

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCEM**  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE TELECOMMUNICATION



**MEMOIRE**

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

**Par** :

BELAKHDAR Faiza

**Sujet**

Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de  
la téléphonie mobile 5G

Soutenu publiquement, le 15 Juillet 2021, devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> H.DJELTI	MCB	Univ.Tlemcen	Présidente
M <sup>me</sup> F.BOUSALAH	MCB	Univ.Tlemcen	Examinatrice
M <sup>me</sup> Y.BELHADEF	MCA	Univ.Tlemcen	Encadrante

Année académique : 2020-2021

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant, de m'avoir insufflé suffisamment de force, de courage et de patience pour entreprendre ce modeste travail.

Ce travail de mémoire intervient à un moment charnière de mes études. Au cours de ces derniers mois, j'ai découvert et exploré des disciplines nouvelles. Cette progression et ces découvertes n'auraient pas été possibles sans l'aide de la personne qui m'a encadré, conseillé et soutenue au cours des derniers mois.

**Madame « BELHADEF Yamina »,**

Je vous exprime ma gratitude et ma reconnaissance pour avoir dirigé mon encadrement, pour votre grande disponibilité, pour vos précieux conseils et pour votre gentillesse, compréhension et compassion.

**Monsieur «SOUIARE Mehdi», Madame «LOUZIM Habiba»,**

Mon respect le plus profond et ma gratitude la plus sincère pour votre aide.

**Madame la présidente de jury «DJELTI Hamida»,**

Je vous remercie vivement d'accepter de présider ce jury.

**Madame l'examinatrice, «BOUSALAH Faiza »,**

Je vous remercie d'accepter de faire partie du jury d'évaluation de mon travail de fin d'étude.

## DEDICACE

**A mes chers parents,**

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

**A mon chère frère Aymen, et mes chères cousines, Meryem, Bouchra, Sara, Hadjer,**

Source de joie et de bonheur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant mes années d'études,

**A mes très chères meilleures amies Ikram, Ahlem,**

Pour leur amour sincère et leur soutien constant de mes efforts personnels vers l'apprentissage.

**Chère ami et frère, Hichem,**

Mon respect le plus profond et ma gratitude la plus sincère pour ton aide, ton soutien moral, et toutes tes qualités humaines.

A moi-même,

A ma grande famille, à mes chers amis,

A ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.

**BELAKHDAR FAIZA**

# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	II
<b>DEDICACE</b> .....	III
<b>SOMMAIRE</b> .....	IV
<b>Liste des figures</b> .....	VII
<b>Liste des tableaux</b> .....	XI
<b>Liste des abréviations</b> .....	XII
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	XIII
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 01 : ETAT D'ART SUR LES ANTENNES PATCHES ET LA 5G</b> ..	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	4
I.2. Historique .....	4
I.3. Description d'antenne micro-ruban .....	4
I.4. Différentes forme des antennes patch.....	5
I.5.Caractéristiques des antennes patches .....	5
I.5.1. Impédance d'entrée .....	5
I.5.2. Bande passante .....	6
I.5.3. Directivité.....	7
I.5.4.Gain .....	7
I.5.5. Rendement.....	8
I.5.6. Polarisation.....	8
I.5.6.1. Polarisation linéaire .....	8
I.5.6.2. Polarisation elliptique .....	8
I.5.6.3. Polarisation circulaire .....	8
I.5.7. Diagramme de rayonnement .....	9
I.5.8. Angle d'ouverture .....	10
I.5.9. Coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	10
I.5.10. Rapport d'onde stationnaire ROS .....	11

I.6. Différentes Formes d'antennes .....	11
I.6.1. Antenne patch circulaire.....	11
I.6. Antenne patch rectangulaire .....	12
I.7. Techniques d'alimentation .....	15
I.7.1. excitation avec contact .....	15
I.7.1.1. Alimentation par ligne micro-ruban .....	15
I.7.1.2. Alimentation par sonde coaxiale .....	16
I.7.2. Alimentation sans contact (par proximité).....	16
I.7.2.1. Ligne microbande en sandwich .....	16
I.7.2.2. Guide d'onde coplanaire.....	17
I.7.2.3. Couplage par fente.....	17
I.8. Méthodes d'analyses des antennes imprimées .....	17
I.8.1. Méthodes analytiques .....	18
I.8.1.1. Modèle de la ligne de transmission .....	18
I.8.1.2. Modèle de la cavité.....	18
I.8.2. Méthodes rigoureuses.....	18
I.8.2.1. Méthode des différences finies .....	19
I.8.2.2. Méthode des éléments finis (FEM) .....	19
I.9. Domaine d'applications.....	19
I.10. Avantages et inconvénients .....	20
I.11. Cinquième génération 5G.....	20
I.11.1. Historique .....	20
I.11.2. Définition .....	21
I.11.3. Objectif et Principe.....	21
I.11.4. Ondes millimétriques .....	22
I.11.5. Avantages et inconvénients de la 5G .....	23
I.11.5.1. Avantages .....	23
I.11.5.1. Inconvénients.....	23
I.12. Conclusion .....	24

## **CHAPITRE II : RESEAUX D'ANTENNES ET DIVISEURS DE PUISSANCE 25**

II.1. Introduction .....	26
II.2. Réseaux d'antennes .....	26
II.3. Condition sur réseau d'antenne .....	26
II.4. Types des réseaux d'antennes.....	27

II.4.1. Réseau d'antenne rectiligne .....	27
II.4.1.1. Réseau a deux éléments.....	27
II.4.1.2. Réseau d'antenne rectiligne uniforme à N-élément .....	28
II.4.2. Réseaux plans.....	28
II.4.3. Réseaux circulaires .....	29
II.5. Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées.....	29
II.5.1. Alimentation parallèle.....	29
II.5.2. Alimentation en série .....	30
II.6. Phénomène de couplage .....	30
II.7. Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes .....	30
II.8. Diviseur de puissances.....	31
II.8.1. Définition d'un diviseur de puissance .....	31
II.8.2. Type de diviseurs de puissance.....	31
II.8.3. Adaptation de la ligne d'alimentation .....	32
II.9. Conclusion .....	33

### **CHAPITRE III : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNE POUR UNE APPLICATION 5G.....34**

III.1. Introduction.....	35
III.2. Conception et Simulation d'une antenne imprimée rectangulaire sous CST .....	35
III.2.1. Outils de simulation.....	35
III.2.1.1. Définition .....	35
III.2.2. Conception d'une antenne patch pour la 5G .....	36
III.2.2.1. Cahier de charge .....	36
III.2.2.2. Adaptation de l'antenne initiale .....	38
III.2.2.3. Etude paramétrique .....	39
III.2.2.3.1. Variation de la largeur $w_1$ de la ligne quart d'onde.....	39
III.2.2.3.2. Variation de la longueur $L$ du patch.....	39
III.2.2.4. Résultat après l'étude paramétrique de l'antenne initiale .....	40
III.3. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédente .....	43
III.3.1. Variation de la largeur $w_1$ de la ligne quart d'onde.....	44
III.3.2. Variation de la longueur $L$ du patch .....	44
III.3.3. Résultat après l'étude paramétrique de l'antenne proposée .....	45
III.4. Réseau d'antenne à deux éléments $2 \times 1$ (à la base de l'antenne modifiée).....	48

III.4.1. Variation de la longueur $L_1$ de la jonction T .....	50
III.4.2. Variation de la longueur $L_2$ de la jonction T .....	50
III.4.3. Résultats après l'étude d'un réseau d'antennes à deux éléments .....	51
III.5. Réseau à quatre éléments 4x1 (à la base du réseaux d'antennes à deux éléments) .....	54
III.5.1. Variation de la longueur $L_4$ et $L_5$ du diviseur de puissance.....	55
III.5.2. Résultats après l'étude d'un réseau d'antenne à quatre éléments.....	56
III.6. Comparaison des résultats obtenus .....	58
III.7. Conclusion .....	59
 <b>Conclusion générale</b> .....	 <b>60</b>

## Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> : Géométrie d'une antenne micro-ruban de forme arbitraire.....	5
<b>Figure I.2</b> : Différentes formes d'antennes patch. ....	5
<b>Figure I.3</b> : Antenne en mode émetteur. ....	6
<b>Figure I.4</b> : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne. ....	7
<b>Figure I.5</b> : Types de polarisation. ....	8
<b>Figure I.6</b> : Diagramme en coordonnées polaires.....	9
<b>Figure I.7</b> : Diagramme en coordonnées cartésiennes.....	10
<b>Figure I.8</b> : Illustration de l'angle d'ouverture. ....	10
<b>Figure I.9</b> : Antenne patch microruban circulaire.....	12
<b>Figure I.10</b> : Antenne patch microruban rectangulaire.....	13
<b>Figure I. 11</b> : Alimentation du patch par une ligne micro-ruban.....	15
<b>Figure I.12</b> : Types d'alimentation par ligne micro-ruban. ....	16
<b>Figure I.13</b> : Alimentation du patch par un câble coaxial. ....	16
<b>Figure I.14</b> : Ligne microbande en sandwich. ....	17
<b>Figure I.15</b> : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire. ....	17
<b>Figure I.16</b> : Alimentation par couplage à travers une ouverture. ....	17
<b>Figure I.17</b> : Cartographie du champ $E$ dans la cavité d'une antenne microruban (mode $TM_{100}$ ). ....	18
<b>Figure I.18</b> : Spectres des fréquences (ondes millimétriques).....	23
<b>Figure II.1</b> : Types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnel. ....	27
<b>Figure II.2</b> : Cas de deux éléments. ....	27
<b>Figure II.3</b> : Réseau linéaire à N éléments. ....	28
<b>Figure II.4</b> : Réseau plan $M \times N$ .....	28
<b>Figure II.5</b> : Réseau circulaire à N éléments. ....	29
<b>Figure II.6</b> : Réseau linéaire avec une alimentation parallèle. ....	30

<b>Figure II.7 :</b> Réseau linéaire avec une alimentation en série.....	30
<b>Figure II.8 :</b> Schéma d'un diviseur de puissance.....	32
<b>Figure II.9 :</b> Différentes formes de la jonction T. ....	32
<b>Figure III.1 :</b> Géométrie de l'antenne initiale.....	37
<b>Figure III.2:</b> Coefficient de réflexion.....	38
<b>Figure III.3 :</b> Géométrie de l'antenne initiale avec ligne quart-d'onde.....	38
<b>Figure III.4.(a):</b> Coefficient de réflexion. ....	39
<b>Figure III.5 :</b> Coefficient de réflexion pour différentes largeurs de la ligne quart d'onde. ....	39
<b>Figure III.6 :</b> Coefficient de réflexion en variant la longueur L du patch.....	40
<b>Figure III.7.(a):</b> Coefficient de réflexion, <b>(b):</b> Taux d'onde stationnaire, <b>(c) :</b> Gain de l'antenne.....	41
<b>Figure III.8.(a):</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan E, <b>(b) :</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan H, <b>(c) :</b> Diagramme de rayonnement en 3D. ....	42
<b>Figure III.9 :</b> Géométrie de l'antenne modifiée. ....	43
<b>Figure III.10 :</b> Coefficient de réflexion de l'antenne modifiée.....	43
<b>Figure III.11 :</b> Coefficient de réflexion pour différentes largeurs de la ligne quart d'onde. ....	44
<b>Figure III.12 :</b> Coefficient de réflexion en variant la longueur L du patch.....	44
<b>Figure III.13. (a):</b> Coefficient de réflexion , <b>(b):</b> Taux d'onde stationnaire, <b>(c) :</b> Partie réelle de l'impédance d'entrée. ....	46
<b>Figure III.14.(a):</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan E, <b>(b) :</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan H, <b>(c) :</b> Diagramme de rayonnement en 3D. ....	48
<b>Figure III.15 :</b> Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments et sa structure le rédacteur du CST Microwave studio.....	48
<b>Figure III.16:</b> Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments.....	50
<b>Figure III.17 :</b> Coefficient de réflexion en variant la longueur $L_1$ de la jonction T...	50
<b>Figure III.18 :</b> Coefficient de réflexion en variant la longueur $L_2$ de la jonction T...	51

<b>Figure III.19. (a):</b> Coefficient de réflexion , <b>(b):</b> Taux d'onde stationnaire , <b>(c):</b> Partie réelle de l'impédance d'entrée , <b>(d) :</b> Gain de l'antenne.....	52
<b>Figure III.20.(a):</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan $E_{\perp}$ <b>(b) :</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan $H_{\perp}$ <b>(c) :</b> Diagramme de rayonnement en 3D. ....	54
<b>Figure III.21 :</b> Géométrie du réseau d'antennes à quatre éléments et sa structure dans le rédacteur du CST Microwave studio.....	55
<b>Figure III.22:</b> Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments. ....	55
<b>Figure III.23 :</b> Coefficient de réflexion en variant la longueur $L_4$ et $L_5$ du diviseur. ....	56
<b>Figure III.24.(a):</b> Coefficient de réflexion, <b>(b):</b> Taux d'onde stationnaire, <b>(c) :</b> Gain de l'antenne.....	57
<b>Figure III.25.(a):</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan $E_{\perp}$ <b>(b) :</b> Diagramme de rayonnement en 2D, plan $H_{\perp}$ <b>(c) :</b> Diagramme de rayonnement en 3D. ....	58

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Equations de l'antenne patch circulaire. ....	13
<b>Tableau I.2</b> : Equations de l'antenne patch rectangulaire.....	15
<b>Tableau I.3</b> : Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles. ....	21
<b>Tableau III.1</b> . Dimensions de l'antenne initiale. ....	37
<b>Tableau III.2</b> : Dimensions de la jonction T. ....	49
<b>Tableau III. 3</b> : Comparaison des résultats des antennes proposées. ....	59

## Liste des abréviations

**CST (MWS)** : Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO

**BP** : Bande Passante

**IOT** : Internet des objets.

**HF** : Hautes Fréquences

**1G** : première génération

**2G** : deuxième génération

**3G** : troisième génération

**4G** : quatrième génération

**5G** : cinquième génération

**3GPP**: 3rd Group Partnership Project

**LTE**: Long Term Evolution

**RF**: Radio Frequency

**VSWR**: The Voltage Standing Wave Ratio

**ROS** : Rapport d'onde stationnaire

**WPD** : Wilkinson Power Divider

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Les technologies de cinquième génération (5G) arrivent à grands pas. Une véritable révolution digitale tant attendue qui possèdent un potentiel de transformation immense pour nous offrir une vie meilleure.

Des soins de santé avancés, des villes d'en plus en plus intelligentes, une industrie bien plus efficace; tout cela devient possible à l'heure où l'Internet des objets prend place et s'accompagne d'une large gamme de solutions innovantes, qui font tourner notre économie actuelle.

La principale caractéristique de la 5G est qu'elle promet de tout connecter, partout et tout le temps. Ses réseaux sont conçus pour que l'utilisateur puisse se connecter simultanément à plusieurs technologies sans fil et échanger entre eux. 5G vise les appareils qui prennent en charge la voix sur IP (VoIP), où l'utilisateur verra un taux élevé de transmission de données (débit de données d'envoi) et un volume approprié de l'appel. Cette technologie a pour but de répondre à toutes les exigences des clients qui aspirent à des fonctionnalités avancées dans les téléphones mobiles.

Récemment, une forme du spectre électromagnétique appelée bande millimétrique était suggérée pour être employé dans la 5G, où plusieurs GHz de cette partie du spectre peut être utilisé pour fournir des commandes élevées de la taille des données pour les utilisateurs de téléphones mobiles, peuvent également prendre en charge les connexions entre les petites cellules dans ces fréquences, il existe un large spectre disponible, car il n'est pas utilisé actuellement. Les fréquences 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz sont les plus confortables dans ce segment du spectre, selon des mesures récentes. En raison des faibles longueurs d'onde de mmWave, des antennes de grande capacité peuvent être fabriquées dans les deux petits appareils portables comme dans les stations de base.

Les outils de simulation tels que CST Microwave Studio, spécialisés pour le calcul numérique rapide et précis sont indispensables pour l'exécution et l'analyse du comportement des antennes. Cet outil permet de gagner du temps et d'économiser dans le processus de mise en œuvre.

Notre recherche vise à concevoir et simuler un réseau d'antennes patchs dans la fréquence 28 GHz pour une utilisation potentielle en 5G qui a pour but d'augmenter le gain afin de répondre aux exigences de la 5G. Ainsi qu'identifier les paramètres de base des antennes et des types d'antennes utilisés pour les gammes de fréquences millimétriques, et décrivez les outils qui seront utilisés pour simuler des antennes pour des ondes millimétriques.

Pour atteindre les objectifs fixés, le présent manuscrit de recherche a été organisé et basé sur: Introduction générale, trois chapitres, et une conclusion générale.

Le chapitre I présente d'une part, les antennes patchs on donnant un bref historique, les caractéristiques et les paramètres géométriques. Par la suite, les techniques d'alimentation, les méthodes d'analyse, les domaines d'application des antennes patchs et leurs avantages et inconvénients. D'autre part, les aspects généraux de la technologie de communication 5G de

la téléphonie mobile.

Dans le deuxième chapitre, généralités sur les réseaux d'antennes en précisant leurs types, techniques d'alimentations, ainsi que les principales caractéristiques sur les diviseurs de puissance.

le troisième chapitre commence par une simple description du logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Science Technology), puis une conception d'une antenne basique rectangulaire, suivie par une étude d'antenne patch design, en présentant ses équations de conception. La deuxième partie de ce chapitre expose la mise en place et la conception d'un réseau d'antenne de deux éléments puis quatre éléments. Enfin une comparaison entre réseaux d'antennes conçus dans ce chapitre est faite afin d'évaluer les performances du réseau d'antenne proposé

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**ETAT DE L'ART DES ANTENNES PATCHES**

## I.1. Introduction

Depuis peu, une nouvelle catégorie d'antenne apparaît de plus en plus comme éléments d'antenne- réseaux et ce, dans de nombreuses applications. Il s'agit des antennes micro ruban, aussi connues sous l'appellation anglaise ‘ patch –antenna’

Ce premier chapitre précise les généralités sur les antennes patch et ces principales caractéristiques. Ainsi les différentes techniques d'alimentation, les applications, les avantages et les inconvénients. A la fin, nous exposons brièvement, la technologie cinquième génération, l'objectif et la notion des ondes millimétriques .

## 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 [I.1].

Un peu plus tard dans l'année 1970, Byron a décrit une structure planaire qui se compose d'une plaque conductrice imprimée sur un substrat diélectrique avec un  $\epsilon_r < 10$  posé sur un plan de masse. Ses premières réalisations étaient essentiellement réservées à des applications militaires. Dans les années 1990, Howel et Munson ont réalisé un véritable passage au stade industriel [I.2].

La majorité des travaux vise à améliorer certains sous-systèmes de cette nouvelle technique. A cette époque, on lui donne plusieurs noms : technologie « sans porteuse », ou en « bande de base » ou encore « technologie impulsionnelle » [I.3].

## I.3. Description d'antenne micro-ruban

Une antenne micro-ruban (appelée microstrip ou microbande) est constituée d'une plaque métallique de forme quelconque, appelée élément rayonnant (patch), située sur la face supérieure d'un substrat diélectrique. On considère en général le conducteur comme étant parfait et d'épaisseur négligeable, et on trouve en dessous du substrat diélectrique le plan de masse (figure I.1) [I.4].

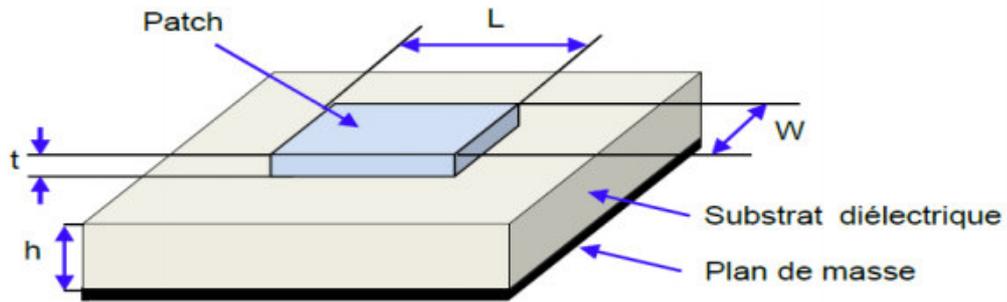


Figure I.1 : Géométrie d'une antenne micro-ruban de forme arbitraire.

