

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : TELECOMMUNICATION  
Spécialité : Réseau et Télécommunication

Thème

**La miniaturisation d'antenne imprimée par l'ajout de fente**

Présenté Par :

- OMARI Ahmed.
- BELAILI Said.

Devant le jury composés de :

<b>DEBBAL Mohamed</b>	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
<b>FEROUANI Souheyla</b>	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
<b>MOULESSEHOUL Wassila</b>	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

*Année universitaire 2019/2020*

## **Dédicaces**

*A mon père **Mustpha***

*A ma mère **Aicha***

*Ma sœur **Khadidja***

*Mes frères **Hachem et Adem***

*Mes amis **Said , Ibrahim , Imed, Adel, walide, Oussama.***

*Mes amies **Narimane, Hadjer, Zohor, kawthar et Asmaa.***

*A mes grands-parents **Alia et Abdelakader.***

*Ma sœur **Karima.***

*Mes cousins et cousines*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Ahmed.....*

## **Dédicaces**

### **Je dédie ce travail**

*A Dieu, à qui je dois tout,*

*À toutes les personnes qui ont été là pour moi, de près ou de  
loin.*

*Je pense spécialement à mon père qui est le premier soutien  
pour moi, à ma mère pour son amour et ses encouragements.*

*À mon frère, à mon ami et mon très cher binôme Ahmed*

*A ma grande famille, qui m'a toujours soutenu, je leurs  
souhaite bonne santé et longue vie.*

*A tous mes amis, pour leur soutien moral de tous les instants,  
qui ont toujours été là pour moi.*

*A tous mes professeurs, pour leur apport à ma formation.*

*Said...*

# Remerciement

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'étude mené au niveau du département de Génie Electrique du Centre Universitaire BLHADJ Bouchaib d'Ain Témouchent.

Tout d'abord, nous tenons à remercier « **ALLAH** » le **Tout Puissant** de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour mener ce travail.

Nous tenons à remercier notre Encadrante **Mme MOULESSEHOUL Wassila** pour sa supervision, sa présence et ses conseils précieux, nous tenons à souligner la qualité de ses observations pertinentes, sa grande rigueur scientifique et son Investissement dans cette étude.

Nous remercions également Monsieur **DEBBAL Mohammed** d'avoir voulu présider le jury de ce mémoire et Madame **FEROUANI Souhayla** qui nous a fait l'honneur d'examiner le présent travail.

Nous tenons aussi à remercier notre cher frère **Khattar Brahim** pour son aide et sa gentillesse, Merci d'être un ami si merveilleux.

Nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail

Pour finir, nous remercions nos familles pour leurs patiences, leurs sacrifices et leurs encouragements.

## Résumé

De nos jours les antennes imprimées sont la technologie la plus utilisée dans le domaine des télécommunications, ces antennes ont été miniaturisées pour faciliter leurs intégrations dans divers appareils.

Ce mémoire a pour but de simuler et miniaturiser une antenne patch rectangulaire qui rayonne à 2.4 GHz en utilisant la technique d'insertion des fentes, tout en gardant ces performances (gain, directivité, bande passante), cette antenne est alimentée par une ligne micro-ruban adaptée à une impédance d'entrée à 50 ohm avec des caractéristiques de rayonnement optimal

Les résultats de simulations ont été validés par une méthode numérique d'analyse à l'aide du logiciel CST.

**Mot clés :** antenne imprimée, miniaturisation, technique d'insertions des fentes

## Abstract

Nowadays printed antennas are the most used technology in the field of telecommunications, these antennas were miniaturized to facilitate the integration in various devices.

our research work has the objective of simulating a rectangular patch antenna which radiates at 2.4GHz and miniaturizing it by using the insertion of slots as a technique, while keeping its performances (gain, directivity, bandwidth), this antenna is powered by a micro ribbon line and adapted to an input impedance at 50 ohm with optimal radiation characteristics, The results of simulations were validated by using CST software.

**Key words:** printed antennas, miniaturized, slots insertion technique.

# Sommaire

*Dédicaces*

Remerciement

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

*Introduction générale* ..... 1

*Chapitre I : Etat de l'art sur les antennes imprimées*

I.1	Introduction	3
I.2	Définition d'une antenne imprimée	3
I.3	Historique de l'antenne imprimée	4
I.4	Caractéristiques des antennes imprimées	4
I.4.1	Le Coefficient de réflexion	4
I.4.2	L'impédance d'entrée	5
I.4.3	La bande passante	5
I.4.4	Le Diagramme de rayonnement	6
I.4.5	La Directivité	7
I.4.6	Le gain	7
I.4.7	Le rendement	7
I.4.8	L'Ouverture	7
I.4.9	La polarisation	8
I.5	Rayonnement d'une antenne imprimée	9
I.6	Les types d'alimentations	10
I.6.1	Alimentation Avec contact	10
I.6.1.1	Alimentation par une sonde coaxiale	10
I.6.1.2	Alimentation par une ligne micro ruban	11
I.6.2	Alimentation Sans contacte	11
I.6.2.1	Couplage par ouverture	11
I.6.2.2	Couplage par proximité	12
I.7	Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation	12
I.8	Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées	13

Chapitre II : Les Antennes Miniatures

II.1 Introduction.....	14
II.2 Les antennes miniatures .....	14
II.3 Le facteur de qualité .....	15
II.4 Le Facteur de miniaturisation .....	16
II.5 Les techniques de miniaturisation .....	16
II.5.1 Modification de la Géométrie .....	16
II.5.1.1 Ajout de fentes .....	16
II.5.1.2 Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts .....	17
II.5.1.3 Repléments .....	18
II.5.1.4 Méandres .....	19
II.5.1.5 L'antenne fractale .....	20
II.5.2 Utilisation d'éléments localisés .....	21
II.5.2.1 Composants électroniques .....	22
II.5.3 Emploi de Matériaux .....	22
II.5.3.1 Matériaux diélectriques, magnétiques ou magnéto diélectriques .....	22
II.5.3.2 Méta matériaux .....	23
II.6 Conclusion .....	24
 <i>Chapitre III : Conception d'une antenne miniature</i>	
III.1 Introduction .....	25
III.2 Conception d'une antenne rectangulaire à 2.4GHZ .....	25
III.2.1 Le cahier de charge .....	26
III.2.2 Calcul des paramètres de l'antenne .....	26
III.2.3 Simulation de l'antenne .....	28
III.2.3.1 Etude paramétrique sur les dimensions de l'antenne .....	29
III.2.3.2 L'ajout des encoches .....	32
III.3 La miniaturisation de l'antenne imprimée .....	38
III.3.1 L'ajout des fentes .....	38
III.3.2 L'élargissement de la bande passante .....	42
III.3.3 L'adaptation de la fréquence .....	43
III.3.4 Discussions et interprétation des résultats .....	44
III.3.5 Représentation finale de notre antenne miniaturisée .....	47
III.4 Comparaison de performances entre l'antenne de base et l'antenne miniature .....	49
III.5 Conclusion .....	50
Conclusion générale .....	51
Bibliographie.....	52

# Liste des figures

## *Chapitre I - Etat de l'art sur les antennes imprimées*

<i>Figure I.1 -Structure d'une antenne imprimée.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.2 -Les formes de patches.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3 -Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.4 -Représentation du diagramme de rayonnement .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.5-L'angle d'ouverture d'une antenne.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.6- Les différentes sortes de polarisation.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.7 -distribution de charge et de densité de courant.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.8 -distribution du champ électrique vertical.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.9 -Alimentation par sonde coaxiale .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.10 -Alimentation par la ligne de transmission micro ruban.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.11 -schématisation du couplage par ouverture.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.12 -schématisation du couplage par proximité.....</i>	<i>12</i>

## **Chapitre II : Les Antennes Miniatures**

<i>Figure II.1- La sphère de CHU.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.2 -Représentation des types de fentes .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.3-Exemple des courants dans une antenne : (A) sans fente (B) avec des fentes .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.4 -Cartographie du champ E dans la cavité d'une antenne micro ruban (mode TM100).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.5 -Antenne PIFA avec court-circuit a) plan ou b) languette.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.6 - Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.7 - une fente en forme de méandre.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.8 - méandre à ligne micro ruban .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.9-Les étapes de la conception d'une fractale selon Von Koch.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.10-Antenne fractale pour un fonctionnement à 825 Mhz .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.11 -antenne patch avec des compensant électroniques .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.12- Géométrie de l'antenne micro ruban chargée par CSRR .....</i>	<i>23</i>

## **Chapitre III : Conception d'une antenne miniature**

<i>Figure III.1-Les dimensions de l'antenne imprimée.....</i>	<i>26</i>
---	-----------

<i>Figure III .2 - l'antenne rectangulaire simulée à 2.4GHZ (a) face supérieure, (b) face inférieure</i> .....	28
<i>Figure III .3- Le coefficient de réflexion du patch rectangulaire</i> .....	29
<i>FigureIII .4-Courbes de l'étude paramétrique sur (L) et (W)</i> .....	30
<i>Figure III .5 -Coefficient de réflexion après l'étude paramétrique</i> .....	31
<i>Figure III .6 - La bande passante après l'étude paramétrique</i> .....	31
<i>Figure III.7- Antenne rectangulaire avec encoches</i> .....	32
<i>Figure III .8 - Courbes de l'étude paramétrique sur les encoches</i> .....	34
<i>Figure III .9 - coefficient de réflexion à 2.4GHZ</i> .....	35
<i>Figure III .10 -l'impédance d'entrée de l'antenne à 2 .4GHZ</i> .....	35
<i>Figure III .11 - Le taux d'onde stationnaire de l'antenne à 2 .4GHZ</i> .....	36
<i>Figure III .12 -La bande passante de l'antenne à 2 .4GHZ</i> .....	36
<i>Figure III .13- la représentation polar et 3D du gain</i> .....	37
<i>Figure III .14 -La représentation polar et 3D de la directivité</i> .....	38
<i>Figure III. 15-Antenne rectangulaire avec des fentes</i> .....	39
<i>Figure III. 16 -Coefficient de réflexion après l'ajout des fentes</i> .....	39
<i>Figure III.17 - Appellation des différentes fentes</i> .....	40
<i>Figure III. 18 - Courbes de l'étude paramétrique sur les fentes</i> .....	41
<i>Figure III. 19- Le coefficient de réflexion de l'antenne à fente</i> .....	41
<i>Figure III. 20 - positionnement de la fente sur le plan de masse</i> .....	42
<i>Figure III.21 - Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de P1 et P2</i> .....	43
<i>Figure III. 22-L'adaptation de la fréquence avec les paramètres des fentes</i> .....	44
<i>Figure III. 23 - Coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 2.4GHZ</i> .....	45
<i>Figure III. 24 - la bande passante de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ</i> .....	45
<i>Figure III. 25-l'impédance d'entrée de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ</i> .....	46
<i>Figure III. 26 - VSWR de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ</i> .....	46
<i>Figure III. 27 - la représentation polar et 3D de la directivité</i> .....	47
<i>Figure III. 28-la représentation polar et 3D du gain</i> .....	47
<i>Figure III. 29 - Antenne miniaturisé à 2.4GHZ (a)face supérieur (b) face inférieure</i> .....	48

# Liste des tableaux

## *Chapitre I : Etat de l'art sur les antennes imprimées*

*Tableau I.1 - la différence entre les techniques d'alimentation..... 13*

## *Chapitre III : Conception d'une antenne miniature*

*Tableau III .1 -Le cahier de charge ..... 26*

*Tableau III.2 - Paramètres de l'antenne imprimée Rectangulaire ..... 27*

*Tableau III .3 -Résultats des calculs simulé..... 28*

*Tableau III .4-Etude paramétrique du patch ..... 30*

*Tableau III .5-Etude paramétrique sur les encoches ..... 33*

*Tableau III .6- les dimensions de l'antenne réalisé ..... 34*

*Tableau III. 7 -Etude paramétrique sur l'antenne avec fentes..... 40*

*Tableau III. 8-Etudes paramétriques sur les fentes ajoutées ..... 44*

*Tableau III. 9 -Les dimensions de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ..... 48*

*Tableau III. 10 -Comparaison des résultats..... 49*

## Liste des acronymes

**BP** : bande passante.

**CST**: Computer Simulation Technology.

**CSRRs**: Complementary Split Ring Resonators

**dB** : decibels.

**EM** : Electro magnétique.

**FI**: Feed Insert.

**FIT** : Finite Integration Technic.

**GHz** : Giga Hertz

**HF** : Haute fréquence.

**IEEE**: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**LAN**: local Area network.

**MMIC**:Microwave Monolithic Integrated Circuit.

**MWS**: Micro Wave Studio.

**PAN**: Personal Area Network.

**PIFA**: Planar Inverted-F Antenna.

**RF**: radio fréquence

**TOS** : Taux d'onde Stationnaire.

**VSWR** : voltage standing wave ratio.

**WIFI**: Wireless Fidelity.

**3D**: trois Dimensions.

**2D** : Deux dimensions.

# **Introduction générale**

# Introduction générale

La communication est l'ensemble de transmission d'informations elle est évolutive à travers le temps, la technologie a permis à cette dernière de franchir un nouveau palier. De la communication filaire qui nécessite un câblage dont l'architecture est bien fixée et la mobilité de ces appareils est limitée par ce câblage de là on est passé à la communication sans fils en utilisant les ondes électromagnétiques émit et reçu par des dispositifs qui ont bouleversé le domaine de la télécommunication

Les antennes sont une pièce maitresse des systèmes de télécommunications sans fils pour assurer la transmission de l'information à distance sans l'aide de conducteur électrique. Initié avec le travail théorique de Maxwell, suivi par la vérification expérimentale des ondes électromagnétiques et leurs propagations par Hertz. Ce dispositif a pris plusieurs formes pour qu'il soit adapté au besoin qui couvre plusieurs domaines tels que le domaine des appareils cellulaires et d'autres avancées, répondant à une énorme demande de nouvelles applications public et industrielles. Ces progrès ont permis à un nombre important d'industries d'intégrer les antennes à des circuits imprimés ce qui a provoqué l'apparition des antennes imprimées.

L'avancement technologique a poussé les concepteurs à se diriger vers la réduction de la taille des objets pour garantir leurs mobilités et combler le besoin de l'utilisateur, cette étape implique à son tour la réduction des antennes imprimées, des études ont mené à la miniaturisation de ces antennes tout en gardant leurs performances essentiels pour garantir leurs bon fonctionnement.

Le principal objectif de ce mémoire est de concevoir et miniaturiser une antenne imprimées à une fréquence de 2.4GHz En utilisant la technique de l'insertion des fentes, ce travail est répartie en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux principes fondamentaux des antennes, en premier temps on va présenter une définition des antennes imprimées suivie d'un bref historique. Dans un second temps, les caractéristiques vont être détaillées avec leurs formules. Ensuite on va s'étaler vers une explication de la manière de rayonnement et de la façon d'alimentation des antennes patch, et pour conclure notre chapitre nous allons citer quelques avantages et inconvénients de ces antennes.

## Introduction générale

Dans le deuxième chapitre nous allons discuter des principes nécessaires à la miniaturisation d'une antenne imprimée, en commençant par une définition, suivie du facteur de qualité et de miniaturisation pour l'obtention d'une antenne miniature compacte, à la fin on citera les différentes techniques de miniaturisation.

Le dernier chapitre se focalise sur la partie pratique, ce dernier est divisé à son tour en deux autres branches, la première est consacré à la simulation et l'adaptation d'une antenne rectangulaire imprimée à la fréquence de 2.4GHz alimenté par une ligne micro-ruban en utilisant logiciel CST Microwave studio, et la deuxième est attaché à la miniaturisation de l'antenne par la technique d'insertion des fentes , Enfin nous allons évaluer les performances de l'antenne réalisée et les comparer a ceux qui sont cités dans la première partie .

Ce mémoire est terminé par une conclusion générale suivie par un annexe dans lequel on va présenter l'outil de simulation (CST Microwave studio) et une bibliographie qui contient les références dont on s'est appuyé pour élargir notre horizon de travail.

# **Chapitre I :**

**Etat de l'art sur les  
antennes imprimées**

### I.1 Introduction

Une antenne est une structure métallique qui capte et / ou transmet des ondes radio-électromagnétiques. Elle convertit l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique. Au fil des années, de nombreux types d'antennes ont été développés pour différents buts à cause de l'évolution rapide de la technologie, plusieurs critères ont été ajoutés à ceux qui existent pour intégrer les antennes à des circuits imprimés pour les utiliser dans des appareils à grand usage comme les téléphones, les routeurs, les capteurs. Parmi ces types on mentionne les antennes imprimées nommées aussi antenne patch.

Ce chapitre est consacré aux principes fondamentaux de ce type d'antennes, en premier temps on a donné une définition des antennes imprimées suivie par un bref historique. Dans un second temps, les caractéristiques ont été détaillées avec leurs formules. Puis on passe à l'explication de la manière dont elles rayonnent et comment les antennes patch sont alimentées. Et pour finir nous allons citer quelques avantages et inconvénients de ces antennes.

### I.2 Définition d'une antenne imprimée

L'antenne imprimée nommée aussi antenne micro-ruban ou antenne patch, est composée d'un élément rayonnant (patch) déposé sur un substrat diélectrique de permittivité diélectrique  $\epsilon_r$  et un plan de masse qui couvre la face inférieure du substrat [1].

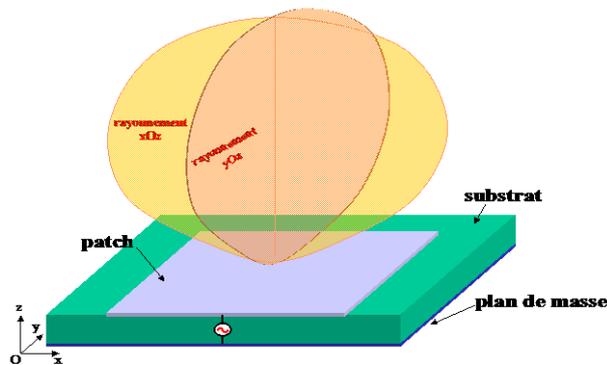
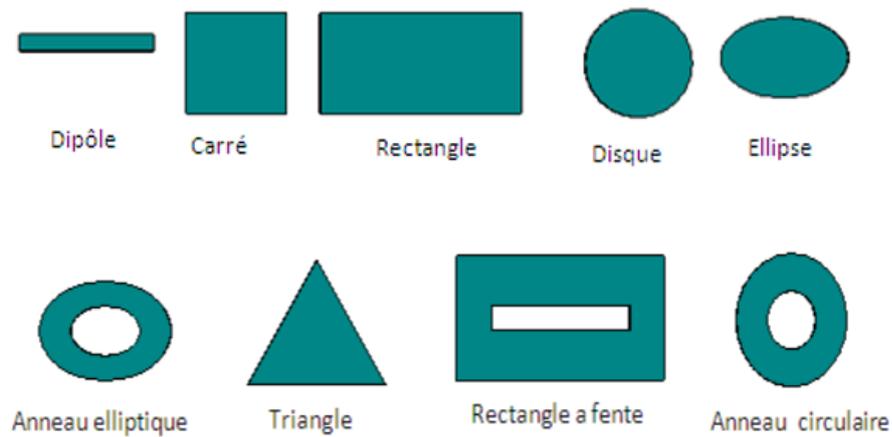


Figure I.1 - Structure d'une antenne imprimée

Le patch est l'élément rayonnant de cette antenne, il est généralement fabriqué par des matériaux conducteurs et il peut prendre plusieurs formes, Comme le montre la Figure (I-2) :



**Figure I.2** - Les formes de patchs

Ces antenne sont utilisées dans plusieurs domaines tel que la télémessure par missile, l'aviation civile et militaire, les téléphones, les antennes d'émission utilisées en médecine, les récepteurs satellite de navigation, les systèmes de télédétection, les systèmes de commande et de contrôle....

### **I.3 Historique de l'antenne imprimée**

Le concept des antennes imprimées fut initialement proposé en 1953 par Deschamps aux Etats Unis d'Amérique et en France par Guttan et Baissimot en 1955, mais ce n'est qu'aux années soixante-dix que les premières applications de ce type d'antennes ont vu le jour.

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration [2].

### **I.4 Caractéristiques des antennes imprimées**

Pour une estimation des performances des antennes fonctionnant dans n'importe qu'elle fréquences, plusieurs critères sont prises en considération, parmi ces caractéristiques il existe :

#### **I.4.1 Le Coefficient de réflexion**

Le coefficient de réflexion «S11»c'est le rapport entre la puissance réfléchie à l'entrée de l'antenne et la puissance émise par l'antenne elle-même, il est défini par l'équation suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

- ( $Z_e$ ) est l'impédance d'entrée de l'antenne.

