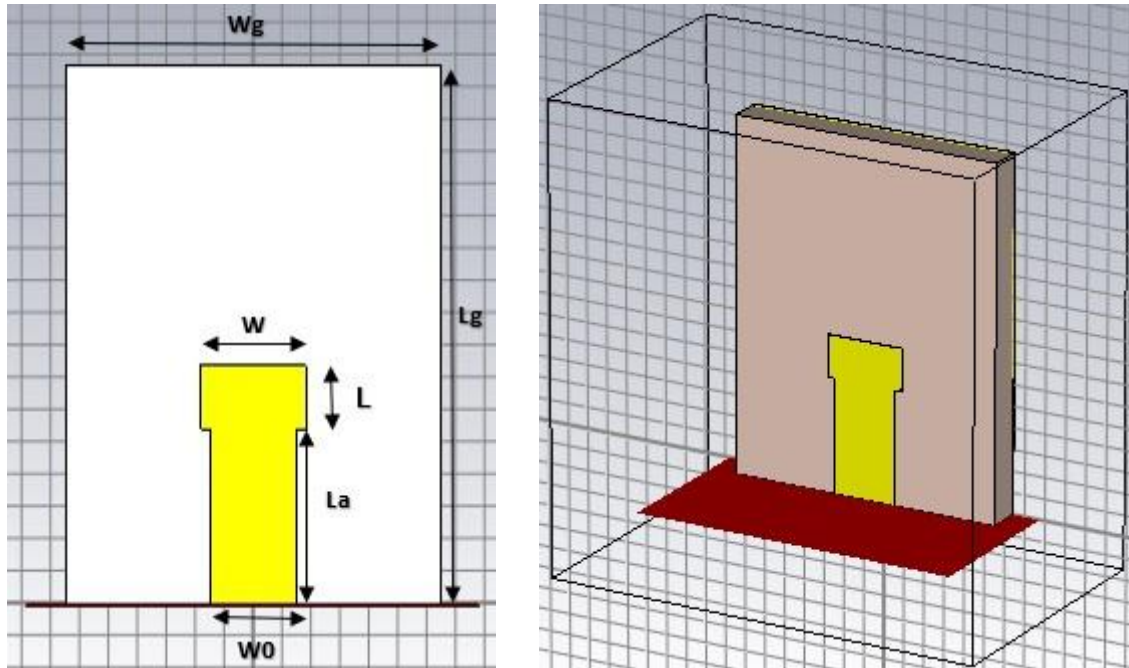


Figure III.1: Géométrie de l'antenne initiale.

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est représenté sur la figure (III.2) suivante :

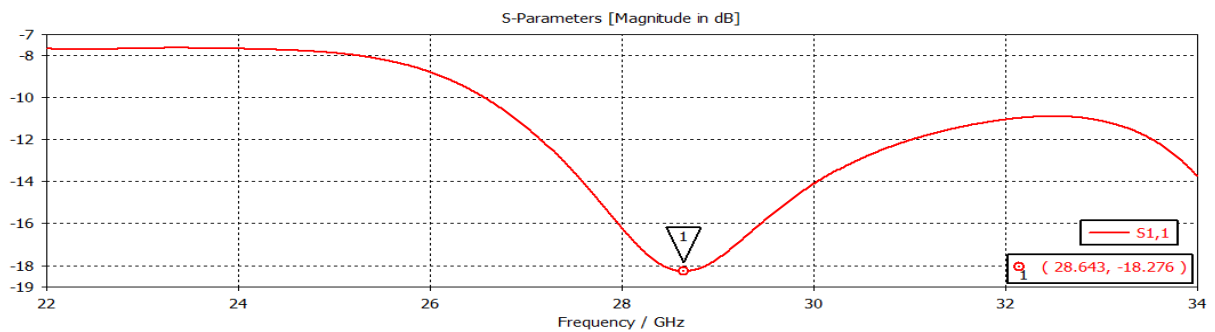


Figure III.2: Coefficient de réflexion.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion est égal à -18.28dB dans la fréquence 28.64GHz , Pour rétrograder la fréquence à 28GHz , Nous avons appliqué une technique d'adaptation dans l'étape suivante.

III.3.2. Adaptation de l'antenne initiale

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne, nous avons deux différentes approches qui peuvent être employées. La première méthode utilise un transformateur quart d'onde pour adapter l'antenne.

Dans notre projet nous avons utilisé la deuxième méthode qui consiste à introduire des encoches à l'entrée du patch, comme indiquée dans la figure (III.3) suivantes :

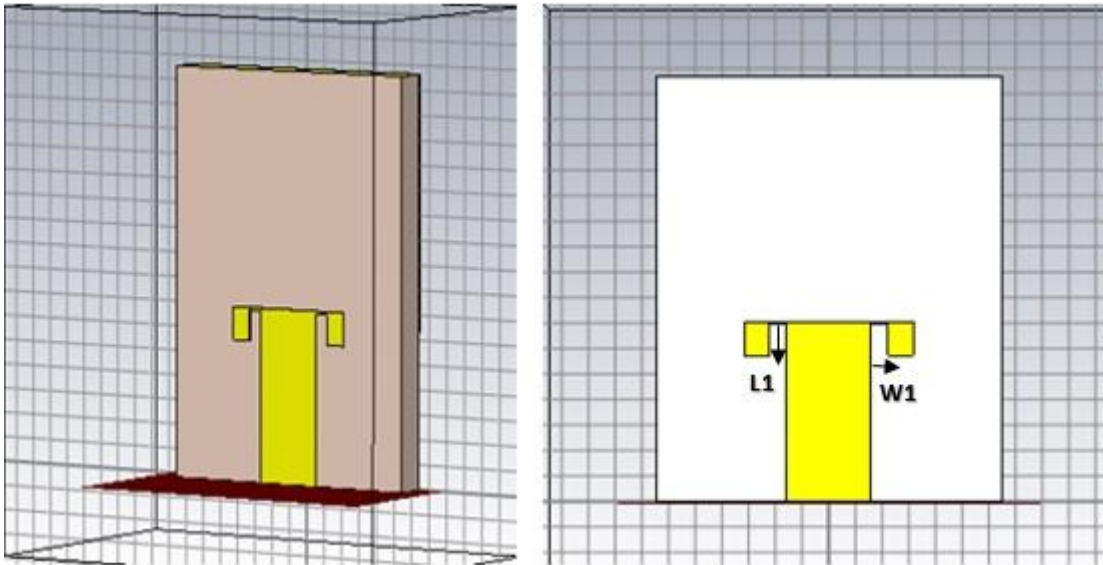


Figure III.3: Géométrie de l'antenne initiale avec encoches.

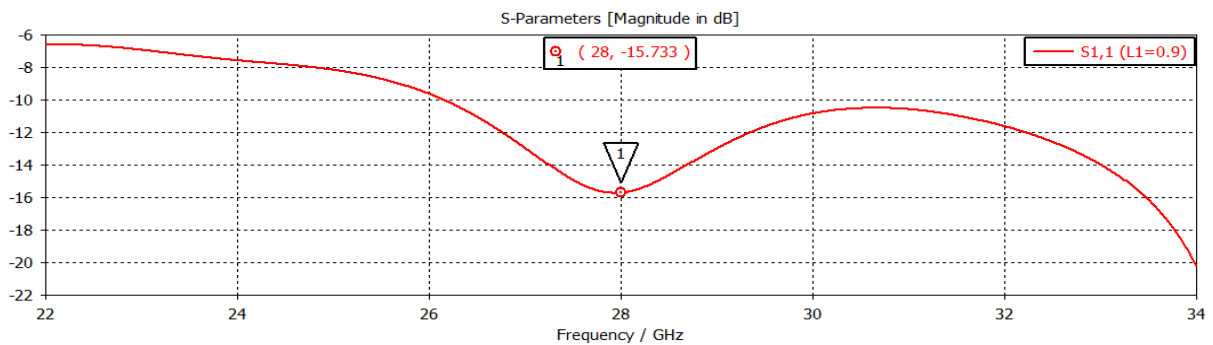
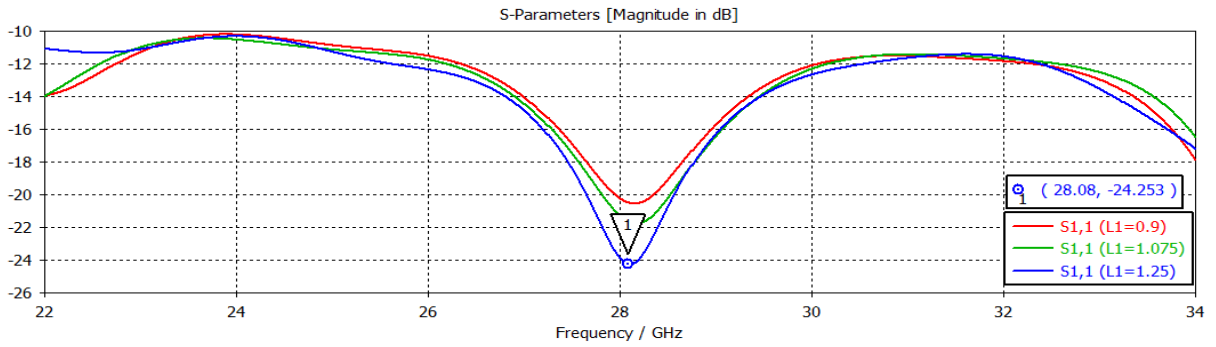


Figure III.4: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale avec encoches.

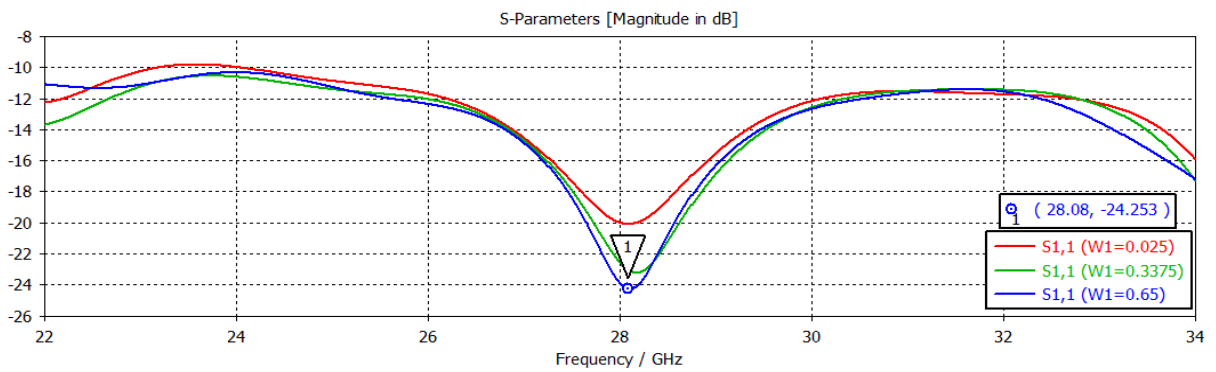
L'antenne décrite précédemment a été utilisée pour réaliser l'étude paramétrique. Quelques paramètres essentiels vont être modifiés afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne à la fréquence désirée.

III.3.3. Etude paramétrique

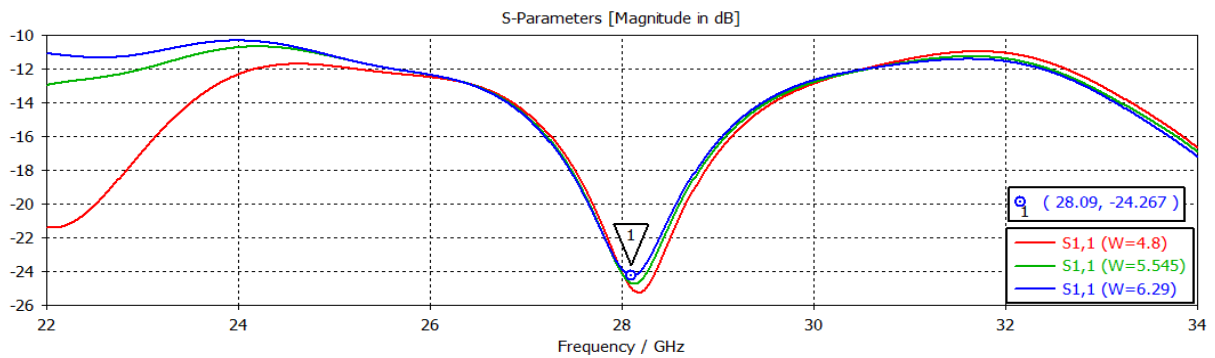
III.3.3.1 Variation de dimensions des encoches et du patch



(a)



(b)



(c)

Figure III.5: (a): Variation de la longueur L1 des encoches

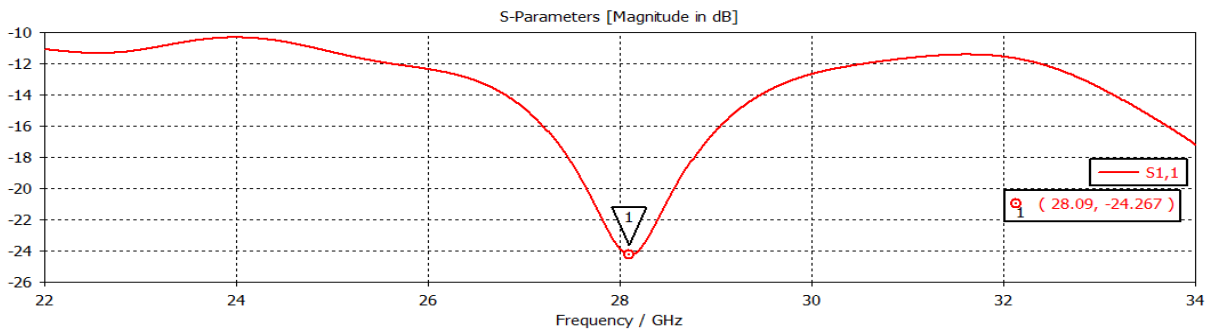
(b): Variation de la largeur W1 des encoches

(c): Variation de la largeur W de patch.

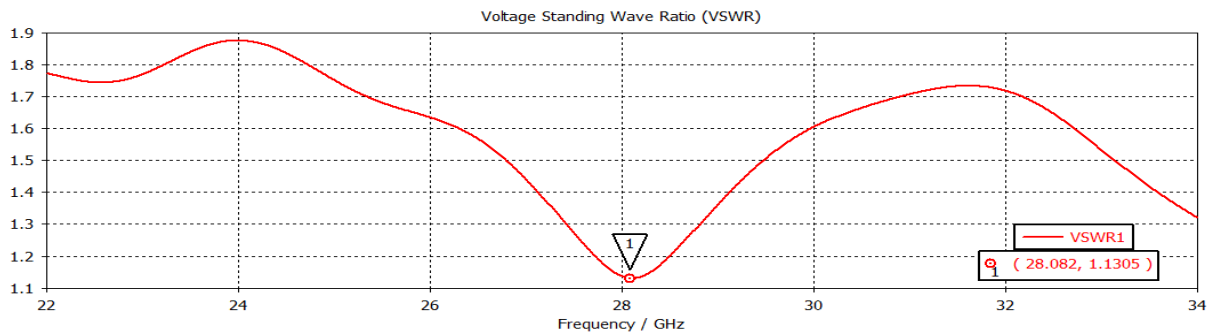
Nous observons que le coefficient de réflexion S_{11} est égale à -24.26 dB à la fréquence de résonance 28 GHz. Donc la variation de ces dimensions présente une bonne adaptation de l'antenne initiale avec encoches à la fréquence désirée.

II.3.4. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne initiale

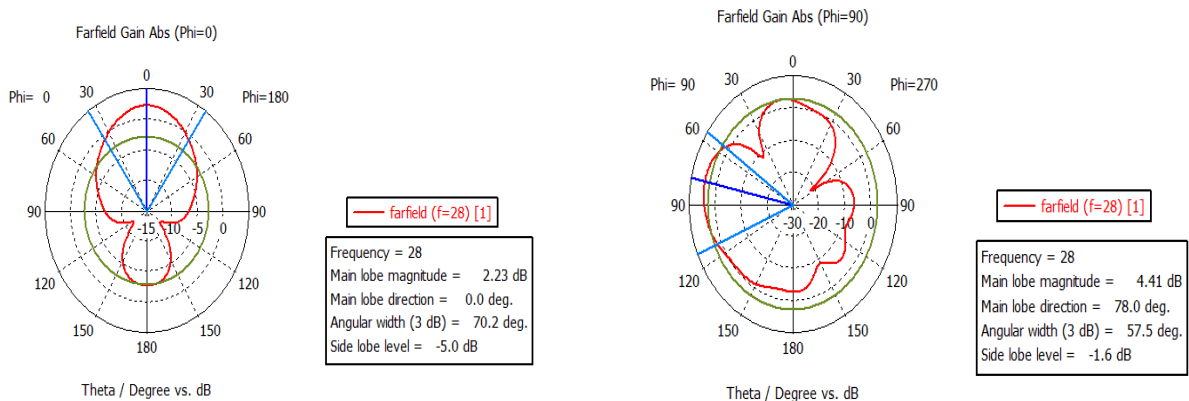
Sur les figures III.6. ((a), (b),(c) et (d)) on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR, le gain et la directivité en 2D et en 3D.



(a)



(b)



(c)

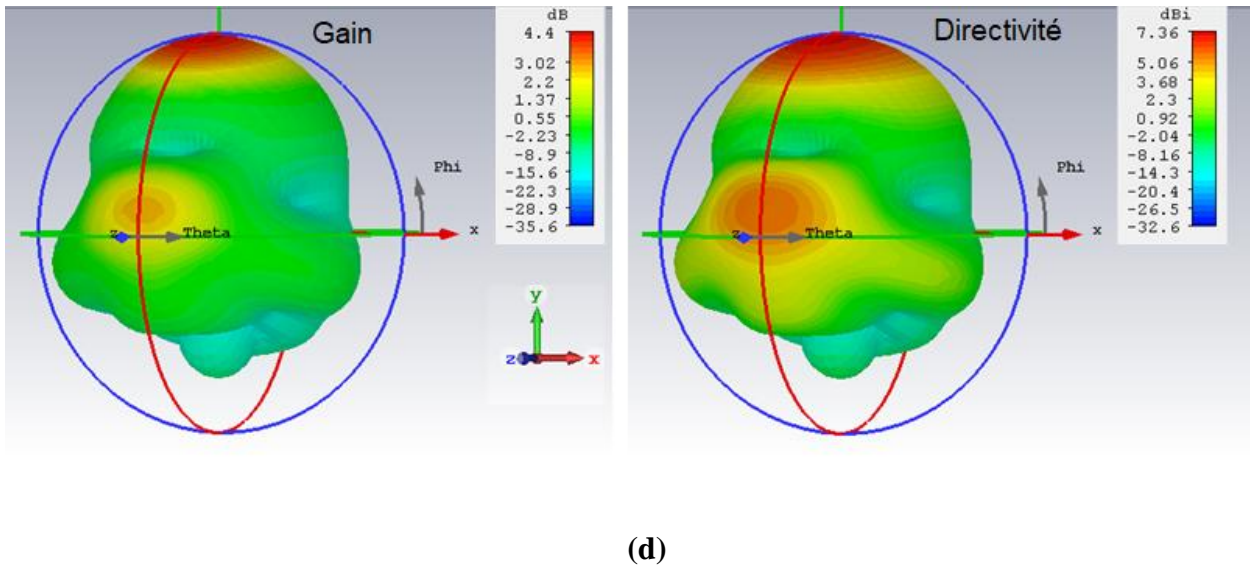


Figure III.1: (a): Coefficient de réflexion.

(b): Rapport d'onde stationnaire.

(c): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H).

(d) : Diagramme de rayonnement en 3D.

On peut voir que l'adaptation est bien réalisée à la fréquence de résonance 28GHz avec un coefficient de réflexion de -24.26 dB. Nous avons également mesuré le rapport d'onde stationnaire (VSWR), il est égal à 1.13 ce qui correspond à une puissance réfléchie nulle.

Le diagramme de rayonnement en 2D dans le plan E ($\varphi = 0^\circ$) et H ($\varphi = 90^\circ$) est presque quasi omnidirectionnel. Le tracé en 3D donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement, nous observons que le gain de l'antenne est égal à 4.4dB et la directivité est égale à 7.36 dBi. L'efficacité de rayonnement est donnée par le rapport entre le gain et la directivité, dans notre cas, nous obtenons une efficacité égale à 60%.

III.4. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédente

La figure (III.7) montre la nouvelle structure de l'antenne patch, Nous avons inséré des encoches et des fentes de forme rectangulaire sur l'élément rayonnant l'antenne patch précédente qui est adaptée à la fréquence de résonance 28GHz.