#### I.4. Différentes forme 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.5].

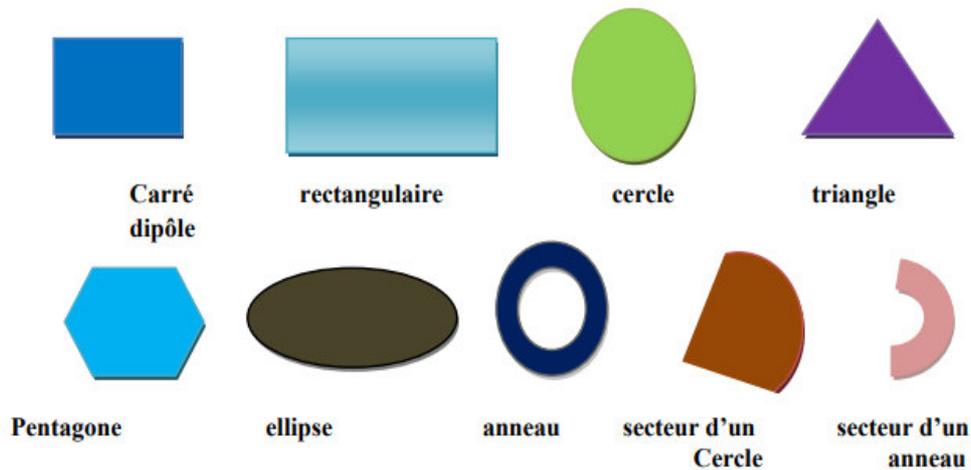


Figure I.2 : Différentes formes d'antennes patch.

#### I.5. Caractéristiques des antennes patches

##### I.5.1. Impédance d'entrée

Une antenne est définie par deux bornes d'entrée A et B. Soit  $V_e$  la tension entre les bornes A et B et  $I_e$  le courant d'alimentation de l'antenne. L'impédance d'entrée de l'antenne est donnée par la formule suivante [I.6]:

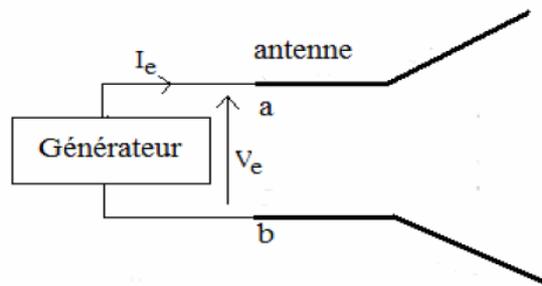
$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{I.1})$$

Où :

$Z$ = impédance d'entrée aux bornes a et b.

$R$ = résistance de l'antenne aux bornes a et b.

$X$ = réactance de l'antenne aux bornes a et b.



**Figure I.3** : Antenne en mode émetteur.

Généralement pour qu'une antenne ait un bon rendement, il est nécessaire que l'émetteur, la ligne de transmission, et l'antenne aient presque la même impédance.

### I.5.2. Bande passante

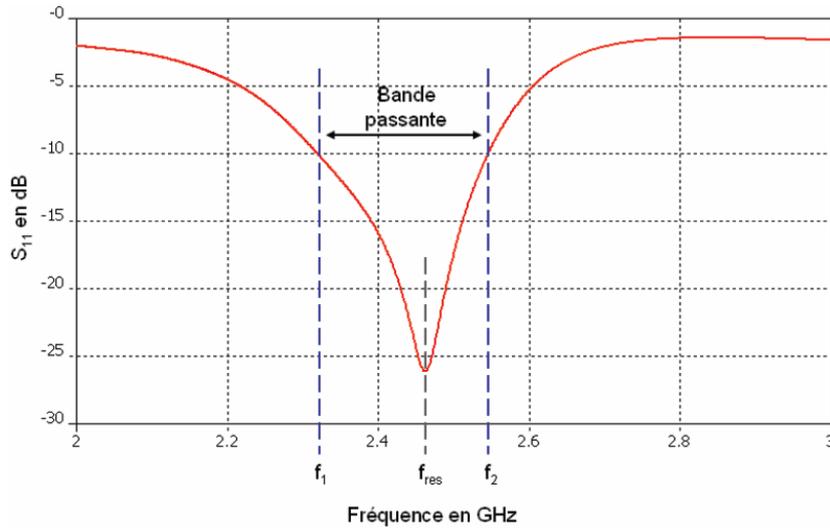
Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal (largeur de bande de fonctionnement) [I.7]. La bande passante d'une antenne définit donc la plage de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur de -10dB.

$$|BP| = f_2 - f_1 \quad (\text{I.2})$$

Généralement, ce paramètre est évalué aussi en pourcentage du rapport de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale [I.7] :

$$BP = \frac{|BP|}{f_m} \quad (\text{I.3})$$

La Figure I.4 montre le paramètre  $S_{11}$  d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB.



**Figure I.4:** Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.

### I.5.3. Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \varphi)$  à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [8]:

$$D(\theta, \phi) = 4 \pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta P_A} \quad (\text{I.4})$$

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope [I.8].

### I.5.4. Gain

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée. Le gain d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  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, il est exprimé par [I.9]:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} = 4 \pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_A} \quad (\text{I.5})$$

### I.5.5. Rendement

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

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad (\text{I.6})$$

### I.5.6. Polarisation

La polarisation d'une antenne dérive de l'orientation du champ électrique émis. Elle est définie par le type de polarisation d'onde qu'elle transmet dans une direction donnée et dans la zone lointaine. L'état de polarisation de l'onde qu'une antenne rayonne peut être :

#### I.5.6.1. Polarisation linéaire

Le champ E est toujours parallèle à une direction, durant la propagation. Il est contenu dans un plan qui contient la direction de propagation appelée plan de polarisation. Elle peut être produite par la combinaison des ondes polarisées linéairement et en phase (ou en opposition de phase) [I.7].

#### I.5.6.2. Polarisation elliptique

C'est le cas général, qui peut être produit par toute autre combinaison d'ondes. L'extrémité du vecteur E décrit alors une ellipse dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation [I.7].

#### I.5.6.3. Polarisation circulaire

La polarisation est dite circulaire si l'extrémité du vecteur du champ électrique, en un point de l'espace, décrit un cercle lorsque les ondes se propagent [I.7].

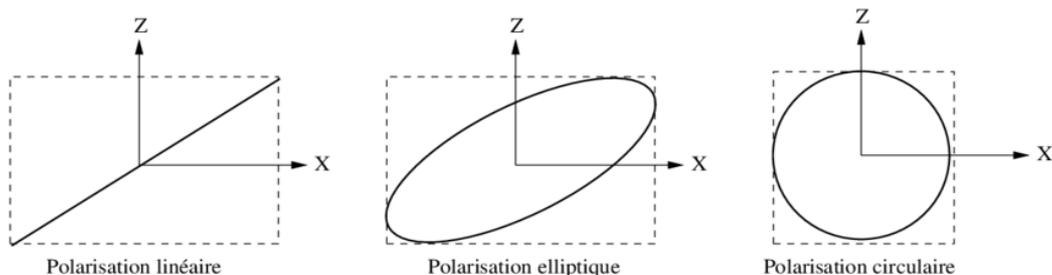


Figure I.5 : Types de polarisation.

### I.5.7. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace [I.10].

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La fonction caractéristique de rayonnement  $(\theta, \phi)$  de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $(\theta, \phi)$  à la puissance  $P_{\max}$  de la direction où le rayonnement est maximal [I.10].

$$P(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (I.7)$$

Différents types de représentation des diagrammes sont utilisées :

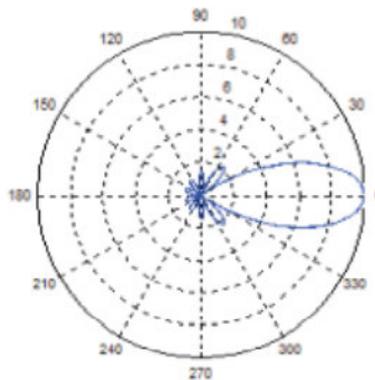
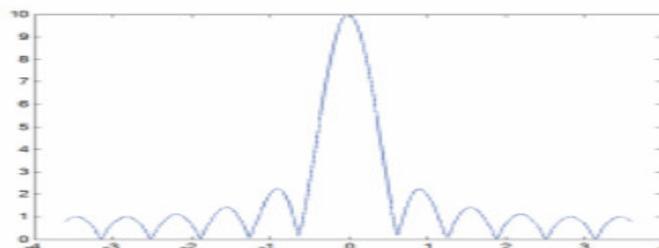


Figure I.6 : Diagramme en coordonnées polaires.

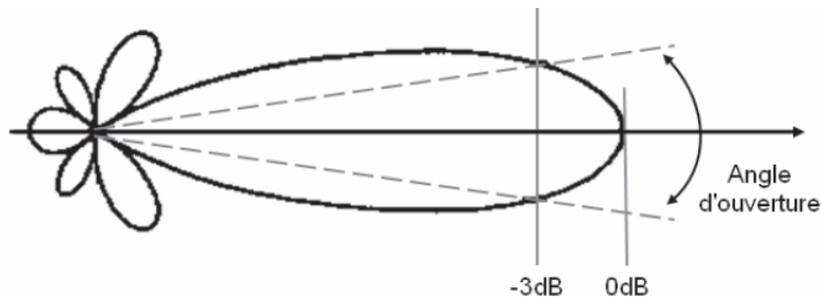


**Figure I.7 :** Diagramme en coordonnées cartésiennes.

### I.5.8. Angle d'ouverture

Lorsque l'antenne présente un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée est à l'intérieur des deux directions à (-3dB). Donc l'angle d'ouverture nous donne une idée assez précise sur la finesse du lobe et la qualité du rayonnement [I.9].

Comme le montre la figure I.8, l'angle d'ouverture est défini dans un plan qu'il convient de préciser.

**Figure I.8 :** Illustration de l'angle d'ouverture.

Cette donnée ne s'applique généralement qu'aux antennes directives présentant un lobe principal de rayonnement. L'angle d'ouverture est une donnée importante pour les antennes très directives utilisées dans des liaisons point à point ou alors dans la mise en œuvre d'antennes sectorielles au niveau des stations de base des réseaux de téléphonie sans fil.

### I.5.9. Coefficient de réflexion $S_{11}$

Afin que le maximum de puissance soit transmis entre différents éléments d'un circuit, il faut que le coefficient de réflexion soit le plus faible possible. Pour cela les différents éléments d'une chaîne d'émission / réception radiofréquence sont conçus pour être adaptés à une impédance caractéristique  $Z_c$ . L'impédance caractéristique peut prendre différentes valeurs en fonction des applications. Par exemple elle prend une valeur de 75 ohms pour des applications grand public comme la réception de la télévision hertzienne ou par satellite. Mais le plus souvent l'impédance caractéristique est fixée à 50 ohms dans les milieux professionnels.

Ce coefficient met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation d'une l'antenne.

A partir de l'impédance caractéristique et de l'impédance d'entrée de l'antenne, nous pouvons définir le coefficient de réflexion par l'expression [I.11] :

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

Le coefficient de réflexion peut également s'exprimer en décibel, on parle alors du paramètre  $S_{11}$  qui se définit comme suit :

$$S_{11} = 20 \cdot \log(\Gamma) \quad (\text{I.9})$$

### I.5.10. Rapport d'onde stationnaire ROS

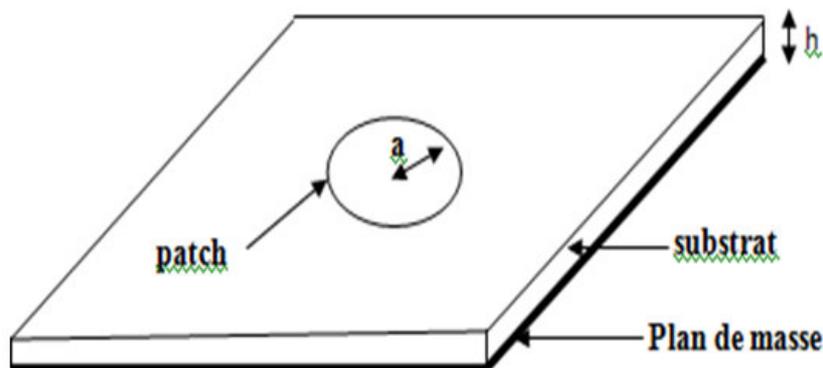
Le Rapport d'Onde Stationnaire ou ROS tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales et minimales de l'amplitude de l'onde stationnaire. Le ROS ou, en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio peut également s'exprimer à partir du coefficient de réflexion par l'expression [I.12] :

$$\text{ROS} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (\text{I.10})$$

## I.6. Différentes Formes d'antennes

### I.6.1. Antenne patch circulaire

Sur la figure I.9, on représente une antenne patch microruban circulaire.



**Figure I.9** : Antenne patch microruban circulaire.

Selon Balanis [I.14], la relation de la fréquence de résonance d'une antenne patch circulaire en fonction du rayon  $a$ , l'épaisseur de substrat  $h$  et la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$ , en son mode dominant  $TM_{110}$  :

$$(f_r)_{110} = \frac{1,2412 c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \tag{I.11}$$

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.

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \tag{I.12}$$

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

Paramètres d'antenne patch circulaire		Equations	
Le rayon réel		$a$ $= \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}}$	$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$
Fréquence de résonance		$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$	
Constant diélectrique ( $\epsilon_{eff}$ )		$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$	
La longueur		$L = L_{eff} - 2\Delta L$	
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left( \frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left( \frac{w}{h} + 0,8 \right)}$	
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 microruban	$Z_C$	$= \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{w_2}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{w_2}{h} + 1,44 \right) \right]} \frac{w_2}{h} \geq 1 \end{cases}$

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

Avec :

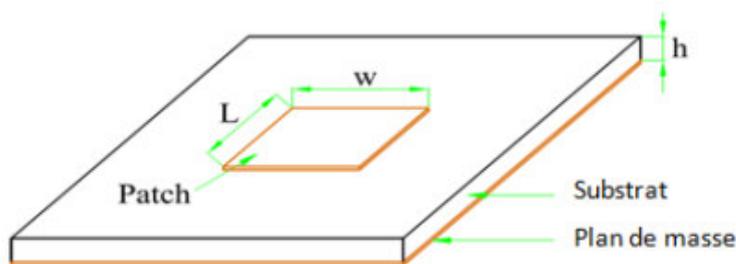
$W$  : Largeur de la ligne micro ruban.

$h$  : Epaisseur du substrat diélectrique.

$\epsilon_r$  : Permittivité relative.

$\epsilon_{eff}$  : Permittivité effective.

### I.6. Antenne patch rectangulaire



**Figure I.10 :** Antenne patch microruban rectangulaire.

Selon Huang, Boyle [I.13] et Balanis [I.14], la fréquence de résonance pour une antenne patch rectangulaire en mode  $TM_{010}$  est donnée par :

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{I.13}$$

Sur le tableau I.2, on donne les équations de l'antenne patch rectangulaire [I.15].

Paramètres de l'antenne patch rectangulaire		Equations
La largeur		$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Fréquence de résonance		$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
Constant diélectrique ( $\epsilon_{reff}$ )		Pour $w/h > 1$ : $\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_{r+1}}{2} \frac{\epsilon_{r-1}}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
La longueur		$L = L_{eff} - 2\Delta L$
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )		$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left( \frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left( \frac{w}{h} + 0,8 \right)}$
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 microruban		$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{8h}{w_2} + \frac{w_2}{4h} \right] \frac{w_2}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{w_2}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{w_2}{h} + 1,44 \right) \right]} \frac{w_2}{h} \end{cases}$

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

Avec :

$L_{\text{eff}}$  : longueur effective du patch.

$L$  : longueur du patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne

$\epsilon_{r \text{ eff}}$  : permittivité effective.

$\epsilon_r$  : permittivité relative.

$h$  : épaisseur 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.

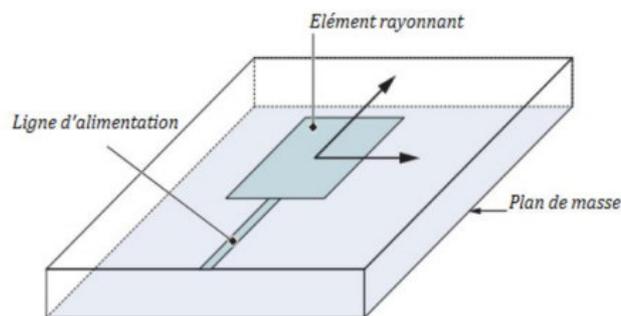
## I.7. Techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes imprimées, est basée essentiellement sur deux classes d'excitation ; excitation avec contact et excitation sans contact.

### I.7.1. excitation avec contact

#### I.7.1.1. Alimentation par ligne micro-ruban

Dans cette technique d'alimentation, on imprime l'élément rayonnant et sa ligne d'alimentation sur la même face du substrat diélectrique comme illustrer sur la figure I.11. Cette technique est, sans doute, peu coûteuse et facilement réalisable [I.16].



**Figure I. 11 :** Alimentation du patch par une ligne micro-ruban.

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne microbande, dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats [I.17].

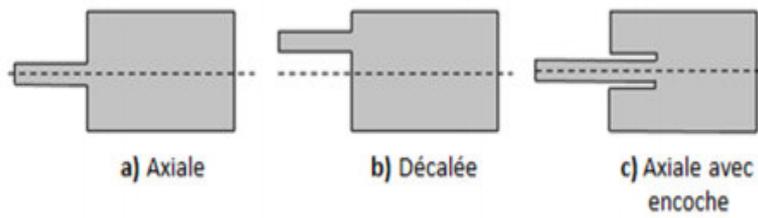


Figure I.12 : Types d'alimentation par ligne micro-ruban.

### I.7.1.2. Alimentation par sonde coaxiale

Le câble de la sonde coaxiale traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse comme monter dans la figure I.13, Cette alimentation est très utilisée avec les patches de formes circulaire et annulaire [I.18].

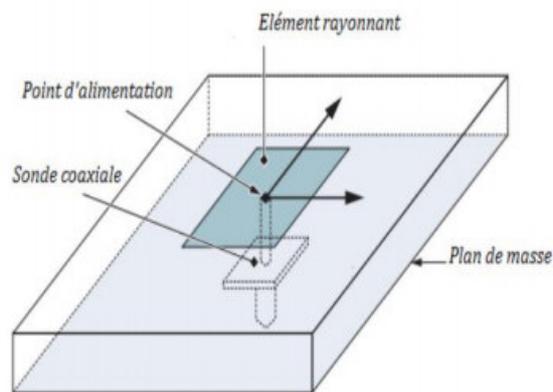


Figure I.13 : Alimentation du patch par un câble coaxial.

## I.7.2. Alimentation sans contact (par proximité)

### I.7.2.1. Ligne microbande en sandwich

Pour ce type d'alimentation, on utilise deux substrats diélectriques, une ligne micro-ruban et une source rayonnante. La ligne micro-ruban n'est pas directement connectée au patch, elle est mise en sandwich entre ces deux substrats diélectriques. La source rayonnante est excitée par la ligne d'alimentation par couplage électromagnétique. Les constantes diélectriques des substrats jouent un rôle principal et sont sélectionnées pour augmenter la bande passante et diminuer les rayonnements parasites provenant de la ligne d'alimentation [I.18].

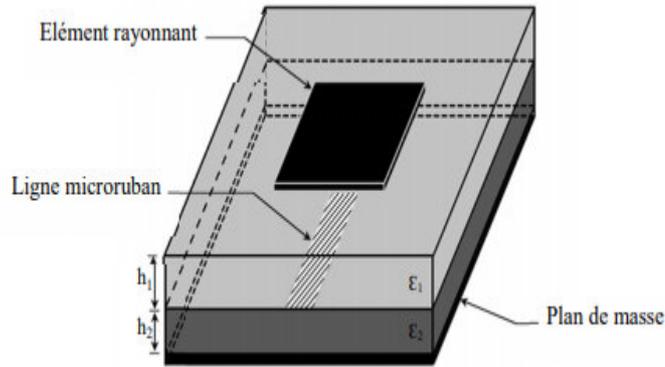


Figure I.14 : Ligne microbande en sandwich.