- ( $Z_0$ ) est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50  $\Omega$ ).

Le **S11** met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre qu'on se base lors de l'optimisation [3]

### I.4.2 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne [3].

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

**Z0** : l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

**S11** : Le coefficient de réflexion.

### I.4.3 La bande passante

La bande passante d'une antenne est définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale  $f_{min}$  et une valeur maximale  $f_{max}$ , la bande passante est donnée par la relation suivante :

$$Bp(\%) = \left[ \frac{f_{MAX} - f_{MIN}}{f_c} \right] \cdot 100 \quad (\text{I-3})$$

Avec  $f_c$  est la fréquence centrale ou de résonance.

On peut juger l'efficacité de l'antenne par l'utilisation du tracé du coefficient de réflexion, on indique la plage de fréquence utilisée [4][5]:

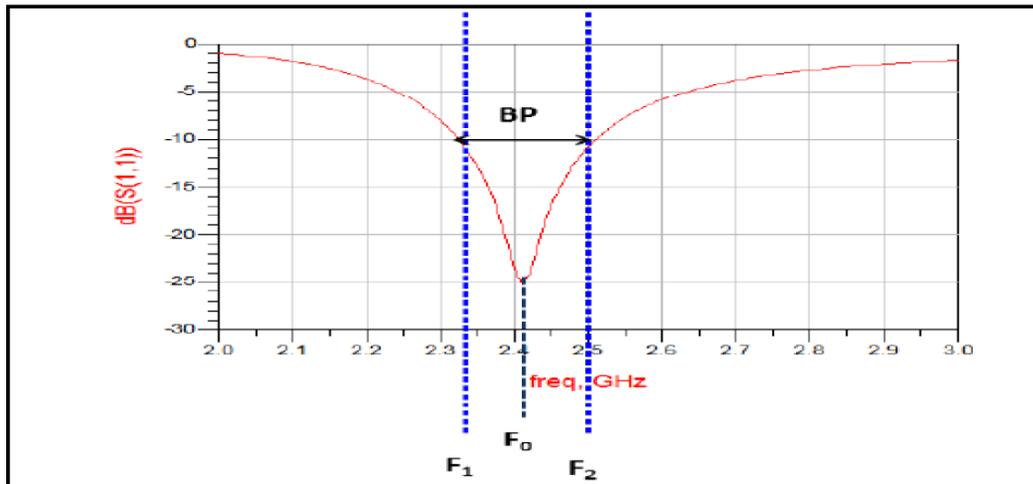


Figure I.3 - Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.

#### I.4.4 Le Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement présente les variations de la puissance rayonné qui se propage dans différente direction de l'espace [6].

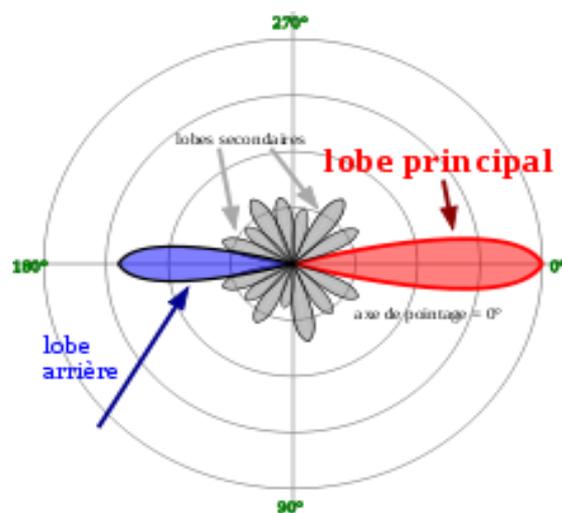


Figure I.4 - Représentation du diagramme de rayonnement

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 :

$$P(\theta, \phi) = \frac{p_a}{4\pi} \quad (I-4)$$

### I.4.5 La Directivité

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $P(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope[6].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{I-5})$$

### I.4.6 Le gain

Le gain représente le rapport entre la puissance rayonné dans une direction et la puissance rayonnée par une antenne isotrope sans perte [6].

Il est exprimé en dB et présenté par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (\text{I-6})$$

Avec :

- $P(\theta, \varphi)$ : Puissance rayonné dans une direction.

-  $P_a$  :Puissance rayonnée par l'antenne.

### I.4.7 Le rendement

Le rendement ou l'efficacité est le rapport entre la puissance total rayonné et la puissance fournit à l'antenne[6].

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\text{gain}}{\text{directivité}} \quad (\text{I-7})$$

Avec :

**P**: Puissance totale rayonné.

### I.4.8 L'Ouverture

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée(-3dB) dans la direction la plus favorable [7].

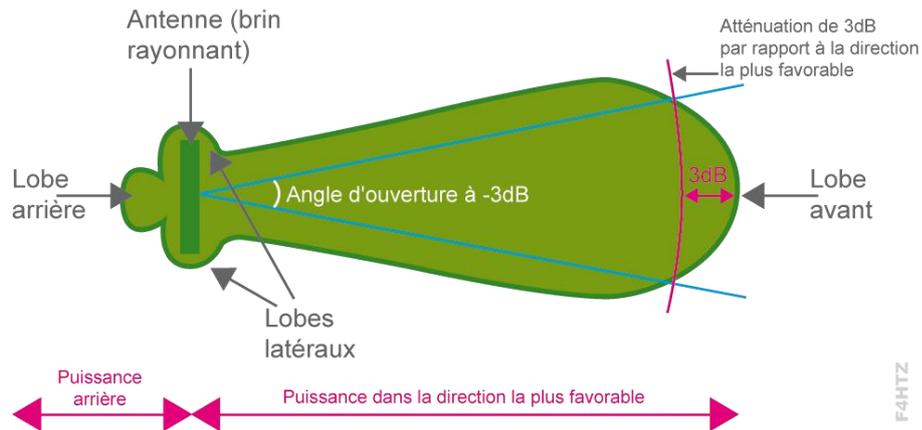


Figure I.5 -L'angle d'ouverture d'une antenne

### I.4.9 La polarisation

L'orientation du champ électrique ( $\mathbf{E}$ ) généré par une antenne est appelée polarisation, elle est généralement linéaire horizontale ou verticale[7].

Le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. Dans certaines conditions, la polarisation peut être aussi "circulaire droite ou circulaire gauche" et Il y a plusieurs sortes de polarisation comme le montre la figure :

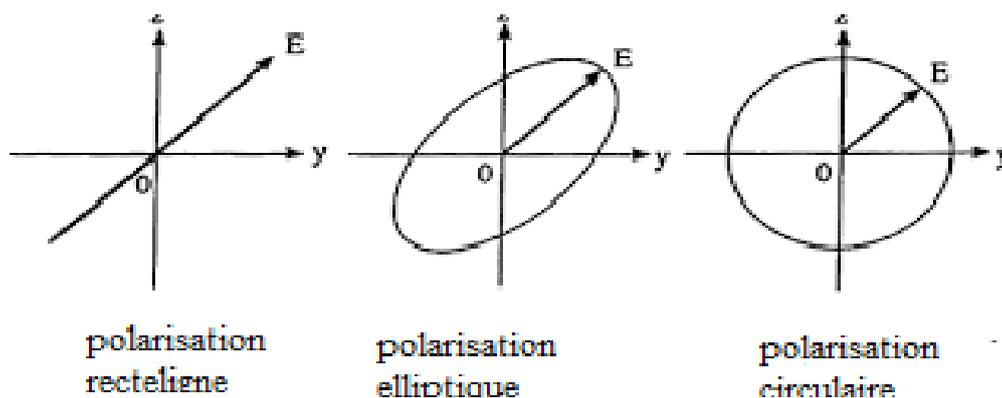


Figure I.6- Les différentes sortes de polarisation

-Une onde plane est dite à polarisation rectiligne si le champ électrique est constamment dirigé dans la même direction,

-L'onde est dite à polarisation circulaire si l'extrémité du vecteur E décrit un cercle, ce cas de figure peut se présenter en considérant deux doublets orthogonaux alimentés en quadrature.

-L'onde est dite à polarisation elliptique si l'extrémité du vecteur E décrit une ellipse.

## I.5 Rayonnement d'une antenne imprimée

Le rayonnement d'une antenne imprimée se fait à partir de sa forme géométrique. Lorsqu'on excite la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne, puis elle attaque l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge comme montrée sur la figure (I-7) va s'établir à l'interface substrat /plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant, et crée un champ électrique vertical (figure (I-8)) entre le patch et le plan de masse [8].

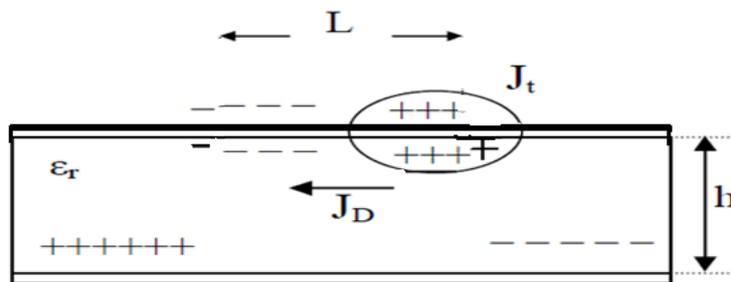


Figure I.7 -distribution de charge et de densité de courant [8]

Avec :

JD : courant de déplacement

Jt : Courant de surface.

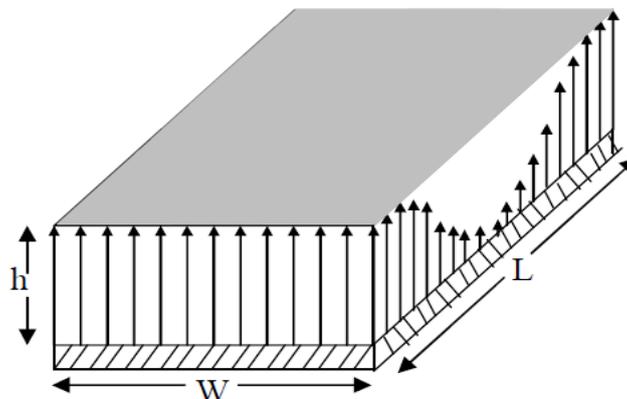


Figure I.8-distribution du champ électrique vertical[8].

## I.6 Les types d'alimentations

La manière d'excitation d'une antenne imprimée est très importante car elle influence directement son rayonnement (performance), cette alimentation dépend toujours de la façon dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Nous allons voir par la suite les différentes techniques d'alimentations qui se divisent en deux catégories :

### I.6.1 Alimentation Avec contact

Dans cette catégorie la ligne de transmission est directement liée à la surface rayonnante de l'antenne.

#### I.6.1.1 Alimentation par une 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 figure (I-9). [9], parmi ses avantages, elle peut être appliquée à n'importe quel emplacement du patch[10].

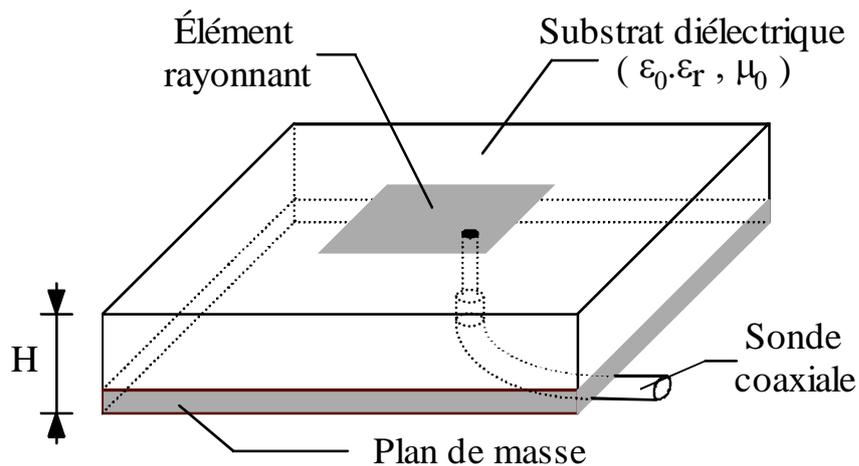


Figure I.9 -Alimentation par sonde coaxiale[1]

### I.6.1.2 Alimentation par une ligne micro ruban

Dans ce type d'alimentation, une bande de conduite est reliée directement au bord du Patch, cette conduite est plus petite dans la largeur par rapport au Patch [11].

La facilité de la fabrication et le cout présente un très grand avantage dans ce type d'alimentation, mais elle provoque un rayonnement parasite qui peut être important [10].

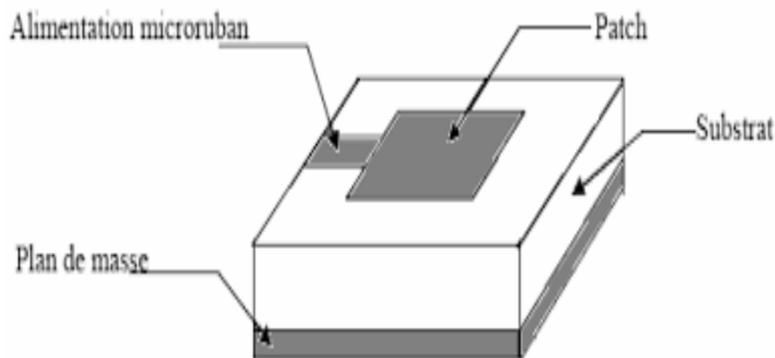


Figure I.10-Alimentation par la ligne de transmission micro ruban [11]

### I.6.2 Alimentation Sans contact

Dans cette catégorie la ligne de transmission n'est pas liée à la surface rayonnante de l'antenne, on trouve :

#### I.6.2.1 Couplage par ouverture

Pour une alimentation par fente deux substrat avec une permittivité diélectrique différentes sont superposé l'un sur l'autre, une fente est posé sur la face supérieure du 1<sup>ER</sup> substrat avec une ligne de transmission sur sa face inférieure, En dessus de ce dernier un deuxième substrat est placé comportant le patch sur sa face supérieure, entre ces deux est imprimé un plan de masse complet tranché par une petite ouverture (fente) qui peut prendre différente forme. Cette technique permet d'alimenter le patch par couplage à travers cette fente, la position de cette dernière (décalée ou centrée) sous le patch modélise la conception de cette technique mais elle souffre d'une bande passante très étroite [1]

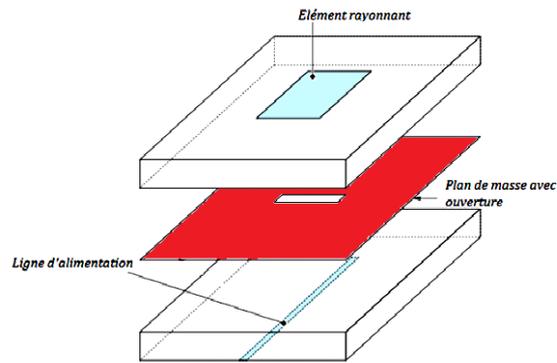


Figure I.11-schématisation du couplage par ouverture[1]

### I.6.2.2 Couplage par proximité

Dans cette structure, la ligne d'alimentation microruban se trouve entre deux couches diélectriques :

- Une couche supérieure qui comporte le patch en haut (substrat d'antenne).
- Une couche inférieure dont le plan de masse est gravé en bas (substrat d'alimentation).

Le couplage électromagnétique se fait indépendamment est sans contact de la ligne d'alimentation avec le patch ce qui permet de minimiser le rayonnement parasites [12].

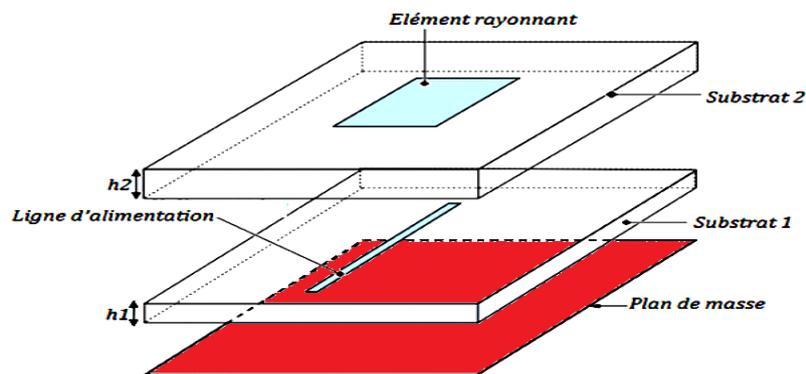


Figure I.12-schématisation du couplage par proximité[1]

## I.7 Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation

Ce tableau représente la différence entre les méthodes d'alimentation, une comparaison a été faite entre leur influence sur les performances des caractéristiques des antennes patch [13]:

Caractéristiques	Alimentation par ligne micro ruban	Alimentation coaxial	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation couplée par proximité
Rayonnement parasite	plus	plus	Moins	minimum
fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5 %	2-5 %	2-5 %	13 %

Tableau I.1- la différence entre les techniques d'alimentation[13]

## I.8 Les avantages et les inconvénients des antennes imprimées

De nos jours les antennes imprimées sont de plus en plus utilisées dans divers domaines grâce à leurs intégrités dans plusieurs appareils, un avantage qui se distingue des autres cités par la suite [14] [15] [16]:

- Faible poids et volume réduit, encombrement réduit, donc possibilité d'être intégrées dans des systèmes mobiles.
- Faible coût de fabrication.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Profil plat et compatible avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

Mais elle représente aussi des inconvénients [13] :

- Bande passante étroite souvent associée avec les problèmes de tolérance géométrique et physique.
- faible gain et la plupart de ces antennes rayonnent uniquement dans un demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances.
- Rayonnement parasite du réseau d'alimentation.
- Circuit d'alimentation parfois très complexe, difficile à réaliser

**Chapitre II**  
**Les Antennes**  
**Miniatures**

## Chapitre II : Les Antennes Miniatures

### II.1 Introduction

Ces dernières années, avec le développement rapide des communications sans fil, de nombreux efforts sont consacrés à réduire la taille des antennes imprimées.

Dans ce chapitre, nous allons énoncer les bases et principes nécessaires à la conception d'une antenne imprimée miniature, commençons par une définition de cette antenne suivie par le facteur de qualité et de miniaturisation pour l'obtention d'une antenne miniature compacte, ensuite on va consulter les différentes techniques de miniaturisation qui existent.

### II.2 Les antennes miniatures

Le concept des antennes miniatures a été introduit par Wheeler en 1947, il permet d'envisager l'encombrement d'une antenne par rapport à sa fréquence d'utilisation. L'idée est de pouvoir comparer les performances de structure d'antennes fonctionnant à des fréquences différentes. La longueur d'onde  $\lambda$  à laquelle fonctionne l'antenne est comparée à sa dimension maximale. Le critère basic de la miniaturisation c'est la multiplication du rayon  $a$  par le nombre d'onde  $K$ . Sur ce critère, il est possible d'appliquer deux conditions [17]:

Premièrement, la condition de Wheeler qui dit que : le diamètre de la sphère de Chu ne dépasse pas  $\frac{1}{K}$  (*radianlength*)

Sachant que  $K$  est le nombre d'onde est définit par :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II-1})$$

Ceci revient à dire qu'une antenne est miniature si elle satisfait la condition suivante

$$K*a < 0.5 \quad (\text{II-2})$$

Deuxièmement Selon Hansen, une antenne est miniature si elle est incluse dans la sphère de Chu nommé aussi le radian sphère, c'est-à-dire si le rayon  $a$  de la sphère est égal à la *radianlength*. Autrement dit :

$$K*a < 1 \quad (\text{II-3})$$

Où

$k$  : est le nombre d'onde

a : le rayon de la sphère minimale qui englobe l'antenne

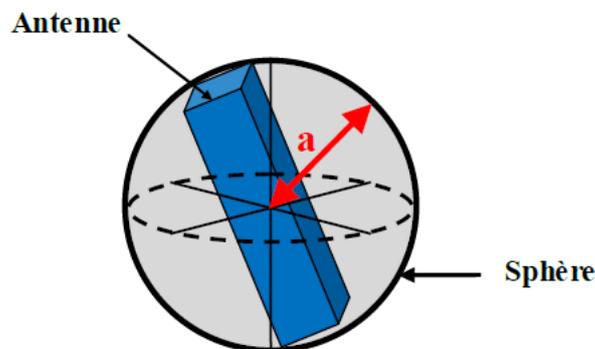


Figure II.1 - La sphère de CHU [18]

### II.3 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité c'est le critère qui limite la miniaturisation d'une antenne on gardant ses performances et ces caractéristiques électromagnétiques (bande passante et gain). Ce facteur fait actuellement le sujet de plusieurs recherches pour aboutir des dimensions minimales de l'antenne avec des bonnes performances électriques.