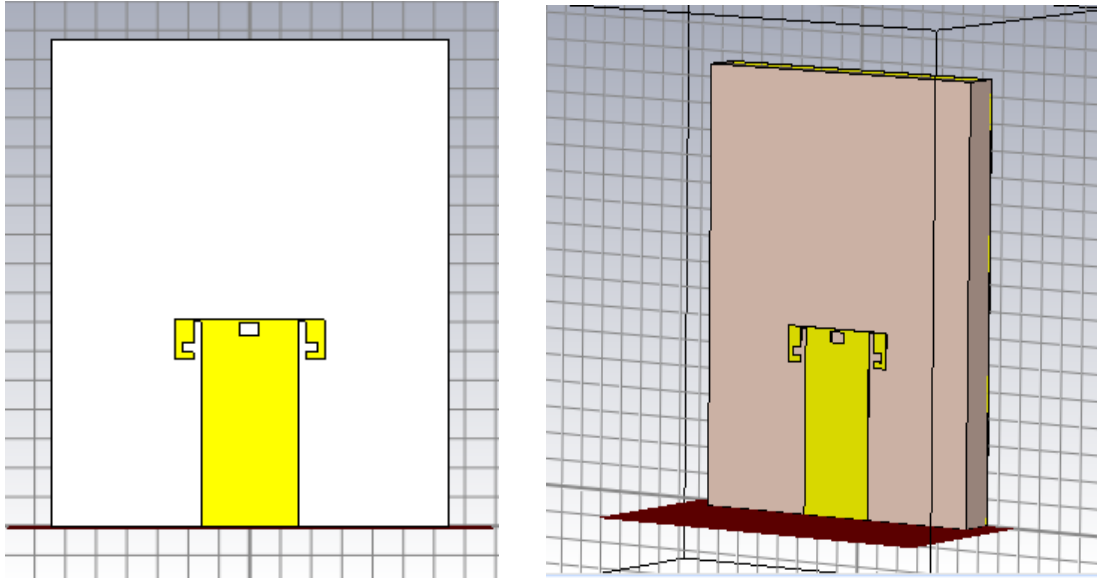


Figure III.7: Géométrie de l'antenne patch modifiée.

Le coefficient de réflexion de l'antenne patch modifiée est représenté sur la figure ci-dessous :

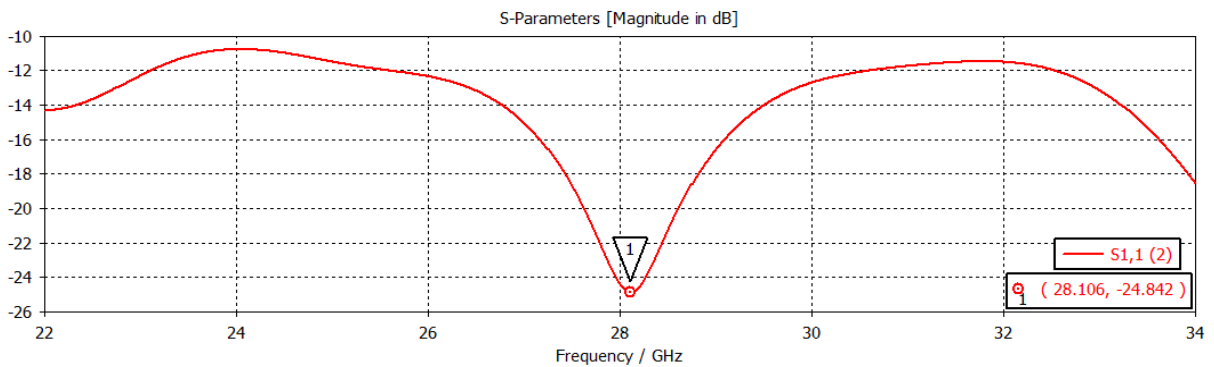
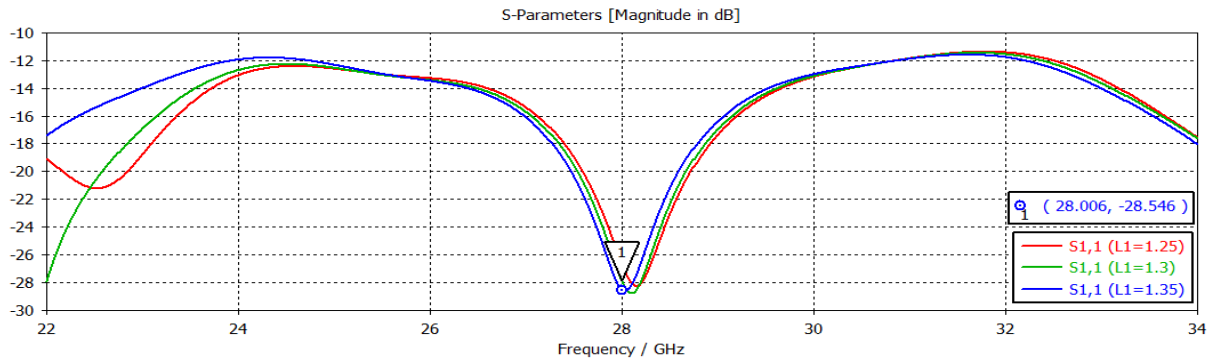


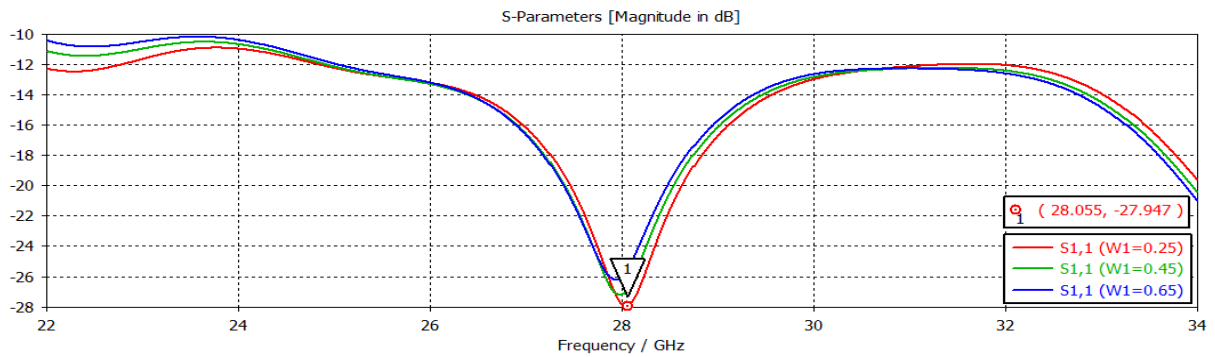
Figure III.8: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch modifiée.

On remarque que le résultat du S_{11} est presque comme le résultat précédent de l'antenne initiale avec encoches, donc pour rétrograder le coefficient de réflexion, on applique une étude paramétrique sur les dimensions de l'antenne modifiée.

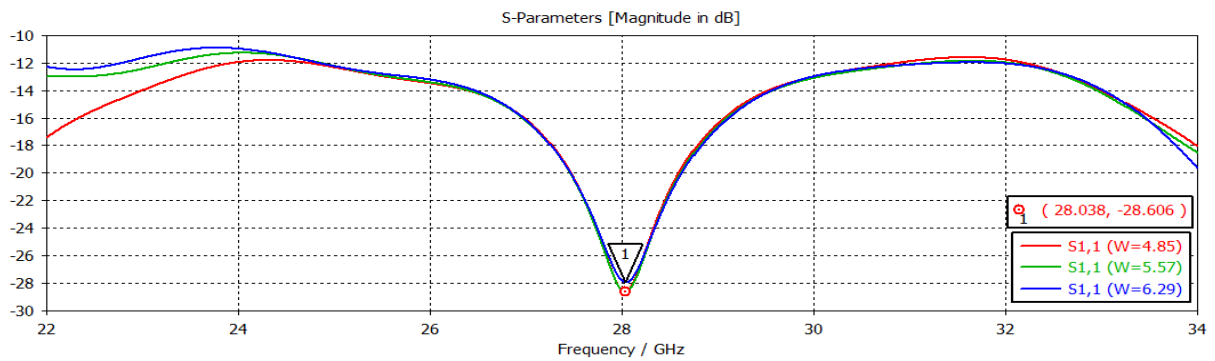
III.4.1. Etude paramétrique sur les dimensions de l'antenne patch



(a)



(b)



(c)

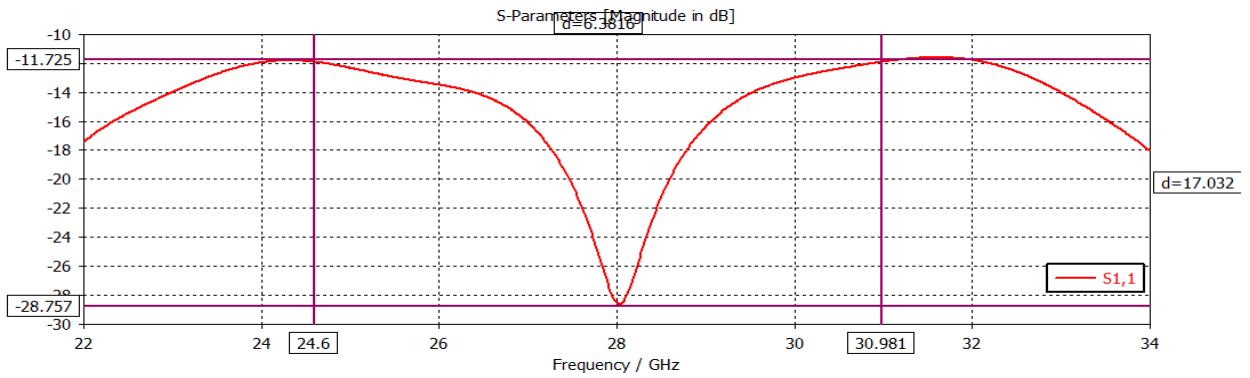
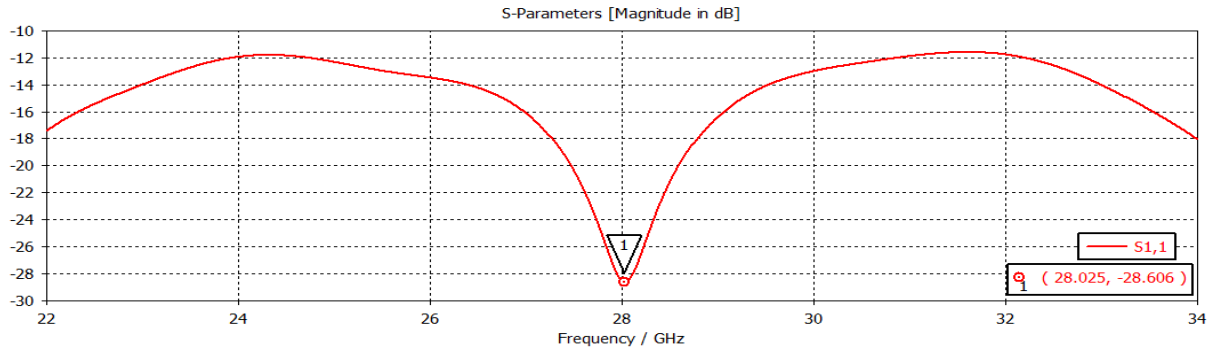
Figure III.9: (a): Variation de la longueur $L1$ des encoches.

(b): Variation de la largeur $W1$ des encoches.

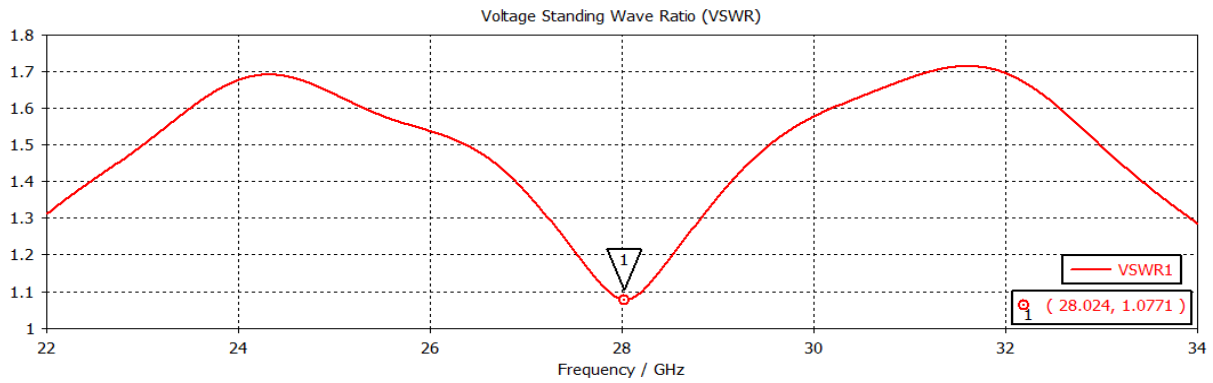
(c): Variation de la largeur W de patch

III.4.2. Résultats après l'étude paramétrique

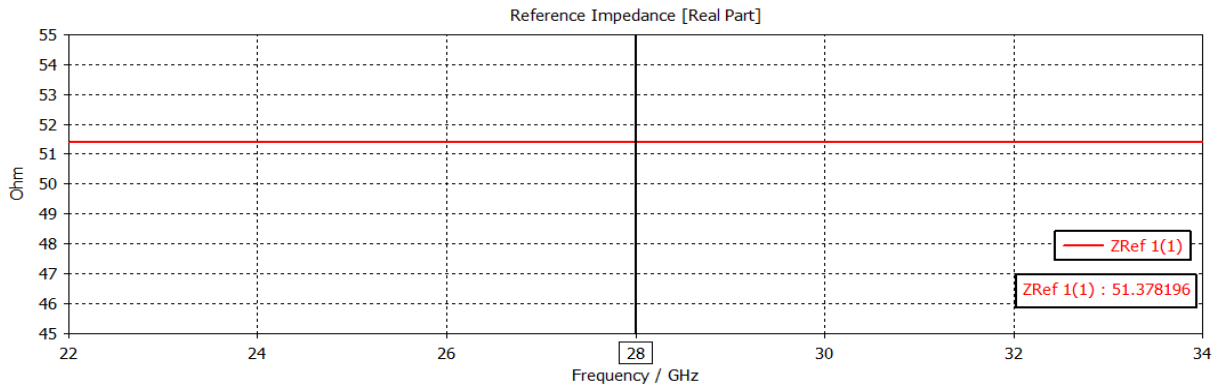
Les figures suivantes présentent le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le diagramme de rayonnement en 2D et 3D.



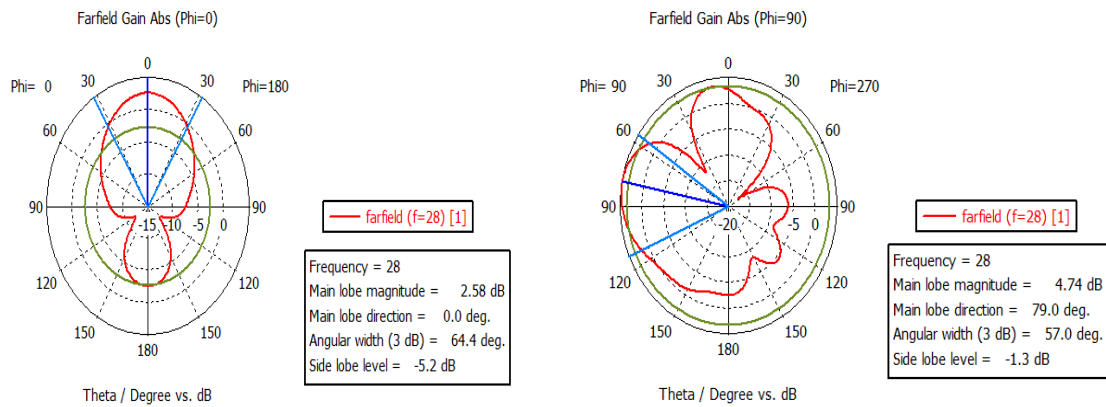
(a)



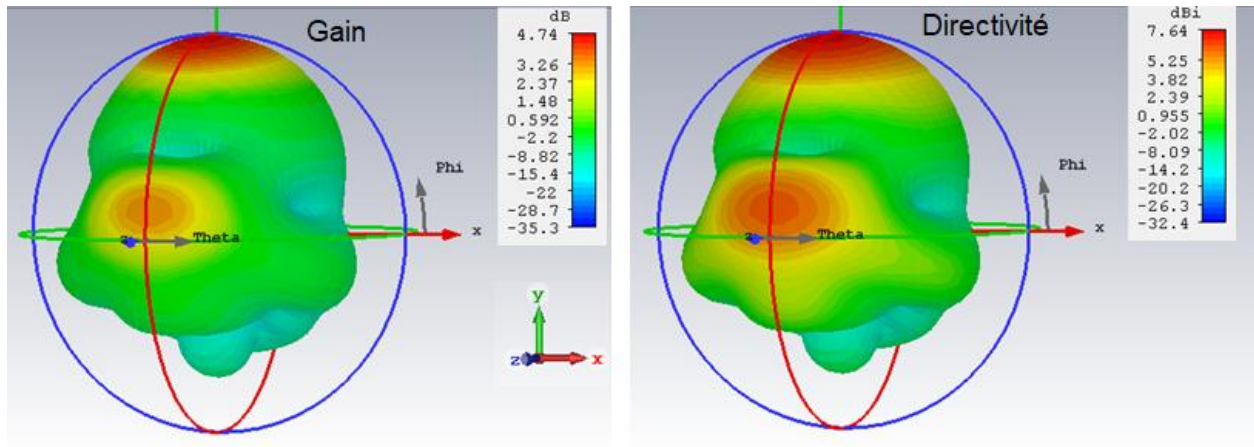
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.10: (a): Coefficient de réflexion,
 (b): Rapport d'onde stationnaire.
 (c): Partie réel de l'impédance d'entrée.
 (d): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H).
 (e): Diagramme de rayonnement en 3D.

D'après la figure III.10. (a), nous observons que le coefficient de réflexion S_{11} atteint un niveau proche de -28dB à la fréquence de résonance 28 GHz. La largeur de la bande passante dépasse le 6.381 GHz et le VSWR est inférieur à 2 sur toute la gamme de fréquence de [22-34] GHz, ce qui montre une bonne adaptation de l'antenne proposée avec un substrat FR4 sur toute cette gamme de fréquence.

On observe aussi que l'impédance d'entrée est égale à 51.4Ω . Cette dernière est proche de 50Ω et cela explique un bon transfert de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant.

Pour les diagrammes de rayonnements, Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans les deux plans E et H qui sont vérifiés sur le diagramme de rayonnement en 3D avec une valeur du gain qui est égale à 4.74dB, ce qui implique une efficacité de 62%.

III.5. Réseau d'antenne à deux éléments (à la base de l'antenne modifiée)

La structure du réseau d'antennes à deux éléments est représentée sur la figure III.11 :

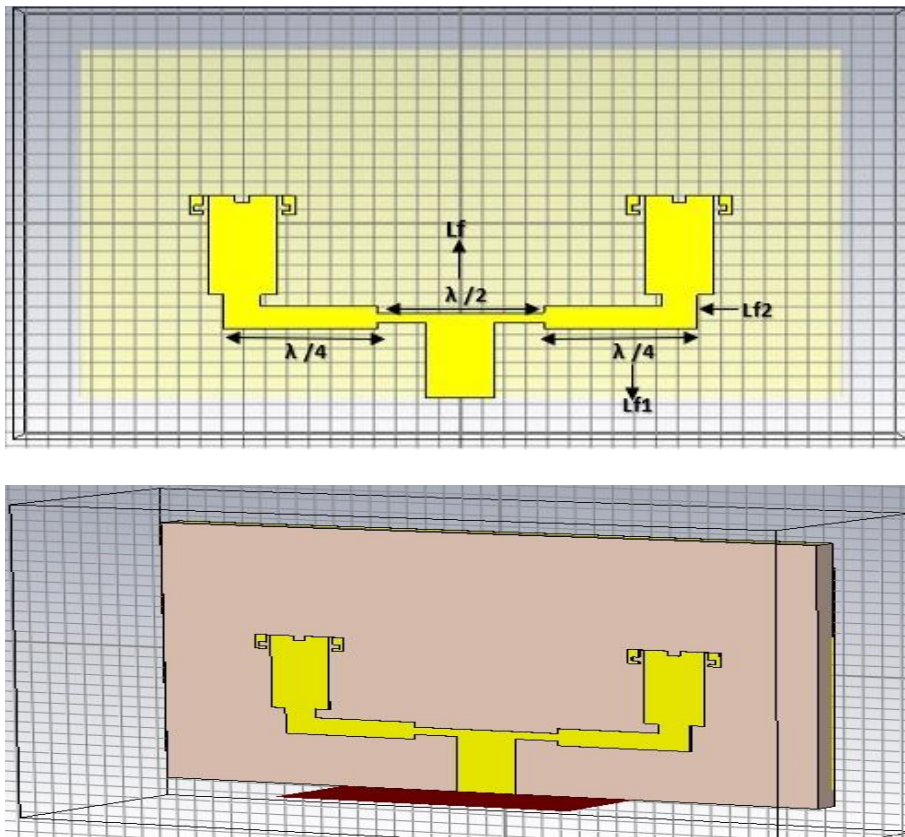


Figure III.11: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments avec une substrat de type FR4.

D'abord pour une conception d'un réseau d'antenne à 2 éléments, nous avons calculé la longueur et la largeur du diviseur de puissance de la jonction T de la façon suivante :

- Nous utilisons une ligne demi-onde à l'entrée de la ligne d'alimentation principale d'impédance caractéristique $Z_c = 50\Omega$ et qui est calculée par la formule suivante :

$$Z_c = \frac{120\pi}{\epsilon_{reff} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad \text{(III.1)}$$

- Puis, on superpose une ligne demi-onde horizontalement d'impédance caractéristique qui égale à 100Ω .

- Finalement, pour raccorder la ligne 100Ω avec la ligne d'alimentation (50Ω) de l'antenne patch élémentaire, nous utilisons une ligne quarte d'onde d'impédance $Z_c = 70.71\Omega$.

L'impédance de la ligne quarte d'onde est calculée par l'équation suivante :

$$Z_{c\frac{\lambda}{4}} = \sqrt{Z_{in} * Z_{out}} \quad \text{(III.2)}$$

Avec :

Z_c : L'impédance caractéristique de la ligne quarte d'onde.