### I.7.2.2. Guide d'onde coplanaire

L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même façade inférieure du substrat [I.19].

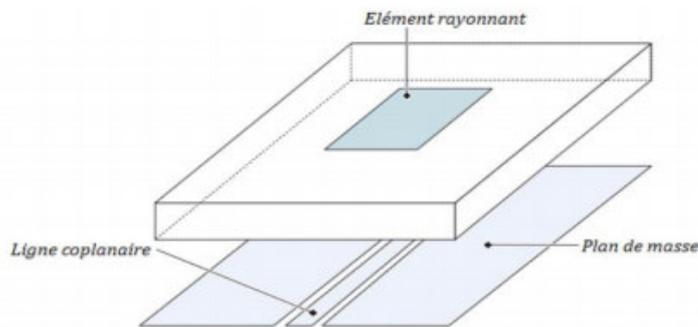


Figure I.15 : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire.

### I.7.2.3. Couplage par fente

Une ligne est disposée au-dessus du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne [I.19].

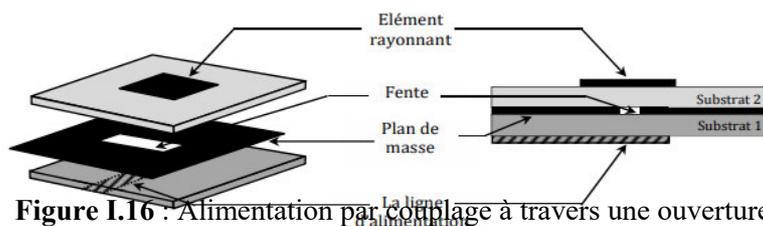


Figure I.16 : Alimentation par couplage à travers une ouverture.

## I.8. Méthodes d'analyses des antennes imprimées

### I.8.1. Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques prennent en compte au départ la nature des phénomènes physiques, ce qui permet d'effectuer des approximations, permettant la modélisation du modèle en question. Parmi ces méthodes, on peut citer [I.20] :

- Le modèle de la ligne de transmission.
- Le modèle de la cavité.

#### I.8.1.1. Modèle de la ligne de transmission

Ce modèle exploite l'analogie qui existe entre un ruban annulaire d'une antenne microbande et un tronçon d'une ligne de transmission. Le modèle de la ligne de transmission représente l'antenne microstrip par deux fentes séparées par une ligne de longueur  $L$ . Pour cela une analyse de réseau d'une ligne de transmission est utilisée pour résoudre le problème, où les inconnues sont la constante de propagation et l'impédance caractéristique. Cette ligne ne peut pas supporter le mode TEM, puisque les vitesses de phase sont différentes dans l'air et dans le substrat [I.21].

#### I.8.1.2. Modèle de la cavité

Un autre modèle qui est le modèle de la cavité utilisant le courant d'alimentation uniforme donne de bons résultats seulement pour les épaisseurs du substrat inférieur à 0.001. La structure imprimée peut être assimilée à une cavité limitée en haut par une plaque conductrice, en bas par un plan de masse et entourée par une surface latérale. Les deux plans conducteurs représentent des murs électriques et la surface latérale constitue le mur magnétique [I.21].

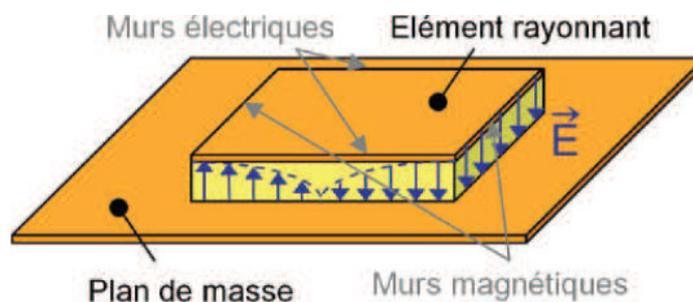


Figure I.17: Cartographie du champ  $\vec{E}$  dans la cavité d'une antenne microruban (mode  $TM_{100}$ ).

### I.8.2. Méthodes rigoureuses

Ces méthodes sont les plus utilisées récemment. Elles sont basées sur la distribution du courant électrique sur le conducteur. Parmi ces méthodes, on peut citer [I.11] :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.

#### **I.8.2.1. Méthode des différences finies**

La méthode des différences finies dans le domaine temporel, permet la résolution d'équations différentielles spatio-temporelles sur ordinateur. L'avantage principal de cette méthode est la simplicité de sa formule, le calcul est alors fait dans le domaine temporel sur une large bande de fréquence. Le temps de calcul croît de façon linéaire en fonction des nombres d'inconnues (ce qui n'est pas le cas pour la méthode des éléments finis). Mais son principal inconvénient est lié au fait que le maillage de la structure doit être uniforme et elle est donc peu adaptée au traitement des dispositifs comportant des éléments ayant des ordres de grandeurs très différents [I.22].

#### **I.8.2.2. Méthode des éléments finis (FEM)**

Elle est basée sur la résolution des équations différentielles des champs électromagnétiques dans le domaine spectral. Il s'agit donc de résoudre un système linéaire d'équations, les champs étant les inconnus. Pour cela, on doit discrétiser entièrement en 3D le domaine où le champ à analyser existe : des triangles sont utilisés sur les surfaces et des tétraèdres dans les volumes [I.22], [I.23].

### **I.9. Domaine d'applications**

On retrouve principalement les antennes patchs dans les systèmes de haute technologie suivants [I.9] :

- Les résonateurs spatiaux et radar embarqué.
- La liaison avec des mobiles (avions, fusées, missiles, navires, véhicules routiers...).
- Les systèmes portables de radiolocalisation par satellite (GPS).
- Les résonateurs pour la téléphonie mobile (stations de base ,5G).
- Les badges et étiquettes électroniques.
- Les applicateurs biomédicaux.

## I.10. Avantages et inconvénients

Les antennes patchs présentent de nombreux avantages dont on peut citer [I.24]:

- Un encombrement réduit.
- Un faible poids.
- Un faible cout de fabrication.
- Les réseaux d'alimentation et d'adaptation sont fabriqués simultanément avec l'antenne.
- La polarisation de l'onde électromagnétique linéaire ou circulaire en ajustant la géométrie et l'excitation de l'élément rayonnant.

Ces antennes ont aussi des inconvénients qui sont les suivants :

- Une bande passante étroite.
- Un faible gain (de l'ordre de 5dB).
- Supportent uniquement les faibles puissances.
- Une pureté de polarisation difficile à obtenir.
- Rayonnement limité à un demi-plan de l'espace.
- Pertes de rayonnement par des ondes de surface.

## I.11. Cinquième génération 5G

La 5G souhaite se présenter comme la génération de rupture, la génération qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie [I.25].

### I.11.1. Historique

Les technologies de communication mobile sont prises en charge par des organisations de développement des standards à l'échelle globale comme le 3GPP (3rd Group Partnership Project), ils sont souvent divisés en générations. Ainsi, la (1G) est le système mobile analogique des années 1980s du siècle dernier. La (2G) est le premier système mobile numérique et la 3G le premier des systèmes pouvant supporter des données à haut débit (Broadband data). L'évolution à long terme ou la LTE (Long Term Evolution) souvent appelée "4G", est la LTE Advanced est l'étape de l'évolution réelle

vers la 4<sup>ème</sup> génération, avec la première version de la LTE : version (release) 8 comme étant la "3.9G".

D'après le tableau I.3, nous voyons un écart de 10 ans entre les principales générations des technologies de communication sans fil. Le tableau I.3 décrit aussi les caractéristiques spécifiques des cinq générations. [I.26]

	1G	2G	3G	4G	5G
Date approximation de déploiement	Années 1980	Années 1990	Années 2000	Années 2010	Années 2020
Vitesse téléchargement théorique	2 kbit/s	384 kbit/s	56 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
Temps de latence	Sans objet	629 ms	212 ms	60-98 ms	<1ms

**Tableau I.3:** Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles.

### I.11.2. Définition

La «5G» est une nouvelle génération de technologie de télécommunications sans fil, qui fait suite aux précédentes générations de la téléphonie mobile. Elle promet de révolutionner la façon de communiquer dans le monde entier. Cette cinquième génération (5G) vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Avec la 5G, la transmission des données sur connexions haut débit sans fil pourrait atteindre, selon certaines estimations, une vitesse de 20Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires, et une latence égale ou inférieure à 1ms pour les usages à boucle de retour en temps réel. La 5G, avec l'avantage de bande passante et sa technologie d'antenne avancée, ouvre aussi la voie à la croissance exponentielle des données transmises sur les systèmes sans fil [I.27].

### I.11.3. Objectif et Principe

La 5G permet des connexions et des téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, on se concentrait sur l'internet des objets. La 5G vise donc à :

- Assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette.

- Atteindre les meilleurs débits (1 Gb par seconde). Avoir de plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Avoir un temps de « latence » plus court qui donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Avoir Moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.

Comme principe, la 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz, mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G [I.28].

#### **I.11.4. Ondes millimétriques**

Les ondes millimétriques sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz (Figure I.18). Nos appareils électroniques communiquent sur une bande de fréquences spécifiques actuellement au-dessous des 6 GHz, mais cette bande de fréquence est très encombré, plus il y'a des objets connectés plus ce service se dégrade. Dans une commande à distance et pour traiter un plus grand volume de données, il nous faut travailler avec de plus hautes fréquences est un plus large spectre. D'une part, les hautes fréquences permettent de passer plus d'information par seconde, d'autre part l'augmentation du spectre permet d'augmenter le nombre de canaux de transmission. Ces deux améliorations permettent de désencombrer le réseau. Cependant, les ondes millimétriques présentent la contrainte de pénétration, où elles traversent les obstacles difficilement, elles sont à plus courte portée et ont tendance à être absorbées par les arbres ou la pluie. Pour résoudre ces problèmes, nous avons besoin d'une deuxième technologie, un réseau de petites antennes [I.29].

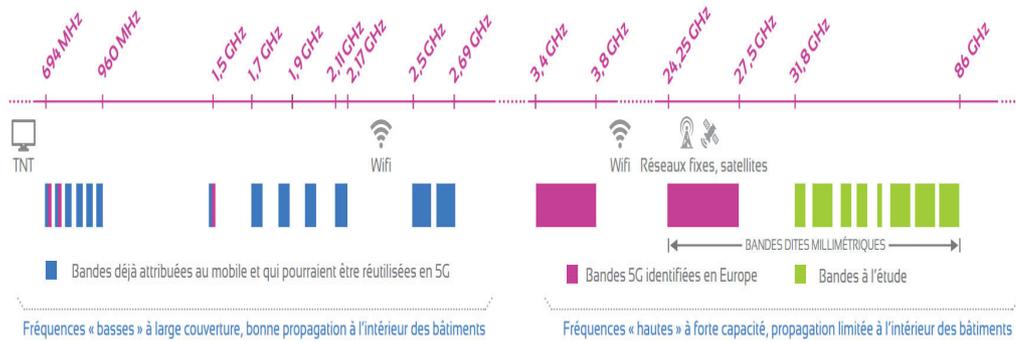


Figure I.18 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques).

## I.11.5. Avantages et inconvénients de la 5G

### I.11.5.1. Avantages [I.30]

- Débit : La 5G va permettre d'aller vite, beaucoup plus vite : des débits de 10 Gbit/s contre 100 Mb/s aujourd'hui. Ce débit peut se comparer avec le réseau de fibres standard disponible chez vous actuellement.
- Latence réduite : désigne le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction.
- Objets connectés : Tous vos objets du quotidien vont pouvoir être connectés simplement et à moindre coût au réseau. C'est l'explosion des volumes de données transmises.

### I.11.5.1. Inconvénients [I.31]

Le futur réseau 5G suscite néanmoins quelques inquiétudes notamment en matière d'exposition aux ondes. En effet, l'impact des radiofréquences sur notre santé et sur l'environnement fait débat, l'arrivée de la 5G, tout comme la 4G, augmentera obligatoirement l'exposition aux ondes avec l'installation de nouvelles antennes pour assurer une bonne couverture 5G du territoire. Pour évaluer si la 5G présente un danger pour notre santé, les expérimentations pilotes actuellement menées en France vont permettre de mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. L'Anse devra également déterminer les limites sanitaires à adopter pour le réseau 5G.

## I.12. Conclusion

La technologie microbande en générale, et les antennes patchs en particulier connaissent un succès croissant aux prés des industriels et des professionnels de télécommunications, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation, et de s'assurer qu'elle se conformera aux exigences des systèmes. Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes imprimées dont aurait besoin tout ingénieur ou chercheur s'intéressant à ce type d'antenne

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté tout d'abord les antennes patchs on donnant un bref historique, les caractéristiques et les paramètres géométriques. Nous avons présenté, par la suite, les techniques d'alimentation, les méthodes d'analyse, les domaines d'application des antennes patchs et leurs avantages et inconvénients. En fin nous avons terminé notre chapitre par cité la technologie 5G, son objectif et ses avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré au réseau d'antennes imprimées et diviseurs de puissance .

**CHAPITRE II**  
**RESEAUX D'ANTENNES ET DIVISEURS**  
**DE PUISSANCE**

## II.1. Introduction

Une antenne réseau est un ensemble d'antennes identiques, appelées éléments, distribuées dans un espace, de façons uniforme ou non, et reliées entre elles au niveau du récepteur. Ce dernier utilise donc, à un même instant, les données provenant de tous les éléments pour ne fournir qu'une seule donnée de sortie.

Dans ce deuxième chapitre, nous donnons des généralités sur les réseaux d'antennes en précisant leurs types, techniques d'alimentations, avantages et inconvénients. Puis, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous donnons des généralités sur les diviseurs de puissance, les types et les différentes formes de la jonction T pour l'adaptation de la ligne d'alimentation.

## II.2. Réseaux d'antennes

Un réseau d'antennes est formé de capteurs spatialement séparés et dont les sorties alimentent un réseau pondéré. Généralement, n'importe quelle combinaison des éléments dans différentes structures géométriques peut former un réseau [II.1].

Dans un réseau d'antenne, l'énergie est distribuée entre les diverses sources rayonnantes selon une loi donnée : les caractéristiques de rayonnement du système dépendent à la fois du diagramme de rayonnement de l'élément de base, des coefficients d'excitation en amplitude et en phase sur chaque source et de la distance entre éléments [II.2].

## II.3. Condition sur réseau d'antenne

Le réseau d'antenne contient plusieurs conditions pour avoir de meilleures performances comme [II.3]:

- Nombre d'éléments rayonnants nécessaires.
- 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'incidence 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 comparée à la fréquence porteuse.

## II.4. Types des réseaux d'antennes

Le groupement en réseau le plus simple est obtenu avec des sources identiques qui se déduisent les unes des autres par translation pour former des réseaux linéaires ou plans.

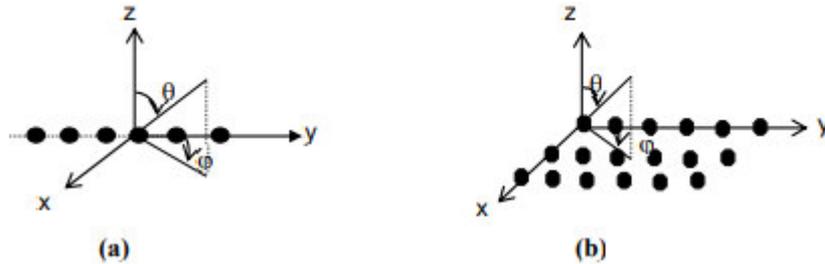


Figure II.1 : Types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnel.

### II.4.1. Réseau d'antenne rectiligne

Par définition, on appelle un réseau rectiligne ou linéaire un ensemble d'antenne placée suivant une ligne et uniforme quand les éléments sont identiques et alimentée avec un courant de même amplitude avec un déphasage Progressif  $\varphi$  [II.4], ce type de réseaux a été minutieusement traité par Balanis [II.5].

#### II.4.1.1. Réseau a deux éléments

La disposition la plus fondamentale et la plus simple à analyser est le rangement à deux éléments, cette disposition démontre le même comportement que des rangements plus grands, c'est un bon point de départ pour comprendre le rapport de phase entre les éléments adjacents

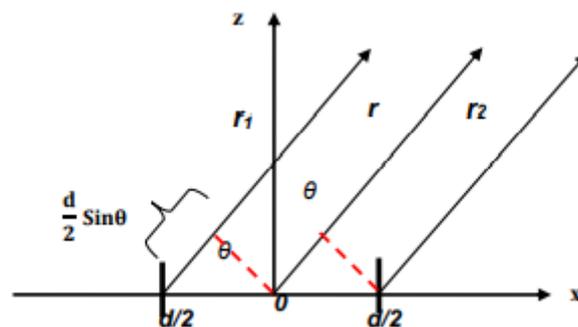


Figure II.2 : Cas de deux éléments.

### II.4.1.2. Réseau d'antenne rectiligne uniforme à N-élément

Le réseau d'antennes rectiligne le plus général est le rangement de N-éléments. Pour la simplification nous supposons que tous les éléments sont équidistants et ont des amplitudes égales (figure II.3).

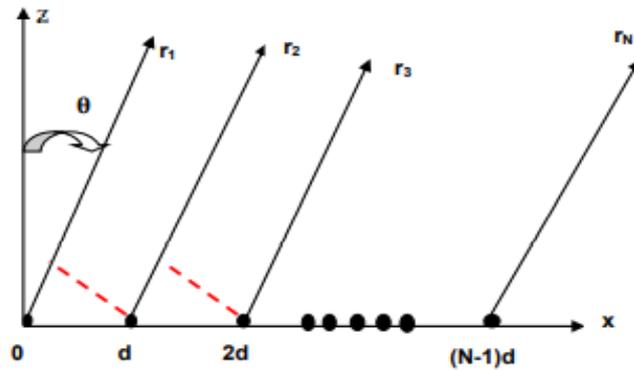


Figure II.3. Réseau linéaire à N éléments.

### II.4.2. Réseaux plans

A la différence des réseaux linéaires qui peuvent seulement balayer dans un plan (ou  $\phi$ ), les réseaux plans peuvent balayer dans les deux plans ( $\theta$  ou  $\phi$ ).

Les réseaux plans offrent un gain plus élevé et des lobes secondaires plus bas aux dépens d'un nombre d'éléments plus grand. Les principes de conception des réseaux plans sont semblables à ceux présentés pour les réseaux linéaires. Puisque les éléments sont placés dans deux dimensions (Figure II.4) [II.6].

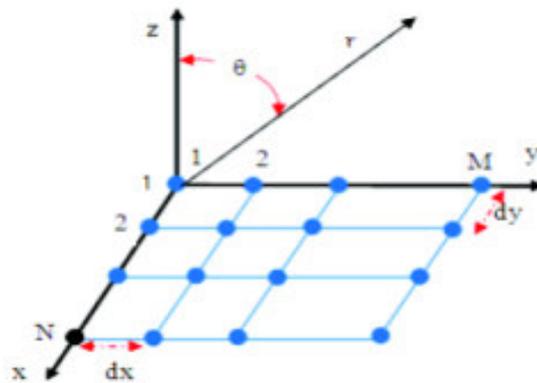


Figure II.4 : Réseau plan MxN.

### II.4.3. Réseaux circulaires

Le réseau circulaire peut être également employé pour un accroissement du gain, ainsi que pour sa géométrie. Dans une configuration de réseau circulaire, les éléments sont placés sur un cercle représenté sur la Figure II.5.