En théorie le facteur de qualité est défini comme étant le rapport entre l'énergie maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée :

$$Q = \frac{2\omega W_e}{P_{rad}} \text{ Si } W_e > W_m \quad (\text{II-4})$$

$$Q = \frac{2\omega W_m}{P_{rad}} \text{ Si } W_e < W_m \quad (\text{II-5})$$

Avec :

**W<sub>e</sub>**: Energie électrique moyenne stockée.

**W<sub>m</sub>**: Energie magnétique moyenne stockée.

**P<sub>rad</sub>**: Puissance rayonnée.

**ω** : La pulsation.

### II.4 Le Facteur de miniaturisation

L'évaluation du facteur de miniaturisation est défini en théorie comme étant le rapport de la grandeur caractéristique de l'antenne miniaturisée par rapport à celle de l'antenne en espace libre pour une fréquence bien défini [19], ce facteur est calculé pour évaluer la réduction d'une antenne comme le montre l'équation suivante :

$$FM(\%) = \frac{L_{min}}{L_{esplib}} \quad (II-6)$$

Mais en pratique il consiste à réaliser une antenne miniaturisé tel que ses performances électromagnétiques se rapprochent le plus de l'antenne imprimée normale en faisant une comparaison des dimensions de ces deux antennes.

### II.5 Les techniques de miniaturisation

Pour minimiser La taille d'une antenne à des fréquences données on est toujours limité par des principes physiques qui gardent les performances de cette antenne, des techniques sont destinées à appliquer ces précédentes, en voici quelques techniques qui existent :

#### II.5.1 Modification de la Géométrie

##### II.5.1.1 Ajout de fentes

L'ajout des fentes est une technique utilisée pour la miniaturisation d'antennes patches. Elle consiste à placer des fentes dans les parties métalliques de l'antenne.

Lorsqu'elles sont bien placées, elles permettent d'augmenter la distance parcourue par le courant surfacique. En effet, un courant qui circule d'un bout à l'autre de la partie métallique de l'antenne sera bloqué par les fentes, donc il devra prendre un chemin plus long cela veut dire que la longueur électrique est augmentée ainsi que la capacité et l'inductance de l'antenne. Grâce à cette technique il est possible de réduire la taille d'une antenne de 30% à 50%.

Il existe deux types de fentes : des fentes quartes d'onde et fente demi-onde comme le montre la figure (II-2) [20].

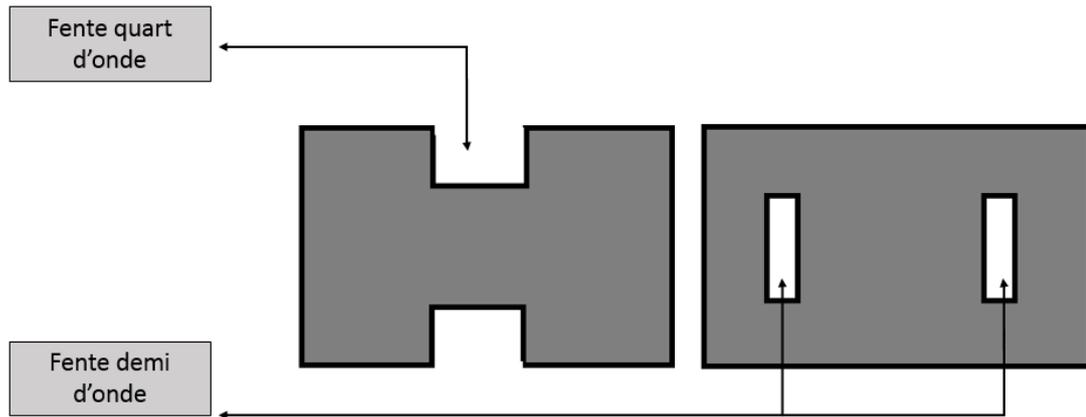


Figure II.2 -Représentation des types de fentes

Des fentes peuvent aussi être faites dans le plan de masse pour réduire la taille de l'antenne. L'inconvénient de cette technique est l'augmentation du facteur de qualité et par conséquent la diminution de la bande passante de l'antenne.

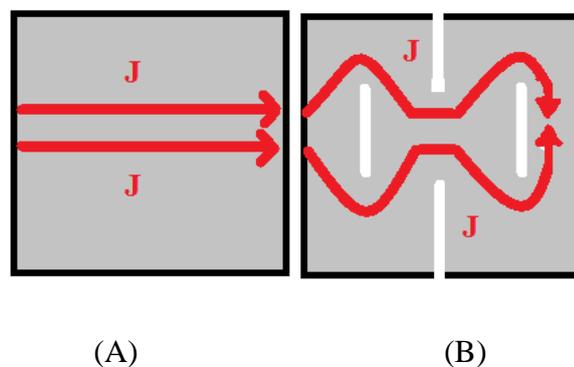


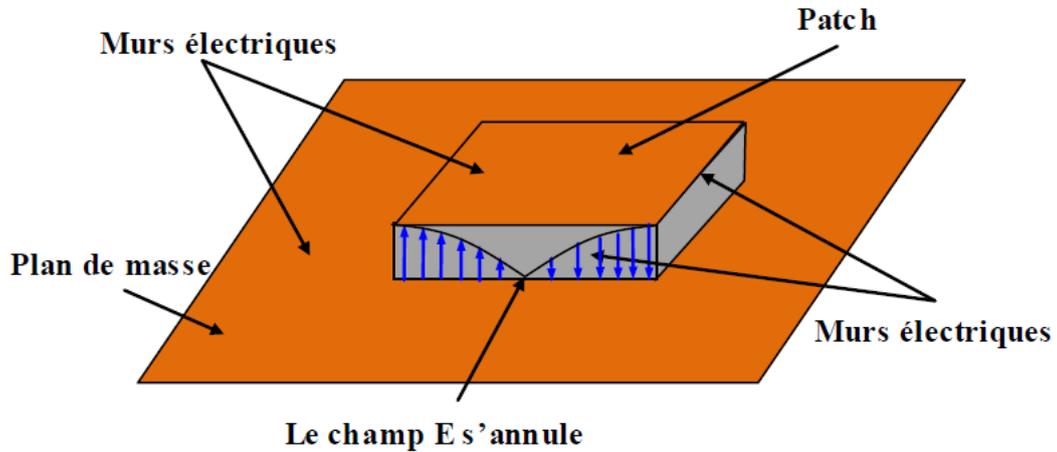
Figure II.3 -Exemple des courants dans une antenne : (A) sans fente (B) avec des fentes

### II.5.1.2 Ajout de court-circuit ou de circuits ouverts

Cette méthode consiste à introduire un ou plusieurs court-circuit entre le patch et le plan de masse.

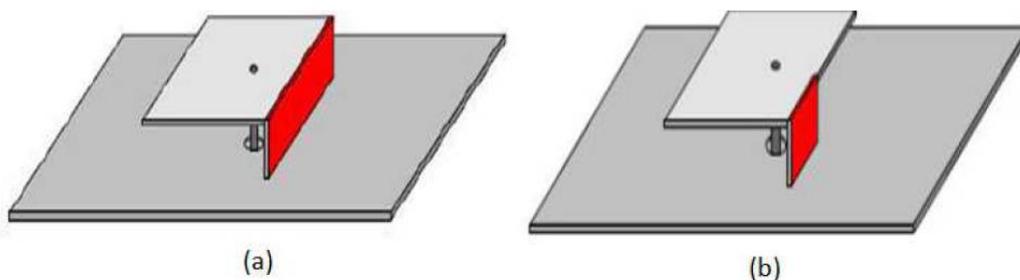
En observant la distribution du champ électrique du premier mode résonnant ou mode fondamental,  $TM_{100}$ , dans la cavité virtuellement délimitée par des murs électriques et magnétiques (Figure II-4), on constate que le champ électrique s'annule au milieu du patch.

Cela signifie qu'en positionnant un mur électrique parfait dans ce plan vertical, la distribution des champs n'est nullement affectée. Par conséquent, la longueur de la structure peut être réduite de moitié [21].



**Figure II.4** - Cartographie du champ E dans la cavité d'une antenne micro ruban (mode TM100)[21]

L'antenne la plus connue utilisant des courts-circuits est l'antenne PIFA (Planar Inverted-F Antenna). Cette antenne est court-circuitée en son centre avec un bout de métal vertical connecté au plan de masse. L'antenne passe ainsi d'une longueur électrique de  $\lambda/2$  à  $\lambda/4$  [26].

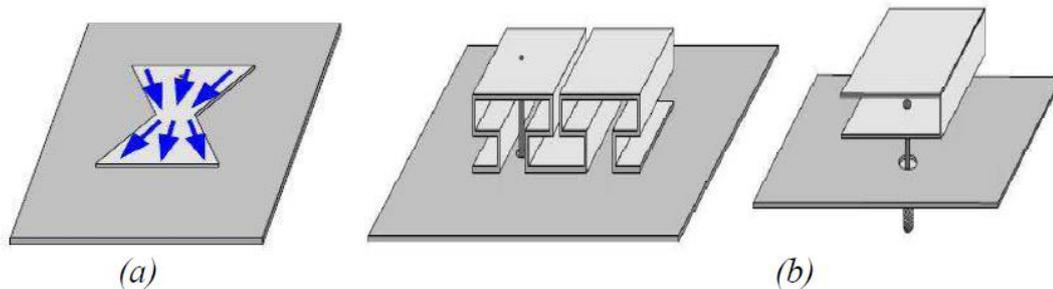


**Figure II.5** - Antenne PIFA avec court-circuit a) plan ou b) languette [26]

### II.5.1.3 Repléments

Cette technique consiste à modifier la forme du patch ou à le replier sur lui-même. Cette action conduit certainement à un élément qui occupe physiquement moins d'espace qu'une structure non repliée.

Ce type d'opération consiste à augmenter les pertes ohmiques et donc une diminution de l'efficacité et du gain [22].



**Figure II.6** - Antenne repliée (a) bow-tie, (b) repliement vertical[22]

### II.5.1.4 Méandres

L'Antenne méandre permet de diminuer la longueur physique d'une antenne sans diminuer sa longueur électrique. Les méandres sont utilisés dans les technologies filaire et imprimée, et les méandres à fentes en technologie imprimée. Les méandres à lignes micro ruban Figure (II-8) sont constitués d'un élément rayonnant replié en forme de méandre.

Les méandres à fentes, sont obtenus en créant une fente en forme de méandre Figure (II-7) dans un plan métallique. Même la possibilité de donner à la ligne micro ruban ou au fil métallique une forme, cette forme peut être créneau, carré, triangulaire, fractal ou sinusoïdal. En fonction des caractéristiques de cette forme.

Ce type de géométrie a un impact sur les performances de l'antenne, comme l'augmentation des pertes métalliques et la diminution de l'efficacité de rayonnement [20].

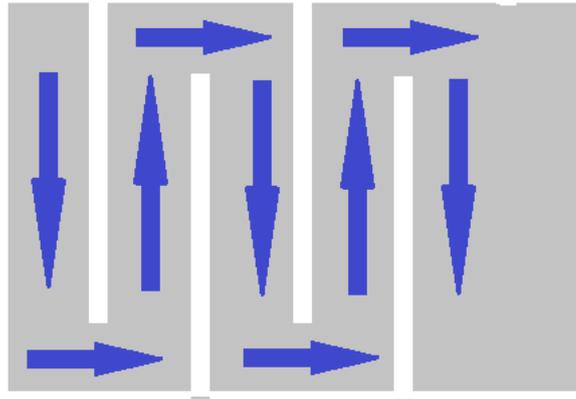


Figure II.7 -une fente en forme de méandre

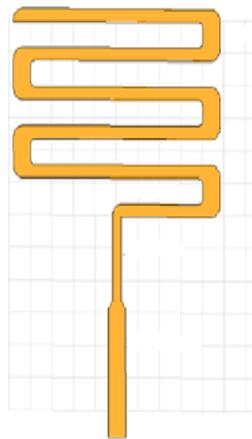
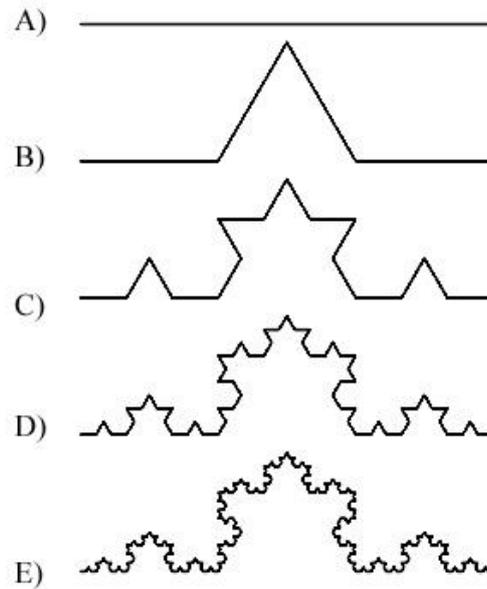


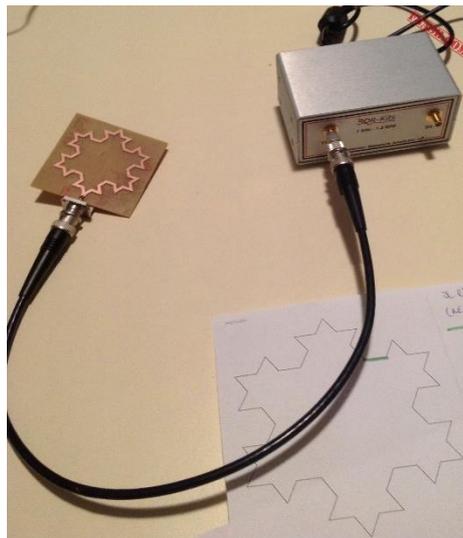
Figure II.8 - méandre à ligne micro ruban

### II.5.1.5 L'antenne fractale

L'antenne fractale, c'est une antenne ou le patch a une forme mathématiques fragmentées cela signifie une géométrie sous forme courbes mathématiques optimisées pour remplir au mieux une surface carrée, triangulaire ou quelconque, à partir d'une cellule élémentaire de même forme [21], on donne comme exemple d'antenne fractale imprimée obtenue à partir de la géométrie de Von Koch [23]:



**Figure II.9-**Les étapes de la conception d'une fractale selon Von Koch[21]



**Figure II.10-** Antenne fractale pour un fonctionnement à 825 Mhz [24]

Un des grands intérêts de ces formes est l'utilisation de leur facteur d'échelle pour augmenter la bande passante de l'antenne.

### II.5.2 Utilisation d'éléments localisés

Ces éléments localisés peuvent prendre différentes formes :

### II.5.2.1 Composants électroniques

Pour miniaturiser l'antenne et améliorer l'adaptation, on peut ajouter des éléments discrets tels que des résistances, des capacités ou des inductances sous forme de diode. L'ajout de ces composants présente des pertes supplémentaires qui causent une diminution de l'efficacité de l'antenne.

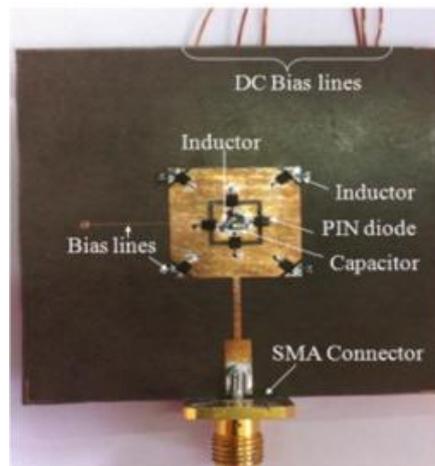


Figure II.11- antenne patch avec des composants électroniques

### II.5.3 Emploi de Matériaux [21]

#### II.5.3.1 Matériaux diélectriques, magnétiques ou magnéto diélectriques :

Les matériaux dits diélectriques sont des matériaux avec de fortes permittivités  $\epsilon_r$ . Si on augmente la permittivité d'un matériau, nous allons permettre la réduction de la taille physique d'une antenne comme le montre l'équation suivante :

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (\text{II-7})$$

Où :

$\lambda_r$  : Longueur d'onde dans un milieu

$\lambda_0$  : est la longueur d'onde dans l'espace libre

$\epsilon_r$  : est la permittivité relative du matériau.

$\mu_r$  : est la perméabilité relative du matériau.

L'utilisation de matériaux à forte permittivité entraîne une augmentation des pertes, ce qui provoque une forte réduction de l'efficacité de l'antenne.

Des recherches ont montré aussi qu'il est possible de miniaturiser les antennes par l'utilisation de matériaux magnétiques. Cette technique repose sur le même principe des matériaux diélectriques qui consistent à réduire la longueur électrique et donc l'encombrement de la structure antennaire selon l'équation précédente (II-7).

Les deux techniques citées précédemment (matériaux diélectrique et magnétique) peuvent être combinées pour miniaturiser une antenne avec l'utilisation des matériaux magnéto-électrique.

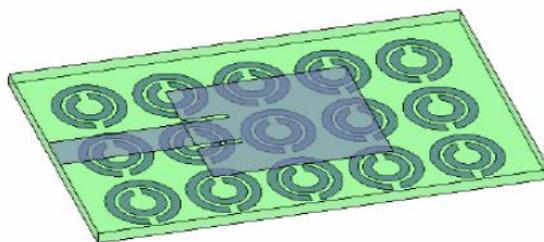
Des chercheurs tels que Sara-bandu et Hal ont développé un matériau constitué d'un empilement de couches diélectriques et magnéto-diélectriques pour diminuer la taille d'une antenne imprimée (La perméabilité et la permittivité relative de ce matériau sont de l'ordre de  $\mu_r = \epsilon_r = 16$  et les tangentes de pertes diélectriques et magnétiques valent respectivement 0.002 et 0.02) [24].

### II.5.3.2 Méta matériaux

Le préfixe méta signifie « après ». Le terme méta matériaux fait référence à des matériaux qui ont des propriétés qu'il est impossible de trouver dans la nature.

Plusieurs études ont été menées pour utiliser ces nouveaux matériaux dans des structures antennaires afin de les miniaturiser.

Hao, et al. ont étudié l'influence d'un méta matériau sur la fréquence de résonance d'une antenne patch Figure (II-12) En effet, le plan de masse uniforme est remplacé par un plan de masse périodiquement gravé de motifs métalliques CSRRs (Complementary Split Ring Resonators), Cette antenne a été fabriquée pour deux valeurs différentes de la permittivité du substrat diélectrique  $\epsilon_r = 3$  et  $\epsilon_r = 4.7$ . Les résultats de mesure confirment que la fréquence de résonance de l'antenne intégrant des CSRR est significativement inférieure à celle sur substrat conventionnel [25].



**Figure II.12-** Géométrie de l'antenne micro ruban chargée par CSRR[25]

### II.6 Conclusion

Au cours des décennies des techniques ont été proposées pour faire une conception d'une antenne imprimée miniature, depuis la modification de la géométrie de l'antenne jusqu'à l'utilisation de matériaux à haute permittivité, jusqu'à l'insertion des métas-matériaux, ce chapitre a englobé toutes les informations nécessaires pour entamer la partie de la réalisation d'une antenne patch rectangulaire miniature fonctionnant à la fréquence de 2.4GHZ, en appliquant une technique de ce qui a été énoncé dans ce chapitre.

# **Chapitre III :**

**Conception d'une antenne  
patch miniature**

### III.1 Introduction

Après avoir détaillé tout ce qui est théorique sur le concept des antennes imprimées et les méthodes de miniaturisation de ces derniers, nous allons appliquer ces informations pour concevoir une antenne imprimée miniature adaptée à la fréquence de 2.4 GHz, nous commencerons par définir le cahier de charge de l'antenne patch rectangulaire à 2.4GHz avec une brève définition sur le domaine de fonctionnement de cette fréquence.

Par la suite et avant de commencer la conception on calculera les valeurs des paramètres de l'antenne pour les introduire au logiciel, une fois l'exécution est faite nous allons discuter les résultats après les modifications nécessaires pour l'adaptation de notre antenne.

De ce point nous passerons à la miniaturisation de cette antenne avec la technique de l'insertion des fentes, et par conséquent de ce fait on a dépensé nos efforts à adapter cette dernière pour avoir une antenne imprimée miniature à 2.4Ghz.

En fin nous allons évaluer les performances de l'antenne réalisée en mettant en valeur le gain, la directivité, la bande passante,...