Z_{in} : L'impédance d'entrée.

Z_{out} : L'impédance de sortie.

- Pour calculer la largeur W du diviseur de la jonction T en fonction de l'impédance caractéristique de la ligne micro ruban, on utilise l'équation (III.3) **(III.4)** :

$$\begin{cases} W = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} * h \\ A = Z_c \frac{\sqrt{2(\epsilon_r+1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \right) * \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Dans le tableau (III.3) suivant, on donne une comparaison entre les dimensions du diviseur de puissance en jonction T calculées par la formule (III.3) précédente et par le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Impédance caractéristique(Ω)	Largeur de la jonction T (mm)	
	Résultats théorique	Résultats du CST
50	2.974	3.137
100	0.702	0.7236
70.71	1.590	1.641

Tableau III.3: Les dimensions du diviseur de puissance en jonction T.

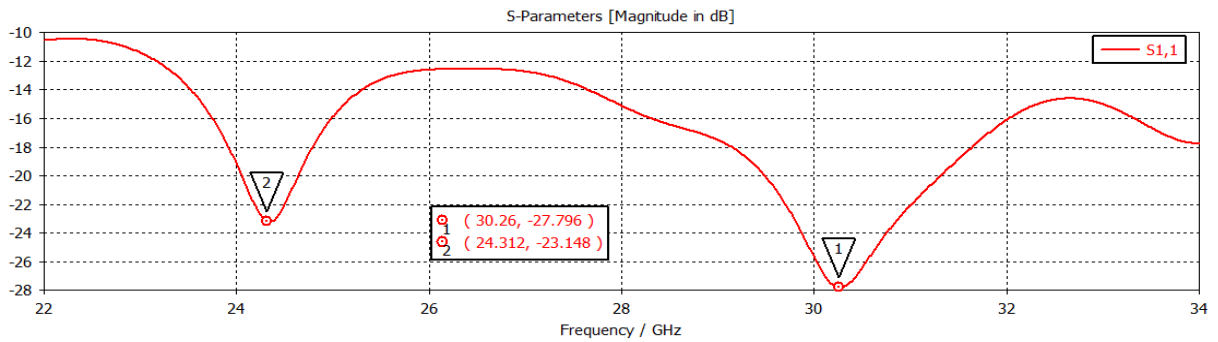


Figure III.12: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments.

Nous observons une adaptation sur toute la gamme de fréquence [22-34] GHz. Pour améliorer encore ce résultat, nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions du réseau d'antennes à 2 éléments avec un substrat de type FR4.

III.5.1. Etude paramétrique

III.5.1.1. Variation de la longueur Lf de la jonction T

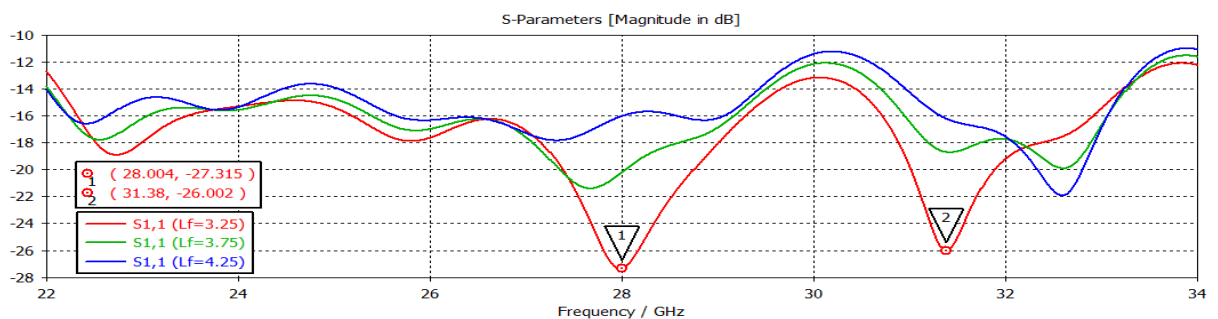


Figure III.13: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de la longueur Lf de la jonction T.

III.5.1.2. Variation de la longueur Lf1 de la jonction T

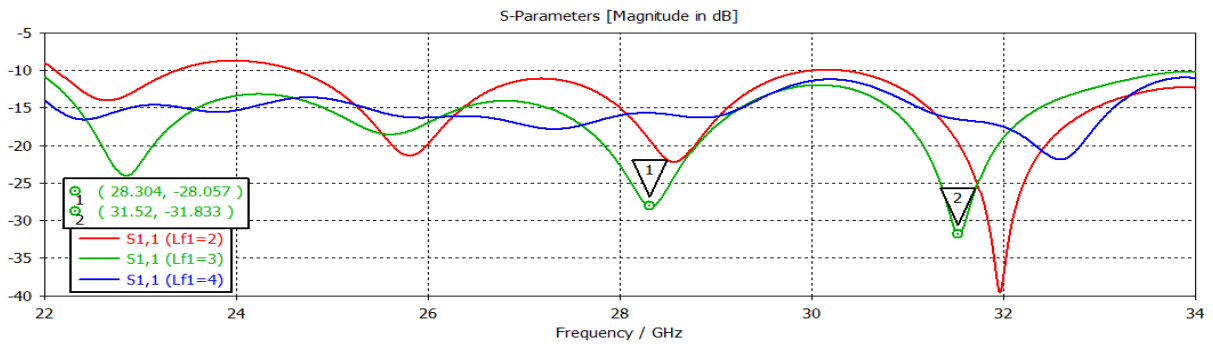
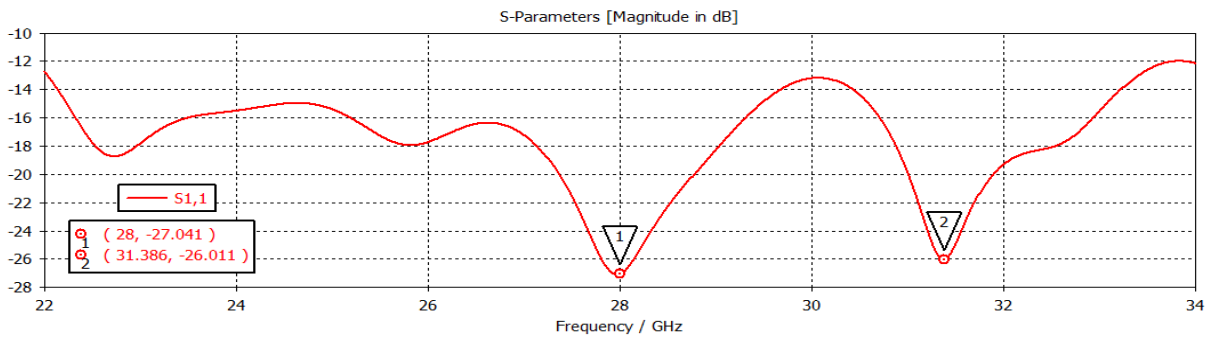


Figure III.14: Coefficient de réflexion avec différentes valeurs de la longueur Lf1 de la jonction T.

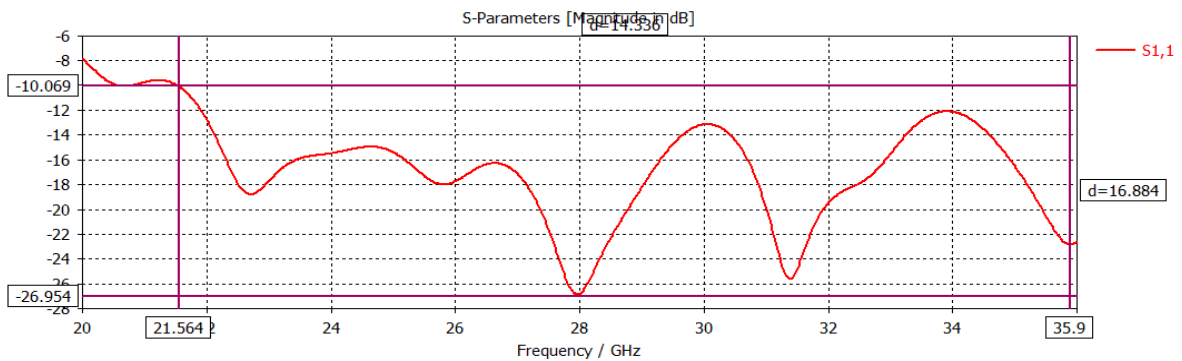
D'après les deux graphes (III.13 et III.14) ci-dessus, on remarque une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour $Lf = 3.25mm$ et $Lf1 = 3mm$.

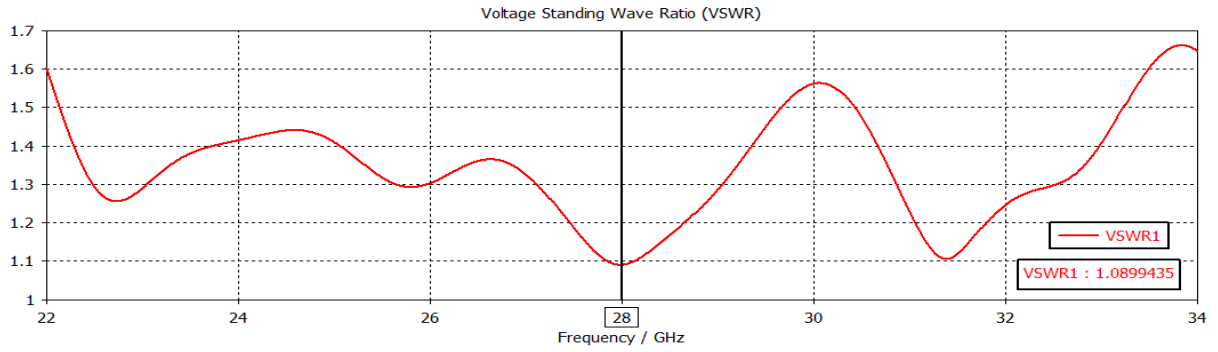
III.5.2. Résultats après l'étude paramétrique

Sur Les figures suivantes, on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le diagramme de rayonnement en 2D et 3D.

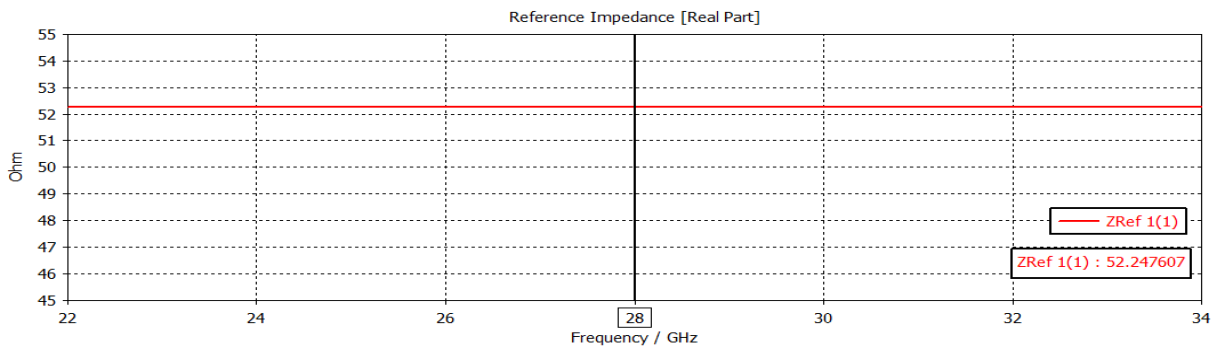


(a)

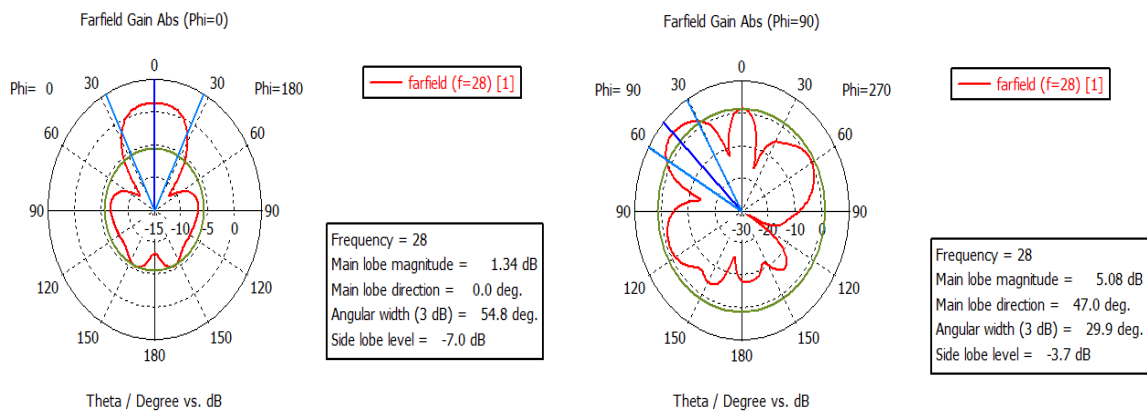




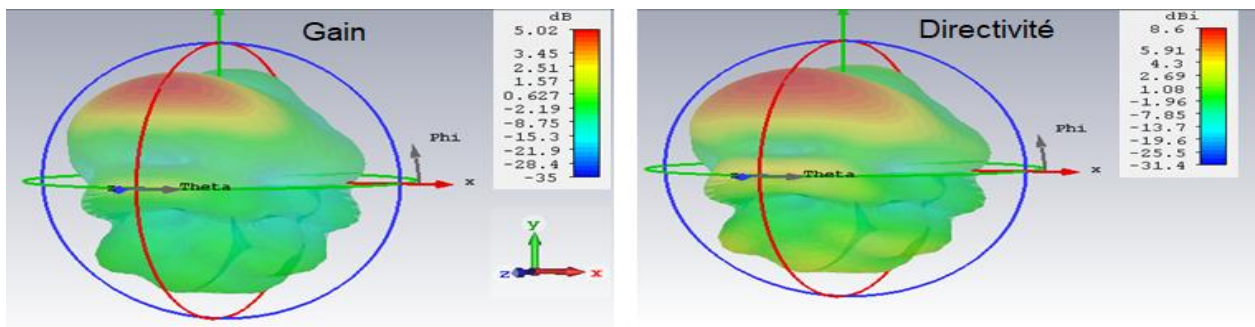
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.15: (a): Coefficient de réflexion.
 (b): Rapport d'onde stationnaire.
 (c): Partie réel de l'impédance d'entrée.
 (d): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E et H).
 (e): Diagramme de rayonnement en 3D.

D'après les résultats obtenus, nous avons obtenu une adaptation favorable à la fréquence de résonance 28 GHz et sur toute la gamme de fréquence de [20-36] GHz. La bande passante dépasse le 12 GHz et le VSWR est inférieur à 2, ce qui donne un fonctionnement ULB de l'antenne.

On observe aussi que l'impédance d'entrée est égale à 52.2 Ω . Ce dernier est proche de 50 Ω et cela explique un bon transfert de l'énergie entre l'alimentation et la ligne micro ruban.

Pour les diagrammes de rayonnements en 3D de l'antenne, nous remarquons que la valeur du gain est égale à 5.02dB et la directivité à 8.6dBi, donc l'efficacité de l'antenne est égale à 58.37%.

III.6. Conception de l'antenne patch pour la 5G (avec substrat de type Rogers 5880)

III.6.1. Conception de l'antenne patch rectangulaire initial

Les dimensions de l'antenne patch initial de substrat Rogers 5880 sont calculées avec le même principe que de l'antenne initiale avec substrat FR-4, ces derniers sont mentionnés dans le tableau (III.4) suivant :

Les éléments de l'antenne	Dimensions (mm)	
	Longueur	Largeur
Patch	3.288	4.24
Plan de masse et substrat2	11.696	7.288
Ligne d'alimentation	5.36	1.578

Tableau III.4: Les dimensions de l'antenne rectangulaire initial.

Sur la figure III.16, on représente la structure de l'antenne initiale sous CST MICROWAVE STUDIO, Cette structure est composée d'un élément rayonnant de longueur L et de largeur W , alimenté par une ligne microruban. Il est déposé sur un substrat diélectrique de type Rogers 5880et le plan de masse recouvre toute la face arrière du substrat.

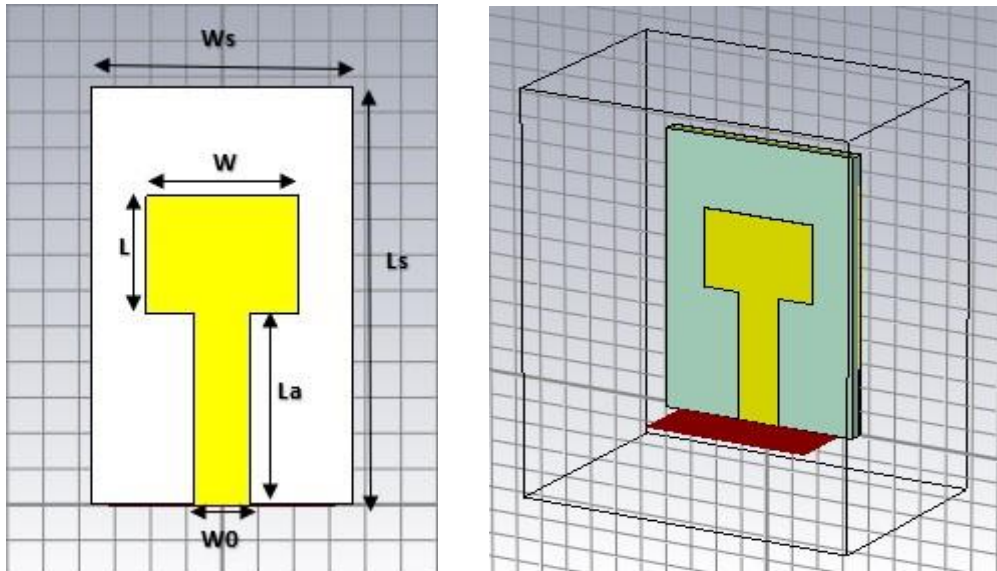


Figure III.16: Géométrie de l'antenne initiale.

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est représenté sur la figure (III.17) suivante :

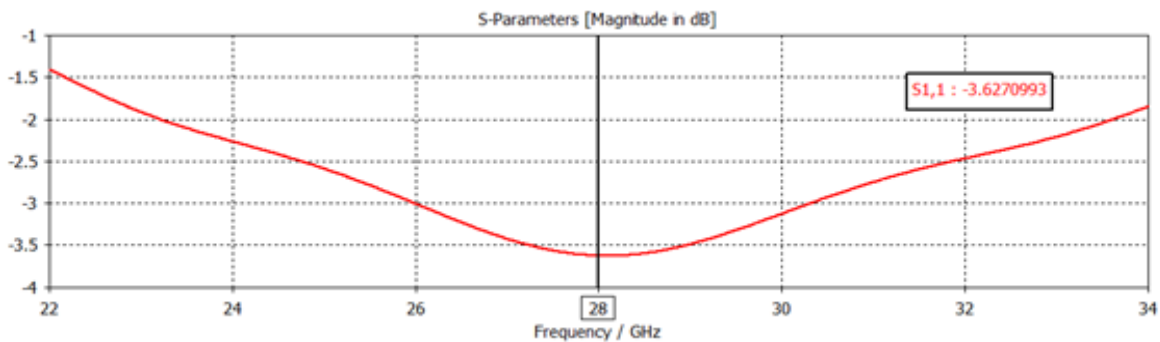


Figure III.17: Coefficient de réflexion S11.

D'après le résultat obtenu, nous remarquons que le coefficient de réflexion est au-dessus de -3.62 dB dans la fréquence de résonance 28 GHz, ce qui conduit à une désadaptation de l'antenne notamment à la fréquence désirée.

III.6.2. Adaptation de l'antenne initiale

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne, nous avons introduit des encoches à l'entrée du patch, comme indiquée dans la figure (III.18) suivantes :

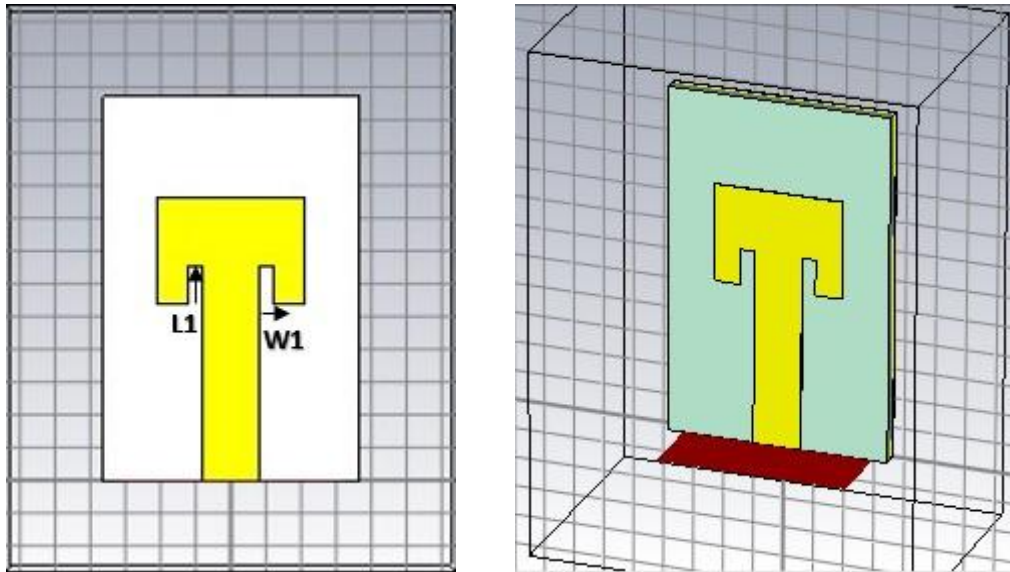


Figure III.18: Géométrie de l'antenne initiale avec des encoches.