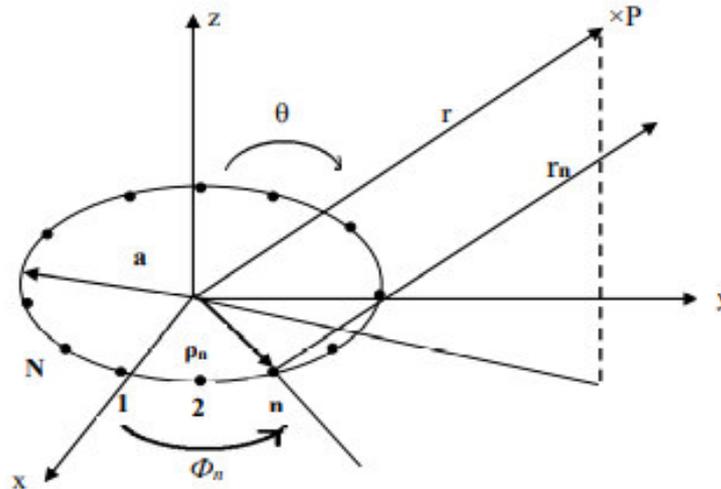


Figure II.5 : Réseau circulaire à N éléments.

## II.5. Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées

Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par l'utilisation des lignes micro-rubans et des transformateurs d'impédances (quart d'ondes) [II.7].

### II.5.1. Alimentation parallèle

Dans l'alimentation en parallèle, le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément comme montre la figure II.6 [II.8].



Figure II.6 : Réseau linéaire avec une alimentation parallèle.

### II.5.2. Alimentation en série

Pour ce type d'alimentation, les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée (figure II.7) [II.8]

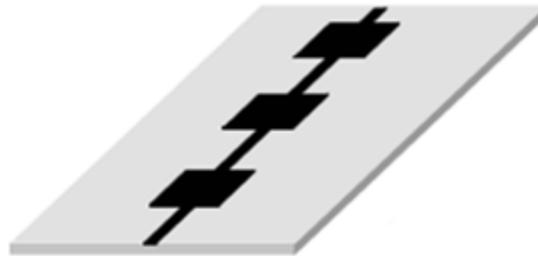


Figure II.7 : Réseau linéaire avec une alimentation en série.

### II.6. Phénomène de couplage

Le couplage mutuel est un inconvénient majeur des antennes microbandes lorsqu'elles sont utilisées comme éléments d'un réseau. Le couplage mutuel est un phénomène inévitable dans les systèmes multi-antennaires provoquant une dégradation des performances du système. Dans un réseau d'antennes lorsque deux antennes sont placées proches l'une de l'autre une interaction a lieu entre elles. Ceci provoque la distorsion du diagramme de rayonnement [II.9], [II.10].

### II.7. Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes

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 mm<sup>2</sup> jusqu'à quelque cm<sup>2</sup> de la surface)
- Le choix de déphasage régulier entre les éléments fixes, une orientation de faisceaux dans l'espace dans certaines limites d'angles.

Malheureusement, les antennes présentent également un certain nombre d'inconvénients qui peut limiter leur domaine d'application, 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.8. Diviseur de puissances**

### **II.8.1. Définition d'un diviseur de puissance**

Les diviseurs de puissance sont des composants passifs très utilisés dans le domaine des micro-ondes et RF. Ces diviseurs sont largement utilisés dans les réseaux d'antennes, les amplificateurs équilibrés, les mélangeurs, les multiplicateurs de fréquence, etc.... en tant que combineurs ou diviseurs de puissance. L'utilisation de ces diviseurs est pour assurer une alimentation d'un réseau d'antennes, un chemin doit être branché en utilisant un ou plusieurs diviseurs de puissance permettant de faire une jonction entre une entrée d'une seule voie avec la sortie de plusieurs voies [II.11]

### **II.8.2. Type de 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 résistif adapté.
- Le diviseur de Wilkinson (WPD : Wilkinson Power Divider).
- Diviseur Gysel (GPD: Gysel Power Divider).

- Le diviseur de Bagley (BDP : Bagley Power Divider).
- Le type de Diviseurs de puissance à N voies

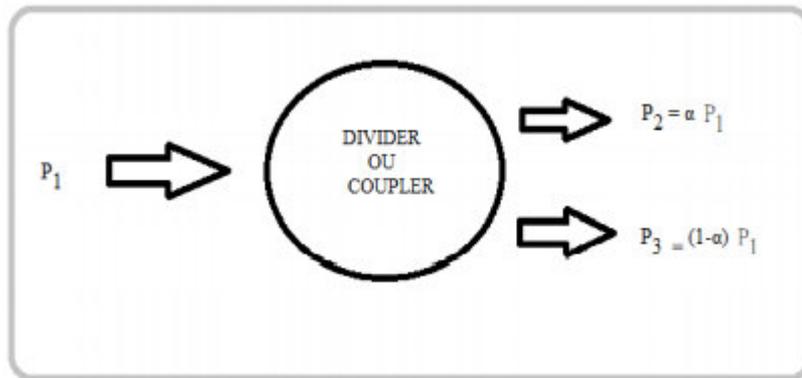


Figure II.8 : Schéma d'un diviseur de puissance.

### II.8.3. Adaptation de la ligne d'alimentation

L'adaptation de la ligne d'alimentation 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. Figure II.9 donne une idée sur les différentes formes de la jonction T [II.12].

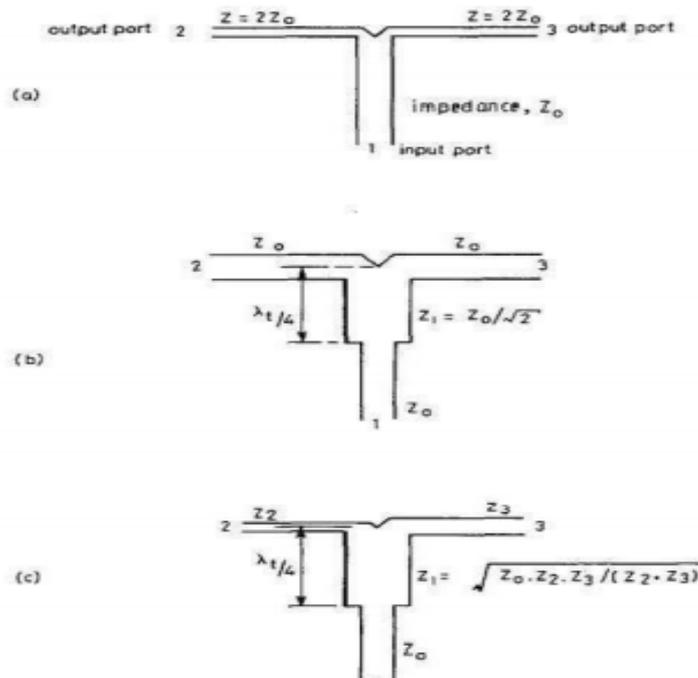


Figure II.9. Différentes formes de la jonction T.

- L'exemple montré dans la figure II.9 (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  $50 \Omega$ , alors l'impédance de sortie aura la valeur de  $100 \Omega$ .
- En ce qui concerne l'exemple de la figure II.9 (b), tous les ports ont la même impédance de  $50 \Omega$ . Pour avoir cette égalité au niveau des impédances caractéristiques, on utilise un adaptateur quart d'onde.

## II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé les généralités sur les réseaux d'antennes en citant brièvement les techniques d'alimentation, les types des réseaux d'antennes et finalement les avantages et les inconvénients. Puis nous avons passé aux diviseurs de puissance en montrons les types et les différentes forme de la jonction T.

Le chapitre suivant est consacré à la conception d'un réseau d'antenne pour la 5G mobile à la fréquence de résonance 28GHz par CST Microwave Studio.

## **CHAPITRE III**

# **CONCEPTION ET SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNES POUR UNE APPLICATION 5G**

### **III.1. Introduction**

La technologie 5G nécessitent beaucoup plus de gain, Pour répondre à ceci, nous devons construire un nouveau design basé sur l'antenne rectangulaire. Après, nous passons à la mise en réseau de deux antennes puis quatre antennes, en utilisant l'antenne design proposé. Dans ce contexte, nous présenterons d'une part la conception de l'antenne élémentaire rectangulaire, la conception de l'antenne patch design. D'autre part, nous démontrons la conception du réseau d'antenne à deux éléments en justifiant le choix du diviseur de puissance. La partie qui suit présente la structure du réseau d'antenne à quatre éléments et les résultats des simulations réalisés sous le CST pour évaluer le réseau conçu.

### **III.2. Conception et Simulation d'une antenne imprimée rectangulaire sous CST**

#### **III.2.1. Outils de simulation**

##### **III.2.1.1. Définition**

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 DEIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [III.1].

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-apport au volume du projet, (plus le projet est grand la durée de simulation est grande).

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). Fonctionnalité pour les unités à l'aide d'une grille hexaédrique. Les solveurs transitoires et mode propre également en charge la technique Tôle mince (TST).
- Caractéristique hybride à 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.2.2. Conception d'une antenne patch pour la 5G**

### **III.2.2.1. Cahier de charge**

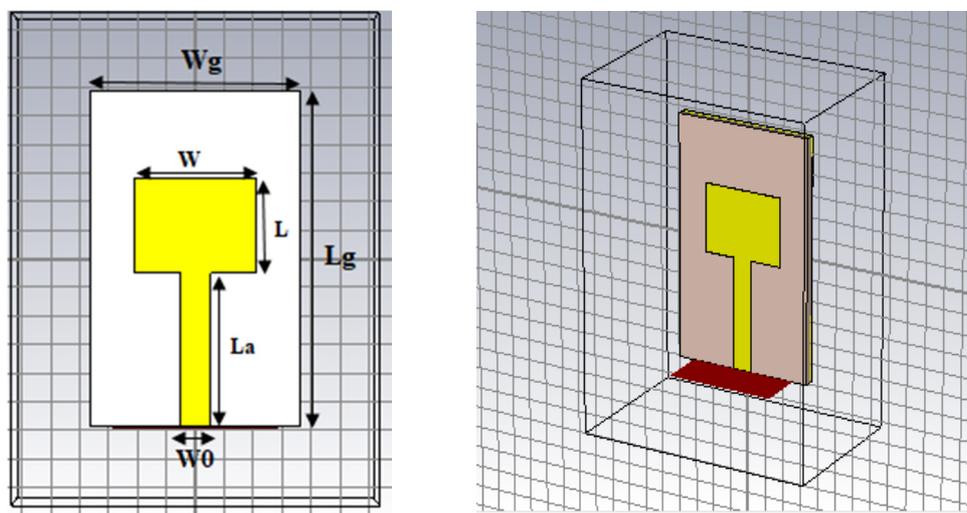
Nous allons simuler notre antenne patch rectangulaire sous CST Microwave Studio avec les données suivantes :

- Patch : rectangulaire
- Substrat: Rogers 5880 ( $h = 0.508mm$ ,  $\epsilon_r = 2.2$ )

- Fréquence de résonance :  $f_r = 28 \text{ GHz}$

La géométrie de l'antenne initiale est présentée dans la figure III.1. 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 5880 avec une permittivité diélectrique  $\epsilon_r = 4.3$ , des dimensions  $L_s \times W_s$  et d'une épaisseur  $h$ . Le plan de masse recouvre toute la face arrière du substrat.

Sur la figure III.1, on représente la structure de l'antenne initiale sous CST Microwave Studio :



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

Les dimensions du patch sont calculées par les équations théoriques de l'antenne micro ruban citées précédemment dans le premier chapitre (Chapitre I) [I.15], [III.2], [III.3]. Les dimensions de l'antenne initiale sont mentionnées dans le tableau III.1.

Les éléments de l'antenne	Dimensions(mm)	
	longueur	largeur
Plan de mass et substrat	11.696	7.288
Patch	3.288	4.24
Ligne d'alimentation	5.36	1.578

**Tableau III.1.** Dimensions de l'antenne initiale.

Sur la figure III.2, on représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale.

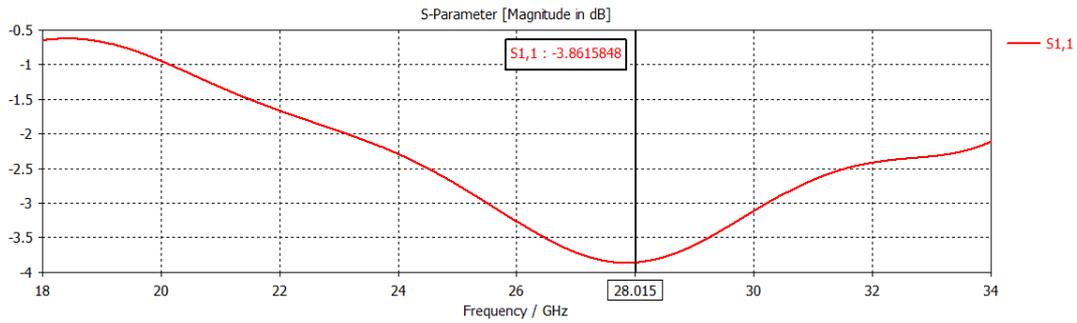


Figure III.2: Coefficient de réflexion.

D'après le résultat obtenu, nous remarquons clairement que le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est inférieur à  $-3.86$  dB à la fréquence de résonance  $28$  GHz. Donc l'antenne présente une mauvaise adaptation à la fréquence désirée.

### III.2.2.2. Adaptation de l'antenne initiale

Parmi les techniques d'adaptation exploitées pour améliorer l'adaptation de l'antenne, nous avons choisi la technique de la ligne quart d'onde. La figure suivante présente la structure de l'antenne initiale avec une ligne quart d'onde :

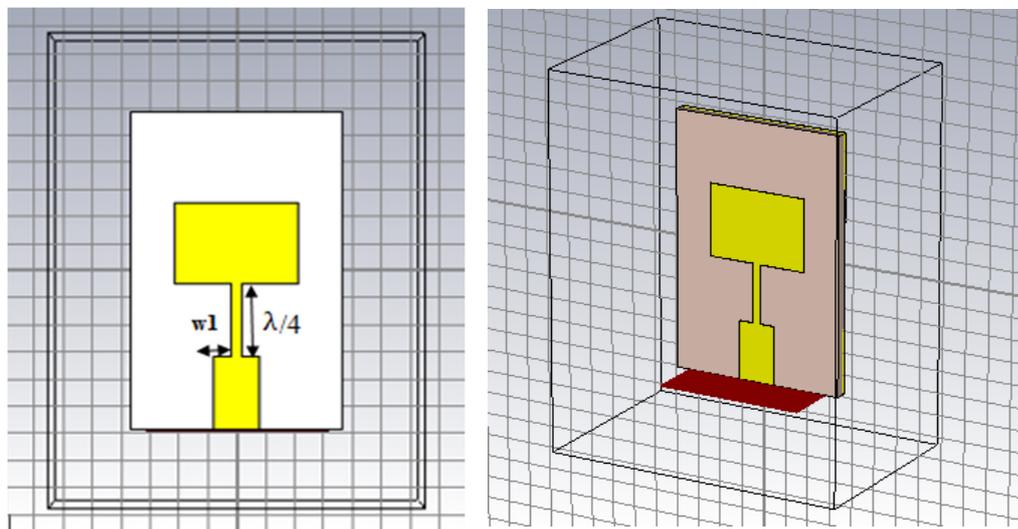
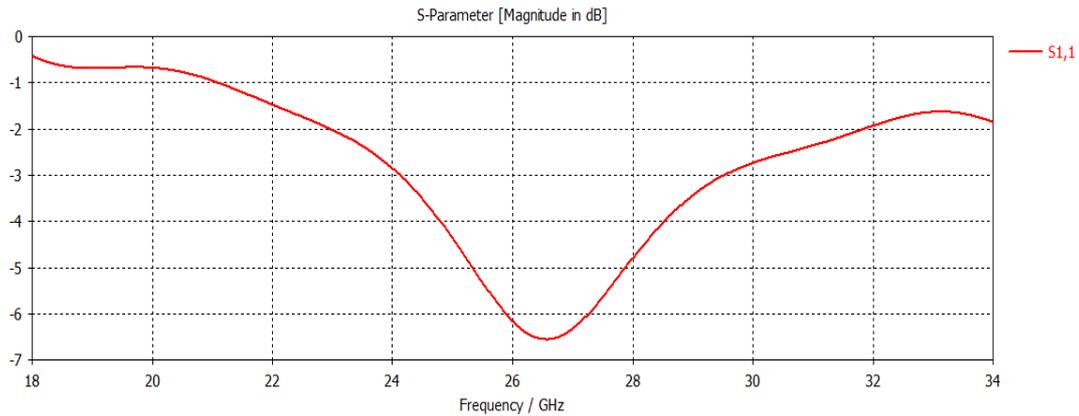


Figure III.3. Géométrie de l'antenne initiale avec ligne quart-d'onde.

Sur les figure III.4.(a) on représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale.

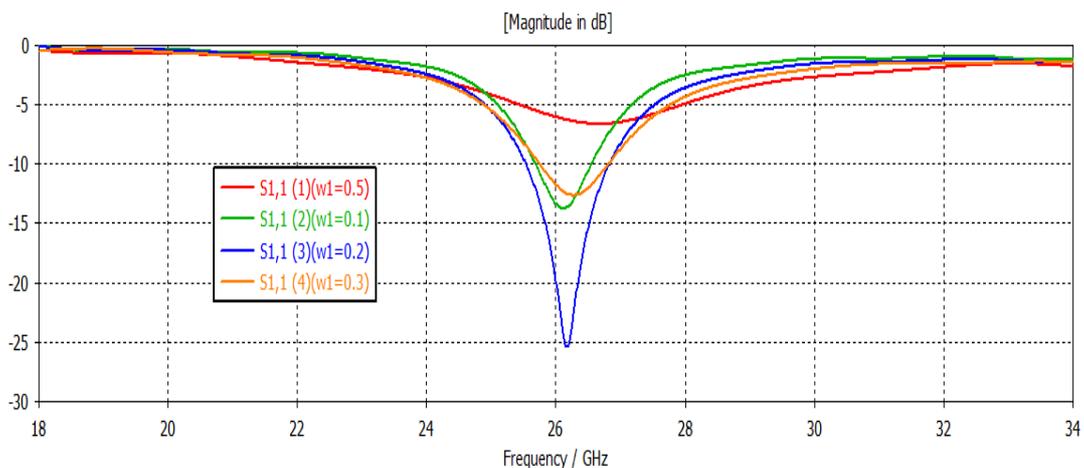


**Figure III.4.(a):** Coefficient de réflexion.

### III.2.2.3. 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.2.2.3.1. Variation de la largeur $w_1$ de la ligne quart d'onde



**Figure III.5 :** Coefficient de réflexion pour différentes largeurs de la ligne quart d'onde.

La figure III.5, confirme l'impact de la ligne quart d'onde sur le coefficient de réflexion S11, donc avoir une adaptation favorable. Par contre, nous sommes bien loin de la fréquence de résonance 28 GHz.

III.2.2.3.2. Variation de la longueur L du patch

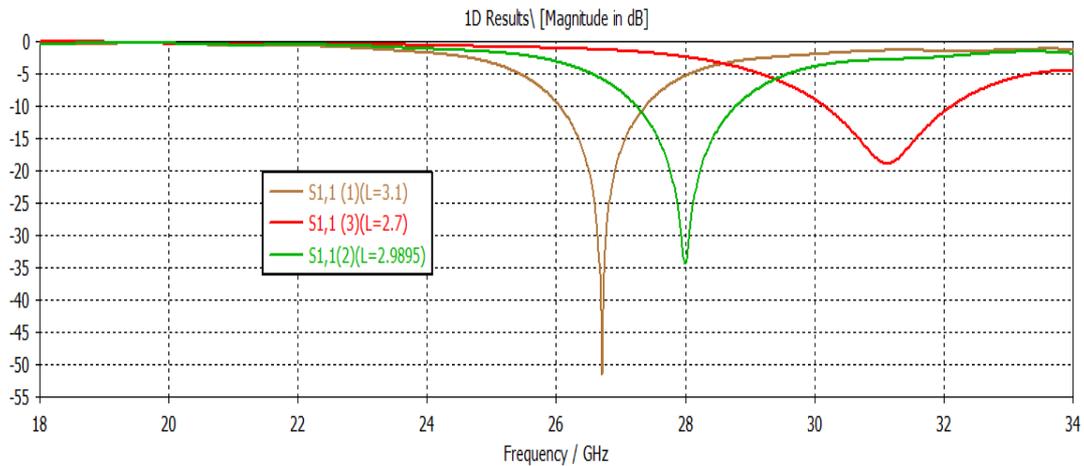
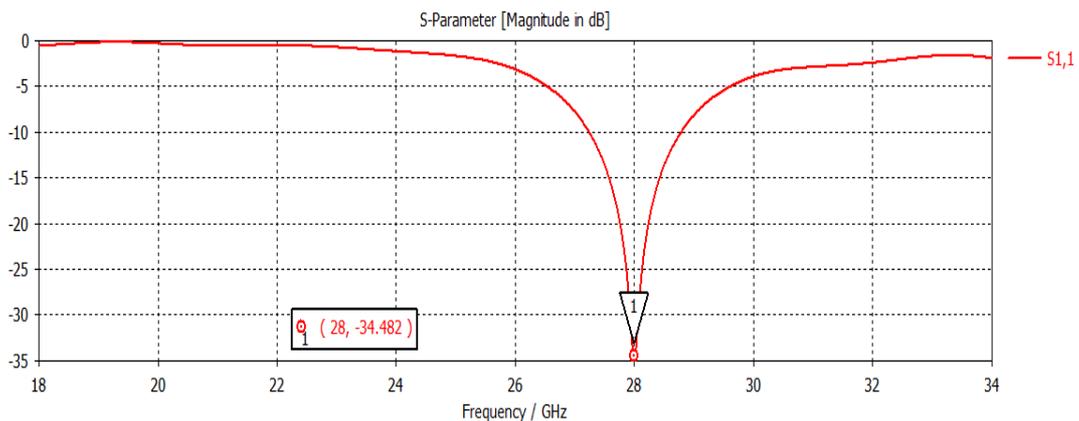


Figure III.6 : Coefficient de réflexion en variant la longueur L du patch.