### III.2 Conception d'une antenne rectangulaire à 2.4GHZ

La bande de fréquence 2,4GHz est une bande largement utilisée dans le domaine de télécommunication. On la trouve partout si on parle en terme de réseaux, elle est conçue pour les réseaux personnel PAN (personale area network) comme le Bluetooth, les réseaux locaux (LAN) comme le Wi-Fi IEEE 802.11 qui est utilisé par de très nombreux appareils, des smartphones aux ordinateurs portables et tablettes en passant par les capteurs à distance, les téléviseurs actionneurs et bien d'autres...

C'est pour cette raison qu'on a fixé notre choix à une antenne miniature à la fréquence de 2.4GHz, pour qu'elle soit facilement intégrée dans les appareils utilisés dans notre vie quotidienne.

### III.2.1 Le cahier de charge

Le tableau suivant résume tous les éléments nécessaires utilisés pour la conception de notre antenne à 2.4GHz, avec leurs propriétés :

Le type de matériaux	Les composants d'antenne	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
Copper (annealed)	Plans de masse	0.035	-----
Copper (annealed)	Le patch	0.035	-----
Copper (annealed)	La ligne d'alimentation	0.035	-----
FR-4 (lossy)	Le substrat	1.6	4.3

Tableau III .1 -Le cahier de charge

### III.2.2 Calcul des paramètres de l'antenne

La structure de l'antenne imprimée est représentée sur la figure suivante :

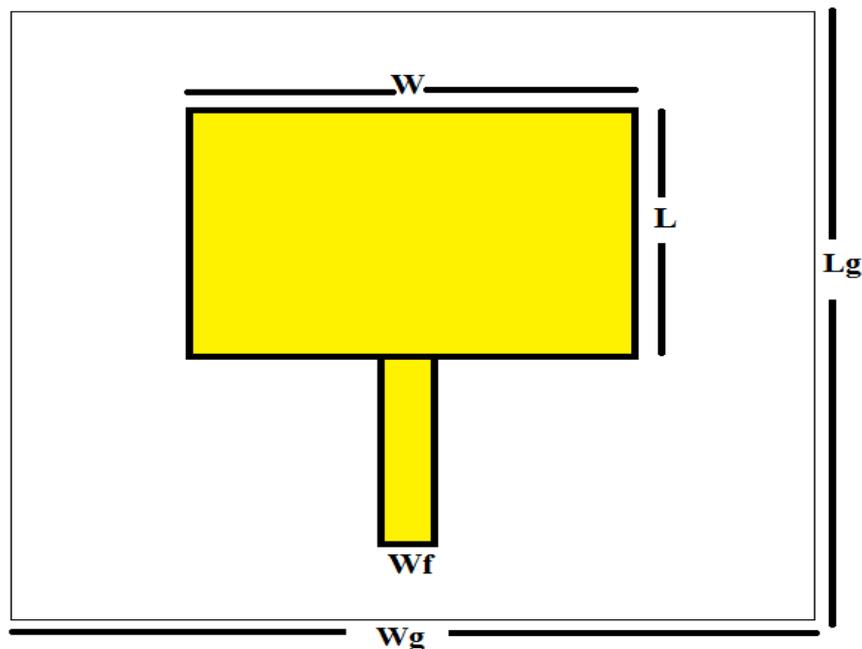


Figure III.1 -Les dimensions de l'antenne imprimée

### Chapitre III : Conception d'une antenne patch miniature

Le tableau suivant représente les équations utilisées pour le calcul de notre antenne rectangulaire à une fréquence de 2.4GHZ [20]:

Paramètre d'antenne	Equations	Référence
Longueur réelle du patch (L)	$L = L_{eff} - 2\Delta L$	III-1
Longueur effective ( $L_{eff}$ )	$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$	III-2
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 2.58)(\frac{w}{h} - 0.8)}$	III-3
Constante diélectrique ( $\epsilon_{eff}$ )	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$	III-4
Largeur du patch (W)	$w = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$	III-5
Longueur du substrat ( $L_g$ )	$L_g = L * 2$	III-6
Largeur du substrat ( $W_g$ )	$W_g = w * 2$	III-7
L'impédance caractéristique de la ligne microruban	$ZC = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[ \ln \left( 4 \frac{h}{wf} + \sqrt{16 \left( \frac{h}{wf} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{h} \right) \right]$	III-8

**Tableau III.2 - Paramètres de l'antenne imprimée Rectangulaire**

- C : la vitesse de la lumière  $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$
- Fr : fréquence de résonance
- $\epsilon_r$  : permittivité du substrat
- h : l'épaisseur du substrat

## Chapitre III : Conception d'une antenne patch miniature

Après avoir calculé les paramètres de l'antenne, les résultats sont classés dans le tableau suivant :

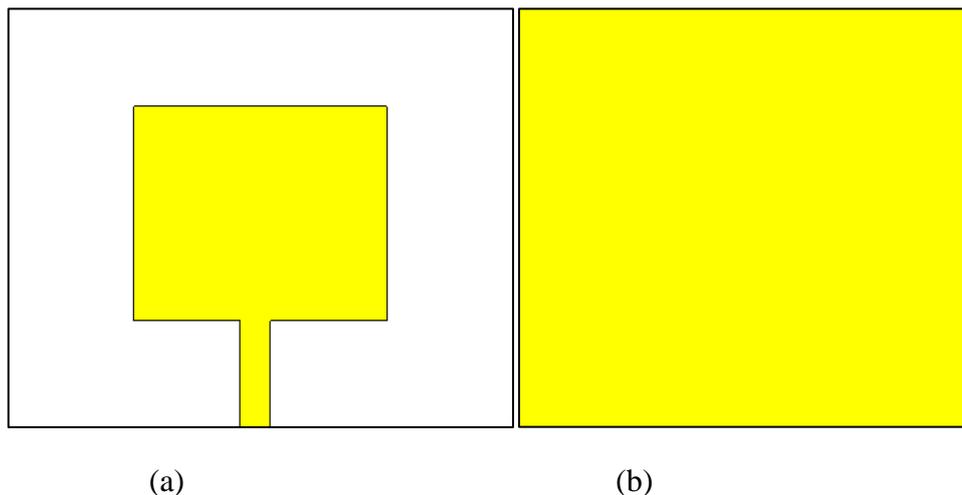
Noms	Appellations	Valeurs (mm)
Longueur du patch	L	29.76
Largeur du patch	W	38.37
Largeur de la ligne d'alimentation	Wf	3.1
largeur du substrat	Wg	59.52
Longueur du substrat	Lg	76.74
Épaisseur du patch	H <sub>T</sub>	0.035
Hauteur du substrat	H <sub>S</sub>	1.6

**Tableau III .3** - Résultats des calculs simulé

### III.2.3 Simulation de l'antenne

La simulation de notre antenne est faite par logiciel CST Microwave studio en introduisant les dimensions et les paramètres des composantes de cette antenne (plan de masse, substrat, patch, ligne d'alimentation).

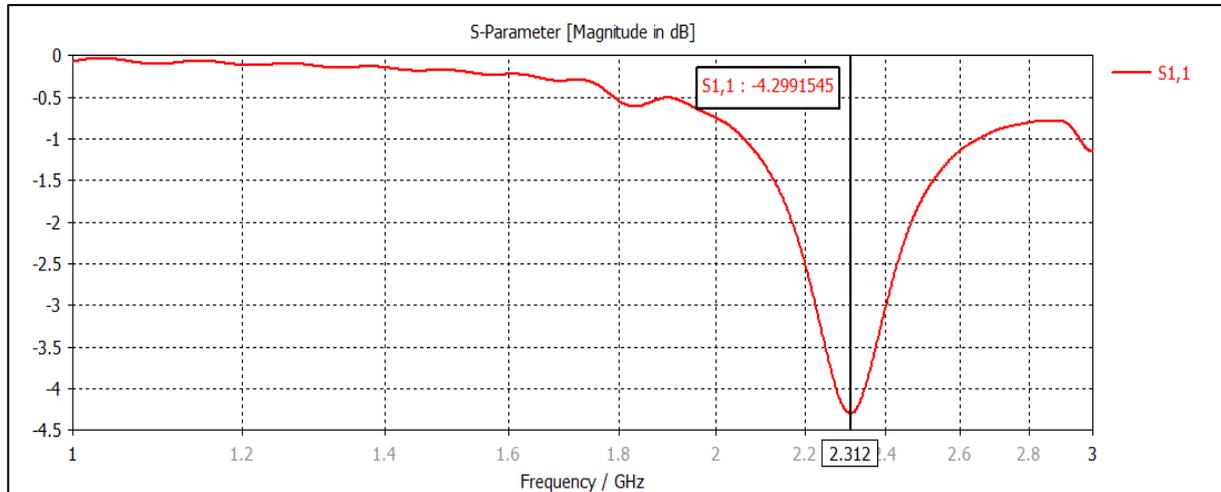
La figure suivante représente l'illustration réelle de l'antenne simulée :



**Figure III .2** - l'antenne rectangulaire simulée à 2.4GHZ (a) face supérieure, (b) face inférieure

## Chapitre III : Conception d'une antenne patch miniature

Après la compilation de l'antenne, le coefficient de réflexion obtenu est représenté par la figure suivante:



**Figure III .3 :** Le coefficient de réflexion du patch rectangulaire

On remarque d'après la figure que l'antenne n'est pas adaptée à la fréquence désirée de 2.4GHz, et le coefficient de réflexion est en dessous de -10dB, ce qui indique une incompatibilité de ces résultats par rapport à notre objectif.

Pour cela, nous avons effectué plusieurs changements ont passant par différentes étapes pour atteindre les résultats souhaités.

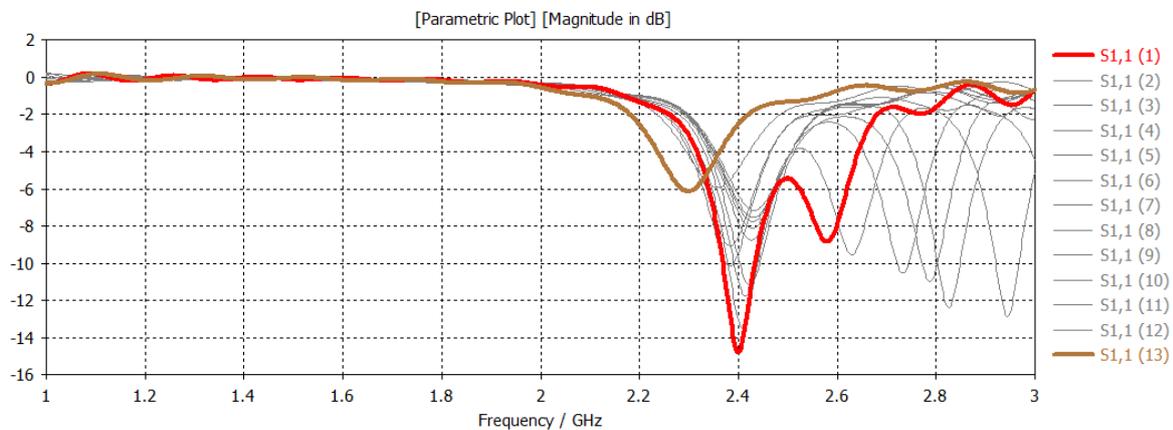
### III.2.3.1 Etude paramétrique sur les dimensions de l'antenne

Une étude paramétrique (voir Annexe A) a été faite à l'aide du logiciel CST sur les dimensions du Patch (**W** et **L**), plusieurs essais ont été exécutés pour adapter notre antenne à sa fréquence de résonance.

Le tableau (III .4) expose quelques essais sur les variations des valeurs L et W avec les résultats du coefficient de réflexion S<sub>11</sub> et la fréquence de résonance de cette antenne :

W	L	S11	Fréquence
38.37	29.76	-4.33	2.314
37	29	-5	2.25
40	28	-8	2.32
41	28	-9.73	2.34
42	28	-9.73	2.349
43	28	-11.70	2.35
45	28	-12	2.36
47	28.5	-12.86	2.37
49	28.5	-12.86	2.38
50	28	-13.31	2.39
51	28.1	-14.01	2.391
53	28.2	-14.6	2.395
54	28.31	-14.74	2.4

Tableau III .4 -Etude paramétrique du patch



FigureIII .4 -Courbes de l'étude paramétrique sur (L) et (W)

### Chapitre III : Conception d'une antenne patch miniature

Après la variation de la longueur et la largeur du patch nous avons remarqué que lorsque la largeur du patch augmente, la fréquence de résonance s'approche à celle voulue avec une petite diminution sur la valeur de la longueur du patch (Figure III .4), le dernier résultat a donné  $W=54\text{mm}$  et  $L=28.31\text{mm}$  avec un coefficient de réflexion qui égale à  $-14.79\text{ dB}$  à la fréquence de  $2.4\text{GHz}$ .

Comme le montre la courbe suivante :

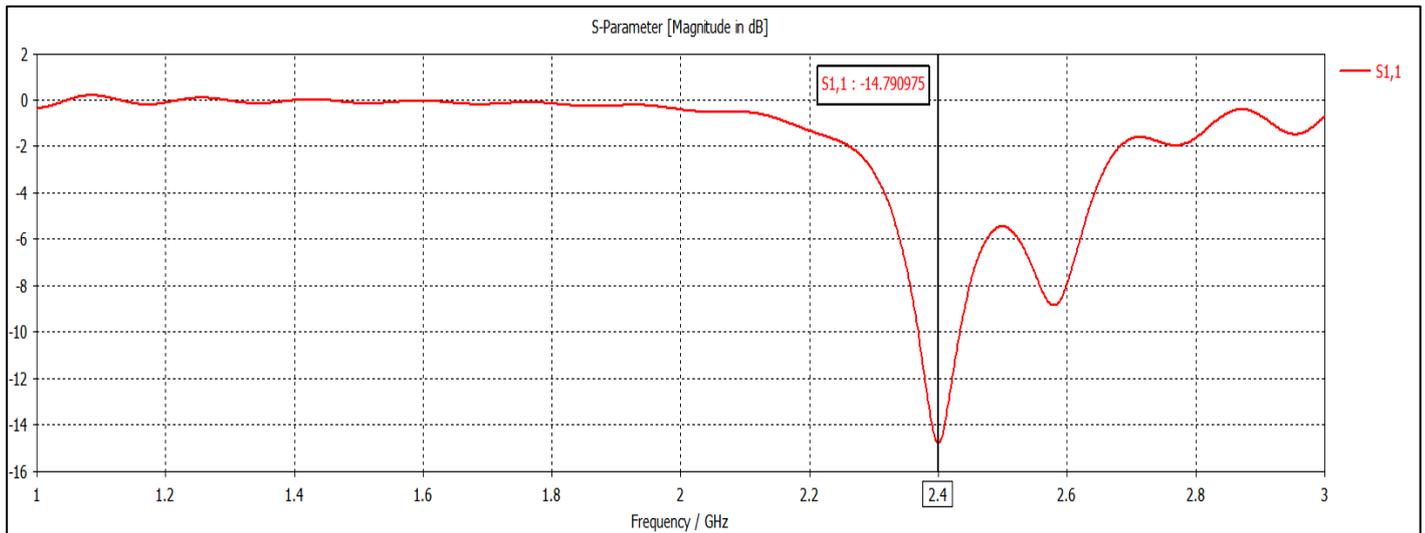


Figure III .5 - Coefficient de réflexion après l'étude paramétrique

Avec une bande passante de  $BP = 2.68\%$

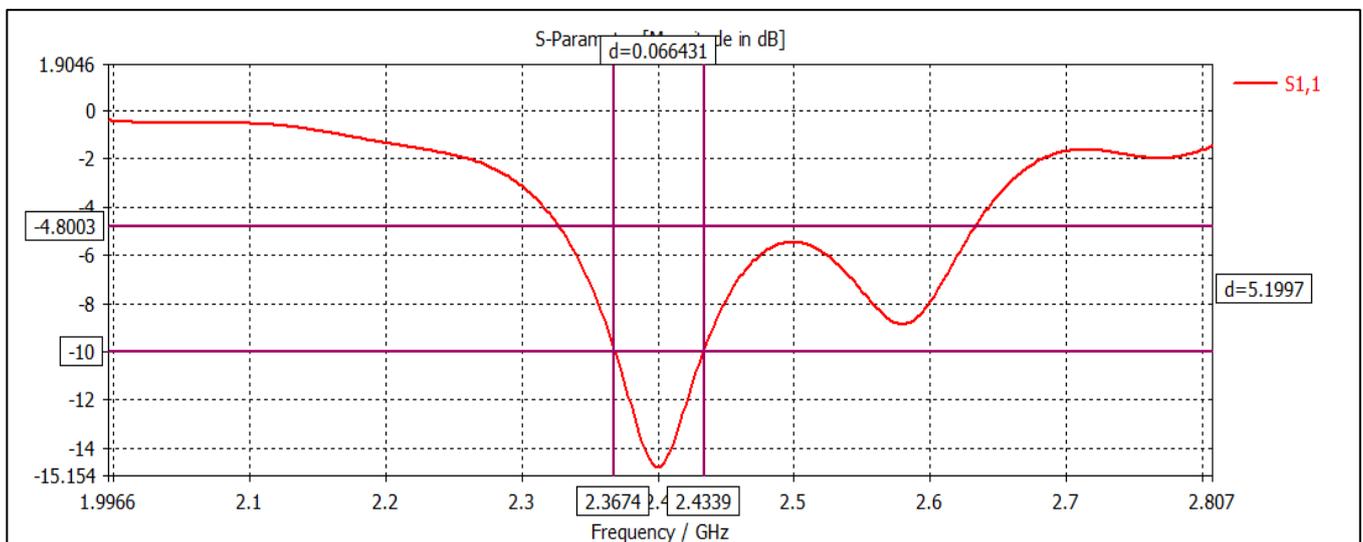


Figure III .6 - La bande passante après l'étude paramétrique

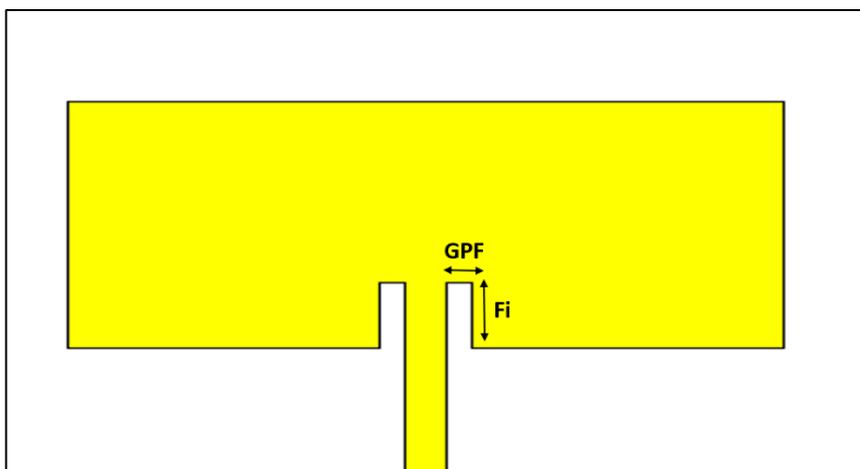
Mais cela n'empêche pas qu'on peut aller plus loin dans nos recherches afin d'améliorer le résultat qu'on a car cette antenne va être miniaturisée par la suite.

### III.2.3.2 L'ajout des encoches

Nous avons trouvé dans la littérature que l'ajout des encoches aide à avoir une meilleure adaptation sur les antennes alimentés par des lignes micro ruban.