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est représenté sur la figure (III.19) suivante :

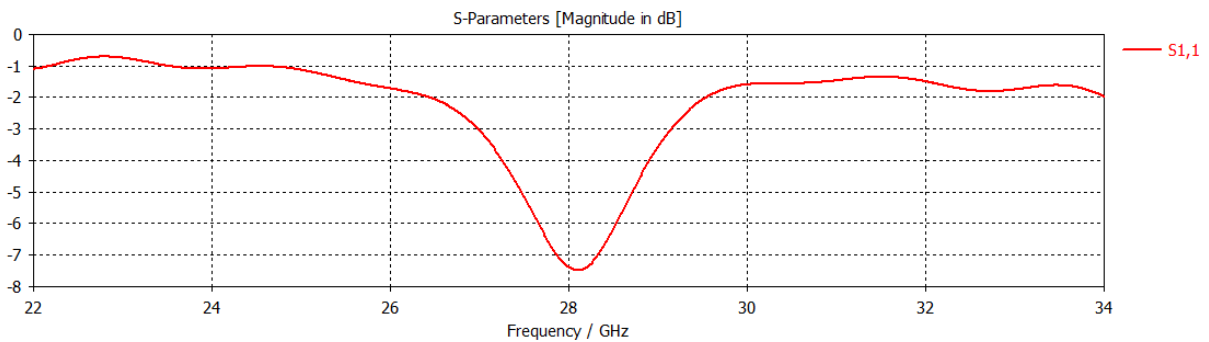
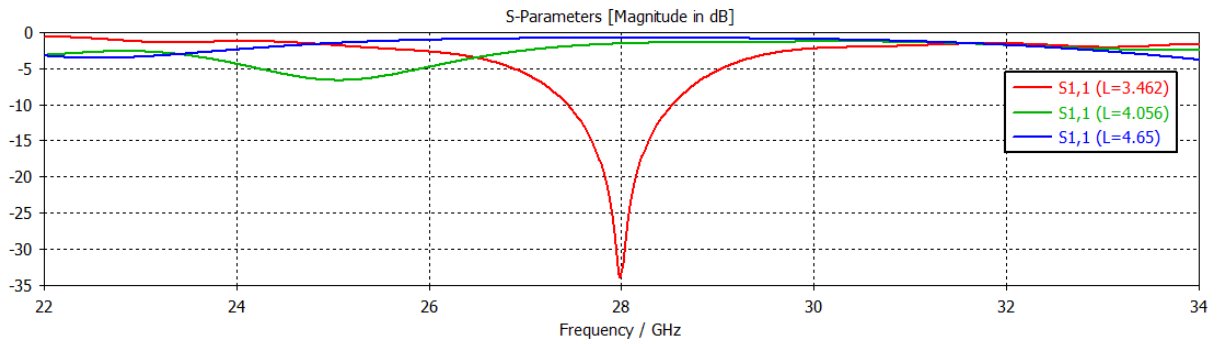


Figure III.19 : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale avec des encoches.

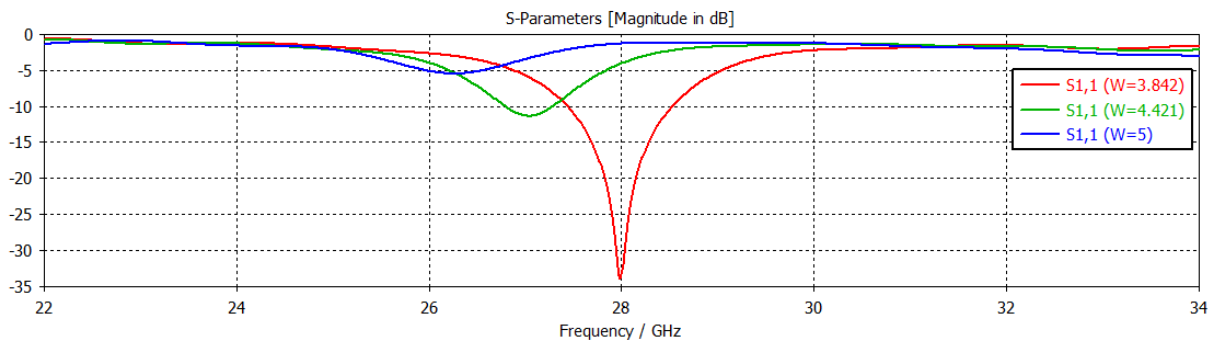
III.6.3. Etude paramétrique

L'antenne décrite précédemment a été utilisée pour réaliser l'étude paramétrique. Quelques paramètres essentiels vont être modifiés afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne à la fréquence désirée.

III.6.3.1. Variation de dimensions du patch et des encoches



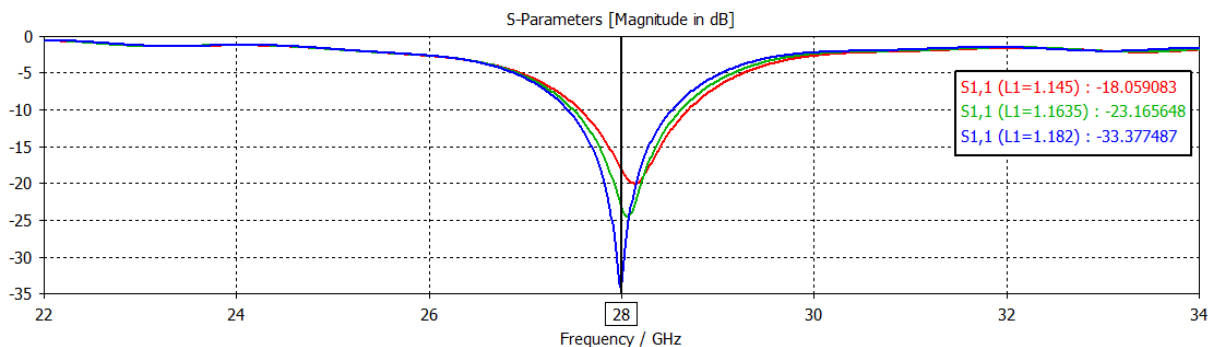
(a)



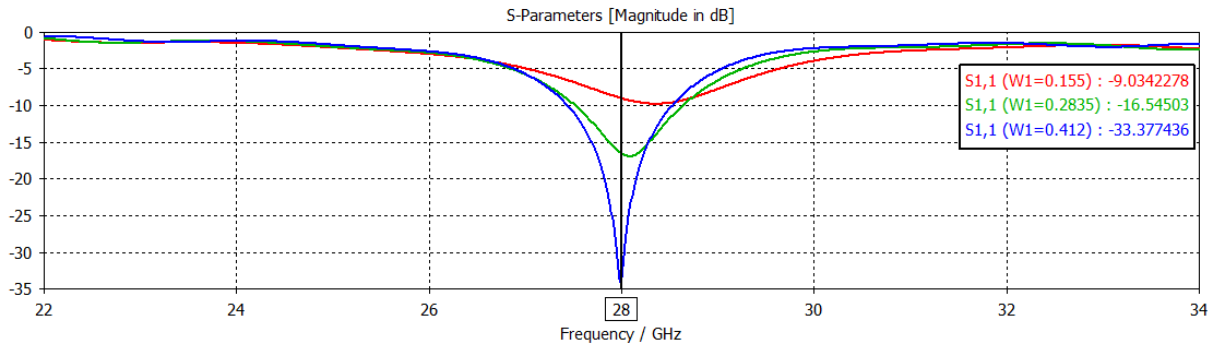
(b)

Figure III.20: (a): Coefficient de réflexion après la variation de la longueur du patch « L ». (b): Coefficient de réflexion après la variation de la largeur du patch « W ».

D'après les résultats des études paramétriques, nous voyons clairement que l'antenne initiale est bien adaptée en changeant la longueur et la largeur du patch. Nous remarquons une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour $L = 3.462 \text{ mm}$ et $W = 3.842 \text{ mm}$, avec une autre variation de la longueur $L1$ et la largeur $W1$ des encoches comme le montre les figure(III.21) suivante et qui confirme l'impact des encoches sur le coefficient de réflexion S_{11} .



(a)



(b)

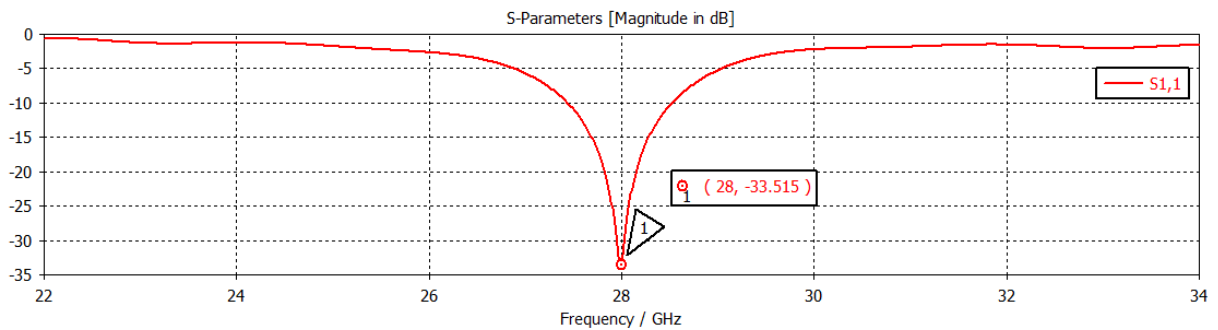
Figure III.21: (a): Variation de la longueur L1 des encoches.

(b) : Variation de la largeur W1 des encoches.

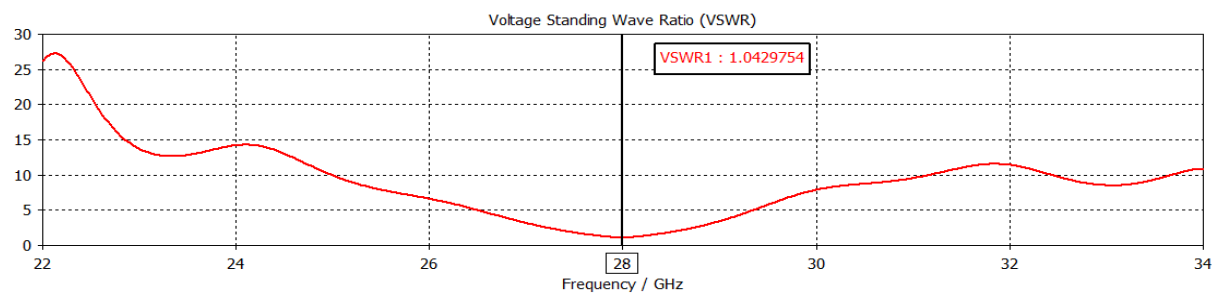
Nous observons que le coefficient de réflexion S_{11} est égale à -33.37 dB à la fréquence de résonance 28 GHz. Donc la variation de ces paramètres présente une bonne adaptation de l'antenne initiale avec encoches à la fréquence désirée.

II.6.3.2. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne initiale

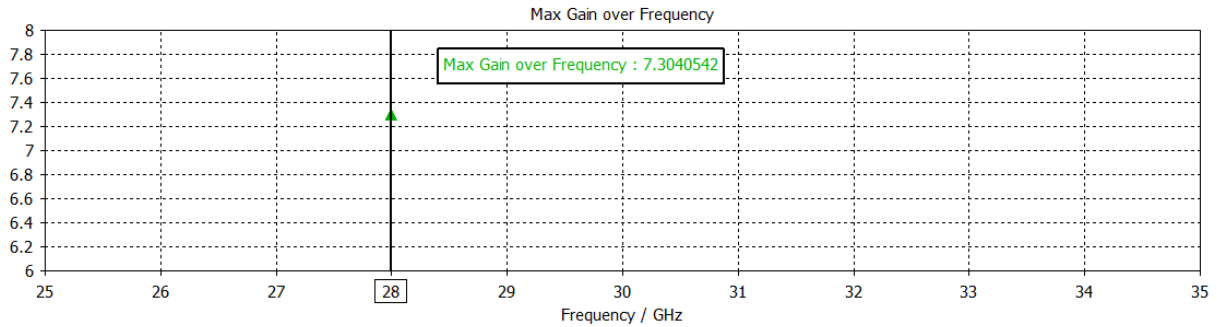
Sur les figures (III.22) ((a), (b) et (c)) on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR et le gain de l'antenne initiale. .



(a)



(b)



(c)

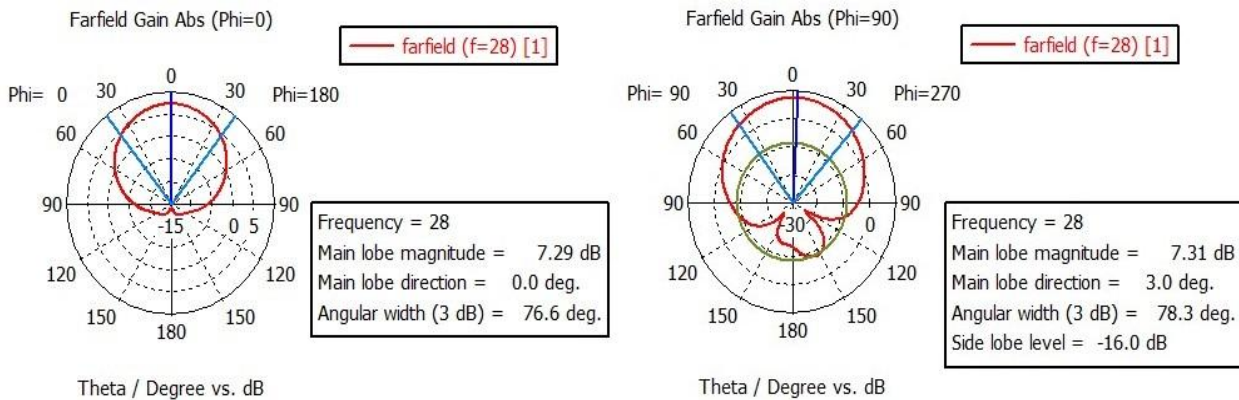
Figure III.22: (a): Coefficient de réflexion.

(b): Rapport d'onde stationnaire.

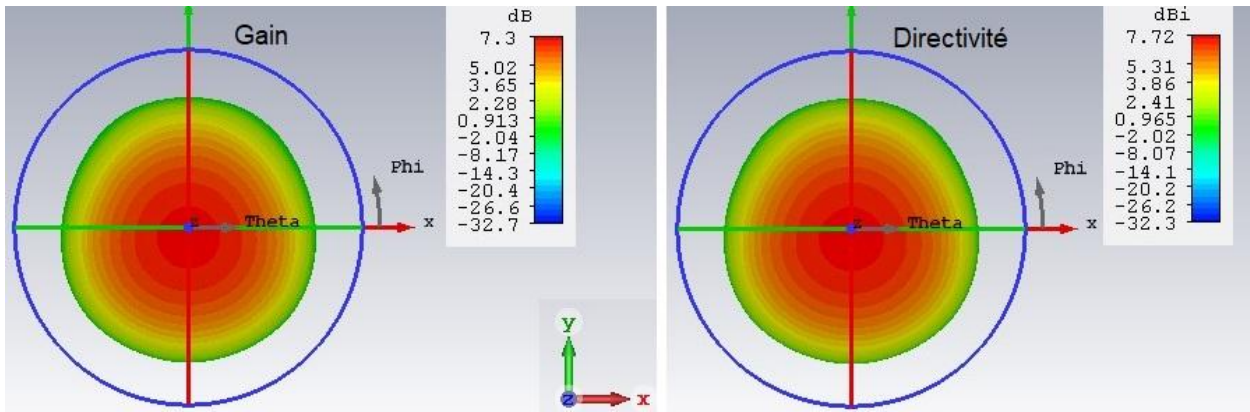
(c): Gain maximal de l'antenne.

On peut voir que l'adaptation est bien réalisée à la fréquence de résonance 28GHz avec un pic de coefficient de réflexion égal à -34.48Db. Nous avons également mesuré le rapport d'onde stationnaire (VSWR), il est égal à 1.04 et le gain maximal de l'antenne égal à 7.30 dB. Ceci traduit alors une adaptation parfaite à la fréquence choisie.

Sur les figures III.23.(a) et (b), on représente respectivement les diagrammes de rayonnements en 2D et en 3D de l'antenne à la fréquence de résonance 28GHz.



(a)



(b)

Figure III.23: (a):Diagramme de rayonnement en 2D de gain (Plan E et H)

(b):Diagramme de rayonnement 3D.

D'après la figure (III.23) l'antenne a un diagramme de rayonnement directif et acceptable dans les deux plans E ($\varphi = 0^\circ$) et H ($\varphi = 90^\circ$) Ces tracés sont vérifiés sur le tracé du diagramme de rayonnement en 3D. Ce lobe de rayonnement 3D contenant le maximum d'énergie et de direction maximal de rayonnement, la directivité égale à 7.72dBi et le gain égale à 7.3dB.

L'efficacité de rayonnement est donnée par le rapport gain sur directivité, dans notre cas nous avons obtenu une efficacité égale à 94.55%.

III.7. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédente

Nous avons inséré des fentes de forme rectangulaire sur l'élément rayonnant de l'antenne patch initiale adaptée à la fréquence de résonance 28GHz. La structure de cette antenne sur le rédacteur du CST MICROWAVE STUDIO est donnée par la figure (III.24)

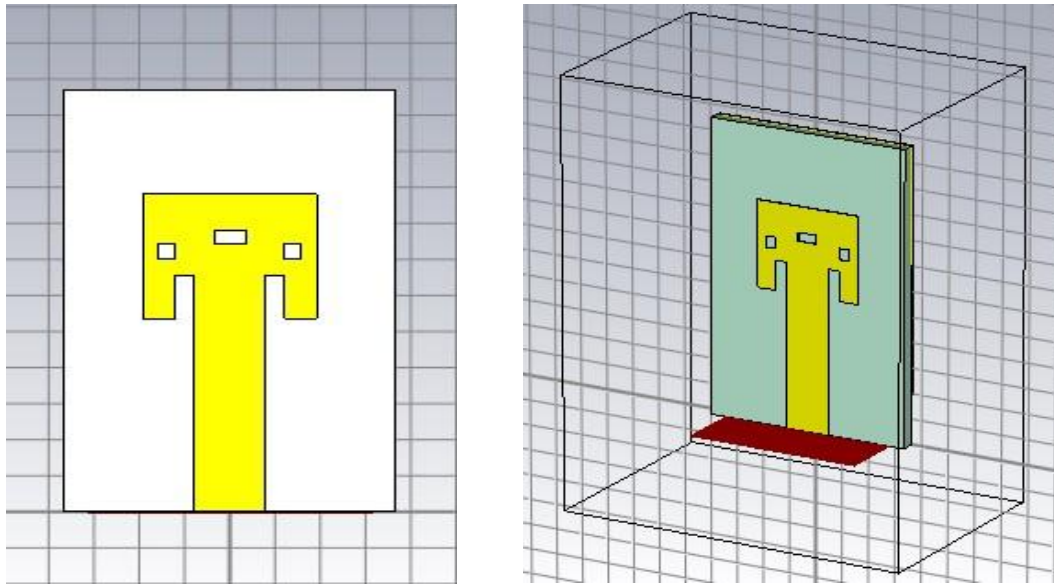


Figure III.24: Géométrie de l'antenne modifiée avec un substrat de type Rogers 5880.

Sur la figure III.25, on représente le coefficient de réflexion de l'antenne modifiée avant l'étude paramétrique.

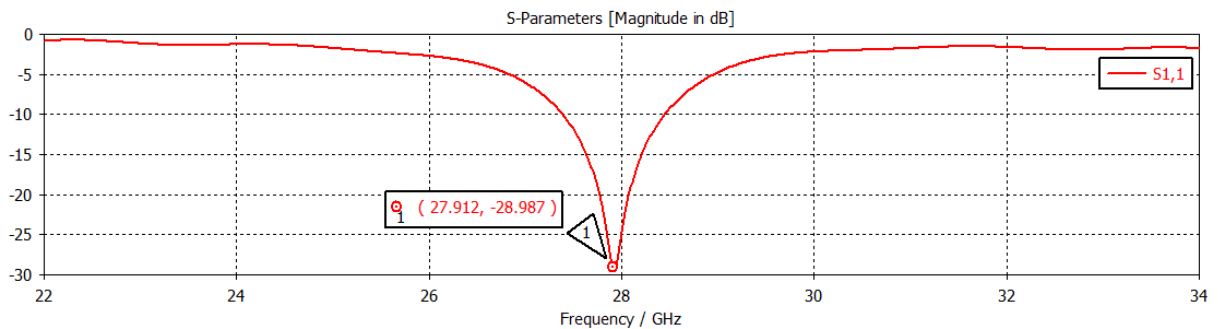


Figure III.25: Le Coefficient de réflexion.