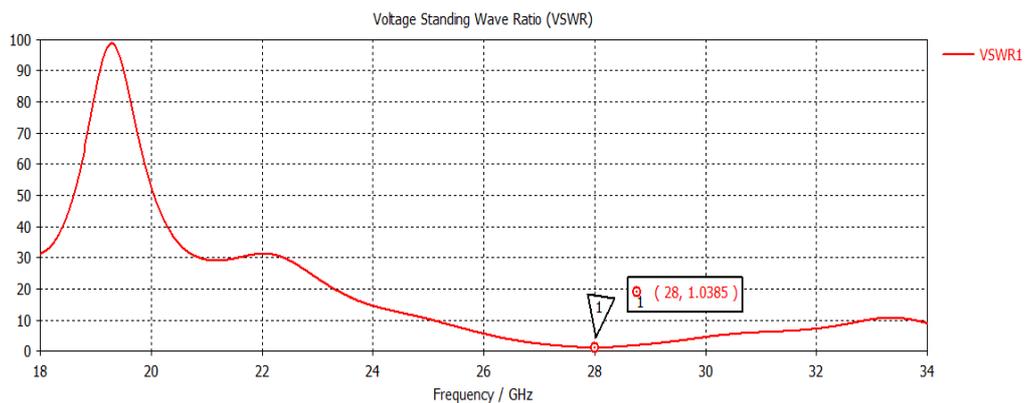
D'après les résultats des études paramétriques, nous voyons clairement que l'antenne initiale est bien adaptée en changeant la largeur de la ligne quart d'onde et la longueur du patch. Nous observons une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour  $w_1 = 0.2\text{mm}$  et  $L = 2.9895\text{ mm}$ .

III.2.2.4. Résultat après l'étude paramétrique de l'antenne initiale

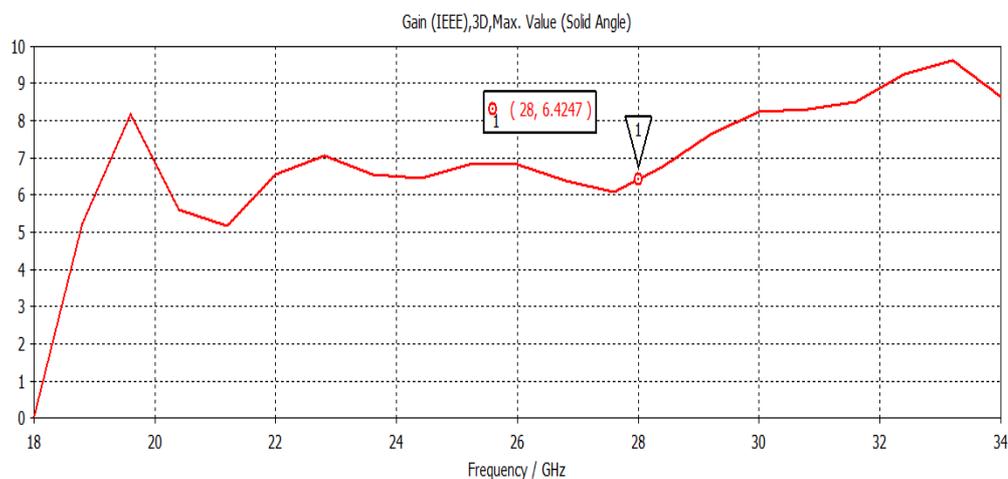
Sur les figures III.7.((a), (b) et (c)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire TOS et le gain de l'antenne initiale adaptée.



(a)



**(b)**



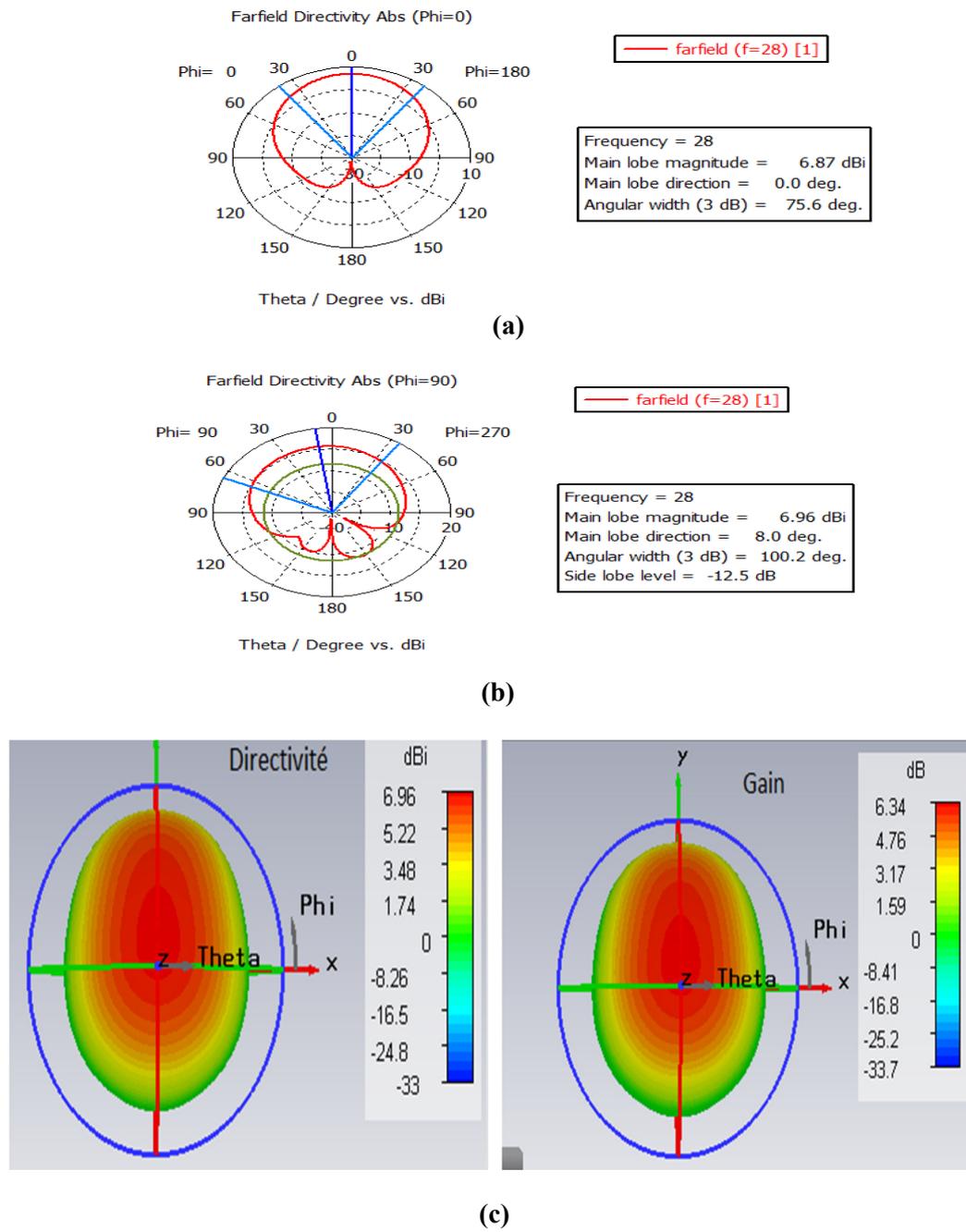
**(c)**

**Figure III.7.(a):** Coefficient de réflexion.  
**(b):** Taux d'onde stationnaire.  
**(c) :** Gain de l'antenne.

On admet qu'une bonne adaptation est obtenue lorsque le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est inférieur à -10 dB. Cela correspond à un Rapport d'onde stationnaire compris entre 1 et 2.

On peut voir que l'adaptation est réalisée à la fréquence de résonance 28GHz avec un coefficient de réflexion de -34.48dB. Nous avons également mesuré le rapport d'onde stationnaire (VSWR), il est égal à 1.17. Ceci traduit alors une adaptation parfaite à la fréquence choisie. La bande passante est de l'ordre de 5.5 %.

Sur les figures III.8.((a),(b) et (c)), on représente respectivement les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et en 3D de l'antenne à la fréquence de résonance 28GHz .



**Figure III.8.(a):** Diagramme de rayonnement en 2D, plan E.  
**(b) :** Diagramme de rayonnement en 2D, plan H.  
**(c) :** Diagramme de rayonnement en 3D.

On remarque que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans le plan E ( $\varphi = 0^\circ$ ) et dans le plan H ( $\varphi = 90^\circ$ ). Ces tracés sont vérifiés sur le tracé du diagramme de rayonnement en 3D.

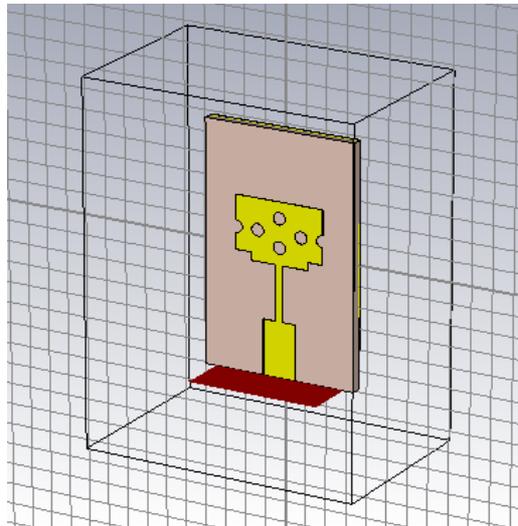
L'efficacité de l'antenne est déterminée par la relation (III.1) en fonction du gain et de la directivité comme suit :

$$\eta = \frac{\text{Gain}}{\text{directivité}} \quad (\text{III.1})$$

Dans notre cas, l'efficacité de l'antenne initiale est égale à : 91%.

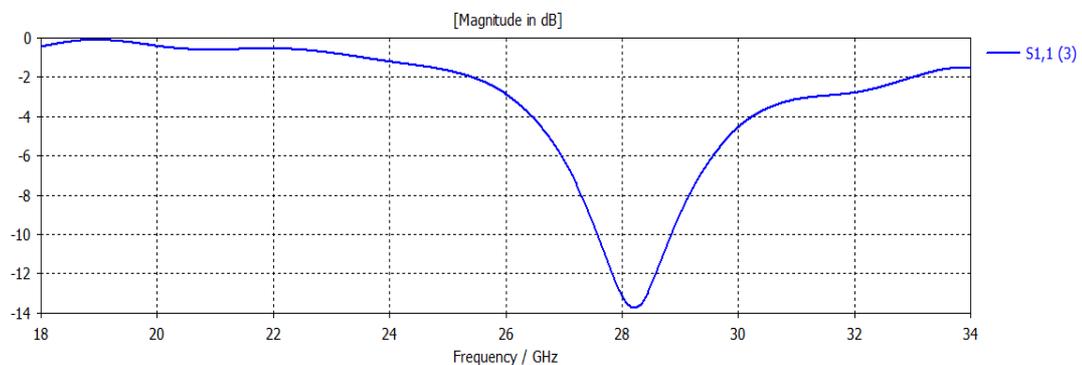
### III.3. Conception d'une nouvelle structure d'antenne patch basée sur l'antenne patch précédente

Nous avons inséré des encoches et des fentes de forme circulaire dont le rayon est égal à 0.3mm sur l'élément rayonnant de l'antenne patch initiale adaptée à la fréquence de résonance 28GHz. La structure de cette antenne dans le rédacteur du CST Microwave Studio est donnée par la figure III.9.



**Figure III.9.** Géométrie de l'antenne modifiée.

Sur la figure III.10, on représente le coefficient de réflexion de l'antenne modifiée.



**Figure III.10 :** Coefficient de réflexion de l'antenne modifiée.

Nous observons clairement que le coefficient de réflexion présente un pic inférieur à -13.5dB à la fréquence 28.2 GHz. Pour améliorer l'adaptation de la structure nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions de l'antenne.

### III.3.1. Variation de la largeur $w_1$ de la ligne quart d'onde

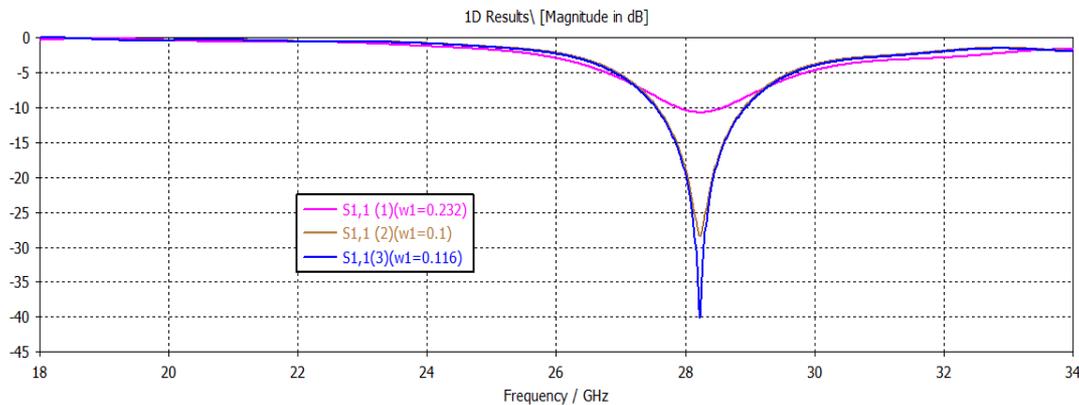


Figure III.11 : Coefficient de réflexion pour différentes largeurs de la ligne quart d'onde.

En manipulant les valeurs de la largeur  $w_1$ , nous voyons que le coefficient de réflexion S<sub>11</sub> peut aller jusqu'à -40dB.

### III.3.2. Variation de la longueur L du patch

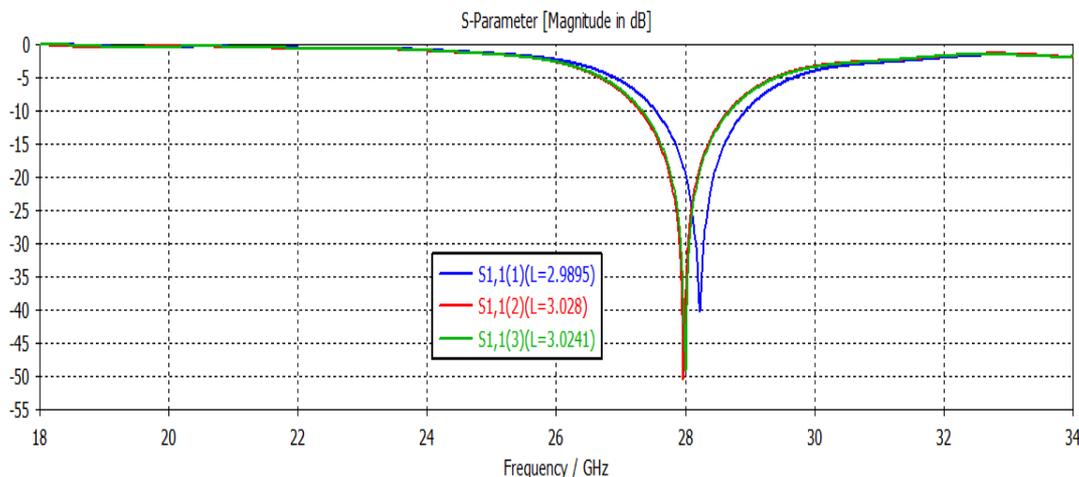


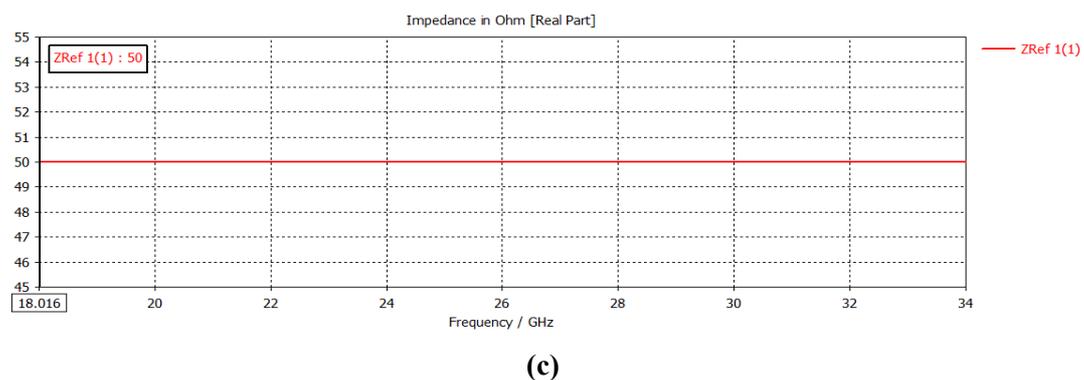
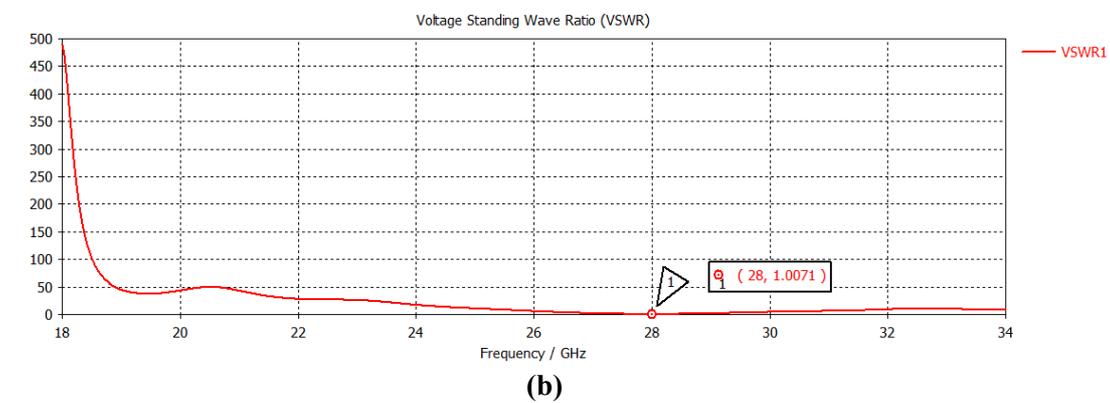
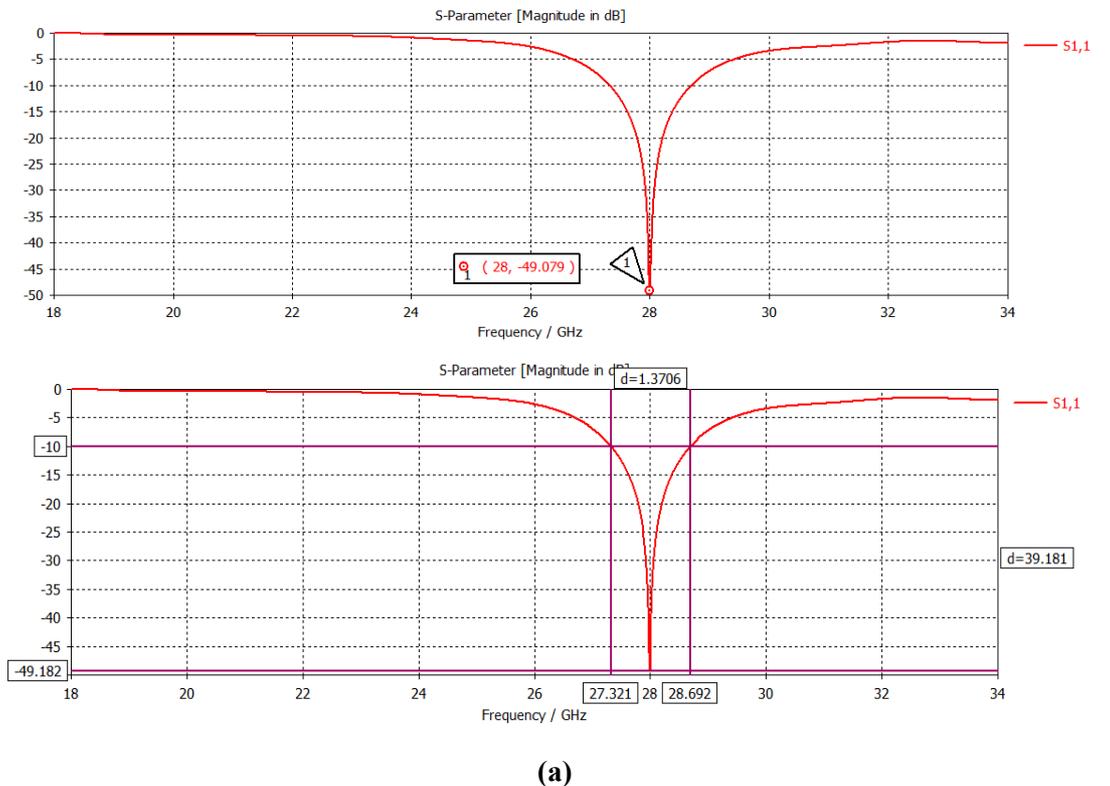
Figure III.12 : Coefficient de réflexion en variant la longueur L du patch.