Donc on a calculé la longueur de l'encoche à partir de l'équation (III.9) [20], et avec une largeur de 1mm.

$$Fi = \frac{6h}{2}(\text{Feed Insertion}) \quad (\text{III.9})$$



**Figure III.7** - Antenne rectangulaire avec encoches

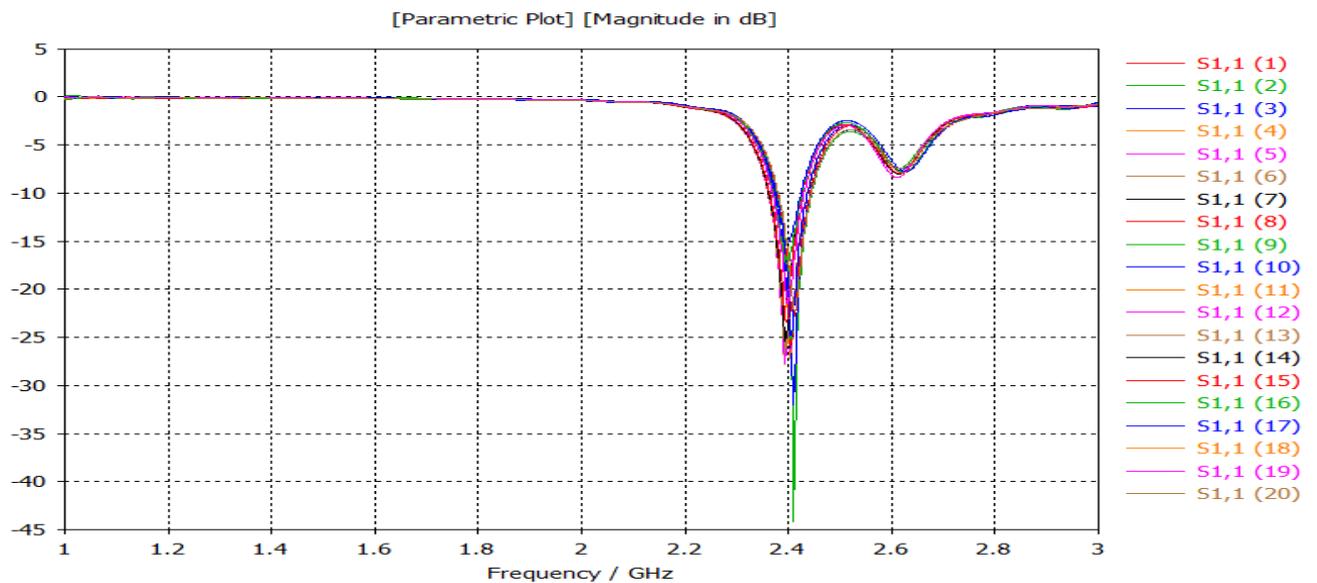
Les résultats de la simulation ont donné un coefficient de réflexion qui égale à **-23.07dB** a une fréquence de 2.41GHZ.

Donc une étude paramétrique sur les encoches était menée pour avoir un meilleur résultat par rapport à la fréquence (2.4GHZ) adapté à son impédance d'entrée  $Z_{11}=50\Omega$ , les modifications ont touché les valeurs de la longueur des encoches (Feed insertion :  $Fi$ ) et la largeur de l'encoches (Feed Gap :  $GPF$ ), ainsi la largeur de la ligne d'alimentations  $W_f$ .

Le tableau suivant montre les différentes valeurs prise pour l'amélioration du fonctionnement des encoches et leur influence sur la fréquence  $S_{11}$ , VSWR et  $Z_{11}$ :

FI	GPF	WF	S11	VSWR	Z11	Fréquence
4.5	1	3.1	-23.07	1.15	51.12	2.41
4.6	0.5	3.1	-44.11	1.01	48	2.42
5	0.5	3.1	-27.12	1.01	50.63	2.404
5.55	0.5	3.1	-26.6	1.01	50.33	2.404
5.7	0.5	3.1	-24.75	1.12	51.37	2.406
5.59	0.5	3.1	-25.79	1.10	50.10	2.404
5.6	0.5	3.1	-24.5	1.12	51.30	2.404
5.7	0.5	3.1	-25.23	1.11	49.77	2.404
6	0.5	3	-27.5	1.08	52	2.39
7	0.5	3	-17.8	1.31	51	2.398
7.5	0.5	3	-15.03	1.34	49.5	2.4
7.5	0.4	3	-21.36	1.10	52	2.4

**Tableau III .5-**Etude paramétrique sur les encoches



**Figure III .8 -** Courbes de l'étude paramétrique sur les encoches

Nous remarquons d'après la figure (III.7) l'influence des paramètres de l'encoche sur les performances de l'antenne, tel que le coefficient de réflexion est arrivé à des valeurs très petite (jusqu'à -44dBi) mais à une fréquence de 2.42GHZ.

En prenant la fréquence d'adaptation, nous trouvant les résultats mentionnés dans le tableau suivant :

Noms	Appellations	Valeurs (mm)
Longueur du patch	L	28.31
Largeur du patch	W	54
Largeur de la ligne	Wf	3
Largeur du substrat	WG	59.52
Longueur du substrat	LG	76.74
La longueur de l'encoche	FI	7.5
La largeur de l'encoche	GPF	0.4
Épaisseur du patch	H <sub>r</sub>	0.035
Hauteur du substrat	H <sub>s</sub>	1.6

**Tableau III .6-** les dimensions de l'antenne réalisé

- **Le coefficient de réflexion**

À partir de la modification des dimensions des encoches, nous avons réussi à avoir un S11 qui égale à -21.36dB a une fréquence (F=2.4GHZ):

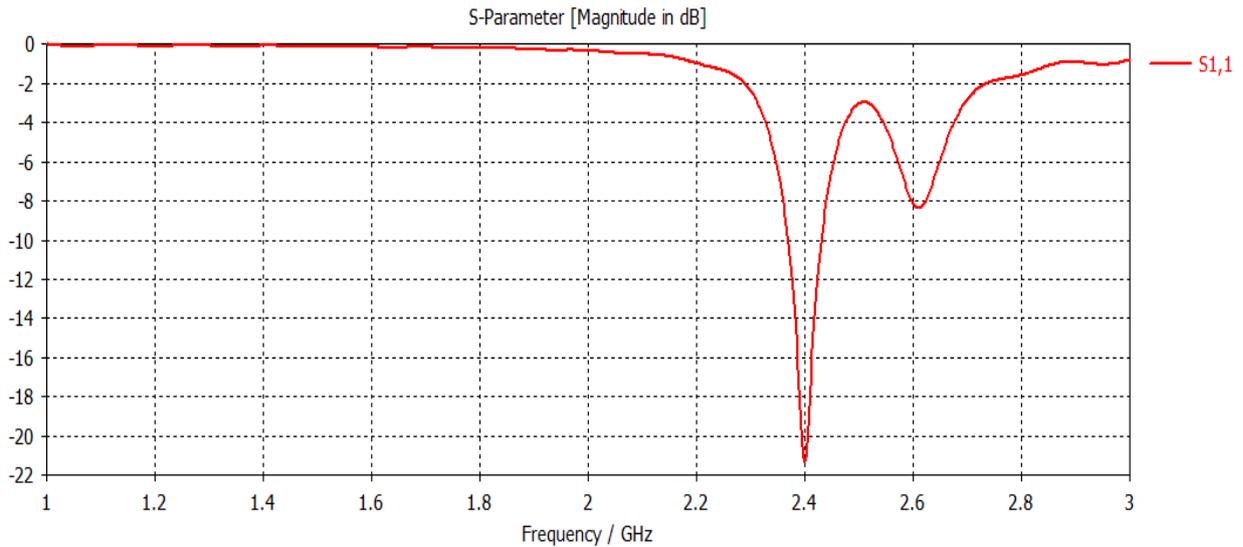


Figure III .9 -coefficient de réflexion à 2.4GHZ

- **L'impédance d'entrée**

Le résultat de l'impédance d'entrée vaut 52 Ohm, est proche à celle de l'impédance caractéristique 50ohm, ce qui engendre une bonne fourniture de l'énergie vers la ligne d'alimentation utilisée.

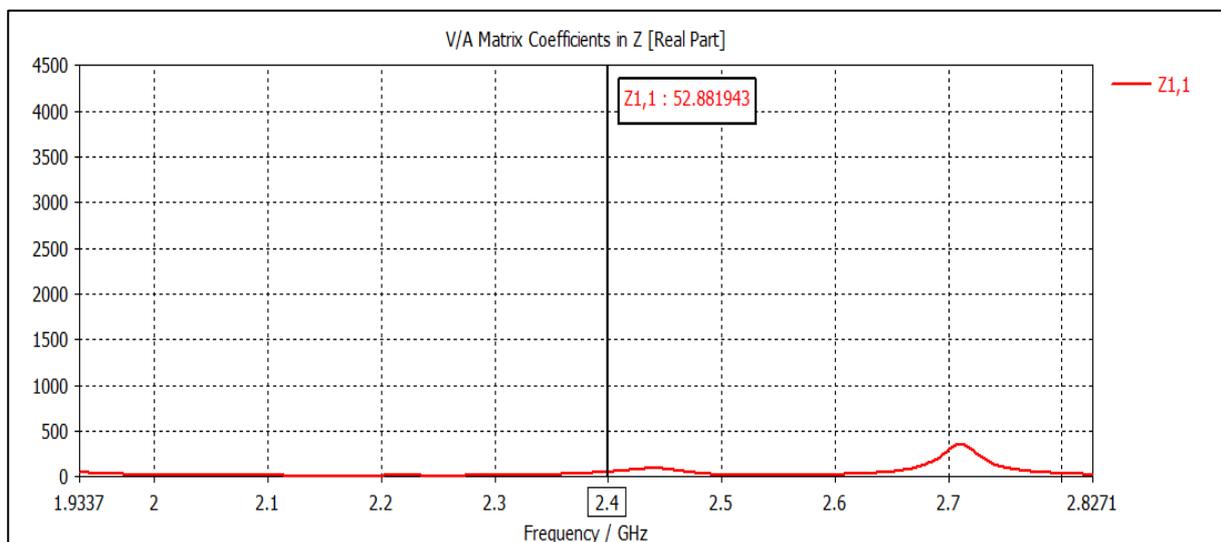


Figure III .10 -l'impédance d'entrée de l'antenne à 2 .4GHZ

- **Rapport d'onde stationnaire (VSWR) :**

Le rapport d'onde stationnaire de notre antenne est en dessous de 2 ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation, VSWR=1.18

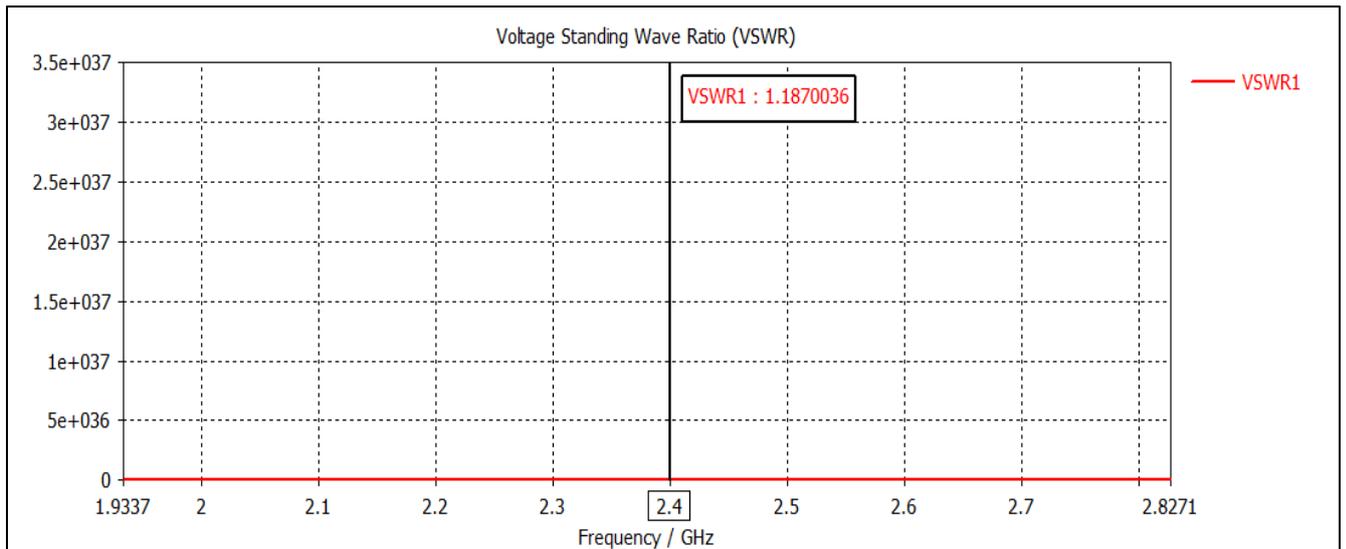


Figure III .11 - Le taux d'onde stationnaire de l'antenne à 2.4GHZ

- **La bande passante**

La bande passante est calculée à partir de l'équation (I-3), on remarque que notre antenne rayonne dans la plage de fréquences [2.36GHZ-2.43GHZ].

$$B_p = 2.54\%$$

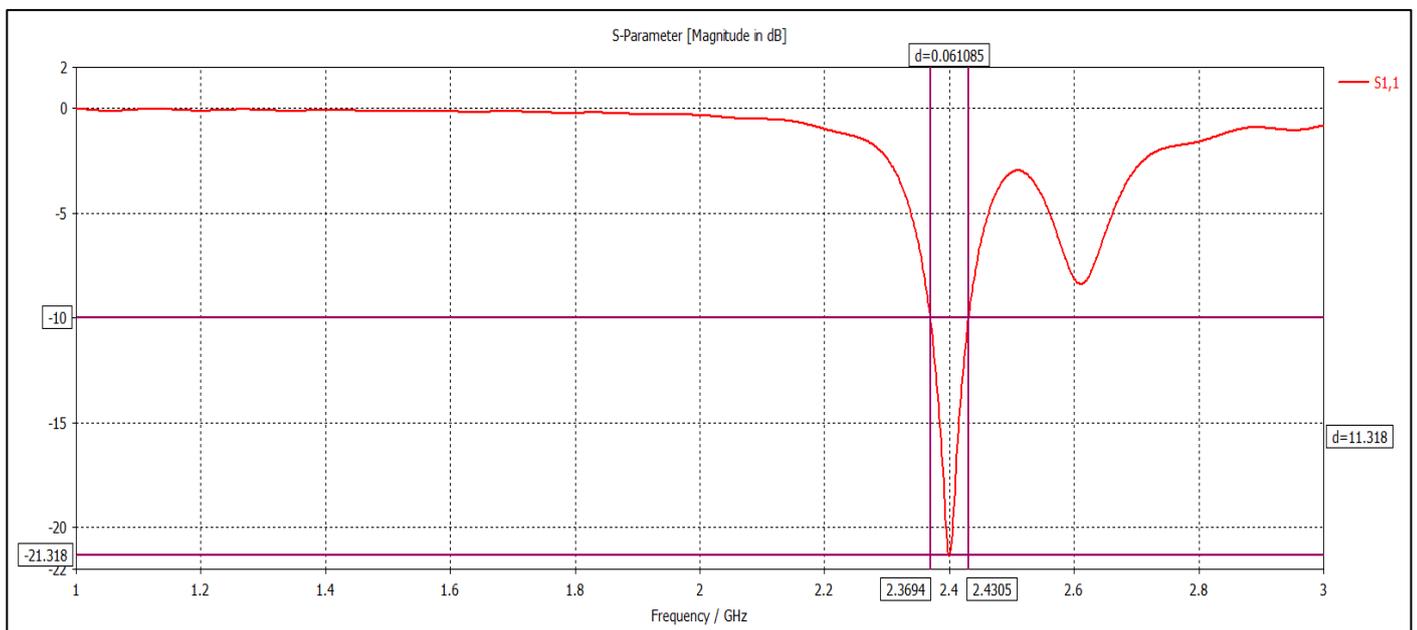


Figure III .12 -La bande passante de l'antenne à 2.4GHZ

- **Diagramme de rayonnement en Gain et Directivité**

## Chapitre III : Conception d'une antenne patch miniature

Le CST nous a permis de visualiser le diagramme de rayonnement de cette antenne en terme de Gain et de directivité sur un plan polaire qui nous donne une idée sur l'angle d'ouverture de cette antenne.

On remarque aussi que le rayonnement en 3D de cette antenne (lobe principale) est dirigé vers la direction Z ce qui montre que l'antenne est presque omnidirectionnelle.

- La valeur du gain est 3.84dB
- La directivité de cette antenne est 6.84dB
- L'angle d'ouverture est 95.7 deg

Les figures suivantes montrent la représentation polaire et 3D du gain et la directivité :

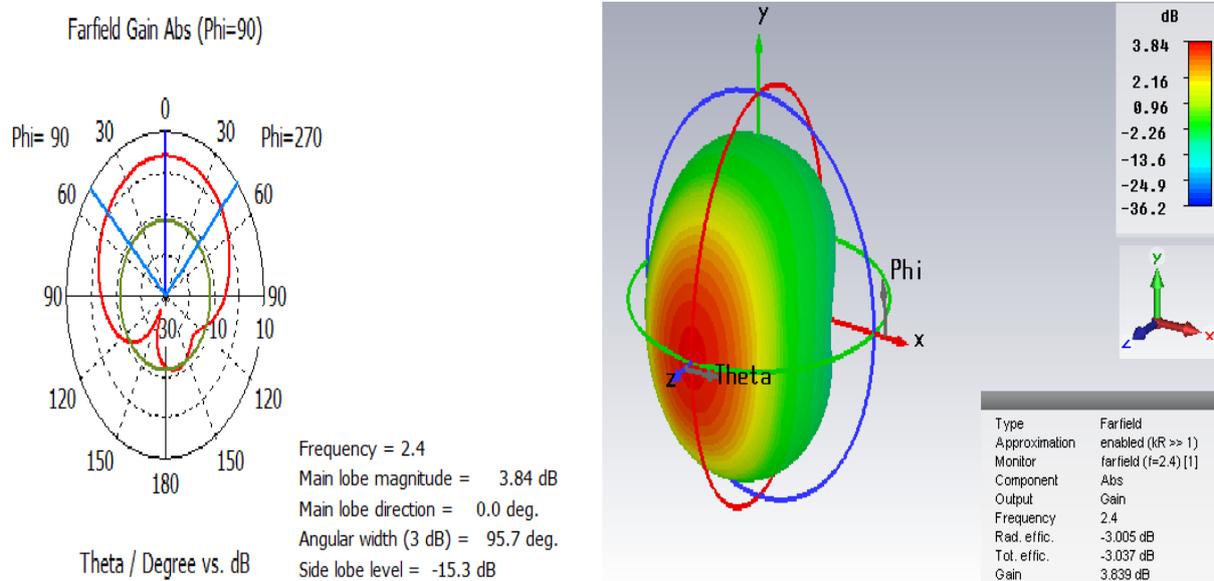


Figure III .13- la représentation polar et 3D du gain

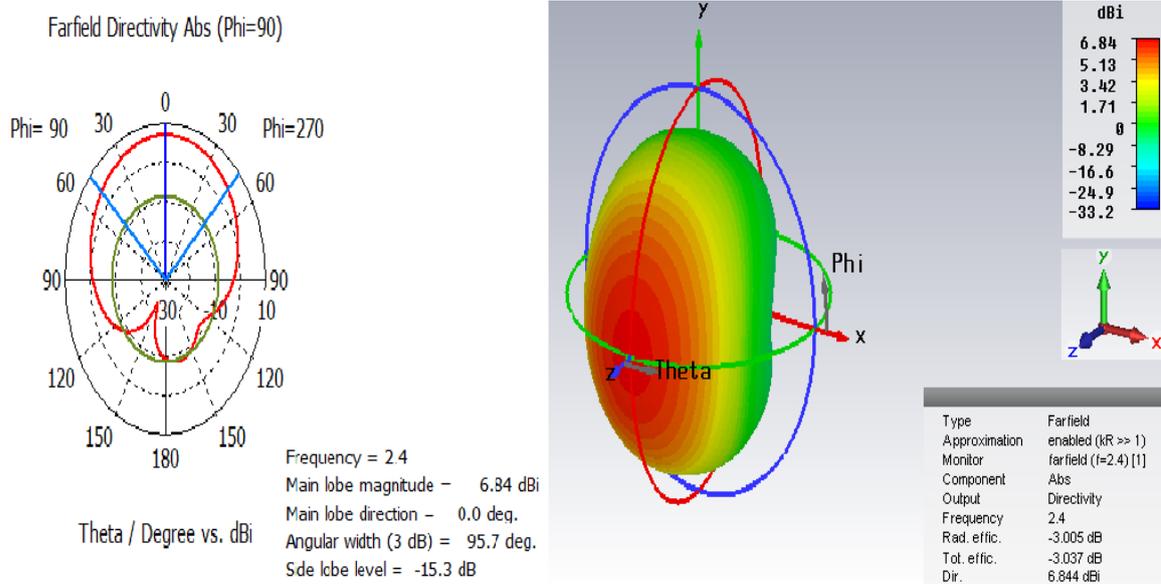


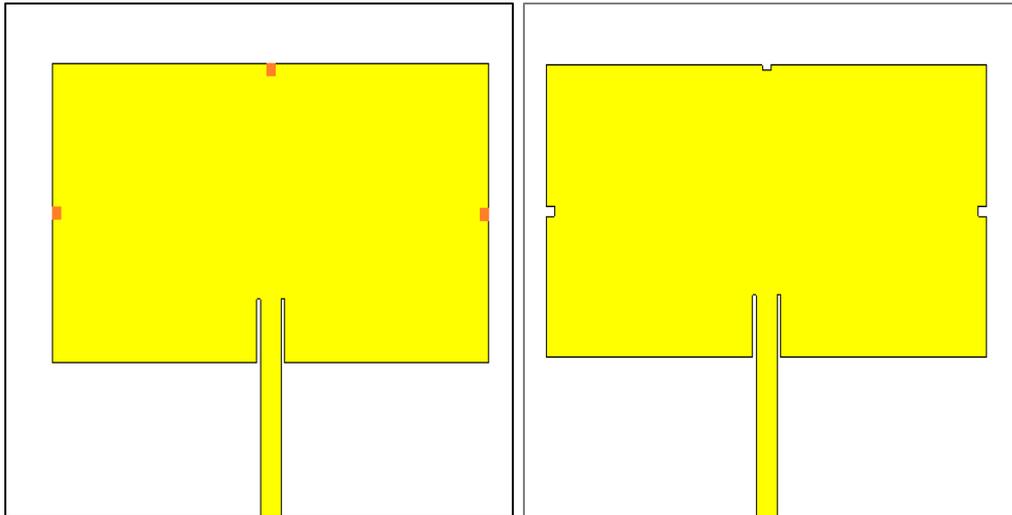
Figure III .14 -La représentation polar et 3D de la directivité

### III.3 La miniaturisation de l'antenne imprimée

Après les recherches menées dans le chapitre précédent (chapitre II) et après avoir acquis des connaissances dans le domaine de la miniaturisation des antennes imprimées, nous avons choisi la technique de la modification de la géométrie de l'antenne, en ajoutant des fentes au niveau de l'antenne.