III.7.1. Variation de la largeur W1 des encoches

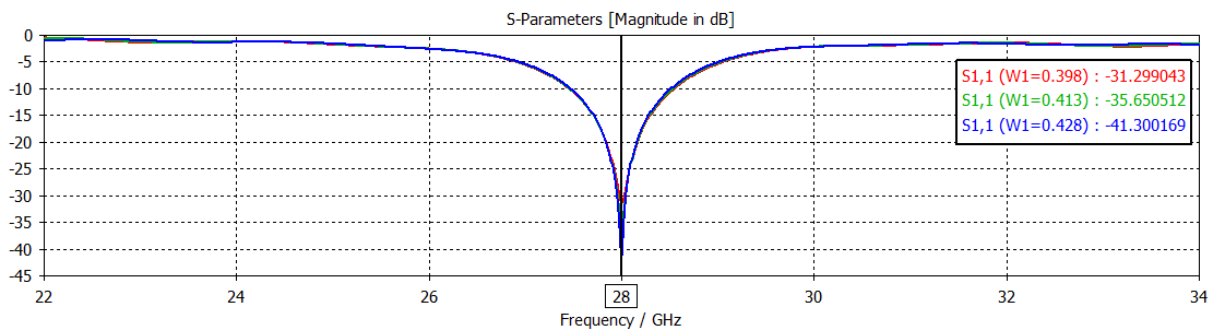


Figure III.26: Variation de la largeur W1 des encoches de l'antenne modifiée.

III.7.2. Variation de la longueur L du patch

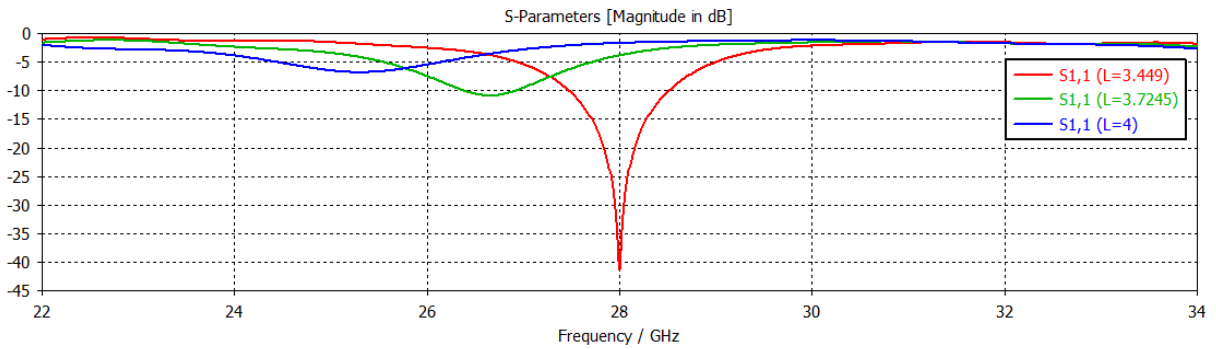
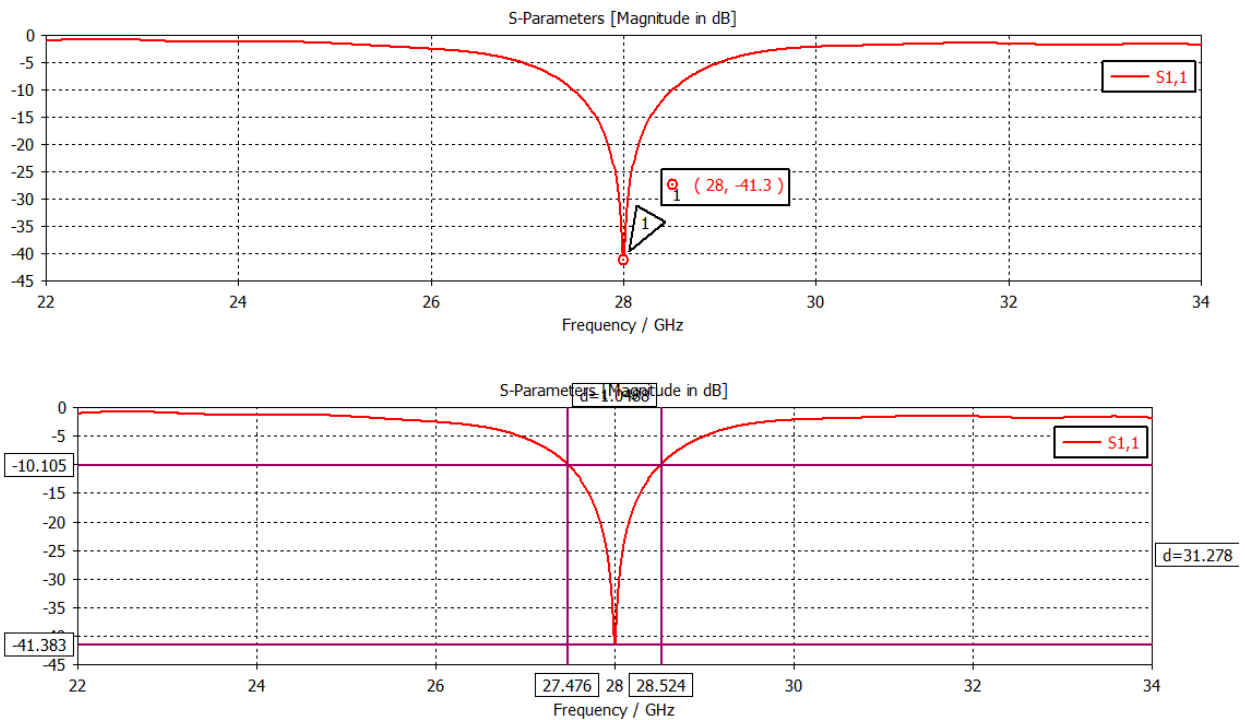


Figure III.27: Variation de la longueur L du patch de l'antenne modifiée.

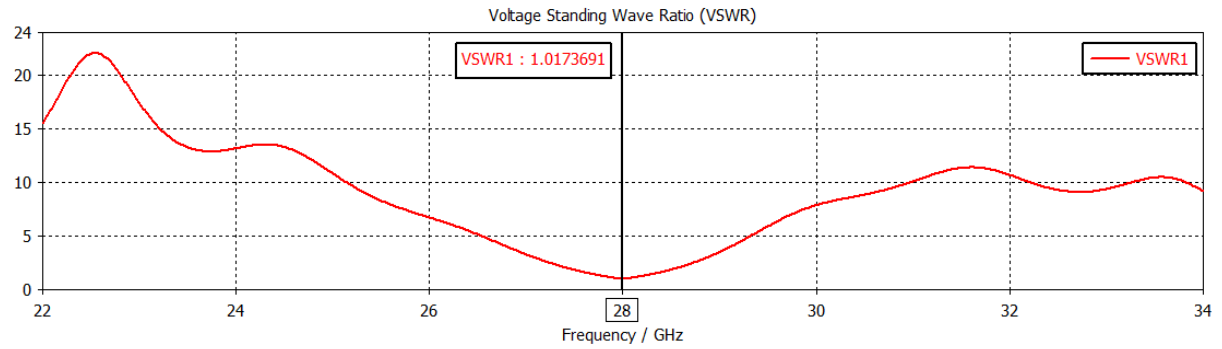
A la base des résultats trouvés au-dessus, nous pouvons sélectionner la meilleure adaptation de l'antenne patch modifiée.

III.7.3. Résultats après l'étude paramétrique de l'antenne proposée

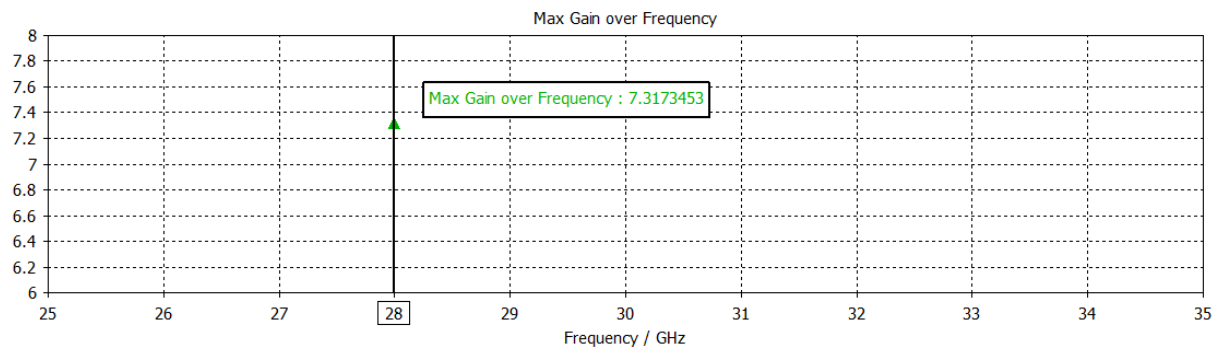
Sur les figures suivantes, on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire, le gain maximal et l'impédance d'entrée après l'étude paramétrique de l'antenne proposée.



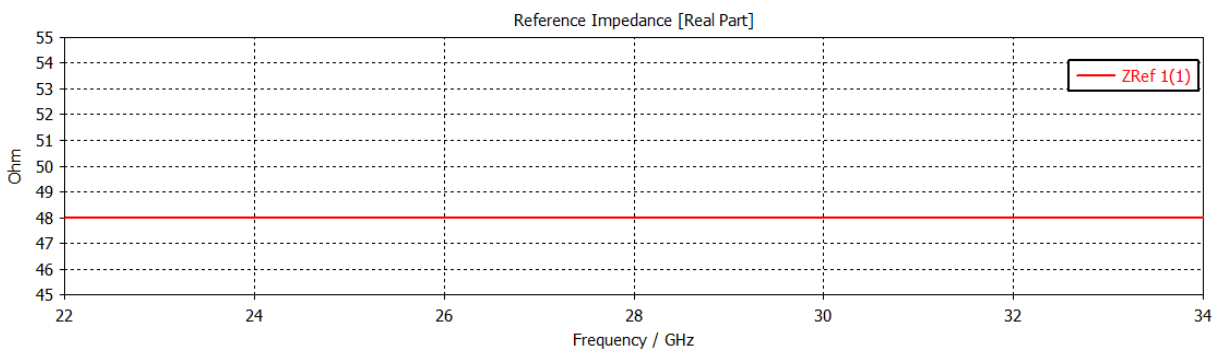
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.28: (a) : Coefficient de réflexion

(b) : Rapport d'onde stationnaire.

(c) : Gain maximal de l'antenne.

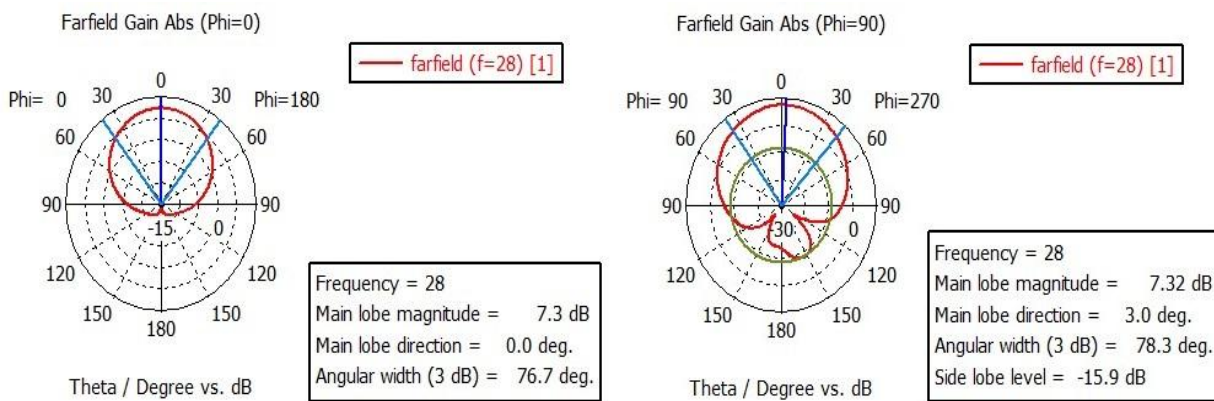
(d) : Partie réel de l'impédance d'entrée.

La figure III.28. (a) montre que l'adaptation est bien réalisée puisque le coefficient de réflexion S_{11} atteint un niveau proche de -41 dB à la fréquence de résonance 28 GHz. La largeur de la bande passante est égale à 1.048 GHz.

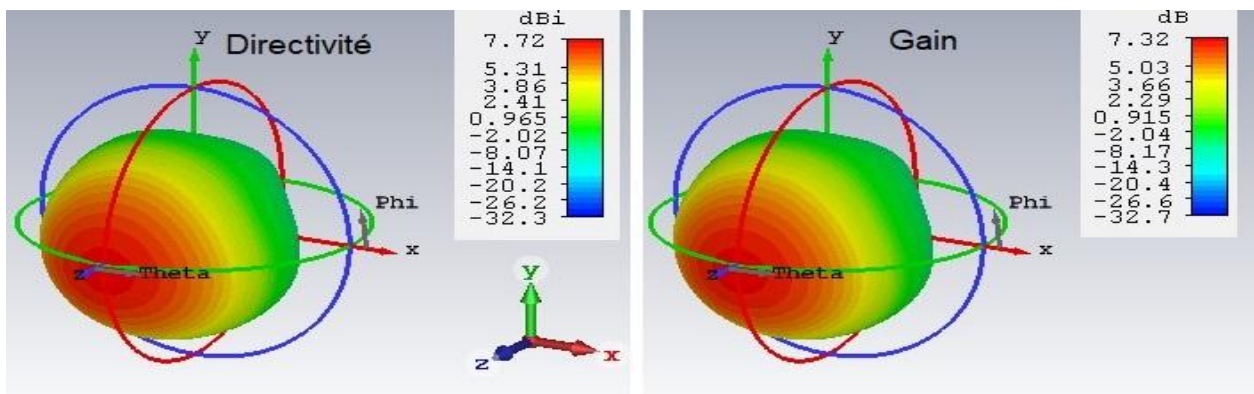
La courbe du rapport d'onde stationnaire simulé est montrée dans la figure III.28. (b) de valeur 1.0173691 qui est inférieur à 2, ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation.

Sur la figure III.28. (C), le gain maximal égal à 7.31 dB ceci explique une bonne adaptation à la fréquence désirée. De même, la représentation sur la dernière figure de la partie réelle de l'impédance d'entrée est autour de 48 Ω (≈ 50Ω), ce qui montre une très bonne adaptation de l'antenne proposée.

Les figures III.19 ci-dessous représentent les diagrammes de rayonnements en 2D et en 3D de l'antenne patch modifiée.



(a)



(b)

Figure III.29: (a): Diagramme de rayonnement en 2D (Plan E et H).

(b):Diagramme de rayonnement 3D.

Nous remarquons que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans les deux plans E et H qui sont vérifiés sur le tracé de rayonnement en 3D avec une valeur maximale du gain qui est autour de 7.32dB et une directivité de 7.72dBi, ce qui implique une efficacité de 94.82%.

III.8. Réseau d'antenne à deux éléments (à la base de l'antenne modifiée)

La structure du réseau d'antennes à deux éléments est représentée sur la figure III.30 :

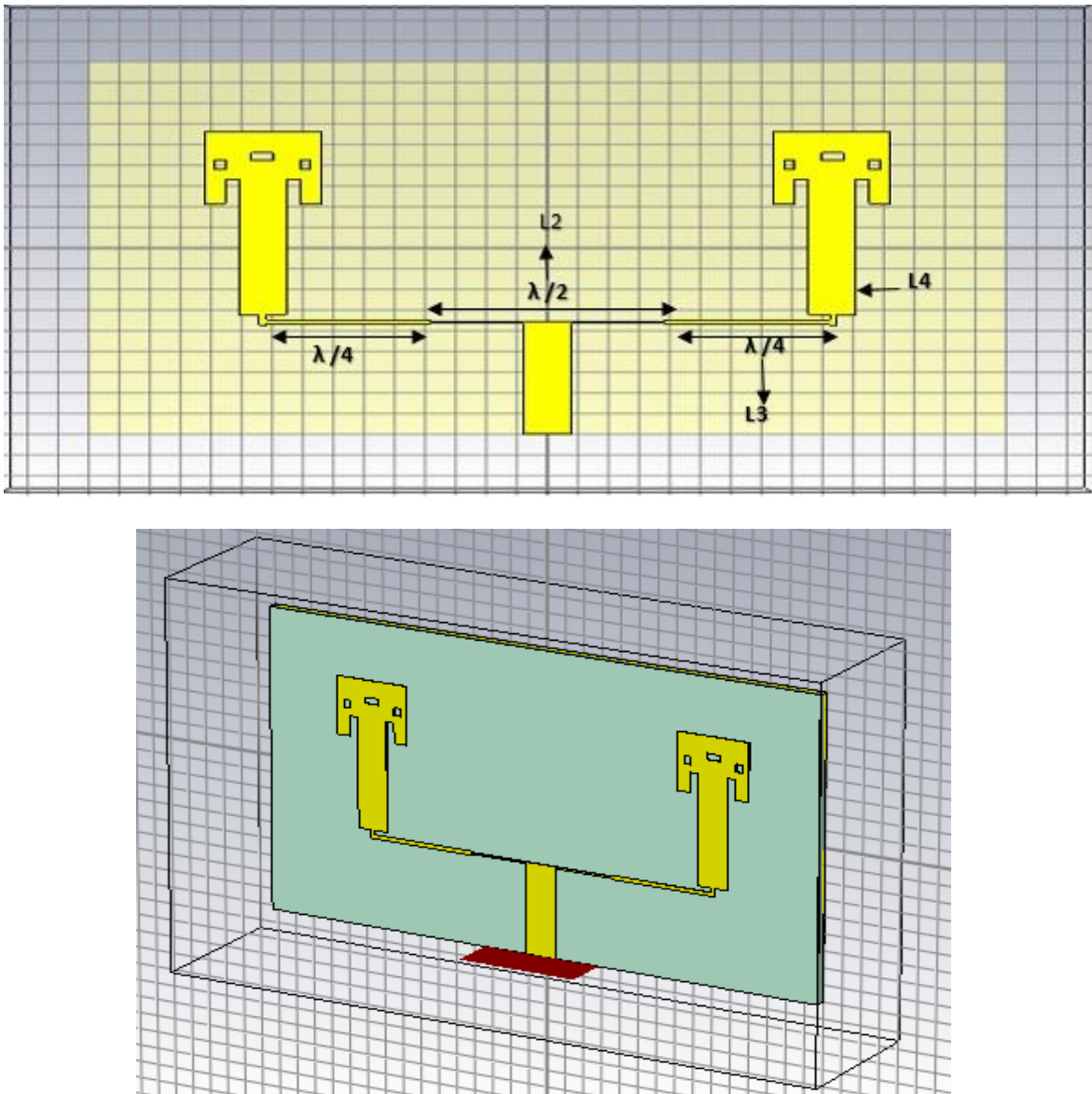


Figure III.30: Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments.

Pour le réseau d'antenne à deux éléments, Nous avons appliqué la même méthode des calculs du diviseur à deux éléments précédents sauf que le substrat est différent. Nous avons utilisé une ligne micro-ruban de longueur $L2 = \lambda/2$ (d'impédance caractéristique 100Ω .)

Dans le tableau III.5, on donne une comparaison entre les nouvelles dimensions de la jonction T calculées par la formule (III.3) précédente et par le logiciel CST MICROWAVE STUDIO.

Impédance caractéristique (Ω)	Largeur de la jonction T (mm)	
	Résultats théorique	Résultats du CST
50	1.3958	1.578
100	0.4146	0.11023
70.7	0.274	0.23467

Tableau III.5: Les dimensions de la jonction T.

Le coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments est représenté sur la figure (III.31) suivante :

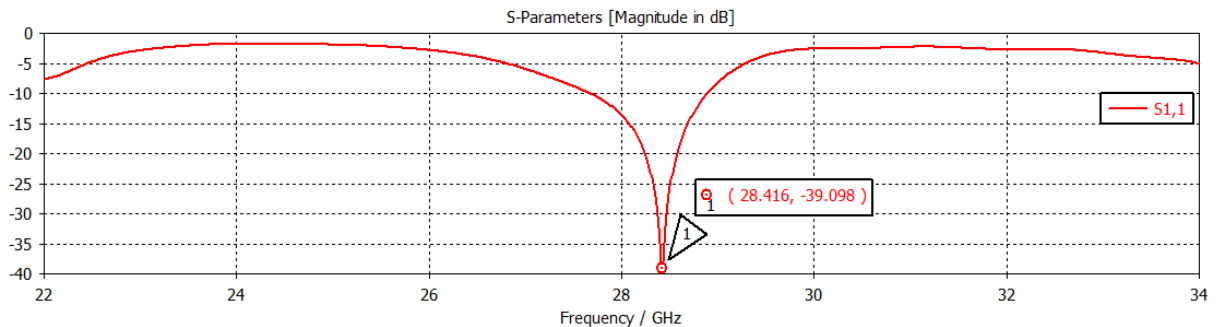


Figure III.31: Coefficient de réflexion du réseau d'antenne à 2 éléments.

Pour améliorer l'adaptation nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions du réseau d'antennes à deux éléments proposés.

III.8.1. Variation de la longueur L2 de la jonction T

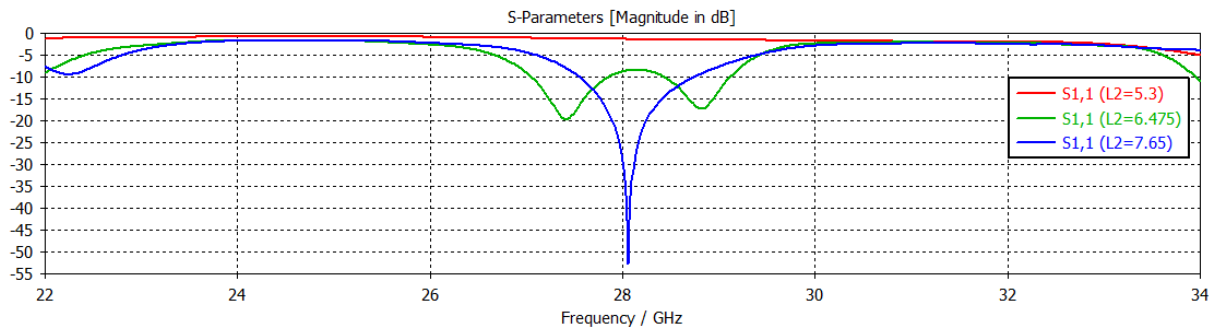


Figure III.32: Variation de la longueur L2 de la jonction T.