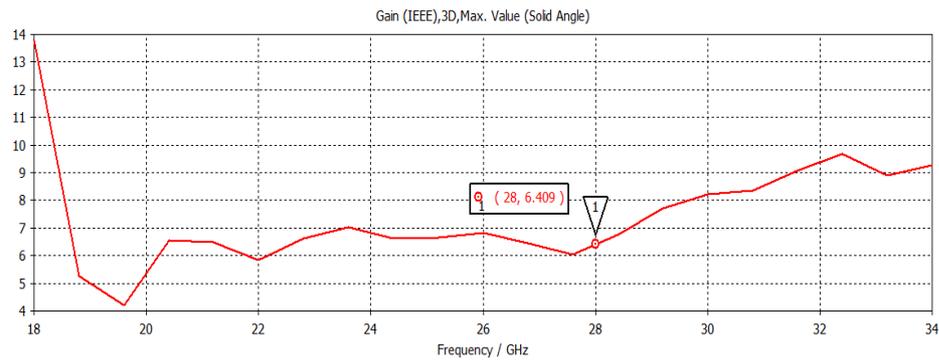
A la base des résultats trouvés au-dessus, nous pouvons sélectionner la meilleure adaptation de l'antenne patch modifiée.

### III.3.3. Résultat après l'étude paramétrique de l'antenne proposée

## CHAPITRE III CONCEPTION ET SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNE POUR UNE APPLICATION 5G

Sur les figures III.13.(a), (b) (c) et (d)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire TOS, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le gain de l'antenne après l'étude paramétrique de l'antenne proposée.



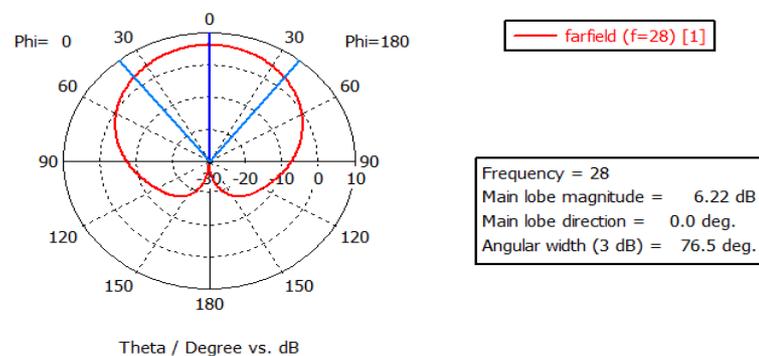


(d)

**Figure III.13.** (a): Coefficient de réflexion.  
 (b): Taux d'onde stationnaire.  
 (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée.  
 (d) : Gain de l'antenne.

La figure III.13.(a) montre que l'adaptation est bien réalisée puisque le coefficient de réflexion S11 atteint un niveau proche de -49 dB à la fréquence de résonance 28 GHz, donc la réflexion à l'entrée de l'antenne est nulle. Nous avons présenté aussi le rapport d'onde stationnaire, on remarque qu'il est compris entre 1 et 2 ce qui montre une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation. De même, la représentation de la partie réelle de l'impédance d'entrée qui est adaptée à 50 Ω traduit une très bonne adaptation de l'antenne. La largeur de la bande passante est égale à 1.37GHz.

Sur les figures III.14.((a),(b) et (c)), on représente respectivement les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et en 3D de l'antenne à la fréquence de résonance 28GHz .



(a)

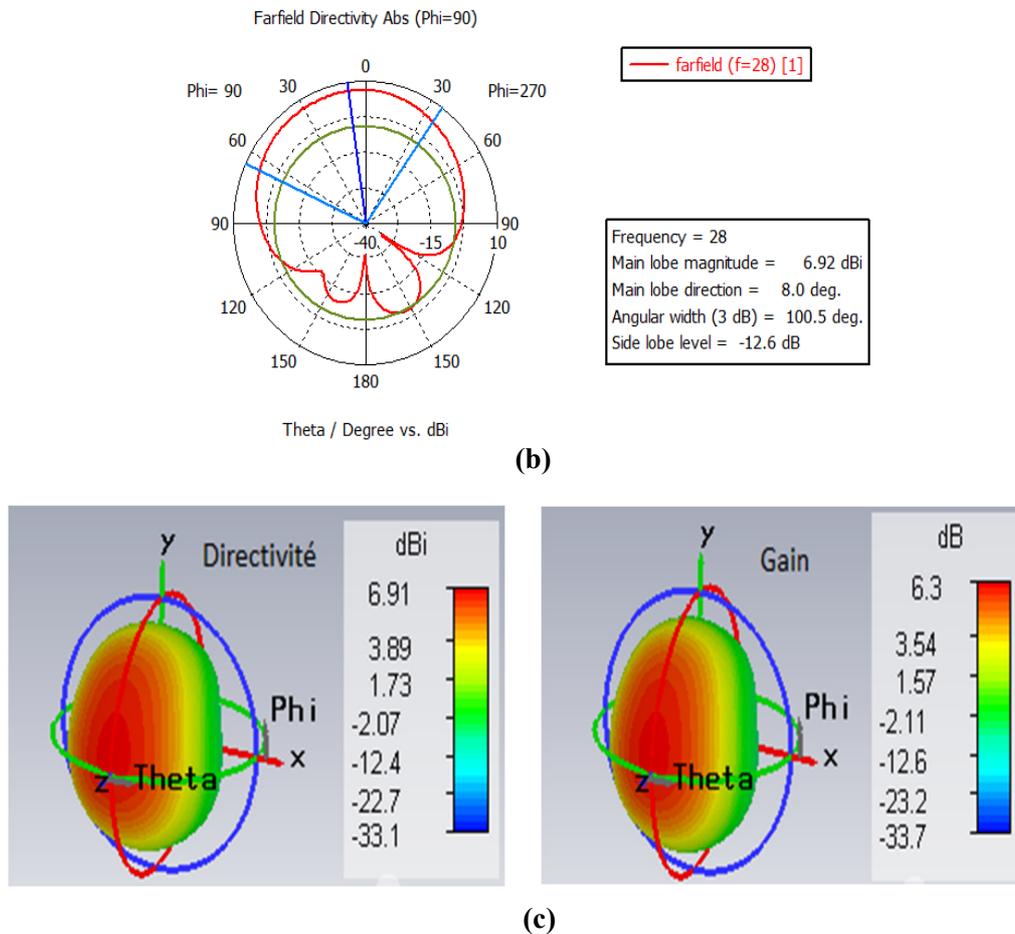


Figure III.14.(a): Diagramme de rayonnement en 2D, plan E.  
 (b) : Diagramme de rayonnement en 2D, plan H.  
 (c) : Diagramme de rayonnement en 3D.

On remarque que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans le plan E ( $\varphi = 0^\circ$ ) et dans le plan H ( $\varphi = 90^\circ$ ). Le tracé en 3D donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement.

En utilisant la relation (III.1), l'efficacité de l'antenne est égale à 91%. Le gain de l'antenne est autour de 6.3dB à la fréquence de résonance 28GHz.

### III.4. Réseau d'antenne à deux éléments 2x1 (à la base de l'antenne modifiée)

Sur la figure III.15, on représente la structure du réseau d'antennes à deux éléments

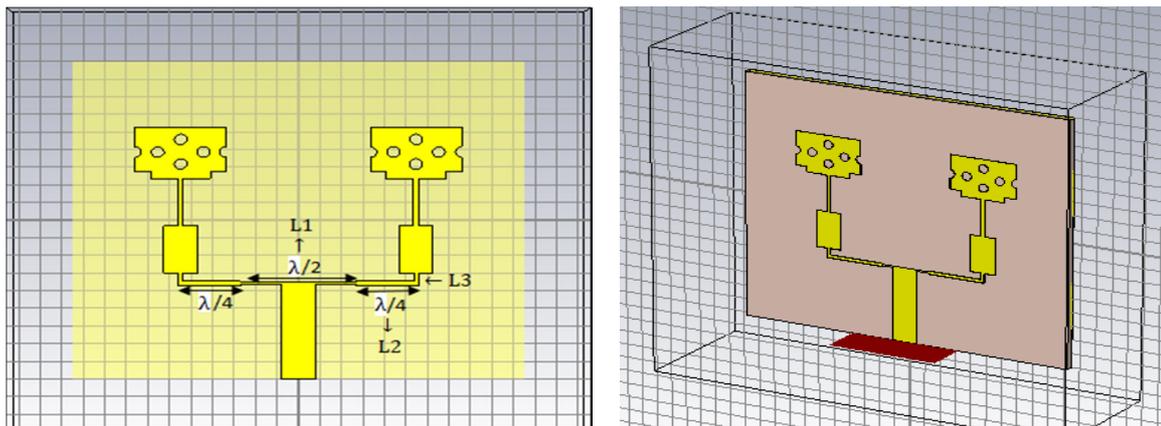


Figure III.15 : Géométrie du réseau d'antennes à deux éléments et sa structure le rédacteur du CST Microwave studio.

La longueur et la largeur du diviseur de puissance de la jonction T sont déterminées 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.

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff} \left[ \frac{w_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{w_0}{h} + 1,444 \right) \right]}} \quad (\text{III.2})$$

- Puis, on superpose une ligne demi-onde horizontalement d'impédance caractéristique est égale à  $100 \Omega$ .
- Finalement, pour raccorder la ligne  $100 \Omega$  avec la ligne d'alimentation ( $50 \Omega$ ) de l'antenne patch élémentaire, nous utilisons une ligne quart d'onde d'impédance  $Z_c=70.7\Omega$ . L'impédance de la ligne quart d'onde est calculée par l'équation suivante :

$$Z_c = \sqrt{Z_{in} * Z_{out}} \quad (\text{III.3})$$

D'où :

$Z_c$  : l'impédance caractéristique de la ligne quart 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.4) [III.4] :

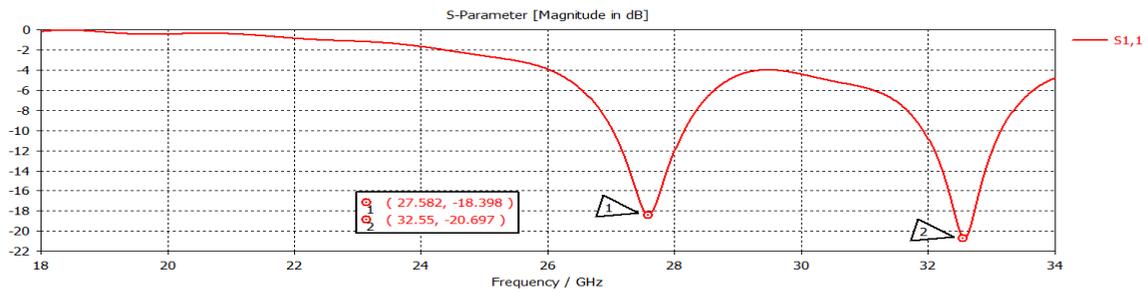
$$\begin{cases} W/h = 8e^A / (e^{2A} - 2) \\ A = \left(\frac{Z_0}{60}\right) [(\epsilon r + 1)^{\frac{1}{2}} + [(\epsilon r - 1)(\epsilon r + 1) \left(0.23 + \left(\frac{0.11}{\epsilon r}\right)\right)]] \end{cases} \quad (III.4)$$

Sur le tableau III.2, on présente une comparaison entre les dimensions de la jonction T calculées par la formule (III.4) et par le logiciel CST Microwave Studio qui sont presque identiques.

Impédance caractéristique (Ω)	Largeur de la jonction T (mm)	
	Résultats de la formule (III.4)	Résultats par CST
50	1.5682	1.578
100	0.1167	0.11023
70.7	0.2362	0.23467

**Tableau III.2 :** Dimensions de la jonction T.

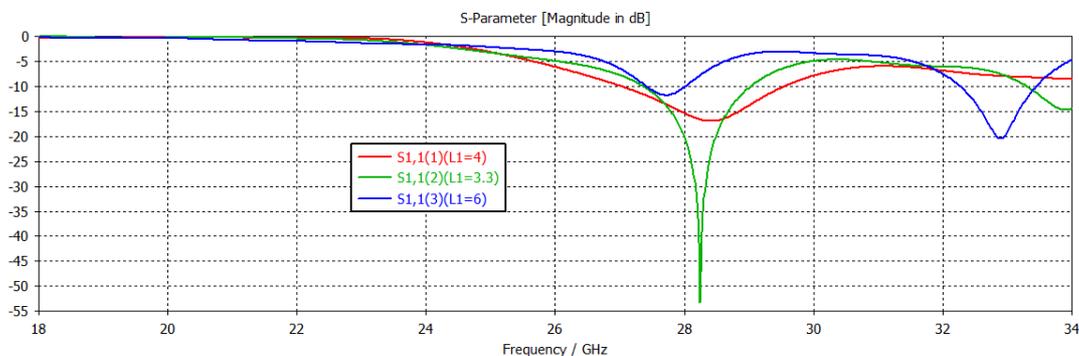
Sur la figure III.16, on représente le coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments.



**Figure III.16:** Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à deux éléments.

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

### III.4.1. Variation de la longueur $L_1$ de la jonction T



**Figure III.17 :** Coefficient de réflexion en variant la longueur  $L_1$  de la jonction T.

On remarque, d'après le graphe ci-dessus, que la diminution de la longueur  $L_1$  de la jonction T s'accompagne par une augmentation du coefficient de réflexion et une diminution de la bande passante.

### III.4.2. Variation de la longueur $L_2$ de la jonction T

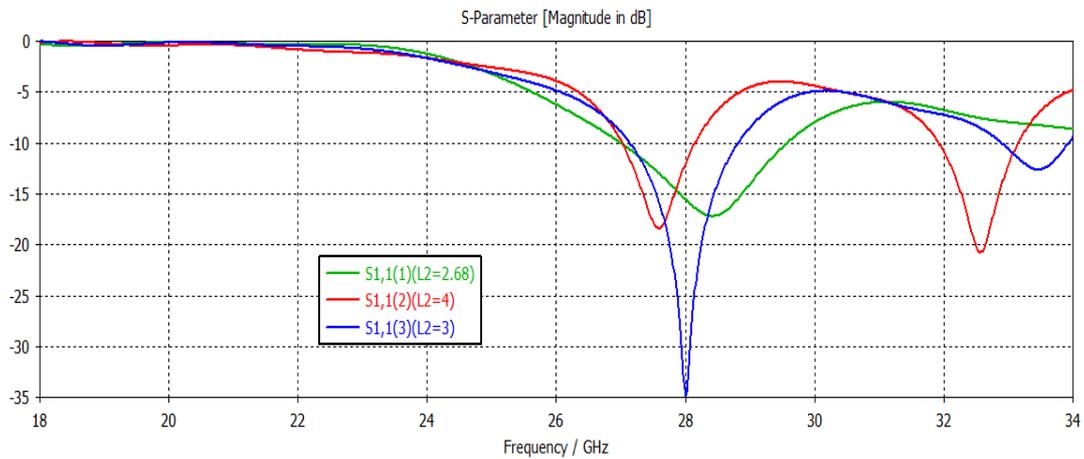
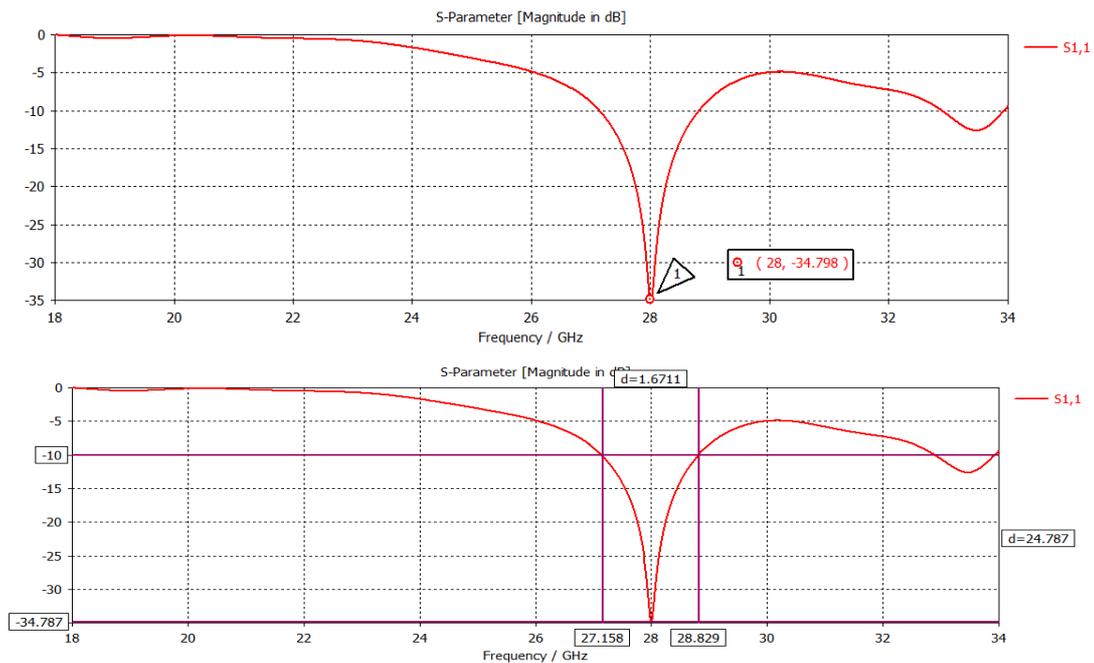


Figure III.18 : Coefficient de réflexion en variant la longueur  $L_2$  de la jonction T.