#### III.3.1 L'ajout des fentes

Au début nous avons pris l'antenne précédente et qui est l'antenne de base de cette étude, et nous avons ajouté des sur les trois extrémités du patch (**Figure III- 15**), ces trois fentes ont eu la valeur de **1mm** de longueur et largeur comme début, sans toucher les mesures de paramètres de l'antenne.

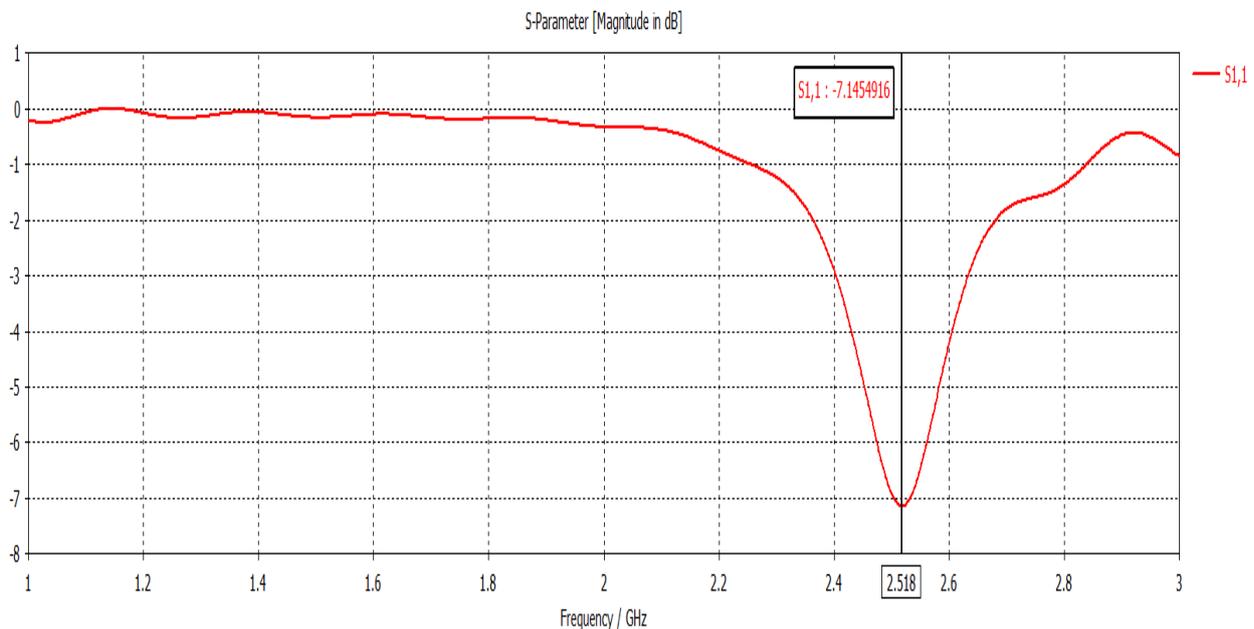


**Figure III. 15**-Antenne rectangulaire avec des fentes

Plusieurs études ont prouvé que cette technique peut réduire de 30% à 50% la taille réelle de l'antenne, donc on a essayé d'appliquer directement ce qui est mentionné dans la littérature.

Les résultats de cette étape démontrent un dysfonctionnement global de l'antenne

$S_{11} = -7.14 \text{ dB}$  à une fréquence de 2.58 GHz.



**Figure III. 16** -Coefficient de réflexion après l'ajout des fentes

Une étude paramétrique a été faite sur les fentes, cette dernière a pour but d'adapter l'antenne à la fréquence de 2.4 GHz, avec un coefficient de réflexion qui dépasse -10 dB :

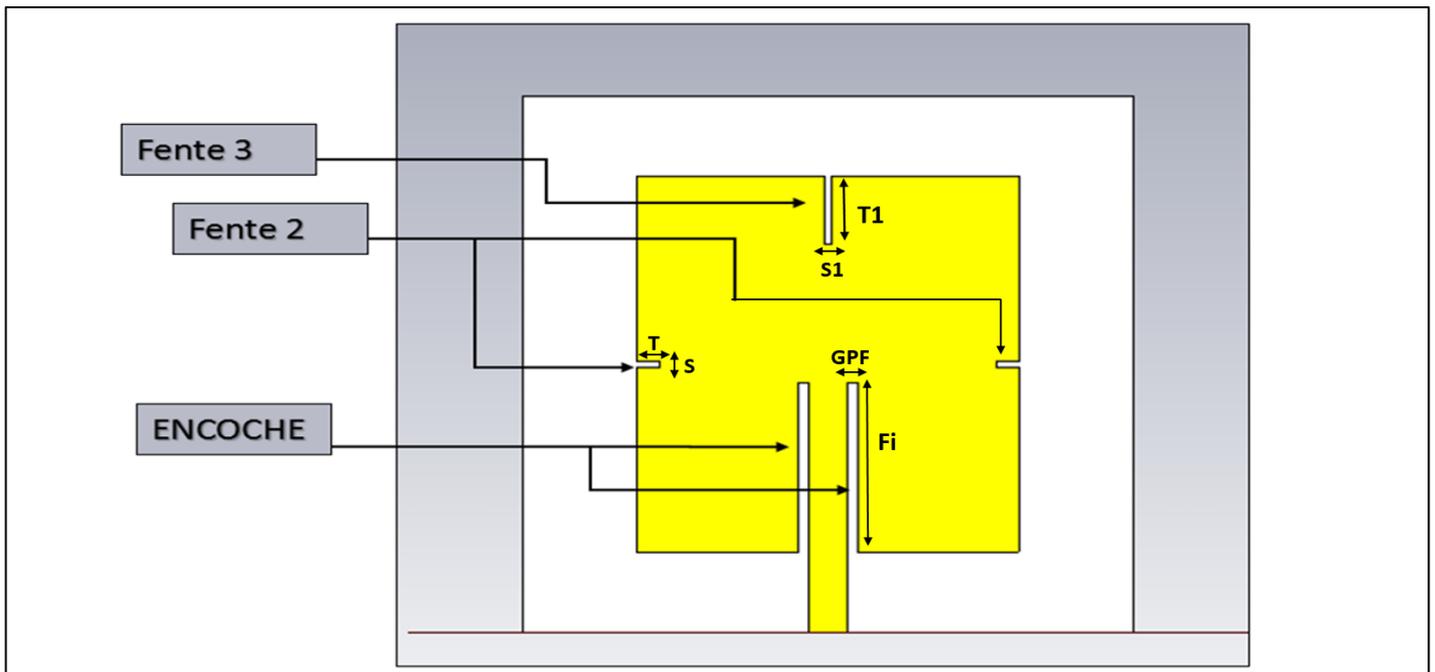


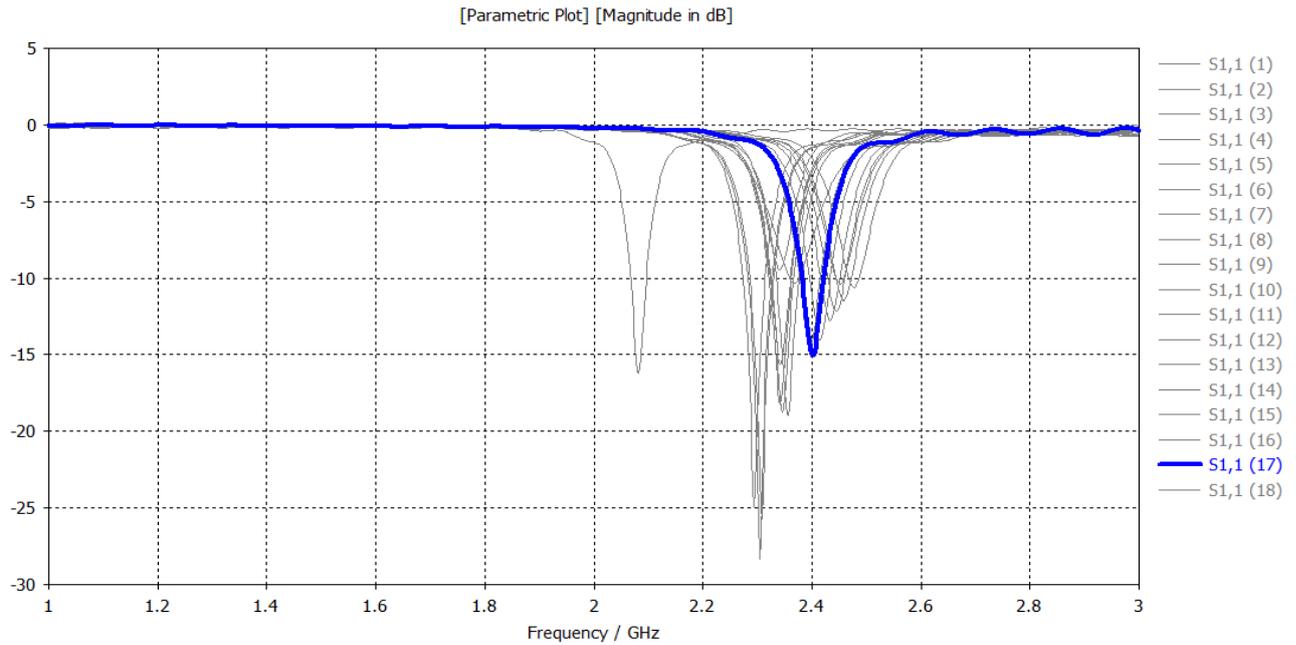
Figure III.17 -Appellation des différentes fentes

Parameter View: 1D Results\S-Parameters\S1,1

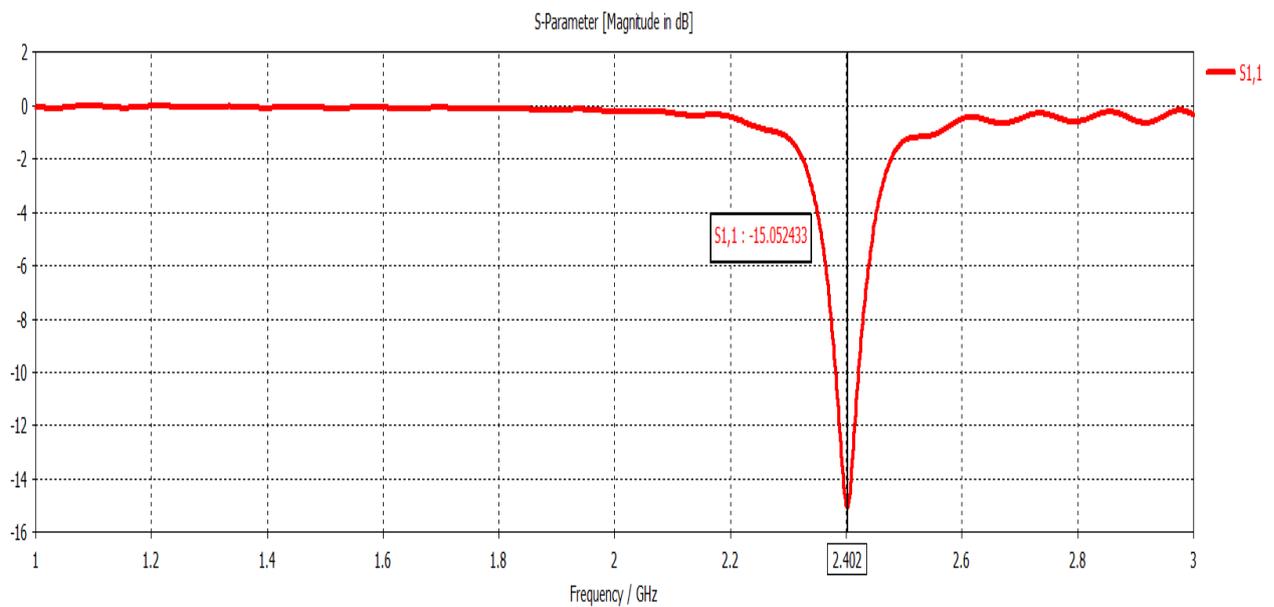
3D Run	Parameters							1D Results\S-Parameters S1,1
	GPF	S	S1	T	T1	WF		
1	0.6	1	16	3	1	2.49831	1DC	
2	0.6	1	16	8	1	2.49831	1DC	
3	0.6	1	16	5	1	2.49831	1DC	
4	0.6	1	16	5	1	2.49831	1DC	
5	0.6	1	10	5	1	2.49831	1DC	
6	0.6	1	10	5	1	3	1DC	
7	0.6	1	10	5	1	3.4	1DC	
8	1	1	10	5	1	3.4	1DC	
9	0.5	2	10	5	2	3.4	1DC	
10	0.5	2	10	5	2	4	1DC	
11	0.6	2	10	5	2	2.49	1DC	
12	0.6	2	10	2	2	2.49	1DC	
13	0.6	3.5	10	2	2	2.49	1DC	
14	0.6	4	10	2	1	2.49	1DC	
15	0.6	5	10	2	1	2.49	1DC	
16	0.6	7	10	2	1	2.49	1DC	
17	0.6	9	10	2	1	2.49	1DC	
18	0.6	9	10	2	1	2	1DC	

Tableau III. 7 -Etude paramétrique sur l'antenne avec fentes

La courbe ci-dessus montre l'impact de l'ensemble des expériences qui ont été faite pour aboutir au résultat montré en bleu sur cette figure :



**Figure III. 18** -Courbes de l'étude paramétrique sur les fentes



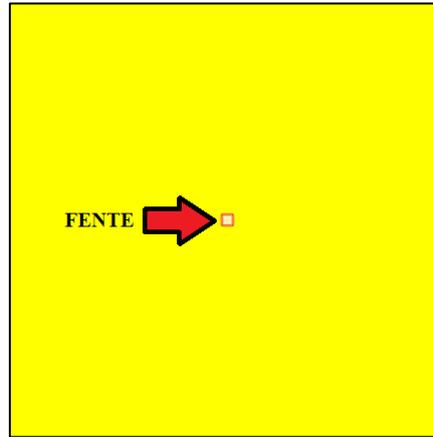
**Figure III. 19**- Le coefficient de réflexion de l'antenne à fente

Le coefficient de réflexion vaut  $-15.05$  dB, avec une largeur de bande de  $1.6\%$ , donc on a procédé à une technique pour élargir un peu la bande passante de cette antenne miniature.

Et parmi les moyens utilisés pour l'élargissement de la bande passante, l'utilisation des fentes sur le plan de masse de l'antenne [26].

### III.3.2 L'élargissement de la bande passante

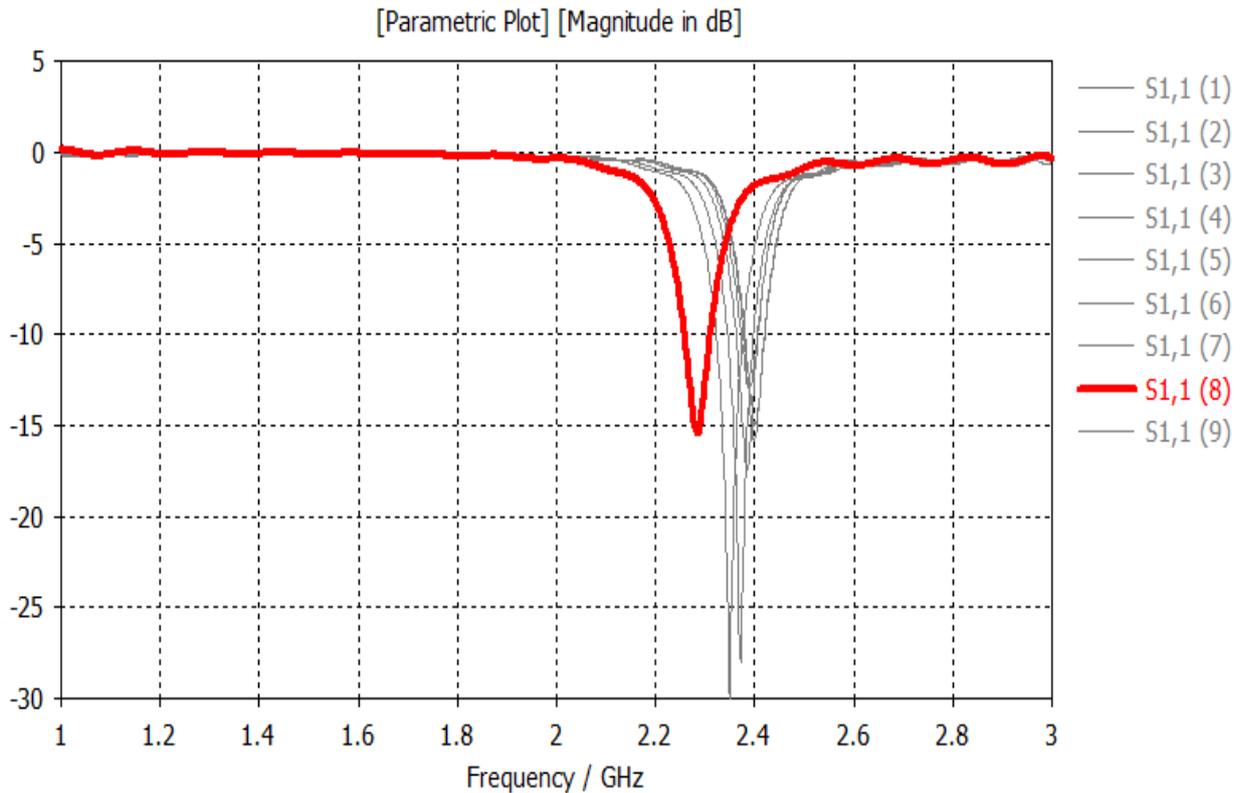
On a inséré une fente d'une longueur  $P1=1\text{mm}$  et une largeur  $P2=1\text{mm}$  dans le plan de masse comme le montre la figure suivante :



**Figure III. 20** -positionnement de la fente sur le plan de masse

On a remarqué que la bande passante est augmenté de 1.6% à 1.66% ce qui signifie que cette méthode à réussie a augmenté la BP donc on va essayer d'élargir la fente.

La figure (III.21) montre que la bande passante est élargi à 2.14% à un diamètre de fente ( $P1=8\text{mm}$  et  $P2=8\text{mm}$ ), on a remarqué que lorsqu'on augmente la longueur et la largeur de la fente, la bande passante s'élargi mais par conséquent la valeur du  $s_{11}$  s'approche de -10dbi, et la fréquence est loin à celle désiré  $f=2.28\text{GHz}$ .



**Figure III.21** -Coefficient de réflexion pour différentes valeurs de P1 et P2

Pour que notre antenne soit adaptée il faut que la fréquence de résonance soit  $F=2.4\text{GHZ}$ , Ce qui nécessite quelques ajustements dans les dimensions des composants de cette antenne.

### III.3.3 L'adaptation de la fréquence

Ce processus nécessite l'application de ce qui a été acquis avant cette étape comme information sur l'effet de chaque paramètre sur les résultats de l'adaptation.