III.8.2. Variation de la longueur L3 de la jonction T

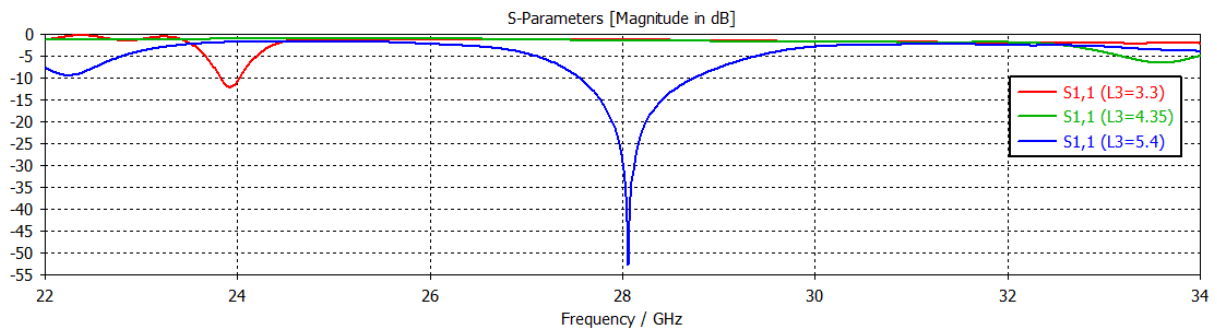


Figure III.33: Variation de la longueur L3 de la jonction T.

D'après les deux graphes (III.32 et III.33) ci-dessus, on remarque une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour $L2 = 7.65\text{mm}$ et $L3 = 5.4\text{mm}$ à la fréquence de résonance 28 GHz.

III.8.3. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antennes à 2 éléments

Sur les figures III.34 ((a), (b) et (c)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR et la partie réelle de l'impédance d'entrée après l'étude paramétrique d'un réseau d'antenne à deux éléments.

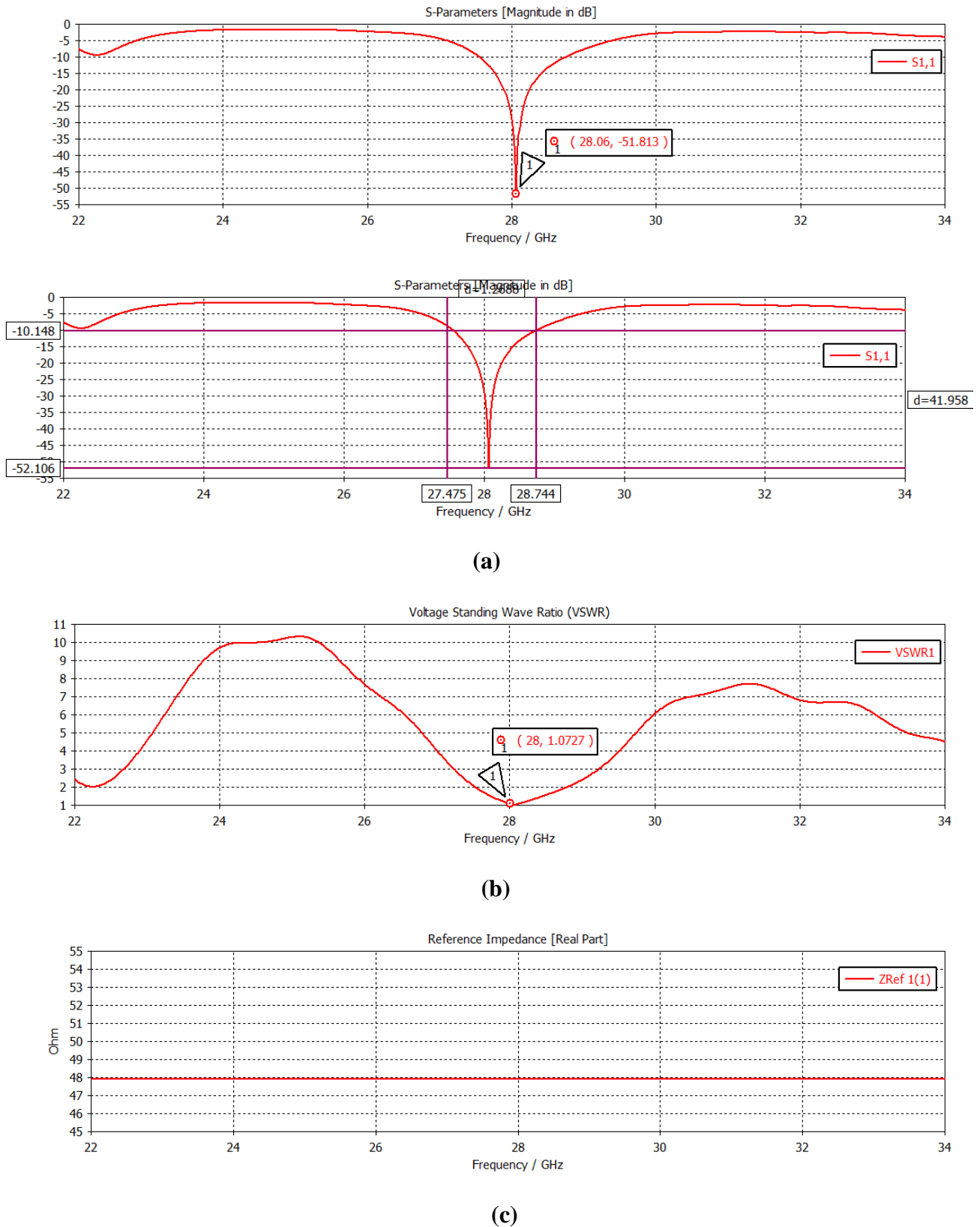
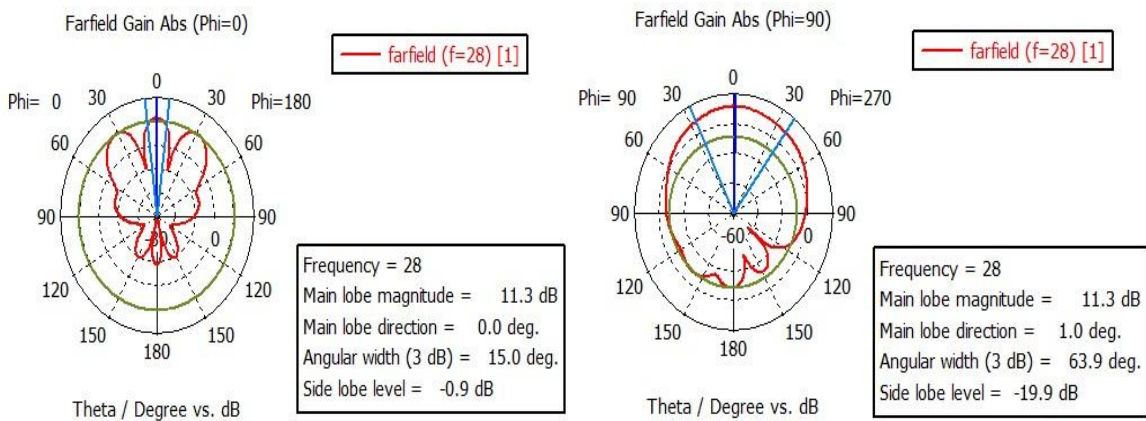


Figure III.34: (a): Coefficient de réflexion.

(b): Rapport d'onde stationnaire.

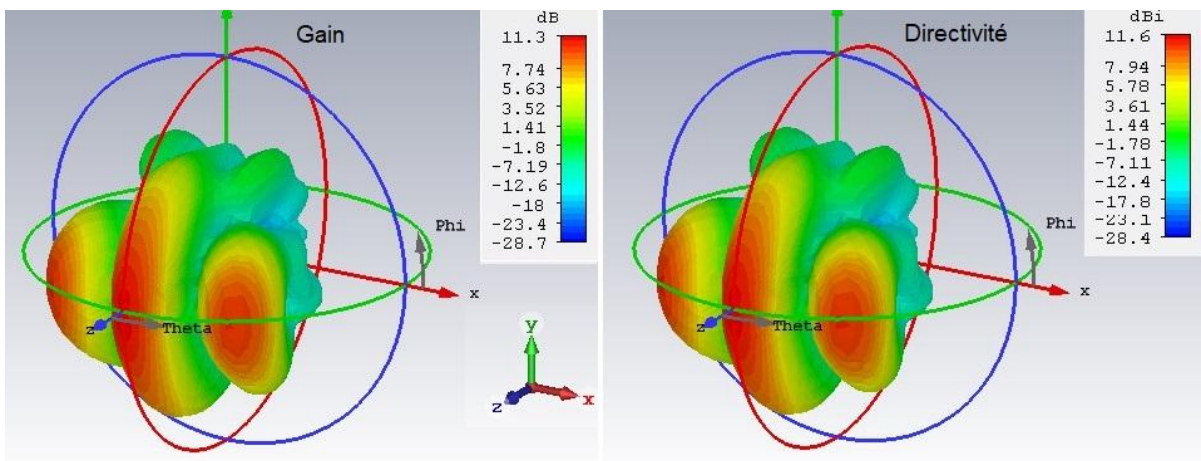
(c): Partie réel de l'impédance d'entrée.

On peut voir que l'adaptation est réalisée à la fréquence de résonance 28GHz avec un coefficient de réflexion de -51.81dB et une bande passante de 1.27GH. Nous avons également mesuré le rapport d'onde stationnaire (VSWR), il est égal à 1.07 et l'impédance d'entrée est autour de 48Ω ($\approx 50\Omega$). Ceci traduit alors une adaptation parfaite à la fréquence choisie.



(a)

(b)



(c)

Figure III.35: (a): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E).

(b): Diagramme de rayonnement en 2D (plan H).

(c): Diagramme de rayonnement 3D.

Les figures au-dessus représentent les diagrammes de rayonnements en 2D et en 3D de l'antenne, Nous remarquons que l'antenne est quasi omnidirectionnelle avec une valeur de gain qui est autour de 11.3dB et une directivité de 11.6dBi, donc l'efficacité est égale à 97.41%.

III.9. Comparaison des résultats obtenus

En terme de coefficient de réflexion l'antenne de substrat Rogers 5880 représente une meilleure adaptation par rapport à l'antenne de substrat FR-4, tel que S_{11} (réseau d'antenne à 2 éléments de Rogers 5880= -51.81 dB) et S_{11} (réseau d'antenne à 2 éléments de FR-4= -27.04 dB), contrairement pour la bande passante, mais en terme de gain et d'efficacité l'antenne patch modifiée et le réseau d'antenne à 2 éléments qui sont déposées sur le substrat Rogers 5880 sont mieux par rapport aux antennes de substrat FR-4, le tableau suivant montre la comparaison entre les deux substrats :

Substrat	Antenne patch modifiée		Réseau d'antenne à 2 éléments	
	FR-4	Rogers 5880	FR-4	Rogers 5880
Coefficient de réflexion (dB)	-28	-41	-27.04	-51.81
Gain (dB)	4.74	7.32	5.02	11.3
Efficacité (%)	62%	94.82%	58.37%	97.41%
Bande passante (GHz)	6.381	1.048	14.33	1.27

Tableau III.6: Comparaison des résultats entre les deux substrats.

III.10. Réseau à quatre éléments 4x1 (à la base du réseau d'antennes à deux éléments de Rogers 5880)

Puisque le substrat Rogers 5880 nous a donné une meilleure adaptation, nous avons conçu un diviseur à quatre éléments avec la même méthode des calculs du diviseur à deux éléments. Nous avons utilisé une ligne micro-ruban de longueur $L5 = 3\lambda/2$ d'impédance caractéristique 100Ω , car si nous utilisons $\lambda/2$ ou λ , il y aura un chevauchement entre les antennes.

Sur la figure III.36, on représente la structure du réseau d'antennes à quatre éléments.

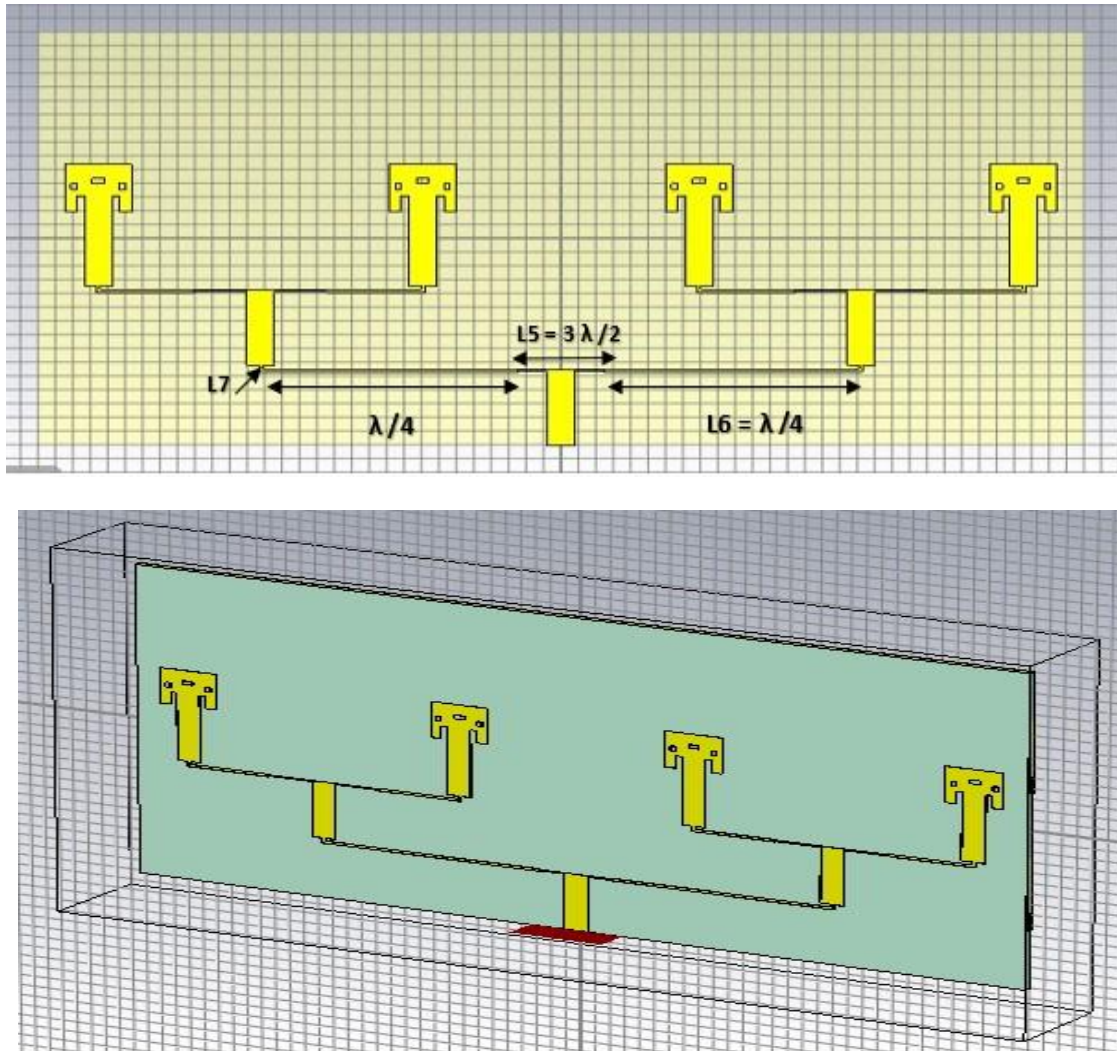


Figure III.36: Géométrie du réseau d'antennes à quatre éléments.

Sur la figure III.37, on représente le coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments.

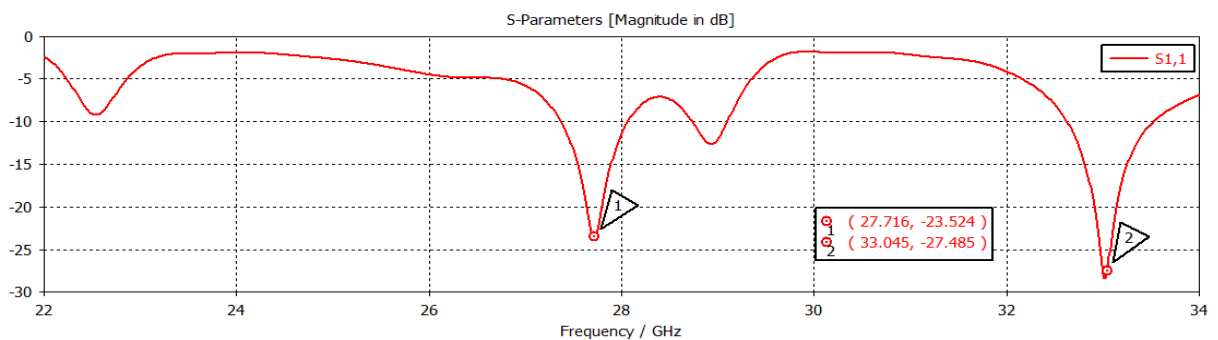
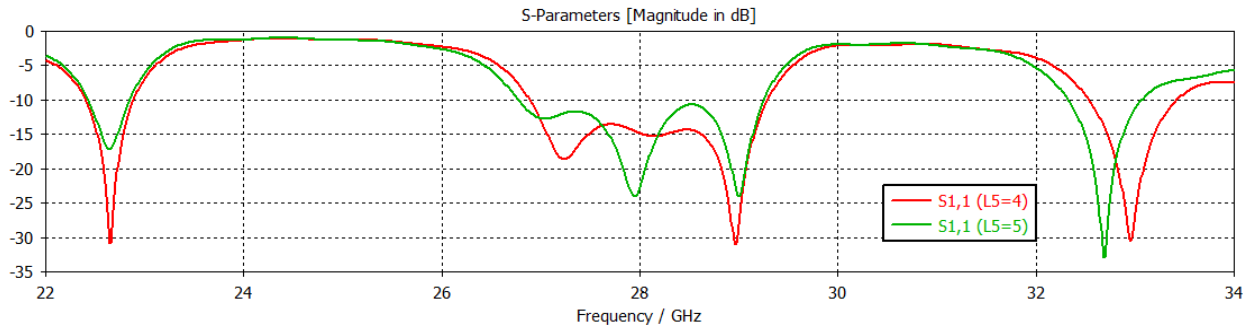


Figure III.37: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments.

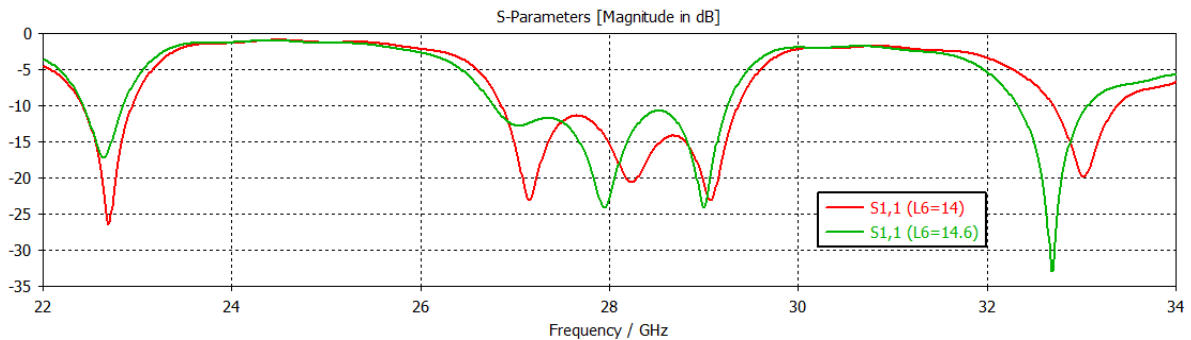
Nous n'observons aucune adaptation au niveau de la fréquence de résonance 28GHz. Par contre, l'adaptation est aux fréquences de résonances 27.716 GHz et 33.045 GHz ce qui donne un

fonctionnement bi-bandes, donc pour améliorer ce résultat, nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions du réseau d'antennes à quatre éléments.

III.10.1. Variation de la longueur L_5 et L_6 du diviseur de puissance



(a)



(b)

Figure III.38: (a): Variation de la longueur L_5 du diviseur de puissance.

(b): Variation de la longueur L_6 du diviseur de puissance.

D'après les deux graphes ci-dessus, on remarque une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour $L_5 = 5\text{mm}$ et $L_6 = 14.6\text{mm}$ à la fréquence de résonance 28 GHz.

III.10.2. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antenne à quatre éléments

Sur les figures III.39. ((a), (b), et (c)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR et le gain de l'antenne après l'étude paramétrique du réseau d'antenne proposée.