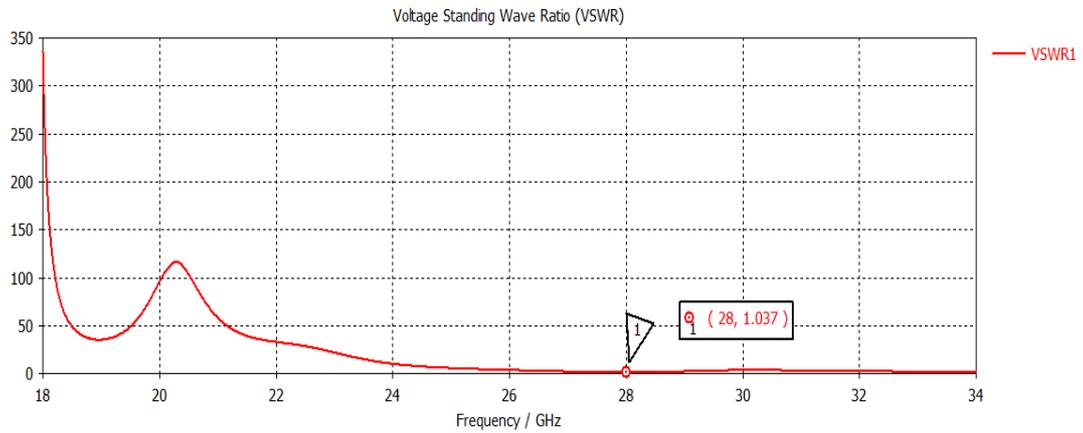
Nous observons une amélioration de l'adaptation qui est obtenue pour  $L_2$  égale à 3mm à la fréquence de résonance 28 GHz.

### III.4.3. Résultats après l'étude d'un réseau d'antennes à deux éléments

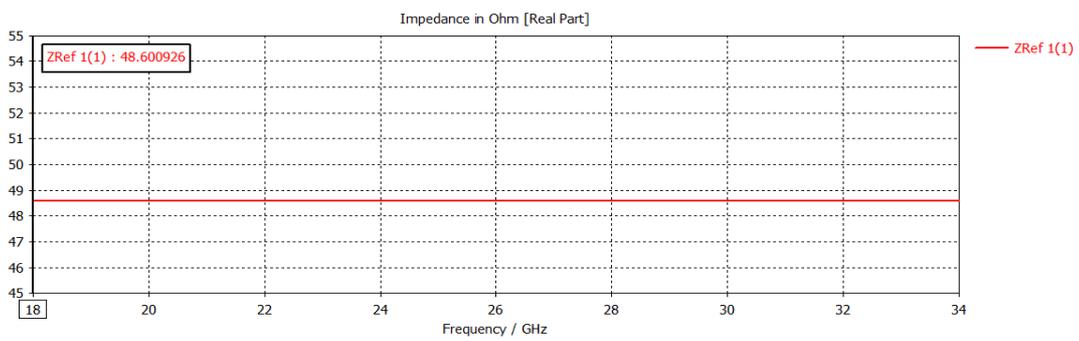
Sur les figures III.13.(a), (b), (c) et (d)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire TOS, la partie réelle de l'impédance d'entrée et le gain de l'antenne après l'étude paramétrique de l'antenne proposée.



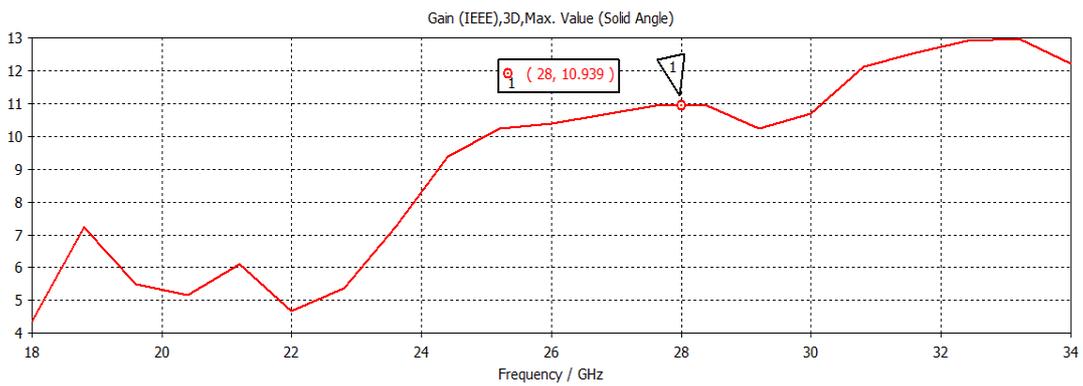
(a)



(b)



(c)



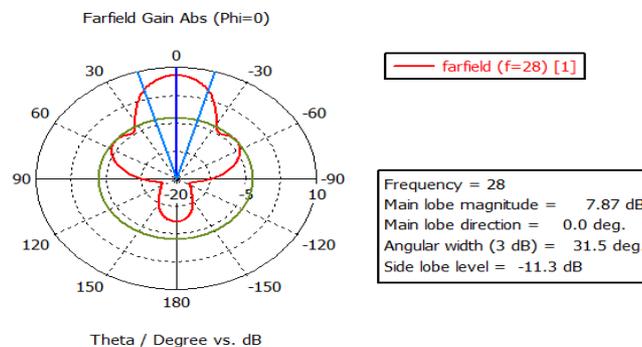
(d)

**Figure III.19.** (a): Coefficient de réflexion.  
 (b): Taux d'onde stationnaire.  
 (c) : Partie réelle de l'impédance d'entrée.  
 (d) : Gain de l'antenne.

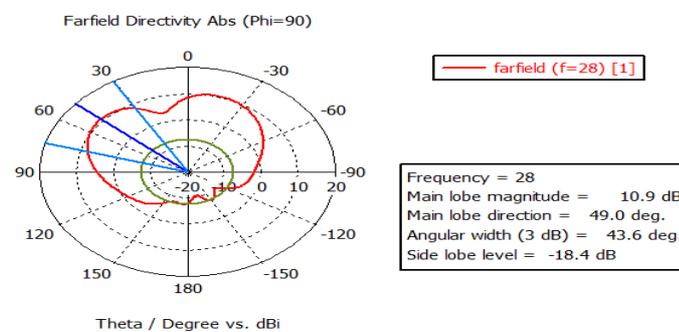
Selon la dernière étude que nous avons effectuée et pour  $L_2$  égale à 3mm, les résultats de simulation ramènent à une adaptation parfaite à la fréquence de résonance désirée. D'après la figure III.19.(a), on peut dire que la puissance réfléchie à l'entrée de l'antenne est nulle puisque le pic atteint une valeur inférieure à  $-34.798\text{dB}$  à la fréquence 28GHz selon l'application de la 5G.

Nous avons présenté aussi le rapport d'onde stationnaire, on remarque qu'il est de l'ordre de 1 à la fréquence de résonance, ce qui donne une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation. De même, la représentation de la partie réelle de l'impédance d'entrée est autour de  $48.6 \Omega (\approx 50\Omega)$ , ce qui montre une très bonne adaptation de l'antenne proposée. La bande passante est de l'ordre de 1.67GHz et le gain de l'antenne est autour de 10.4dB à la fréquence de résonance 28GHz.

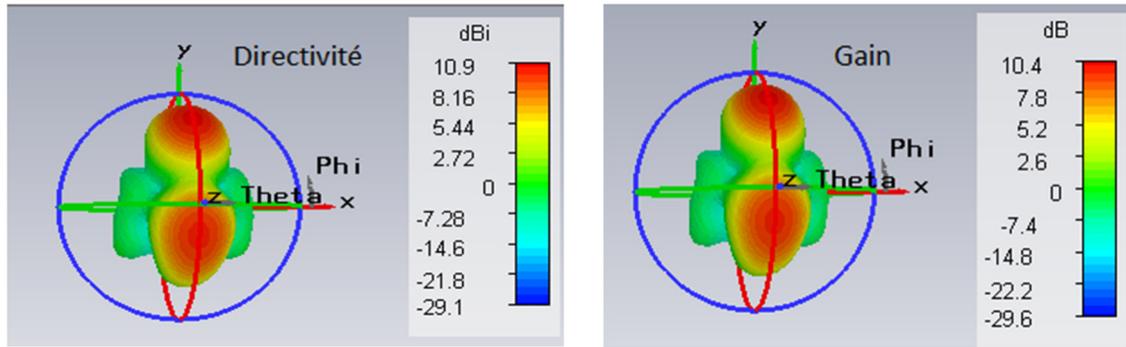
Sur les figures III.20.(a), (b) et (c)), on représente respectivement les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et en 3D de l'antenne à la fréquence de résonance 28GHz .



(a)



(b)



(c)

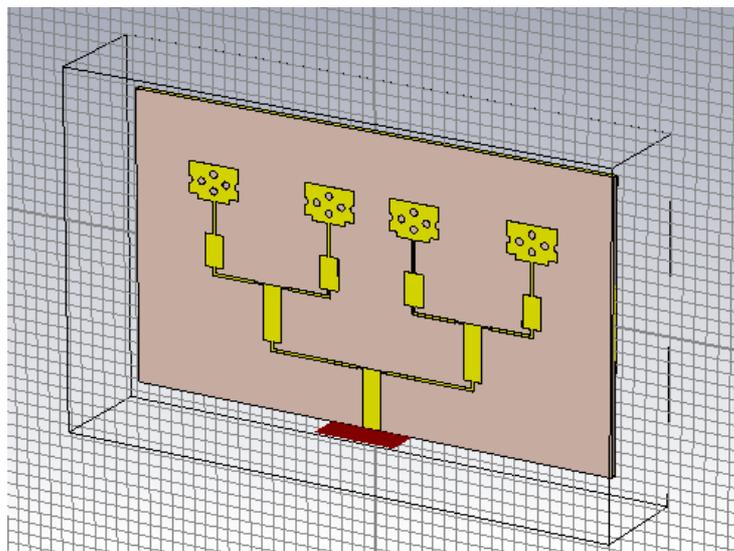
Figure III.20.(a): Diagramme de rayonnement en 2D, plan E.  
 (b) : Diagramme de rayonnement en 2D, plan H.  
 (c) : Diagramme de rayonnement en 3D.

On remarque que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans le plan E ( $\varphi = 0^\circ$ ) et dans le plan H ( $\varphi = 90^\circ$ ). Le tracé en 3D donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement.

En utilisant la relation (III.1), l'efficacité de l'antenne est égale à 95%. Le gain de l'antenne est autour de 10.4 dB à la fréquence de résonance 28GHz.

### III.5. Réseau à quatre éléments 4x1 (à la base du réseaux d'antennes à deux éléments)

Sur la figure III.21, on représente la structure du réseau d'antennes à quatre éléments



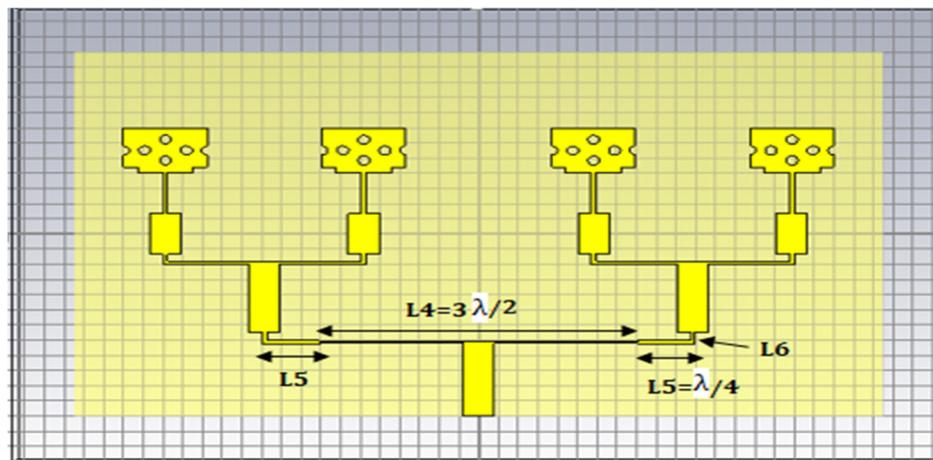


Figure III.21 : Géométrie du réseau d'antennes à quatre éléments et sa structure dans le rédacteur du CST Microwave studio.

Les mêmes principes des calculs du diviseur à deux éléments sont appliqués pour le diviseur à quatre éléments.

Nous avons utilisé une ligne micro-ruban de longueur 'L4' égale à  $3\lambda/2$  et d'impédance caractéristique  $100\Omega$ , car si nous utilisons  $\lambda/2$  ou  $\lambda$ , il y aura un chevauchement entre les antennes.

Sur la figure III.22, on représente le coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments.

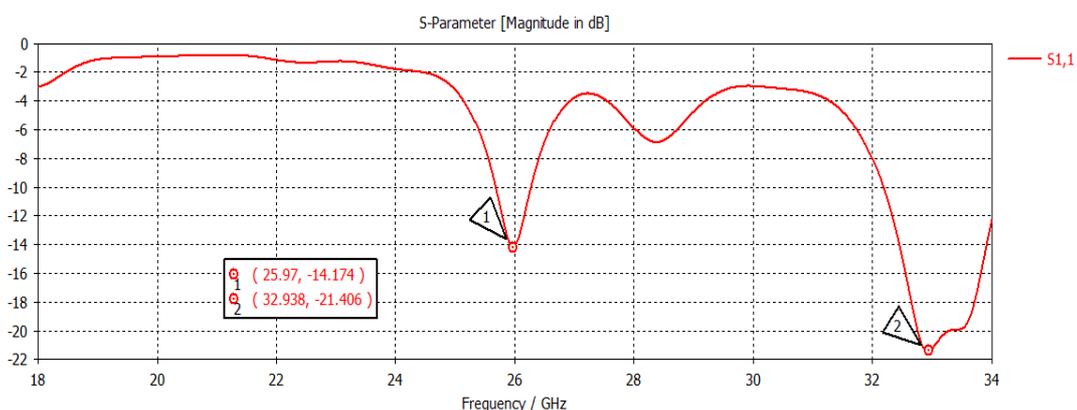


Figure III.22: Coefficient de réflexion du réseau d'antennes à quatre éléments.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons une adaptation aux fréquences de résonances 25.97 GHz et 32.93 GHz ce qui donne un fonctionnement bi-bandes. Par contre, il y a aucune adaptation au niveau de la fréquence de résonance 28GHz. Pour améliorer ce résultat, nous avons effectué une étude paramétrique sur les dimensions du réseau d'antennes à quatre éléments proposé.

### III.5.1. Variation de la longueur $L_4$ et $L_5$ du diviseur de puissance

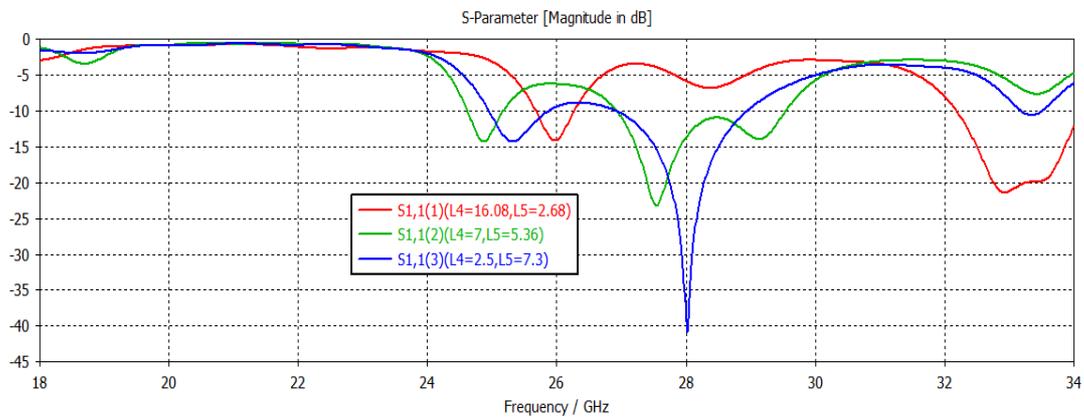
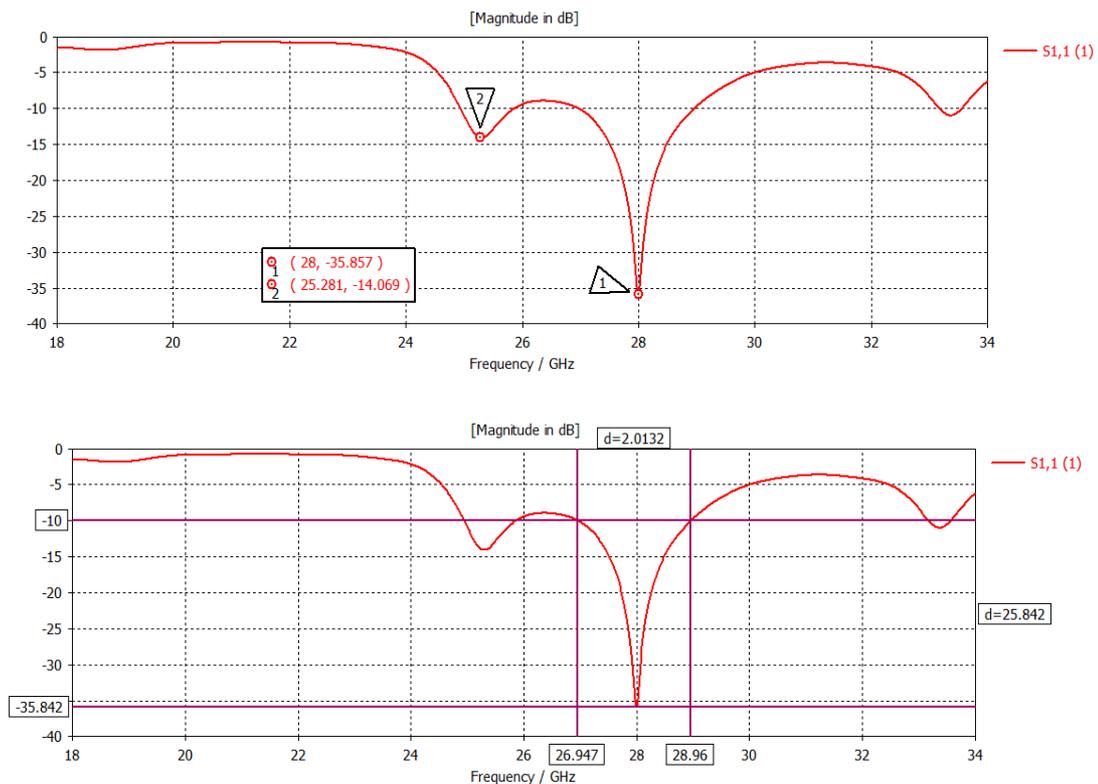
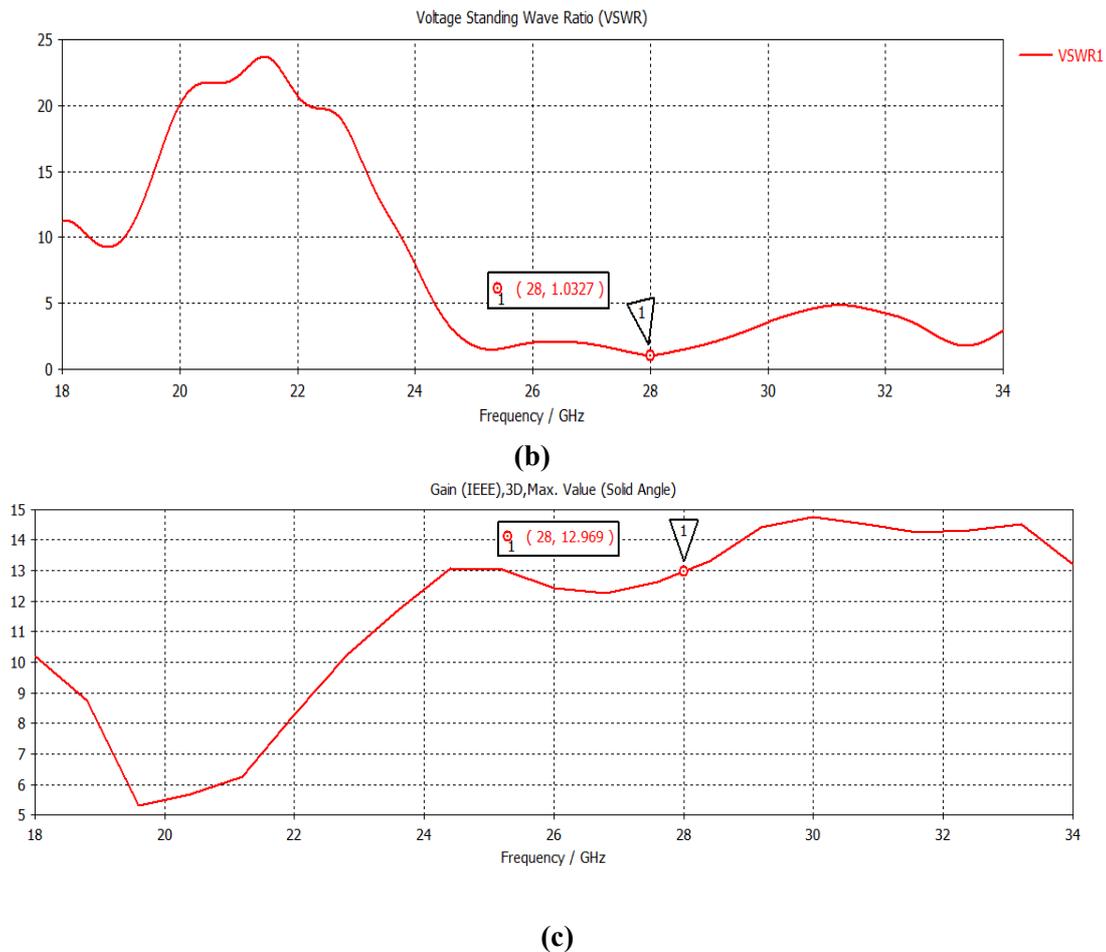


Figure III.23 : Coefficient de réflexion en variant la longueur  $L_4$  et  $L_5$  du diviseur.