Les modifications apportées aux paramètres de cette antenne n'ont pas touché la longueur et la largeur du patch ( $L$ ) et ( $w$ ) ainsi la longueur et la largeur de l'antenne ( $LG$ ) et ( $WG$ ) pour préserver la taille après la miniaturisation, ce qui valorise le rôle des fentes ajoutées par avant.

La figure (III. 22) montre que lorsqu'on diminue la largeur des fentes la fréquence augmente vers la valeur voulue :

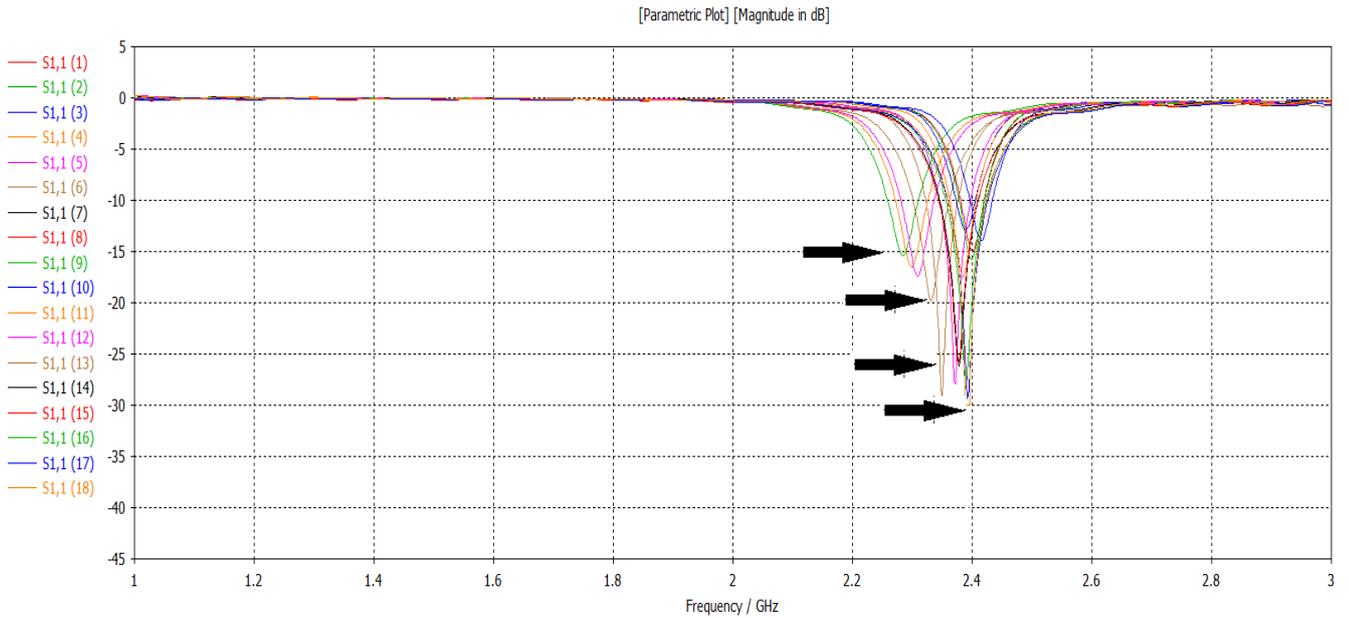


Figure III. 22-L'adaptation de la fréquence avec les paramètres des fentes

S (mm)	T(mm)	S1(mm)	T1(mm)	Fréquence (GHZ)	S11(dB)
9	2	1	10	2.28	-15.43
7	2	1	10	2.29	-16.54
6	2	1	10	2.30	-17.40
4	2	1	10	2.33	-19.81
1	2	1	10	2.37	-26.17
0.5	2	0.5	10	2.39	-26.93
0.4	2	0.5	10	2.4	-27.61

Tableau III. 8 -Etudes paramétriques sur les fentes ajoutées

### III.3.4 Discussions et interprétation des résultats

- Le Coefficient de réflexion

Nous avons réussi à avoir un coefficient de réflexion  $S_{11} = -27.61 \text{ dB}$  à la fréquence  $2.4 \text{ GHz}$ , exactement comme on a souhaité

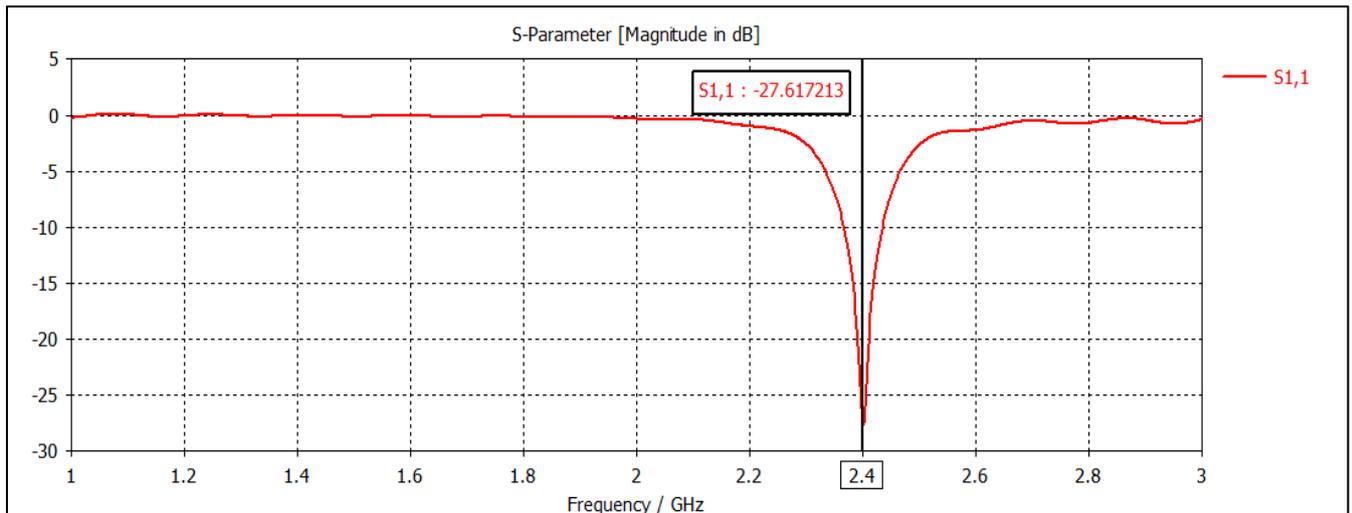


Figure III. 23 - Coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 2.4GHZ

- **La bande passante**

Notre antenne rayonne dans la plage de fréquence [2.36GHZ-2.43GHZ]

La valeur de la bande passante est de l'ordre de 2.83%.

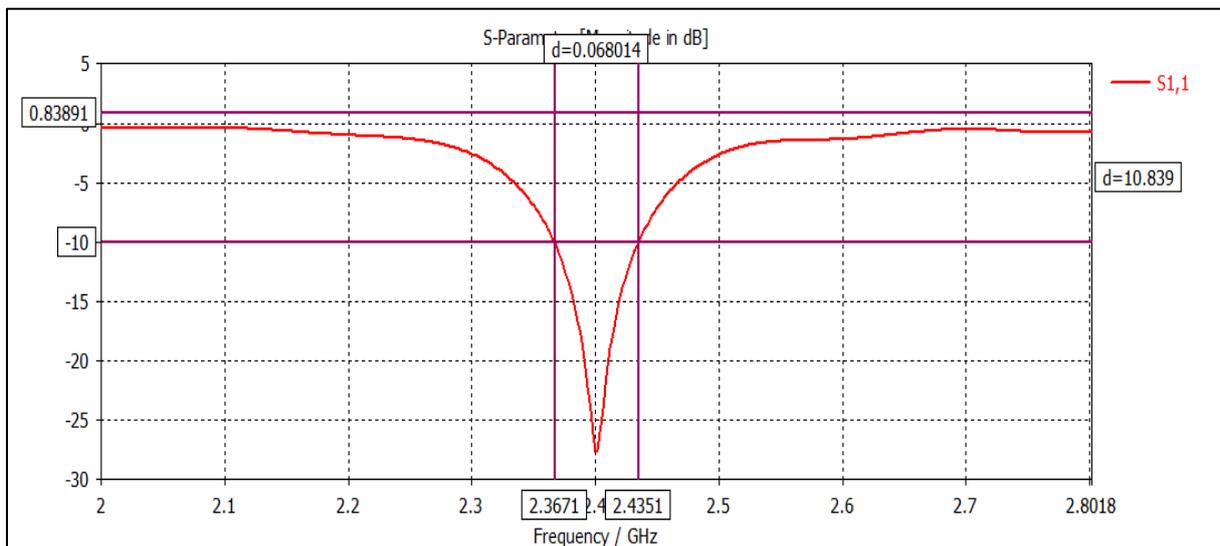


Figure III. 24 - la bande passante de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ

- **L'impédance d'entrée**

Le résultat de l'impédance d'entrée est proche à celle de l'impédance caractéristique 50ohm, ce qui engendre une bonne fourniture de l'énergie vers la ligne d'alimentation utilisée  $Z_{11}=51.66$

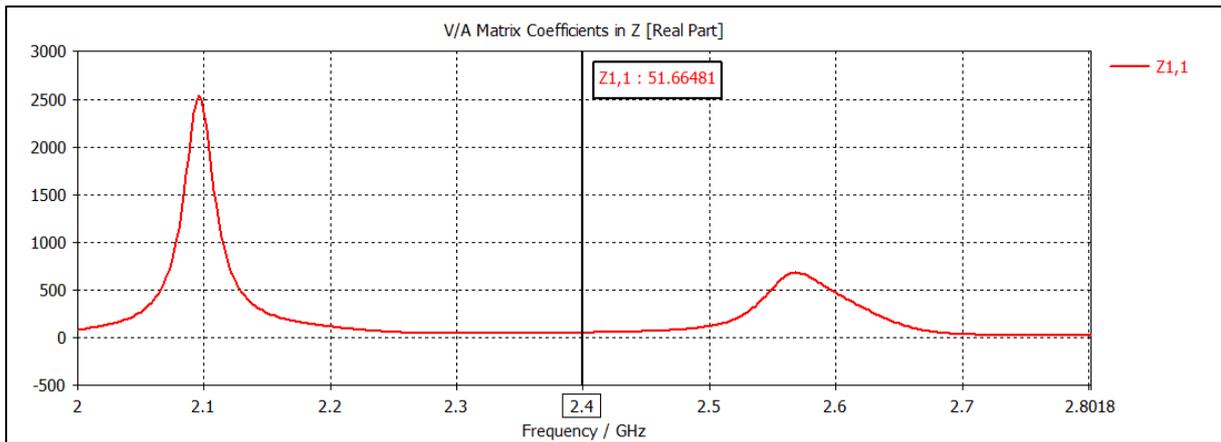


Figure III. 25 - l'impédance d'entrée de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ

- **Taux d'onde stationnaire VSWR**

Le rapport d'onde stationnaire nous donne l'appréciation de l'adaptation, le TOS est en dessous de 2 ce qui indique une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne de d'alimentation, VSWR=1.086

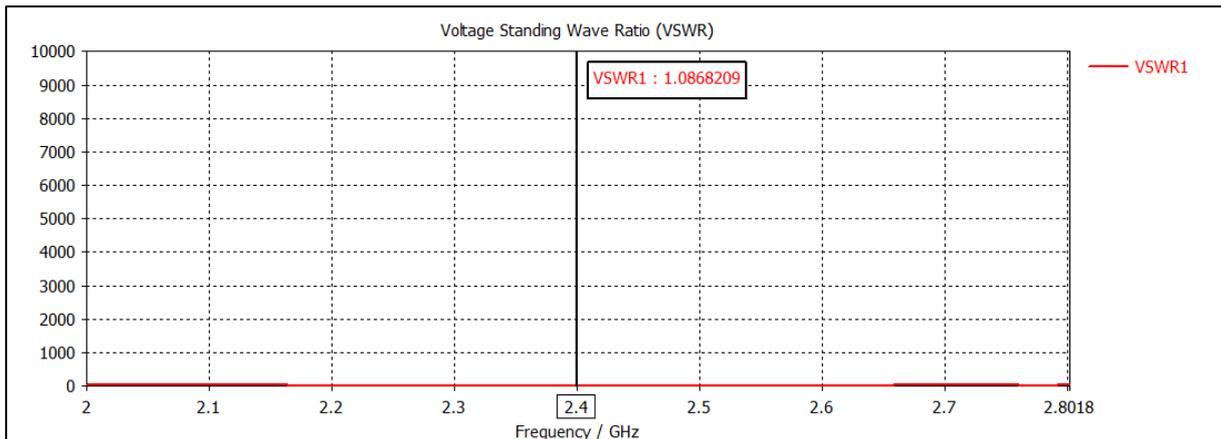


Figure III. 26 - VSWR de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ

- **Diagramme de rayonnement en Gain et Directivité**

Le diagramme de rayonnement 3D de cette antenne reflète la valeur du Gain et la directivité, et sur le plan polar on peut voir l'angle d'ouverture de cette antenne :

- La valeur du gain est 1.79dB
- La directivité de cette antenne est 5.29dBi
- L'angle d'ouverture est 95deg

Les figures suivantes montrent la représentation polar et 3D du gain et la directivité :

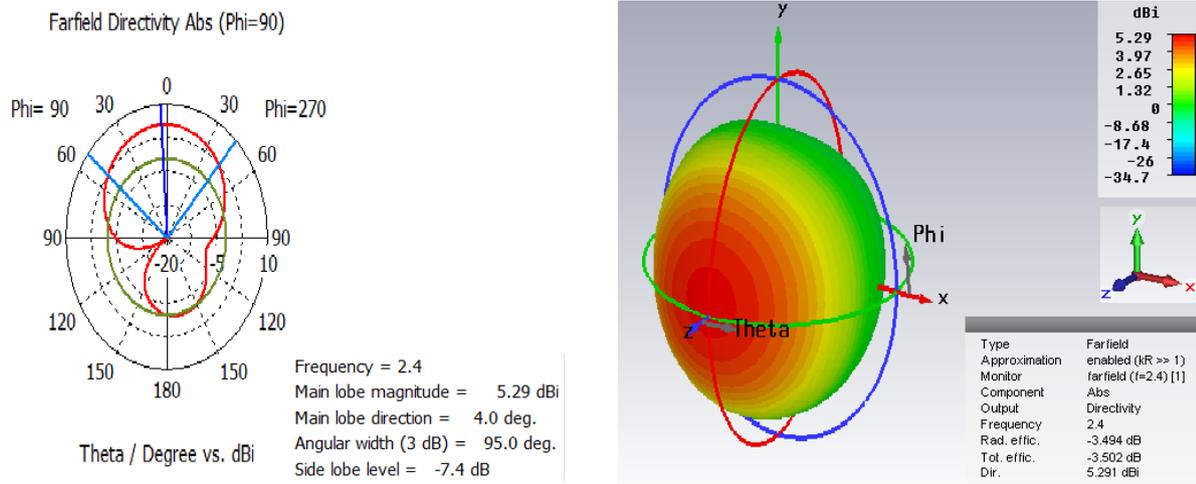


Figure III. 27 - la représentation polar et 3D de la directivité

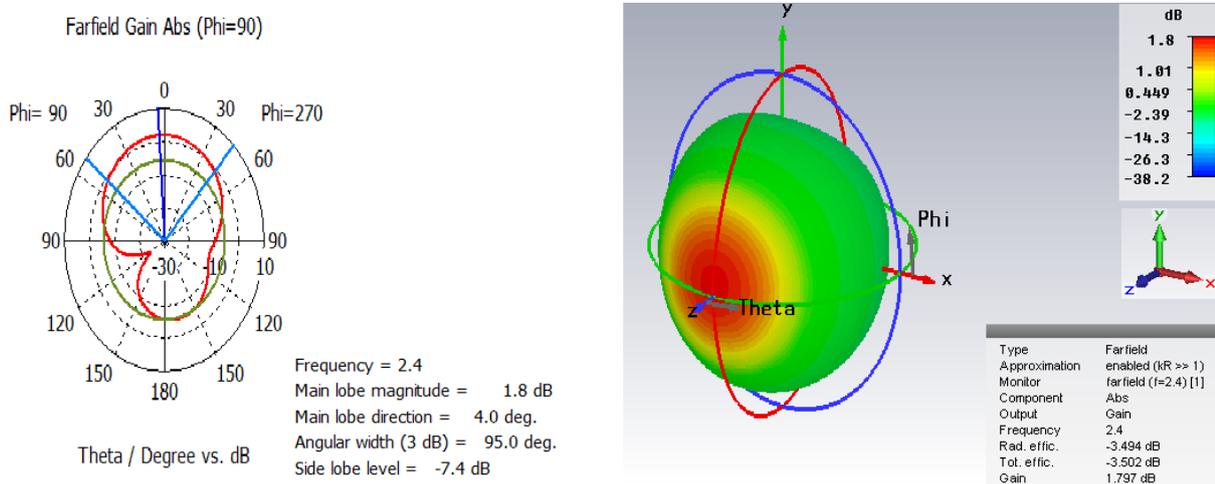


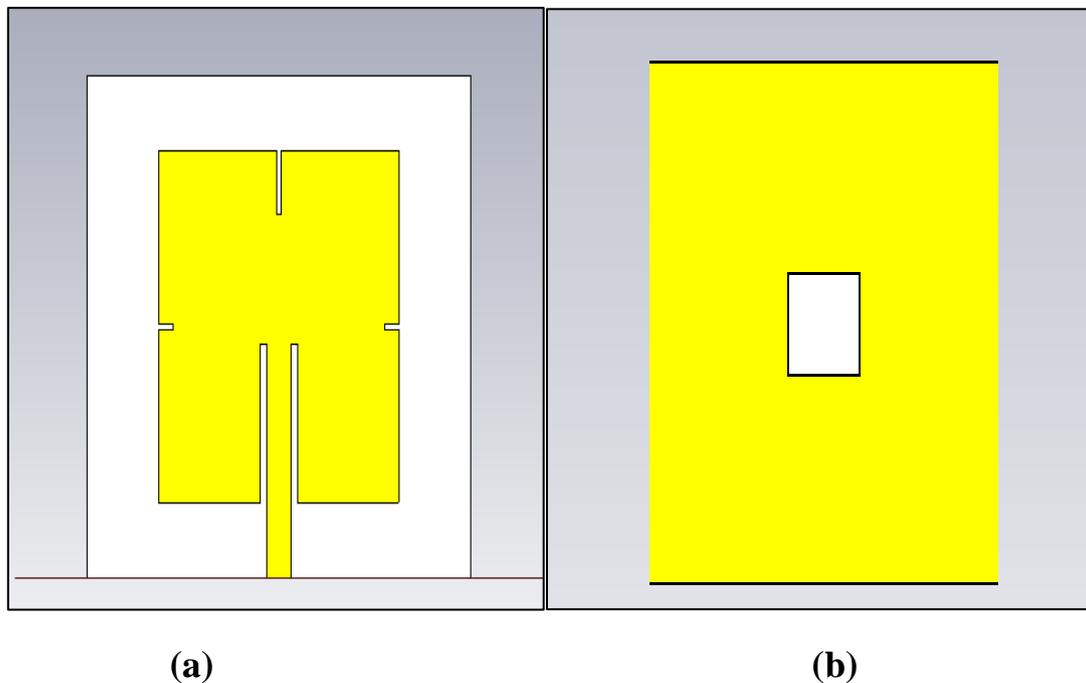
Figure III. 28- la représentation polar et 3D du gain

### III.3.5 Représentation finale de notre antenne miniaturisée

Nous avons réussi à réduire 62% de la taille de notre antenne et 54% de la taille de notre patch pour obtenir les résultats présentés dans le tableau (III. 9).

Noms	Valeurs (mm)	Noms	Valeurs (mm)
Longueur du patch <b>L</b>	28	La longueur de la fente 2 <b>T</b>	2
Largeur du patch <b>W</b>	25	La largeur de la fente 2 <b>S</b>	0.4
Largeur de la ligne <b>WF</b>	2.49	La largeur de la fente 3 <b>S1</b>	0.5
largeur du substrat <b>LG</b>	40	La longueur de la fente 3 <b>T1</b>	10
Longueur de substrat <b>WG</b>	40	La largeur de la fente du plan de masse <b>P1</b>	8
La largeur de l'encoche <b>GPF</b>	0.7	La longueur de la fente du plan de masse <b>P2</b>	8
La longueur de l'encoche <b>Fi</b>	12.6	Hauteur de substrat <b>Hs</b>	1.6

**Tableau III. 9** - Les dimensions de l'antenne miniaturisée à 2.4GHZ



**Figure III. 29** - Antenne miniaturisé à 2.4GHZ (a)face supérieur (b) face inférieure

### III.4 Comparaison de performances entre l'antenne de base et l'antenne miniature

Le tableau suivant présente les valeurs du : gain, directivité et bande passante de l'antenne patch rectangulaire avec ces dimensions normales, et celle de sa version miniature :

**Tableau III. 10 - Comparaison des résultats**

Antenne	Gain	Directivité	Bande passante
Antenne normal	3.83	6.84	2.54%
Antenne miniaturisé	1.79	5.29	2.83%

Nous remarquons une diminution des performances électromagnétiques (gain, directivité) ce qui est normale par rapport au fait de la miniaturisation, mais cette diminution de performance n'empêche pas le bon fonctionnement de l'antenne car le gain a une valeur positive.