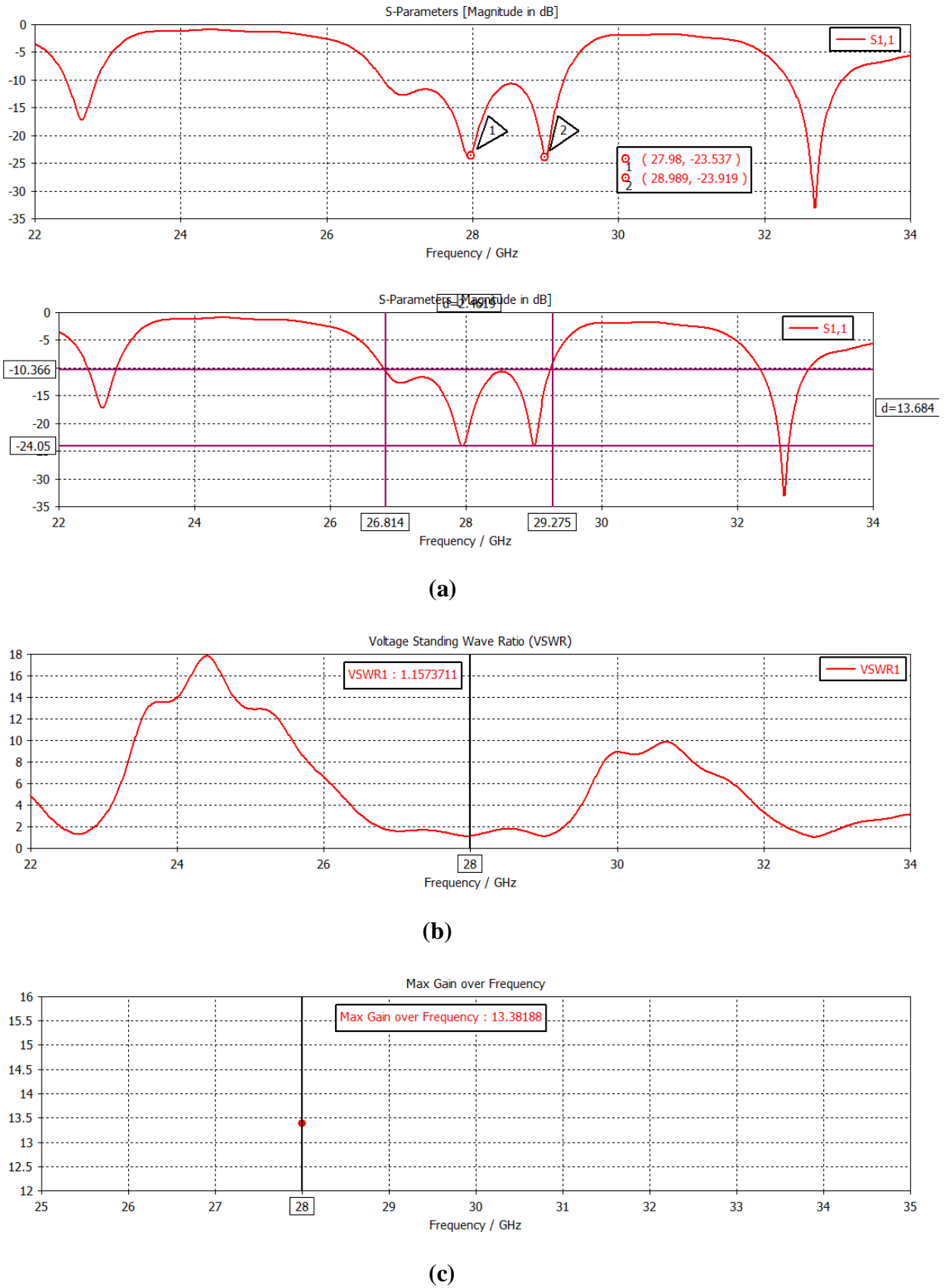
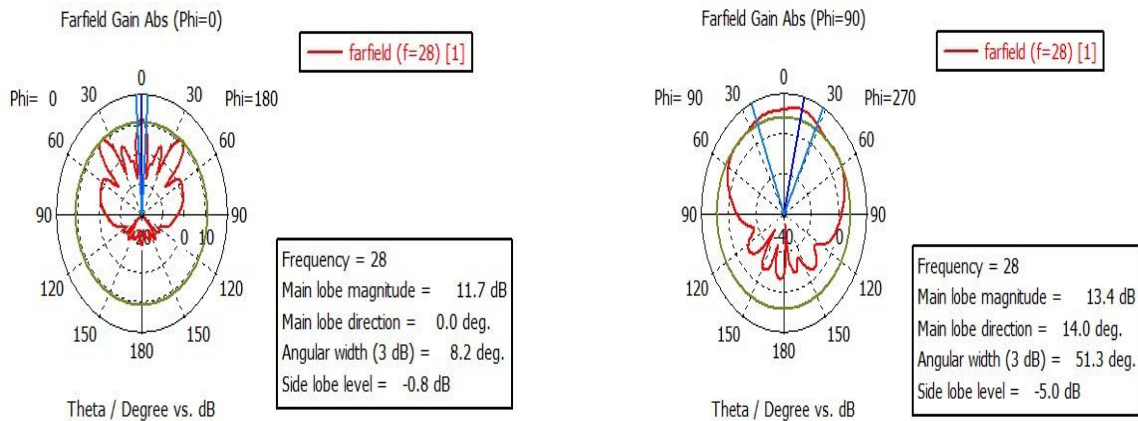


Figure III.39: (a):Coefficient de réflexion. (b):Rapport d'onde stationnaire. (c): Gain maximal de l'antenne.

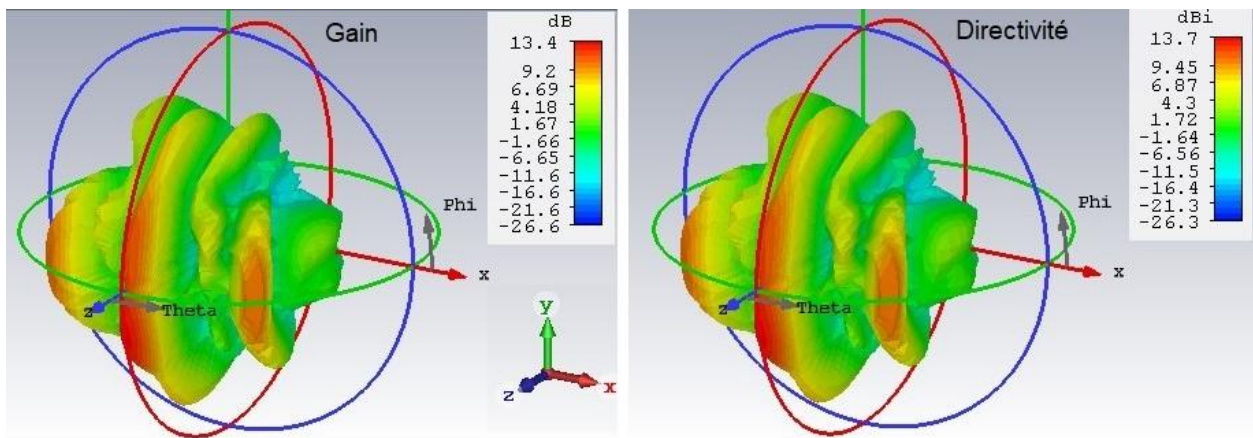
D'après les résultats obtenus, nous avons une adaptation favorable à la fréquence de résonance 28 GHz avec un coefficient de réflexion S_{11} égal à -23.54dB. La bande passante est égale à 2.5GHz, ce qui donne un fonctionnement ULB de l'antenne. Le gain maximal est égal à 13.38 dB à la fréquence de résonance choisie.

Sur les figures suivantes, on représente les diagrammes de rayonnements en 2D et en 3D du réseau d'antennes à quatre éléments à la fréquence de résonance 28GHz.



(a)

(b)



(c)

Figure III.40: (a): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E).

(b): Diagramme de rayonnement en 2D (plan H).

(c): Diagramme de rayonnement 3D

On remarque que l'antenne présente un rayonnement quasi omnidirectionnel dans les deux plans (E et H). Le tracé en 3D donne une bonne exploration du diagramme de rayonnement.

Le gain de l'antenne est autour de 13.4dB, ce qui donne une efficacité qui est égale à 97.81% ($\approx 98\%$).

III.11. Réseau à huit éléments 8x1 (à la base du réseau d'antennes à quatre éléments)

Pour le réseau d'antenne à 8 éléments, on a calculé les lignes d'alimentation du diviseur avec le même principe que de réseaux de 4 et 2 éléments. La figure III.41, présente la structure du réseau d'antenne à huit éléments.

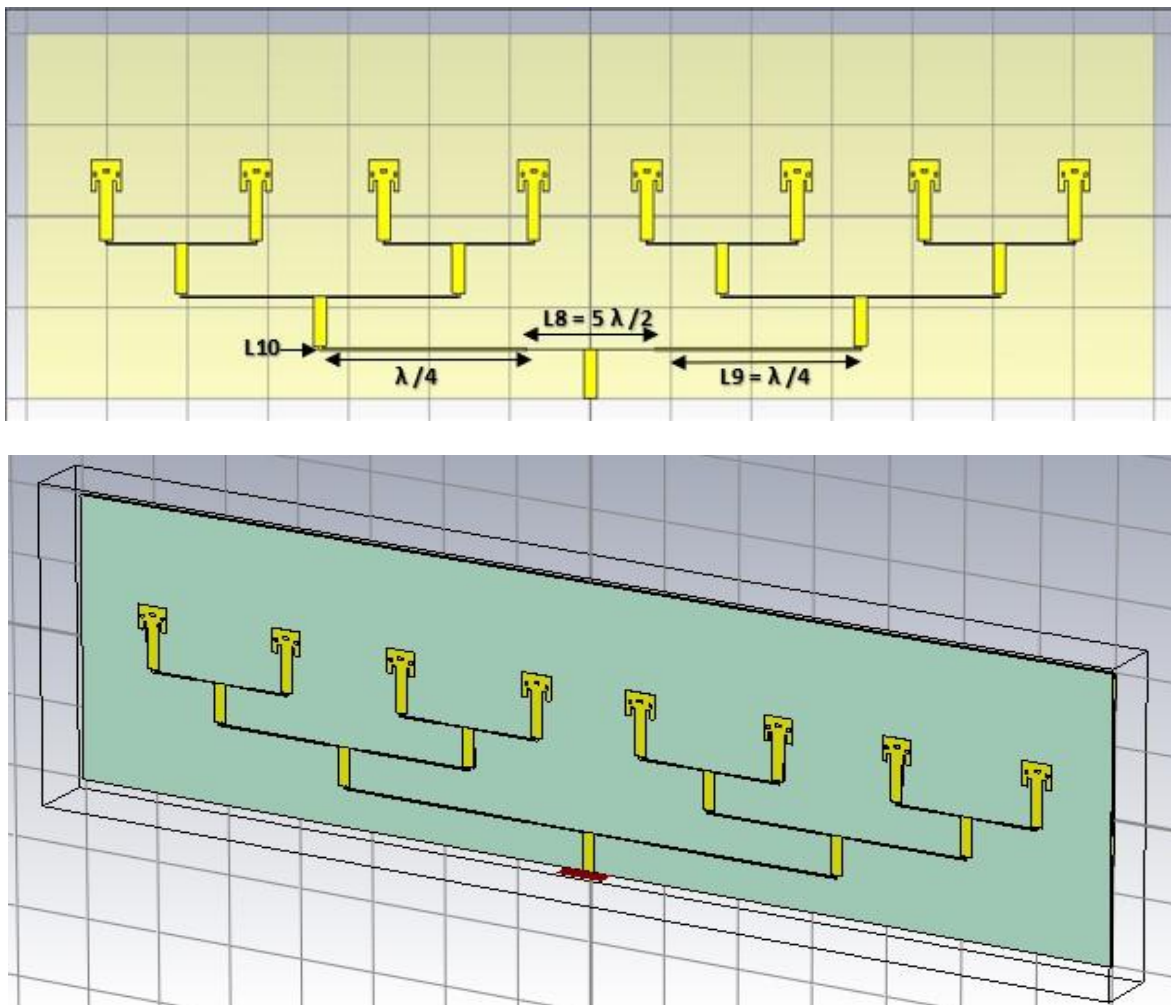


Figure III.41: Géométrie du réseau d'antennes à huit éléments

Sur la figure III.42, on représente le coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments.

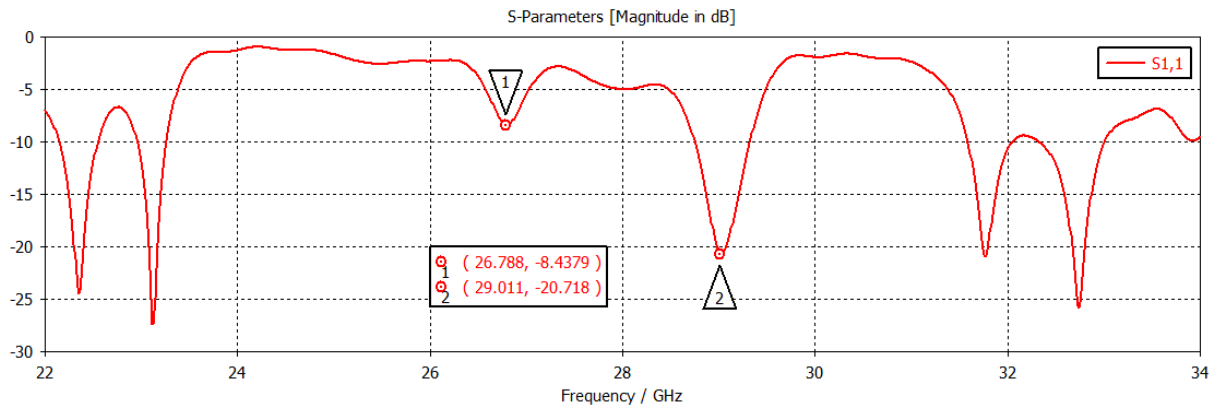
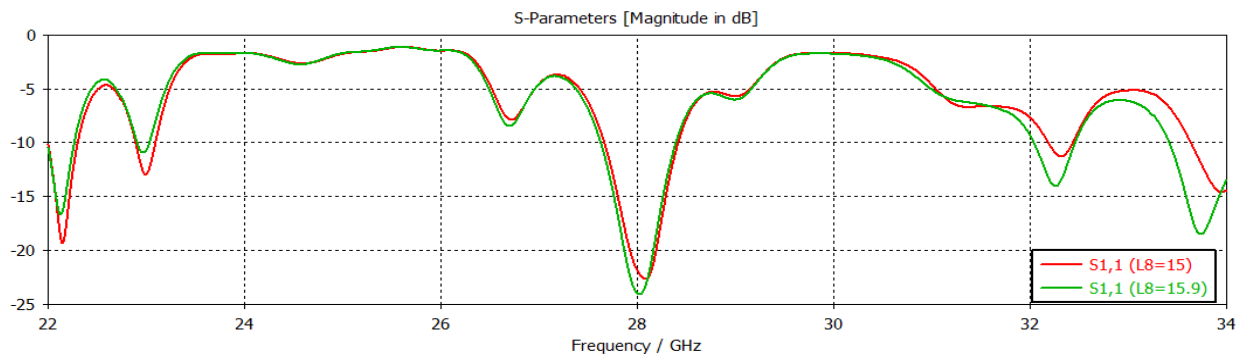


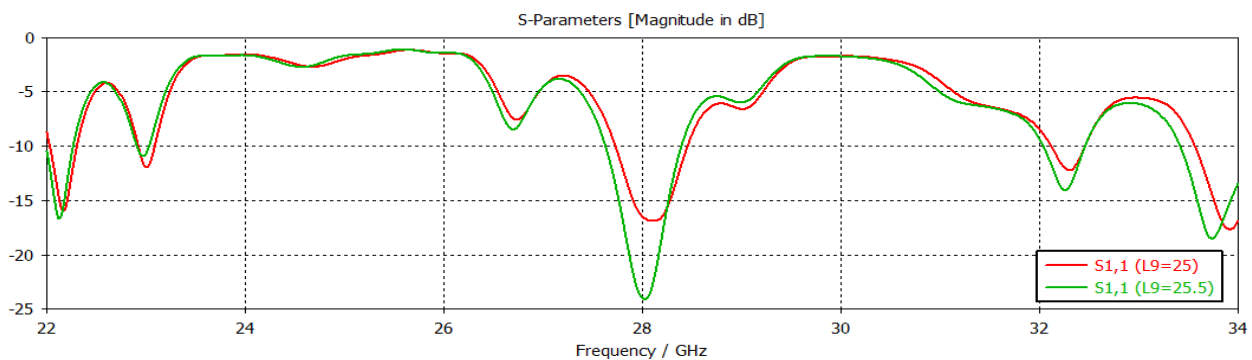
Figure III.42: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à 8 éléments.

D'après la figure précédente, nous remarquons une adaptation aux plusieurs fréquences de résonances, mais au niveau de la fréquence de résonance 28 GHz, il y n'a aucune adaptation. Pour cela, nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions L8 et L9 du diviseur de puissance.

III.11.1. Variation de la longueur L8 et L9 du diviseur de puissance



(a)



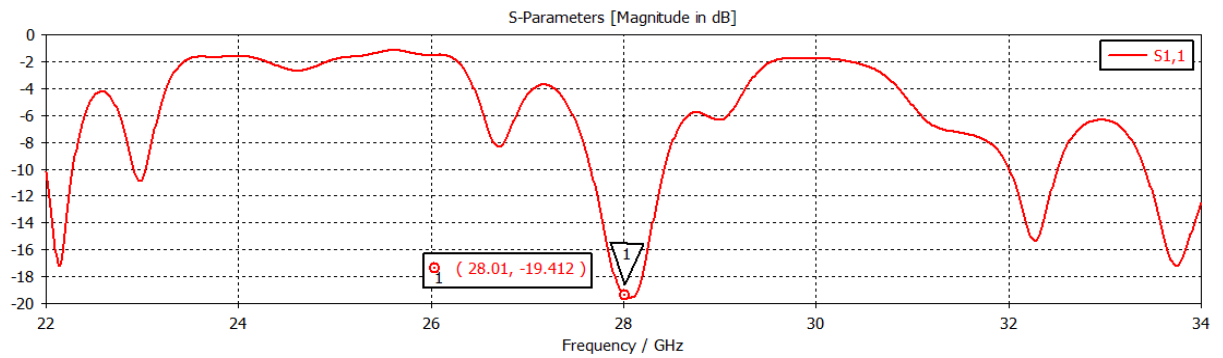
(b)

Figure III.43: (a): Variation de la longueur L8 du diviseur de puissance. (b): Variation de la longueur L9 du diviseur de puissance

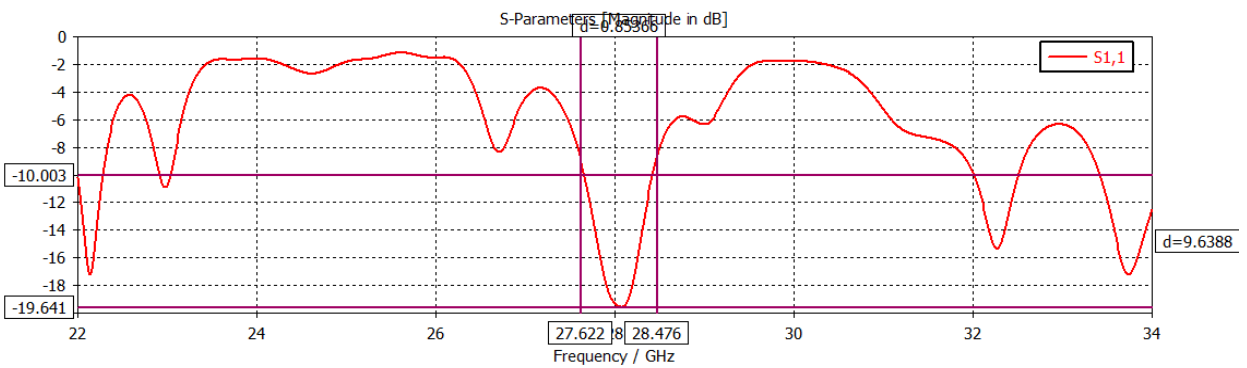
D'après les deux graphes ci-dessus, on remarque une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour $L8 = 15.9$ et $L9 = 25.5$ à la fréquence désirée.

III.11.2. Résultats après l'étude paramétrique d'un réseau d'antenne à huit éléments

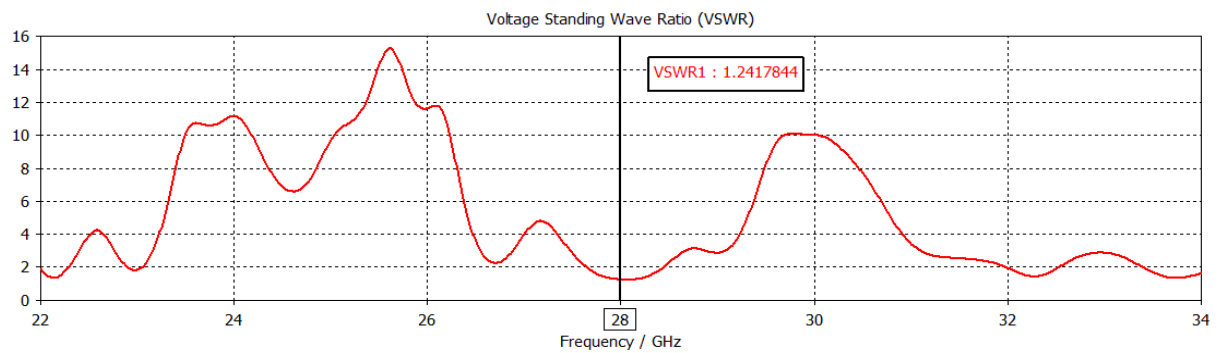
Sur les figures III.44. ((a), (b), et (c)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire VSWR et le gain de l'antenne après l'étude paramétrique du réseau d'antennes proposé avec un substrat de type Rogers 5880.