### III.5.2. Résultats après l'étude d'un réseau d'antenne à quatre éléments

Sur les figures III.24.((a), (b), et (c)), on représente respectivement le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire TOS, et le gain de l'antenne après l'étude paramétrique de l'antenne proposée.

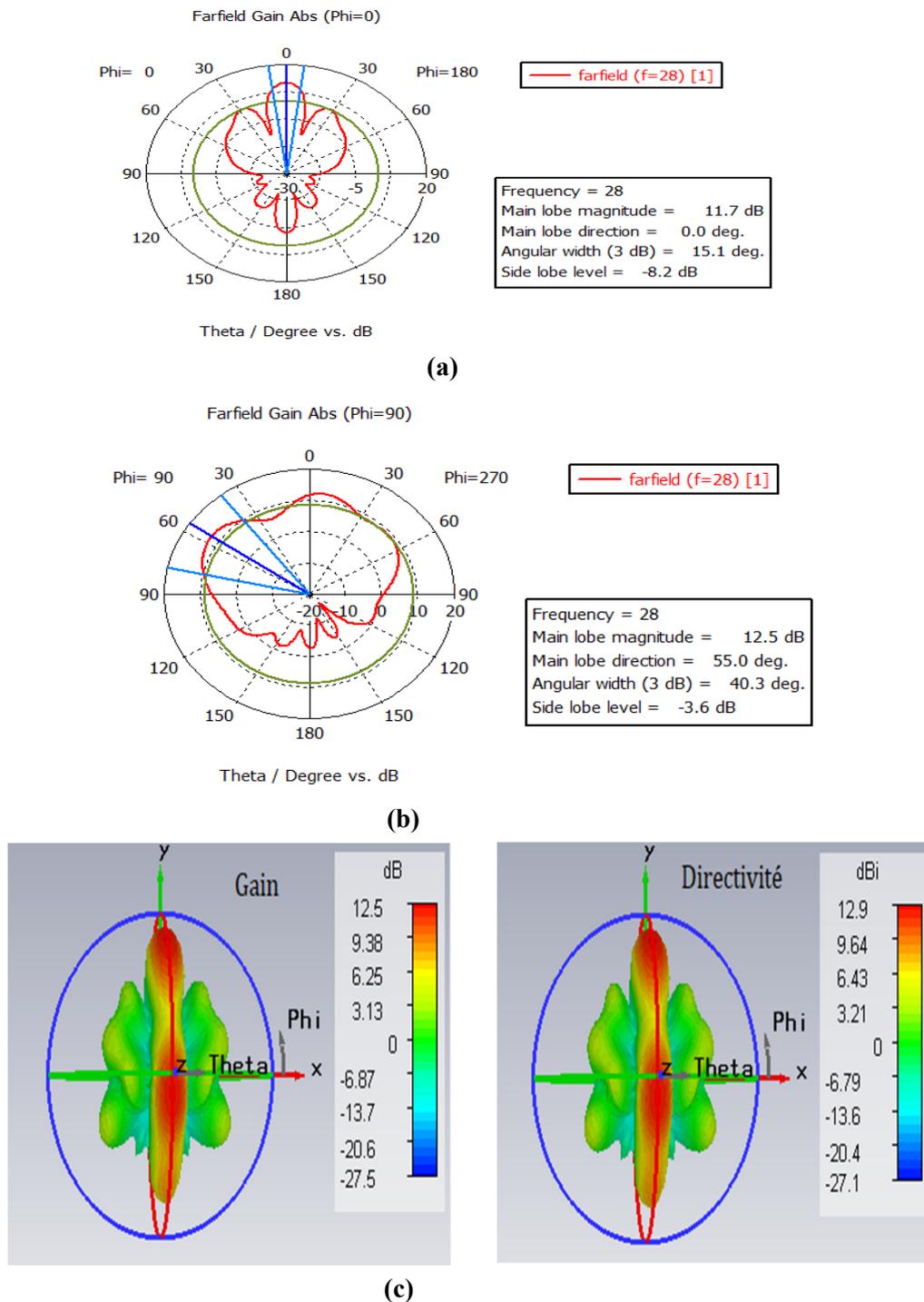




**Figure III.24.(a):** Coefficient de réflexion.  
**(b):** Taux d'onde stationnaire.  
**(c) :** Gain de l'antenne.

D'après les résultats obtenus, nous avons une adaptation favorable à la fréquence de résonance 28 GHz avec un coefficient de réflexion S11 égale à -35.8 dB. En plus, l'apparition d'un autre pic adapté à la fréquence 25.28GHz avec un pic de coefficient de réflexion inférieur à -14dB. Ce qui donne un fonctionnement bi-bandes de l'antenne. La bande passante est égale à 2GHz.

Sur les figures III.25.((a), (b) et (c)), on représente respectivement les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et en 3D de l'antenne à la fréquence de résonance 28GHz .



**Figure III.25.**(a): Diagramme de rayonnement en 2D, plan E.  
 (b) : Diagramme de rayonnement en 2D, plan H.  
 (c) : Diagramme de rayonnement en 3D.

On remarque que l'antenne présente un rayonnement presque quasi omnidirectionnel dans le plan E ( $\varphi = 0^\circ$ ) et dans le plan H ( $\varphi = 90^\circ$ ). Le tracé en 3D donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement.

En utilisant la relation (III.1), l'efficacité de l'antenne est égale à 98%. Le gain de l'antenne est autour de 12.5dB à la fréquence de résonance 28GHz.

### III.6. Comparaison des résultats obtenus

	Antenne patch design	Réseau à deux éléments	Réseau à quatre éléments
Coefficient de réflexion	<b>-49.046</b>	<b>-34.798</b>	<b>-35.857</b>
Gain (dB)	<b>6.4</b>	<b>10.9</b>	<b>12.9</b>
Efficacité (%)	<b>91%</b>	<b>95%</b>	<b>98%</b>
Bande passante (GHz)	<b>1.3655</b>	<b>1.67</b>	<b>2</b>

Tableau III. 3 : Comparaison des résultats des antennes proposées.

### III.8. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de déterminer une solution qui répondait à l'une des exigences de la 5G qui sera un gain plus élevé. Cette solution était la mise en réseau de quatre éléments à partir de l'antenne rectangulaire. Les éléments du réseau est reliés entre elles par un diviseur de puissance en jonction T. La conception a été faite par le logiciel CST Microwave Studio. L'analyse des résultats montre une bonne adaptation au 28GHz avec une amélioration importante du gain. Par ailleurs, la bande passante du patch réseau répond aux applications 5G (28Ghz). Les résultats de simulation indiquent que le réseau proposé à des bonnes performances en termes de taux d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée et d'efficacité à la fréquence de travail 28 GHz.

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale :

Le développement rapide qu'a connu ces dernières années le domaine de communication sans fil et précisément la cinquième génération a posé plusieurs défis aux concepteurs d'antennes tels que la taille réduite, la capacité de transmission de données élevée, la faible consommation d'énergie, temps de latence, cout, gain...etc

Dans le premier chapitre de ce mémoire, les généralités sur la 5G ont été présentées d'une manière générale afin de se familiariser avec le concept de base de cette notion. Nous avons ensuite présenté les antennes imprimées et par la suite dans le deuxième chapitre, les réseaux d'antennes avec 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 antenne 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 et qui est autour de la fréquence 28 GHz

L'utilisation des réseaux d'antennes améliore la qualité de transmission et permet d'augmenter le gain et large bande passante et ainsi augmentation le débit. Toutefois, le défi réside dans la conception de l'alimentation de ces antennes, leurs nombres et leur emplacement dans le réseau. Le but donc est de concevoir un réseau compact, simple, à faible cout et à un gain élevé. Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous avons fait le choix sur le type d'alimentation de la jonction en T grâce à sa simplicité de conception. Le réseau conçu comporte quatre antennes alimenté par trois ponts de jonction T. Les résultats de simulations ont permis de montrer que de notre réseau constitue un bon choix pour les applications en 5G [II.2] .

Comme perspective, nous envisagerons de poursuivre ce travail parce qu'il parait intéressant de continuer les recherches sur les réseaux d'antennes à base des antennes imprimées en optimisant ces structures, parce qu'ils ont un avenir prometteur. Egalement, pour valider les résultats d'antennes simulées, il est serait intéressant de réaliser la structure proposée.

# Références

## CHAPITRE I :

- [I.1] I. J. Bahl, P. E. Bhartia « Microstrip Antennas » Dedham,MA : Artech House.1980.
- [I.2] mémoire Master Recherche Génie Electrique \_ Université de Mohamed Khider-Biskra Faculté Technologie " Étude et caractérisation d'antennes imprimée pour les systèmes ULTRA\_LARGE\_BANDE.
- [I.3] H.H.Laribi. N.Kamni, "Conception d'antennes implantables larges bandes pour les applications médicales", mémoire Master, université de Tlemcen, 2019.
- [I.4] Odile Picon et coll « LES ANTENNES Théorie, conception et application » Préface de Maurice Bellanger, Paris, 2009.
- [I.5] D. Aissaoui, " Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées par ligne adaptées ", Mémoire de Magister, Université de Abou Baker Belkaid Tlemcen, 03/2007.
- [I.6] AMEZIANE Djamel « Etude et optimisation d'antennes fractales plaquées », Magister télécom, 20 mai 2009
- [I.7] Abdenour Yassine, Université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen Faculté Technologie " Étude et conception des antennes miniatures pour les applications biomédicales"
- [I.8] De Recherche- Rabih A Slim Conception Antenne WIFI –Micro-ruban - HFSS\_Methodologie -Université Antonine Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique
- [I.9] GUENNACH Mohamed, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Faculté des Sciences et Techniques Fès Département Génie Electrique "Conception d'une antenne ''PIFA'' Multi-bandes pour applications sans fil"
- [I.10] W.ABDELLAOUI. F.CHERGUI, Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle la cavité, mémoire fin d'étude, université de TIZI OUZOU, 2012.
- [I.11] W.DECHFEL.R.MERZOUCI, étude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée, mémoire de fin d'étude, université de M'sila, 2017.
- [I.12] Salima Azzaz Rahmani et Noureddine Boukli Hacene, "Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques : Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multibandes", Mémoire fin d'étude, université Tlemcen avril 2012.
- [I.13] Y.HUANG, and K. BOYLE, «Antennas from theory to practice», 1<sup>st</sup> edn, England : John, 2008.
- [I.14] C.A. Balanis, «Antenna theory analysis and design», Arizona State University Tempe, AZ. 2005.

- [I.15] 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.16] L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas ", IEEE trans. Antennas Propagat. , vol. 49, pp. 45-47, 01/ 2001.
- [I.17] P. F. Combes, "Micro-ondes tome 2 : Circuits passifs, Propagation, Antennes", Dunod – 1997.
- [I.18] Stalling, D, Zockler, M; Hege, H-C: «Fast display of illuminated field lines "Visualization and computer Graphics », IEEE transaction on .Vol.3, Issue2, pp.118-128, June 1997.
- [I.19] J.AISSAOUI, "Etude et conception d'antenne fractales pour des applications ultra-large-bande", thèse, Université de Tlemcen, 2019.
- [I.20] S. BADRA "Utilisation de la méthode de l'équation du champ électrique et des réseaux de neurones artificiels pour l'étude d'une antenne imprimée bicouche fonctionnant en mode ", thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2011
- [I.21] D. KHEDROUCHE "" Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale "" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Juin 2009.
- [I. 22] M. Diblang, " Développement du concept de l'antenne a résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire," Université de Limoges. Thèse de doctorat 20 mars 2006.
- [I.23] A. Hafiane, "Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique," Université de Marne la Vallée Thèse de doctorat 10 mars 2003.
- [I.24] A. Boufrioua, "Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant", Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2006.
- [I.25] Rapport-Enjeux de la 5G « Autorité de régulation des communications électronique et des postes », République Français, Mars 2017.
- [I.26] A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei . «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004.
- [I.27] Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. Walker Townes. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Netcom, 32-1/2 | 2018, 139-162.
- [I.28] Olivier Ezratty . «Opinions Libres» <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018.
- [I.29] François MAGNE. «Télécommunications haut débit en ondes millimétriques»,10 mai 1998.

[I.30] R. Cetkovic, « Les avantages de la 5G simplement », Article rédigé dans <https://www.journaldunet.com/ebusiness/telecoms-fai/1420427-les-avantages-de-la-5g-simplement/#>, 20/12/2018

[I.31] Réseaux 5G « Les avantages et les inconvénients », Article rédigé dans <https://www.prixtel.com/decouvrir-prixtel/actualite/news/reseau-5g-les-avantages-et-les-inconvenients/>, 24 juin 2019.

## CHAPITRE II :

[II.1] A .Oussoukine., N.Rayeh. «MIMO Beamforming Multi Utilisateur». L'Université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Telecommunication. Mai 2016.

[II.2] A.Bouhafs, A.Ichou, Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G, Memeoire,L'Université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Telecommunication,2020.

[II.3] C.Aissaoui, Contribution à l'analyse des antennes microbandes avec excitation par la méthode du domaine spectral - Application à un réseau d'antennes microbandes, Thèse , Université de Constantine,2017 .

[II.4] N. Nora, «Etude et simulation de diagramme de rayonnement de l'antenne intelligente », thèse de doctorat, université de Blida, édition 2007.

[II.5] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design". New York: John Wiley & Sons, 4th Edition, 2016.

[II.6] W.SAMATI «optimisation d'un réseaux d'antenne» thèse d'ingénieur, université de Blida, édition 2010.

[II.7] BARKAT OUARDA. « Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique ».Thèse doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2009.

[II.8] TITTAFI Abdelhadi, MOULAY Saïd . « Etude et conception d'un diviseur de puissance bi-bande à quatre ports ».Thème mémoire académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,2018

[II.9] R. Hazra, C. K. Ghosh, S. K. Parui, "Mutual coupling reduction between closely spaced microstrip patch elements using DGS," J Academia Ind. Res., vol. 2, pp. 142– 145, 2013.

[II.10] C. K. Ghosh, "A compact 4-channel microstrip MIMO antenna with reduced mutual coupling", Int. J Electron. Commun., vol. 70, pp. 873-879, 2016

[II.11] Daniel Courivaud-SIGTEL-Groupe ESIEE-2002.

[II.12] J. R. James and P.S. Hall, 'Handbook of Microstrip Antenna' 1989.

## CHAPITRE III :

[III.1] L Douchet, M Sauzeix, S Tisserant, « Electronique MP», 2007.

[III.2] A.Balanis . « Antenna Theory Analysis And Design » Arizona State University Tempe,AZ. 2005.

[III.3] P.S. Nakar. «Design of a compact microstrip patch antenna for use in wireless cellular devices». [Thesis]. Florida State University, Florida, USA (2004). p. 51 <http://diginole.lib.fsu.edu/islandora/object/fsu:181039/datastream/PDF/view>. Page 51

[III.4] M. H. Azizan, "Developments of Microstrip patch array antenna for wireless local area network (WLAN)," School of Computer and Communication Engineering, Universiti Malaysia Perlis, May,2007.

## Résumé

Une nouvelle révolution s'annonce avec un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles, dénommé 5G. Ce standard ouvre des perspectives pour répondre aux besoins actuels, mais également ceux du futur. Le but de la 5G ce n'est pas seulement de répondre aux déficits liés à la bande passante ou à l'augmentation de débit, mais d'obtenir un temps de latence ultra-court, de réduire la consommation énergétique avec un service de qualité omniprésent. Face à l'ensemble de ces exigences, la future génération des systèmes de télécommunications mobiles devra combiner plusieurs technologies afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire aux attentes. Pendant ces dernières années, les antennes sont devenues une matière importante de recherche dans le domaine électromagnétique. Elles sont bien conformes pour les différentes applications de la cinquième génération 5G. Plusieurs recherches ont étudiées les caractéristiques radioélectriques des antennes imprimées telles que la fréquence de résonance, la bande passante, le diagramme de rayonnement, le gain, l'efficacité...etc. L'objectif de ce travail est d'étudier et de proposer des structures d'antennes imprimées qui trouvent leurs applications dans les systèmes de la téléphonie mobile de la 5G.

**Mots-clés** : Antenne imprimée, simulation, téléphone mobile, 5G, caractéristiques radioélectriques.

## Abstract

A new revolution is coming with a new standard for mobile telecommunications systems, called 5G. This standard opens perspectives to meet current needs, but also those of the future. The goal of 5G is not only to meet the deficits related to the bandwidth or the increase in speed, but to obtain an ultra-short latency time, to reduce energy consumption with a quality service ubiquitous. Faced with all these requirements, the future generation of mobile telecommunication systems will have to combine several technologies in order to have a mobile network that can meet the expectations. In recent years antennas have become an important research topic in the electromagnetic field. They are well suited for the different applications of the fifth generation 5G. Several researches have studied the radio characteristics of printed antennas such as resonant frequency, bandwidth, radiation pattern, gain, efficiency...etc. The objective of this work is to study and propose printed antenna structures that find their applications in 5G cell phone systems.

**Keywords:** Printed antenna, mobile phone, simulation, 5G, radio characteristics.

## ملخص

ثورة جديدة قادمة بمعيار جديد لأنظمة الاتصالات المتنقلة ، يسمى 5G يفتح هذا المعيار آفاقًا لتلبية الاحتياجات الحالية ، ولكن أيضًا الاحتياجات المستقبلية. الهدف من 5G ليس فقط الاستجابة للعجز المرتبط بعرض النطاق الترددي أو لزيادة السرعة ، ولكن للحصول على وقت استجابة قصير للغاية ، لتقليل استهلاك الطاقة مع خدمة عالية الجودة منتشرة في كل مكان. في مواجهة كل هذه المتطلبات ، سيتعين على الجيل التالي من أنظمة الاتصالات المتنقلة الجمع بين العديد من التقنيات من أجل الحصول على شبكة متنقلة يمكنها تلبية التوقعات. في السنوات الأخيرة ، أصبحت الهوائيات موضوعًا مهمًا للبحث في المجال الكهرومغناطيسي. إنها متوافقة جيدًا مع التطبيقات المختلفة للجيل الخامس 5G. لقد درست العديد من الدراسات الخصائص الراديوية للهوائيات المطبوعة مثل تردد الرنين وعرض النطاق الترددي والرسم البياني للإشعاع والكسب والكفاءة وما إلى ذلك. الهدف من هذا العمل هو دراسة واقتراح هياكل الهوائيات المطبوعة التي تجد تطبيقاتها في أنظمة الهاتف المحمول 5G .

كلمات مفتاحية: هوائي مطبوع ، محاكاة ، هاتف محمول ، 5G ، خصائص الراديو.