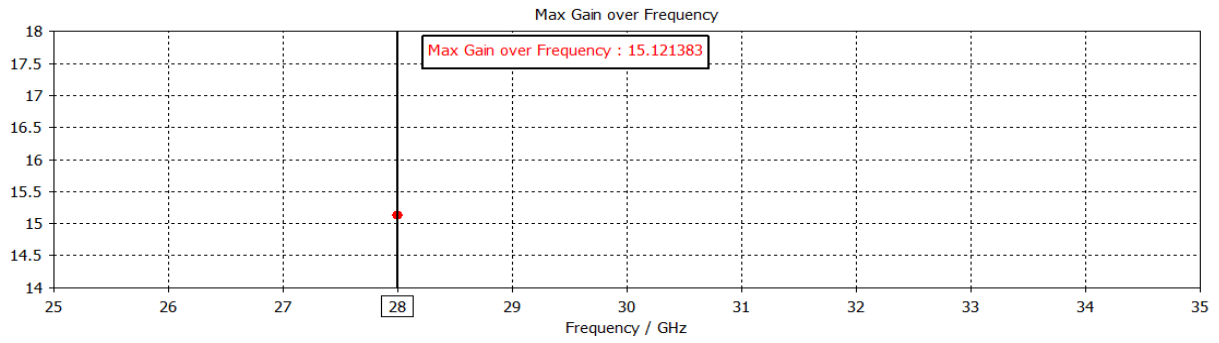


(a)



(b)





(c)

Figure III.44: (a): Coefficient de réflexion. (b): Rapport d'onde stationnaire. (c): Gain maximal de l'antenne.

D'après les résultats obtenus, nous avons une adaptation à la fréquence de résonance 28 GHz avec un coefficient de réflexion S_{11} égale à -19.41dB . La bande passante est égale à 0.9 GHz et le gain maximal est égal à 15.12 dB à la fréquence choisie.

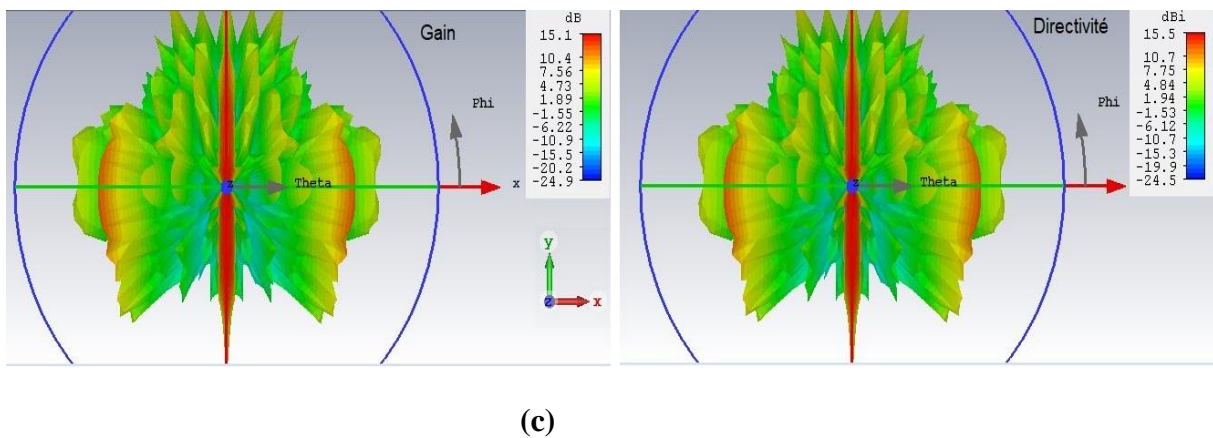
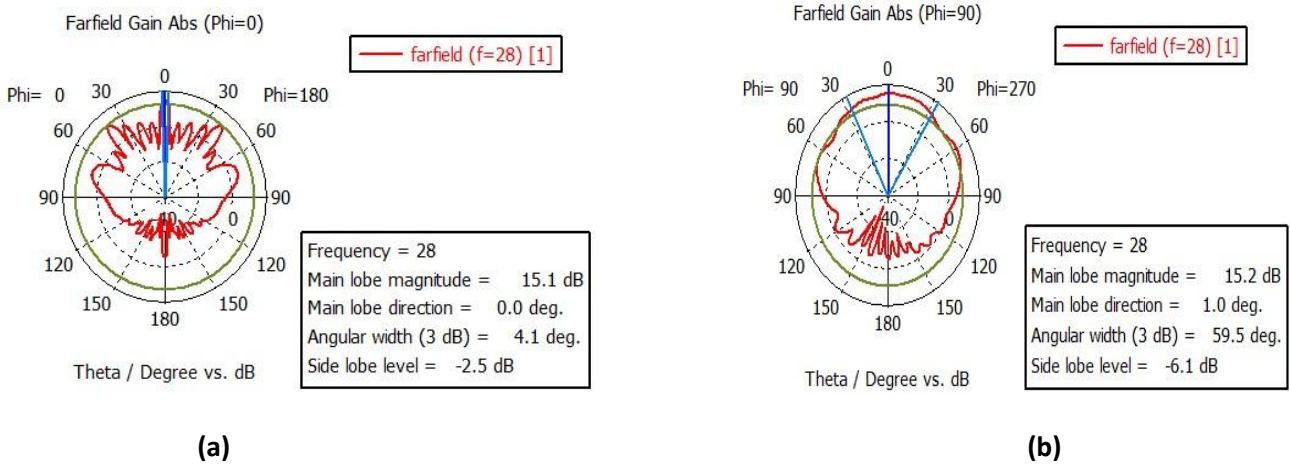


Figure III.45: (a): Diagramme de rayonnement en 2D (plan E) (b): Diagramme de rayonnement en 2D (plan H). (c): Diagramme de rayonnement 3D.

Les figures au-dessus représentent les diagrammes de rayonnements en 2D et en 3D du réseau d'antennes à huit éléments, Nous observons que le diagramme de rayonnement est presque quasi omnidirectionnel avec une valeur de gain qui est autour de 15.2dB et une directivité de 15.5dBi, donc l'efficacité est égale à 98%.

III.12. Comparaison des résultats obtenus

Le tableau (III.7) suivant montre la comparaison entre les antennes proposées de substrat Rogers 5880 :

	Antenne patch modifiée	Réseau à 2 éléments	Réseau à 4 éléments	Réseau à 8 éléments
Coefficient de réflexion(dB)	-41	-51.81	-23.54	-19.41
Gain (dB)	7.32	11.3	13.4	15.2
Efficacité (%)	94.82%	97.41%	97.81%	98%
Bande passante (GHz)	1.048	1.27	2.5	0.9

Tableau 1: Comparaison entre les nouvelles structures proposées avec un substrat de type Rogers5880.

III.13. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons traité les différentes étapes pour concevoir deux antennes imprimées rectangulaires alimentées par une ligne microruban avec deux substrats différents de types FR4 et Rogers 5880, qui résonnent à la fréquence de résonance 28GHz (5G). Dans le but de réaliser ces antennes, en faisant plusieurs simulations sous CST MWS, tout d'abord nous avons commencé par la conception des antennes initiales en fonction des calculs théoriques des paramètres de l'antenne patch (**Chapitre I, Tableau I.2**), où nous avons vu une désadaptation à la fréquence choisie.

Afin d'améliorer l'adaptation des antennes modifiées, nous avons fait des études paramétriques sur les dimensions du patch et les encoches. L'effet positif de cette étude sur l'adaptation est clairement observé en utilisant le logiciel CST MWS. Après cette étude, nous avons conçu des nouvelles structures d'antennes à fentes, puis des réseaux d'antennes à 2 éléments, à 4 éléments et à

8 éléments afin d'améliorer les performances des structures proposées (le gain, la bande passante et l'efficacité). Les résultats obtenus par le simulateur CST MWS peuvent être observés dans les figures et les tableaux présentés précédemment.

Nous avons déterminé une solution qui répondre à l'une des exigences de la 5G qui est le gain le plus élevé, cette solution était la mise en réseau à huit éléments qui sont reliés entre eux par un diviseur de puissance en jonction T à partir de l'antenne patch rectangulaire.

A la fin, l'analyse des résultats indiquent que le réseau proposé à huit éléments à des bonnes performances en termes de la bande passante, le taux d'ondes stationnaires, l'impédance d'entrée et l'efficacité à la fréquence de résonance 28 GHz. Cette analyse montre aussi une amélioration importante du gain de réseau qui répond aux applications 5G.

D'après tout ce que nous avons effectué, nous pouvons conclure que les nouvelles structures de réseaux d'antennes patches sont conçues avec succès.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les applications de ce domaine qui ont attiré plus d'attentions- sont les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil et plus particulièrement les réseaux 5G.

Les travaux qui ont été effectués dans le cadre de ce mémoire sont consacrés à la conception des réseaux d'antennes patches de formes rectangulaires alimentés par les diviseurs de puissances en jonction T. Les modèles proposés sont conçus en utilisant le logiciel de simulation CST MWS qui utilise la méthode d'intégration finie, ils ont été proposés comme une solution pour les applications 5G.

Dans le premier chapitre, nous nous sommes intéressés aux antennes imprimées, où nous avons présenté les principales caractéristiques de ces structures, les différentes structures, les techniques alimentations utilisées pour ces types d'antennes, les avantages, les inconvénients, ainsi leurs domaines applications. Nous avons ensuite abordé le système de la téléphonie mobile 5G d'une manière générale afin de se familiariser avec le concept de base de cette technologie.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à la présentation des réseaux d'antennes et les diviseurs de puissance, étant donné qu'ils constituent une bonne solution qui a pu améliorer les performances du système.

L'objectif de ce travail était d'élaborer un système multi antennes pour une application 5G dans la bande des ondes millimétriques. Nous avons dans un premier temps mis l'accent sur la conception de l'antenne élémentaire qui va former notre réseau. Évidemment, l'antenne doit assurer de meilleures performances dans la bande désirée qui est autour de la fréquence 28 GHz.

L'utilisation d'un réseau d'antennes améliore la qualité de transmission et permet d'augmenter le gain, le débit et d'élargir la bande passante. Toutefois, le défi réside dans la conception de l'alimentation de ce réseau d'antennes, leurs nombres et leur emplacement dans le réseau. Le but donc est de concevoir des réseaux compacts, simples, à faible coût et à un gain élevé.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous avons fait le choix sur le type d'alimentation en jonction T grâce à sa simplicité de conception. Une comparaison entre deux réseaux d'antennes proposés

à deux éléments a été faite avec deux substrats différents de types Roger 5880 et FR4. D'autres réseaux d'antennes à quatre et à huit antennes élémentaires ont été conçus afin d'augmenter le gain du système, alimentées par trois et sept ponts en jonction T respectivement. Les résultats de simulations ont permis de montrer que ces réseaux constitués un bon choix pour les applications en 5G.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagés à partir de ce travail. Tout d'abord il parait intéressant de continuer les recherches sur les réseaux d'antennes en optimisant ces structures dans le but d'augmenter le gain et d'élargir la bande passante du réseau. Également pour valider les résultats des réseaux d'antennes simulés, il est important de réaliser ces structures proposées et effectuer des mesures sur ces différentes configurations.

Référence

Chapitre I : Généralités sur les antennes imprimées

- [I.1] G. Kossiavas, R. Staraj, C. Luxey, A. Papiernik, "Antennes imprimées- Bases et principes", Technique de l'ingénieur, Référence E3310, 05/ 2007.
- [I.2] D. Aissaoui, " Analyse a l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées par ligne adaptées ", Memoire de Magister, Université de Abou Baker Belkaid Tlemcen, 03/2007.
- [I.3] Deghfel Walid et Merzougui Rami, "Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée ", Université Mohamed Boudiaf Msila, 2017.
- [I.4] C.A. Balanis «Analysis Design, Third Edition» John Wiley & Sons, Inc. page 811,2015.
- [I.5] M.A.Bedi, S.Ben Hssine, G.Chaib, „Etude, conception et réalisation d'une antenne planaire HF en technologie micro ruban“, mini projet en dispositif micro-ondes et antennes, école nationale d'ingénieur de Tunis,2015.
- [I.6] Dida Houdaifa et Boughrari Ala Eddine, "Antenne micro ruban à polarisation circulaire pour application WIFI", Université Kasdi Merbah Ouargla,2019.
- [I.7] IEEE-SA Standards Board, IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas, Institute of Electrical and Electronics Engineers 2014.
- [I.8] Mohamed Mansouri et El Haithem Ezzourog, "Conception et Simulation d'une antenne patch ultra large bande", Institut d'aéronautique et des études spatiales2019.
- [I.9] Yazid Hmeydi, "Réalisation et mise au point d'un système de brouillage GSM 900-1800 ", Institut supérieur des études technologique en communication de Tunis – projet de fin d'études 2009.
- [I.10] P.F. Combes, « circuits passifs, Propagation, Antennes, 4 » Micro-onde Tome 2, Dunod, 1997. Paris : Dunod. 1 vol(XI-383p).
- [I.11] polarisation d'une antenne-polarization.10 octobre 1985.
- [I.12] GUENNACH Mohamed, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah Fès, "Conception d'une antenne ""PIFA"" multi bandes pour applications sans fil".
- [I.13] Ulaby, F.T, "Fundamentals of Applied Electromagnetic" Prentice Hall, 1999.
- [I.14] Barrou et Abdelati Reha, "Etude Paramétrique Des Antennes Patches Rectangulaires Alimentées Par Proximité", Hassan II University, Casablanca, Morocco, 2016.

- [I.15] Aliouat Mahfoud et Bouzakaria Ferielle, "Etude et conception d'une antenne millimétrique multiservice pour application 5G", Université Saad Dahlab de Blida 1, 2021.
- [I.16] T.A. Milligan Modern Antenna Design, second edition John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [I.17] G. Kossivas, A. Papiernik, R. Staraj, C. Luxey Antennes imprimées - Bases et principes Dossier E 3310, Antenne, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [I.18] Luka Lemorentin. De la 1G à la 5G. petite historique du réseau mobile sans-fil. Les principales étapes du réseau télécom.12 juin 2020.
- [I.19] M.Khelladi Mounir, Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G, Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER,2020.
- [I.20] Bachir Sadou et Dheya Alhaq Alqudami, "Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G et 6G de nouvelle génération", Université Mohamed Al Seddik Ben Yahia Jijel, 2020.
- [I.21] Dehmechi Marwa et Bouhafer Asma, "Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G", Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [I.22] "Cybersécurité de la 5G", AO Kaspersky Lab, 2022.
- [I.23] "La rédaction Les Echos Solutions. La technologie de la 5G", 26 janvier 2021.
- [I.24] BRIEFING, Parlement européen, "Les effets de la communication sans fil 5G sur la santé humaine", Union européenne.2020

Chapitre II : Réseaux d'antennes et diviseurs de puissances

- [II.1] R.J.Mailloux, "Phased Array Antenna Handbook," Second Edition Artech House, Inc, 2005.
- [II.2] W.K.CHEN, "The Electrical Engineering Handbook", Elsevier Inc, 2004
- [II.3] Dr. AOUNALLAH Naceur, Cours "ANTENNES ", Département d'Electronique et des Télécommunication, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [II.4] W. H. Kummer, "Basic Array Theory", Proc. IEEE, vol. 80, no. 1, pp. 127–140, 1992.
- [II.5] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", Wiley. 2005.
- [II.6] Andrée FOUQUE, "Contribution à la conception d'un récepteur mobile faible cout et faible consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S", Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2012.

[II.7] Mohammed MESSAOUDENE, "Modélisation par Modèle équivalent amélioré des antennes Périodiques et log-périodiques à base d'éléments rayonnants à encoche : 56 Applications aux télécommunications Sans Fil", Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Tlemcen, Avril 2016.

[II.8] J.Huang,"Practical Design of Microstrip Arrays and Reflectarrays", IEEE International Antennas and Propagation Symposium and USNC/CNC/URSI North American Radio Science Meeting, 2003.

[II.9] J.Q. Howell, "Microstrip Antennas", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 23, Issue 1, p. 90-93, janvier 1975.

[II.10] G. Kossiavas, A. Papiernik, R. Staraj, C. Luxey, "Antennes imprimées - Bases et principes Dossier E 3310, Antenne, Techniques de l'Ingénieur, 2012.

[II.11] BOUHAFS ABDERREZZAQ & ICHOU ABDELKADER, "Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G", Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen 2020.

[II.12] Abdelhadi, T. I. T. T. A. F. I., & Saïd, M. O. U. L. A. Y. (2019). "*Etude et conception d'un diviseur de puissance bi-bande à quatre ports* ", Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M" (SILA).

[II.13] R.James and P.S. Hall, "Handbook of Microstrip Antenna", 1989.

[II.14] BOUTEHLLOULA Sarra, "Conception des Diviseurs Optimales à base de la Technologie SIW pour Télécommunication Spatiales", L'UNIVERSITÉ DE TLEMCEM FACULTÉ DE TECHNOLOGIE, 2015.

Chapitre III : Conception et simulation d'un réseau d'antenne pour une application 5G

[III.1] W.Roh et al, "Millimeter-Wave Beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results", IEEE Comm. Magazine, pp. 106-113, Feb.2014.

[III.2] Computer Simulation Technology AG All rights reserved - CST 1998-2010 CST

[III.3] Chon, N.L, "Photonic Antenna for Wireless Local Area Network backhaul Application", Unpublished Master's Thesis, University Technology, Malaysia 2010.

Résumé

Afin de répondre aux besoins actuels du domaine de communication des réseaux mobiles de la 5G, des antennes de plus en plus performantes sont nécessaires. Ceci est dans le but de répondre aux demandes croissantes d'antennes assurant diverses fonctionnalités pour des équipements de communications modernes. Pour cela, les concepteurs ont élaboré des dispositifs à base des réseaux d'antennes imprimées. Les antennes imprimées présentent des caractéristiques très avantageuses en termes de poids, de volume, de cout, da simplicité de fabrication et surtout la possibilité de les implanter sur tout type de dispositif électronique.

Le présent projet combine des travaux théoriques, méthodologiques et de conceptions qui aboutissent à la conception et l'adaptation de nouvelles structures de réseaux d'antennes planaires alimentées par des diviseurs de puissance en jonction T, et qui fonctionnent à la fréquence de résonance 28GHz selon les réseaux mobiles 5G. La conception est basée sur l'étude paramétrique des paramètres des structures proposées, permettant d'améliorer les performances radioélectriques (le gain, la bande passante, l'efficacité... etc.) de ces structures qui ont été conçues par le simulateur CSTMWS. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les exigences demandées.

Mots-clés : Antenne imprimée, 5G, réseaux mobile, diviseur de puissance, performances radioélectriques, simulateur CST.

Abstract

In order to meet the current needs of the 5G mobile networks communication domain, increasingly high-performance antennas are required. This is in order to meet the increasing demands for antennas providing various functionalities for modern communications equipment. designers have elaborated devices based on printed antenna networks. Printed antennas have very advantageous characteristics with regard to weight, volume, cost, manufacture simplicity and above all the possibility to implement them on any electronic device type.

The present project combines theoretical, methodological and design work that results in the design and adaptation of new planar antenna array structures fed by T-junction power dividers, and which operate at the 28GHz resonant frequency according to 5G mobile networks. The design is based on the parametric study of the proposed structures parameters, allowing to

improve the radioelectric performances (gain, bandwidth, efficiency...etc) of these structures what have been designed by the CSTMWS simulator. The obtained results are in good agreement with the requested requirements.

Keywords : Printed antenna, 5G, mobile networks, power dividers, radioelectric performances, CST simulator.

ملخص

من أجل تلبية الاحتياجات الحالية لمجال الاتصالات لشبكات محمول الجيل الخامس، هناك حاجة إلى هوائيات فعالة بشكل متزايد. هذا من أجل تلبية الطلبات المتزايدة على الهوائيات التي توفر وظائف مختلفة لمعدات الاتصالات الحديثة. لهذا، طور المصممون أجهزة تعتمد على مصفوفات الهوائيات المطبوعة. تتميز الهوائيات المطبوعة بخصائص مفيدة للغاية من حيث الوزن والحجم والتكلفة وبساطة التصنيع وقبل كل شيء إمكانية تثبيتها على أي نوع من الأجهزة الإلكترونية.

يجمع هذا المشروع بين الأعمال النظرية والمنهجية والتصميمية التي تؤدي إلى تصميم وتكييف هياكل مصفوفة الهوائي المستوي الجديدة التي تغذيها مقسم الطاقة على شكل تي، والتي تعمل بتردد رنين 28 جيجا هرتز وفقاً لشبكات الهاتف المحمول للجيل الخامس. يعتمد التصميم على الدراسة البارامترية لمعاملات الهياكل المقترحة، مما يجعل من الممكن تحسين أداء الراديو (الكسب، وعرض النطاق الترددي، والكفاءة، وما إلى ذلك) لهذه الهياكل التي تم تصميمها بواسطة المحاكاة. النتائج التي تم الحصول عليها في توافق جيد مع المتطلبات المطلوبة.

كلمات مفتاحية: هوائي مطبوع، الجيل الخامس، شبكات الهاتف المحمول، مقسم الطاقة، أداء الراديو، محاكاة.