La bande passante de l'antenne miniature est un peu large du fait de l'ajout de la fente au niveau du plan de masse.

Généralement on peut dire que nous avons réussi à miniaturiser l'ensemble des dimensions des composantes de l'antenne pour avoir une antenne imprimée miniature à la fréquence de 2.4GHZ.

### III.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de réaliser une antenne imprimée rectangulaire à 2.4GHZ miniature. Nous avons commencé par la conception d'une antenne patch rectangulaire simple performante, après plusieurs tentatives d'adaptation on a réussi à atteindre notre première phase de cette conception. En ce qui concerne la deuxième phase on a réduit la taille de l'antenne avec la technique de l'insertion des fentes, ces fentes nous ont permis de conserver les performances de cette dernière (gain, bande passante, directivité) après plusieurs tests sur la longueur et la largeur de ces fentes-là.

A la fin de ce chapitre nous avons comparés les performances de l'antenne imprimée normale et sa version miniature ou on a constaté une diminution minime des performances qui n'affecte pas beaucoup le fonctionnement normale de notre antenne, donc nous avons réussi à concevoir une antenne patch rectangulaire miniature à la fréquence de 2.4GHZ

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale :

Les antennes miniatures sont le sujet de plusieurs études depuis maintenant de nombreuses années, en effet l'antenne est un élément indispensable de tout système de communication et sa miniaturisation est un défi pour la réduction de la taille global des objets communicant sans fil. Les techniques de miniaturisation ont reçus une attention considérable ces dernières années principalement en raison de leur capacité à rétrécir les dimensions physique de l'antenne sans que cela n'intervienne sur les performances de l'antenne.

Notre travail à portée sur le fait de miniaturiser une antenne en utilisant une de ces techniques qui est celle de l'utilisation des fentes, nous avons explorés d'une manière générale l'état de l'art des antennes imprimées et leur caractéristiques ainsi les technique d'alimentation pour passer ensuite à l'explication détaillé de la miniaturisation et tout ce qui limite théoriquement la diminution électrique et physiques des antennes, de plus nous avons traité l'ensembles des techniques existantes pour la réduction de la taille des antennes.

De ce point on a introduit au logiciel (CST microwave studio) les paramètres calculés pour concevoir une antenne rectangulaire à 2.4GHz, les résultats de cette opération ont révélé des répercutions a notre but recherché ce qui a provoqués des études paramétriques, ainsi l'introduction des encoches pour arriver au performance souhaitées , une fois l'antenne patch rectangulaire est bien adapté on est passé à la réduction de la taille de cette dernières par l'insertion des fentes sur l'éléments rayonnant de l'antenne, cependant les résultats de cette réduction qui ont nécessité une optimisation des performances par des études sur le nombre et la taille des fentes , de ce fait des évolutions remarquables ont été révélé sur certain caractéristiques comme le coefficient de réflexion, le gain et la directivité , toutefois la bande passant était très étroites donc on à décider de l'élargir par le fait d'insérer une autre fentes sur le plans de masse.

À la fin nous nous sommes arrivés à notre but qui est celui de réaliser une antenne patch rectangulaire miniaturisé à une fréquence de 2.4GHz, par la suite on a exercé une comparaison de performances entre l'antenne de base et sa version miniature dans laquelle on a remarqué que le fait de miniaturiser va engendrer une dégradation de performances qui agissent sur l'antenne sans affecter son bon fonctionnement.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] : BENAZZOUZ Ghouti et BENSENANE Ikram, Sujet : Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE, 03/07/2019, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –Faculté de technologie.
- [2] : BAALOUJ Oualid, sujet : Etude de l'effet des matériaux du substrat sur les caractéristiques d'une antenne patch micro ruban , l'Université Larbi Tebessi-Tébessa / Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, Département : Science de la matière.
- [3] :C. Hamid « Conception D'un Nouveau System D'antenne Réseau Conforme En Onde millimétrique» Maitrise En Ingénierie, Université De Québec A Chicoutimi. Mai 2012.
- [4] :M, Gujral, J.L.W, Li,T, Yuan, and CW.Qiu, "Bandwidth improvement of microstrip antenna array using dummy ebg pattern on feed line" national university Of singapore, progress in electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.
- [5] :Md, Maruf Ahmed, Kishore Bhowmik, Md. Shahidulla, Md.Shihabul Islam, Md, Abdu Rahman "Rectangular microstrip patch antenna at 2Ghz on different Dielectric constant for pervasive wireless communication", International journal of electrical and computer engineering (IJECE) Vol.2, N°3, pp.417-424, June 2012.
- [6] :A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Diriges» Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse.
- [7] : Support de cours Aline-saidane <http://www.infcom.rnu.tn/content/pdf/cours/aline-saidane/chapitre1-generalies-sur-les-antennes-2dni.pdf>.
- [8] Mell. Melihi Souhila ET Mr. S. BERRAH, Thème : Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia Faculté de Technologie Département d'Automatique de Télécommunication et d'Electronique
- [9] :L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas ", IEEE trans. Antennas Propagat. , vol. 49, pp. 45-47, 01/ 2001.
- [10] : S. E .Sandstrom « A Compact Microstrip Patch Antenna For LTE Application, Master Thesis, Submitted For Degree Of Master In Electrical Engineering Specialization In Signal Processing Wave Propagation ».
- [11] :A. K. Bhatta charryya , "Long rectangular patch antenna with a single feed , " IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 38 , N°. 7, pp. 987-993, July 1990.
- [12]:A. Balanis. Antennas Theory - Analysis and Design. 3rd Edition. John Wiley&Sons, Inc, 2005.

## Bibliographie

[13] : Mr IRANKUNDA Germain Mr UFITEYEZU Emmanuel, Sujet : Etude et Conception d'une antenne patch Rectangulaire pour les Réseaux Personnels Sans fils \_WPAN à 60 GHz. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

[14]: I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip antennas, "Dedham, Ma: Artech House 1980.

[15]: D. M. Pozar, "Microstrip antennas," IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992

[16]: J.R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas," IEE Electromagnetic Waves Series 28, 1989.

[17] :([https://oatao.univ-toulouse.fr/24561/1/Victor\\_ENGELHARDT\\_.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/24561/1/Victor_ENGELHARDT_.pdf)).

[18] : Doctorat de l'université Toulouse Délivré par : Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) spécialité : Electromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence Présentée et soutenue par : M. JEREMY VALLEAU le jeudi 1 décembre 2016.

[19] : Doctorat de l'université de Toulouse présenté par MILUSINE Pigeon, intitulé : Etude et réalisation d'antennes ultra-compactes à base de métamatériaux Application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature. nov. 2011.

[20] : Doctorat de l'université de Grenoble présenté par SARAH SUFYAR intitulé « contristions à l'étude d'antenne miniature reconfigurable en fréquence par association d'élément actifs » se tenu le 14 décembre 2011.

[21] : Doctorat de l'université de RENNES 1 Mention : Electronique Ecole doctorale MATISSE présentée par Sabre DAKHLI préparée à l'unité de recherche UMR CNRS 6164 Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes Groupe Antennes et Hyperfréquences UFR Structures et Propriétés de la Matière et au Laboratoire Innov.Com, SUP.COM.

[22] : François Grange : 'Matériaux composites pour antenne miniature intégrée', Thèse De Doctorat. Université de RENNES 1, le 23 novembre 2010.

[23] : John J. O'Connor et Edmund F. Robertson, « Niels Fabian Helge von Koch », dans MacTutor History of Mathematics archive, university de St Andrews [https://fr.wikipedia.org/wiki/Helge\\_von\\_Koch](https://fr.wikipedia.org/wiki/Helge_von_Koch) 31.

[24] :blog Publié le 26 mai 2013 par f8asb

« <http://blog.f8asb.com/2013/05/26/experimentation-antenne-fractale/> »

[25] :P. Ikonen, S. Maslovski, S.Tretyakov, "On Artificial Magneto-dielectric Substrates with Microstrip Antennas : The Role of Frequency Dispersion," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 390 – 393, 2006.

[26] :Usha Kiran, K., Yadahalli, R.M., Vani, R.M. and Hunagund, P.V. (2008) Compact Broadband Stacked Dual Wide Slit Loaded Rectangular Microstrip Antenna. Radio and Space Physics, 37, 366-369.

## Bibliographie

[27] : Dassault Systèmes SE, société de droit français immatriculée au registre du commerce et des sociétés de Versailles sous le numéro 332 306 440, sise 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, France (ci-après « 3DS ») <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>.

[28] :[http://www.mweda.com/cst/cst2013/mergedProjects/CST\\_PARTICLE\\_STUDIO/special\\_overview/special\\_overview\\_waveguideover.htm](http://www.mweda.com/cst/cst2013/mergedProjects/CST_PARTICLE_STUDIO/special_overview/special_overview_waveguideover.htm).

[29] : Site Dassault Systèmes The 3DExperience company :<https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/optimisation/2002-2020>.

# **Annexe**

## Annexe A: Outil de simulations CST Microwave Studio :

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est un outil spécialisé pour la simulation 3D EM de composante haute fréquence, il permet une analyse rapide et précise des appareils haute fréquence (HF) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planes et multicouches. Les utilisateurs de ce logiciel bénéficient d'une grande flexibilité pour aborder une large gamme d'applications grâce à la variété des technologies de solveurs disponibles celle du domaine temporel qui est largement utilisé et aussi du domaine fréquentiel.

Son fonctionnement est basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une digitalisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tout les composants des systèmes simulé, ce qui lui permet d'être une très bonne solution à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences [27].

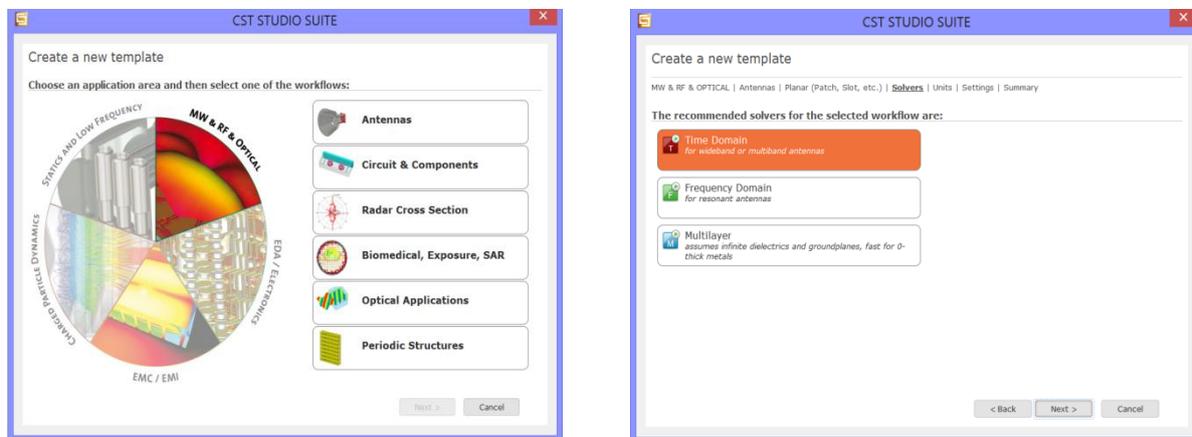


Figure A-1 : Les applications existantes sur le CST Microwave studio, et les solveurs utilisés

### A.1 Les étapes de conception de notre antenne :

Après avoir choisi l'outil de simulation qui est le CST microwave studio en a essayé d'apprendre comment l'utiliser. Donc on a commencé par introduire les valeurs des dimensions des composantes utilisées qui ont été calculé par les équations du (tableau III .I.2) sur le paramètre liste (figure A-2).

# ANNEXE A : OUTIL DE SIMULATION

Name /	Value	Description	Type
FI	7.5		Undefined
GPF	0.4		Undefined
HS	1.6		Undefined
HT	0.035		Undefined
L	28.31		Undefined
LG	59.52		Undefined
W	54		Undefined
WF	3		Undefined
WG	76.74		Undefined

Figure A-2 : Liste des paramètres

Premièrement on a commencé par le plan de masse après avoir choisir le matériel de la bibliothèque des matériaux (figure A-3)

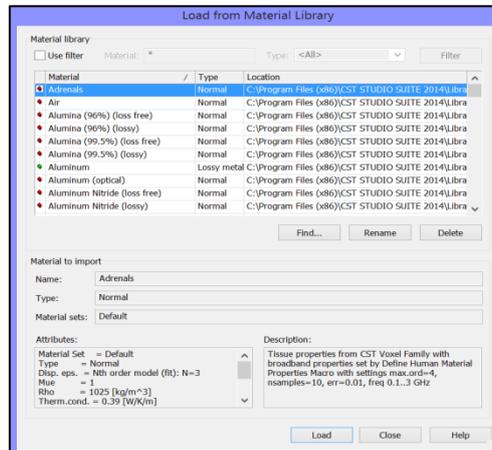


Figure A -3: bibliothèque des matériaux du CST microwave studio

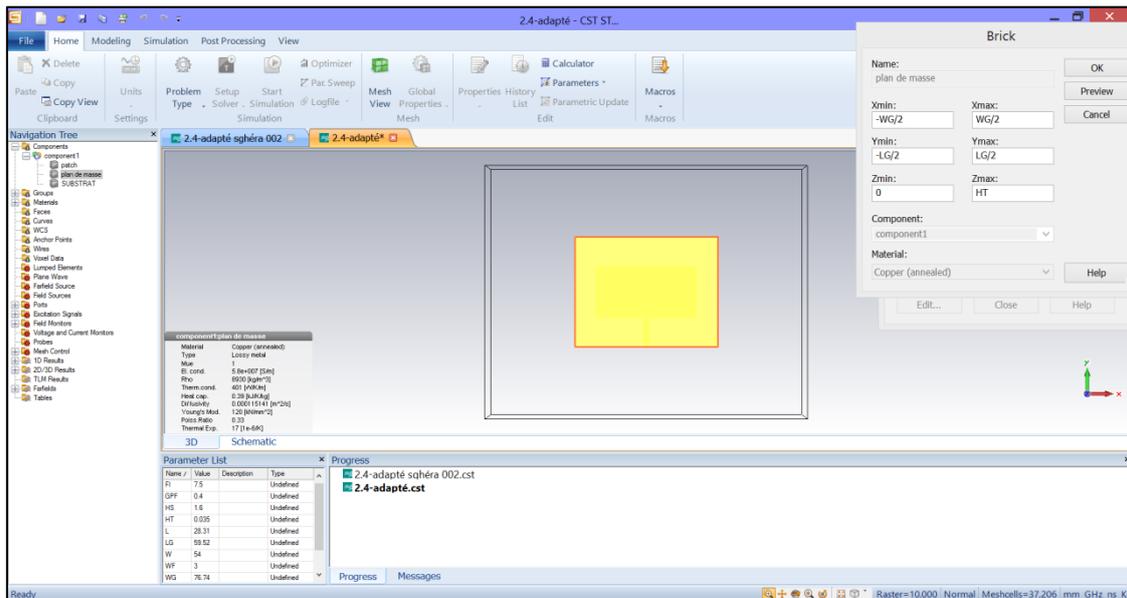


Figure A-4 : La conception du plan de masse

## ANNEXE A : OUTIL DE SIMULATION

De la même manière on a passé à la deuxième composante qui est le substrat diélectrique avec les mêmes dimensions mais à une hauteur différente en utilisant le FR4-lossy comme matériel (figure A-5).

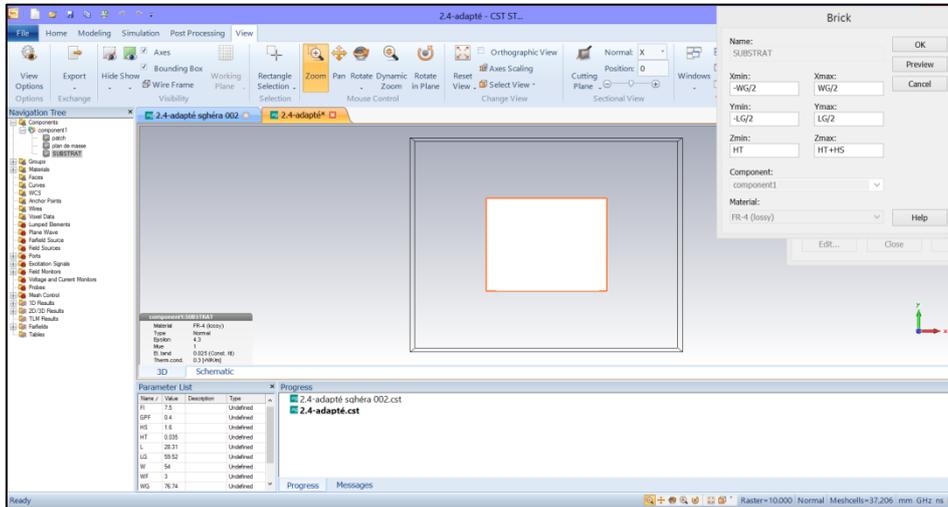


Figure A-5 : La conception du substrat

Ensuite le patch qui est l'élément rayonnant était placé à la face supérieure du substrat au milieu de ce dernier, avec la ligne d'alimentation de l'antenne gravé sur ce patch (figure A-6)

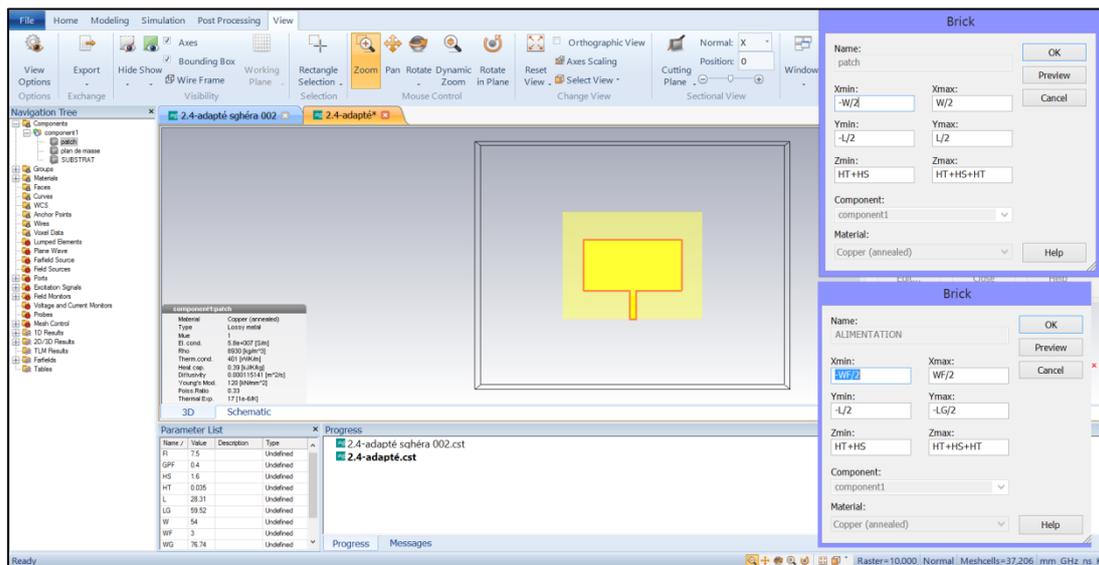


Figure A-6 : La conception du patch et la ligne d'alimentation

Pour simuler notre antenne sur le CST Microwave studio on a inséré le waveguide port (Figure A-7), Les ports de guide d'ondes représentent un type spécial de condition aux limites du

domaine de calcul, permettant la stimulation ainsi que l'absorption d'énergie, ce type de port simule un guide d'onde connecté à la structure.

CST MICROWAVE STUDIO utilise un solveur de mode propre 2D pour calculer les modes de port du guide d'ondes. Cette procédure peut fournir des niveaux de réflexion très bas en dessous de -100 dB dans certains cas.

En général, la définition d'un port de guide d'ondes nécessite de placer tout le domaine rempli de champ dans la section transversale de la ligne de transmission avec la zone du port (figure A-7) [28].

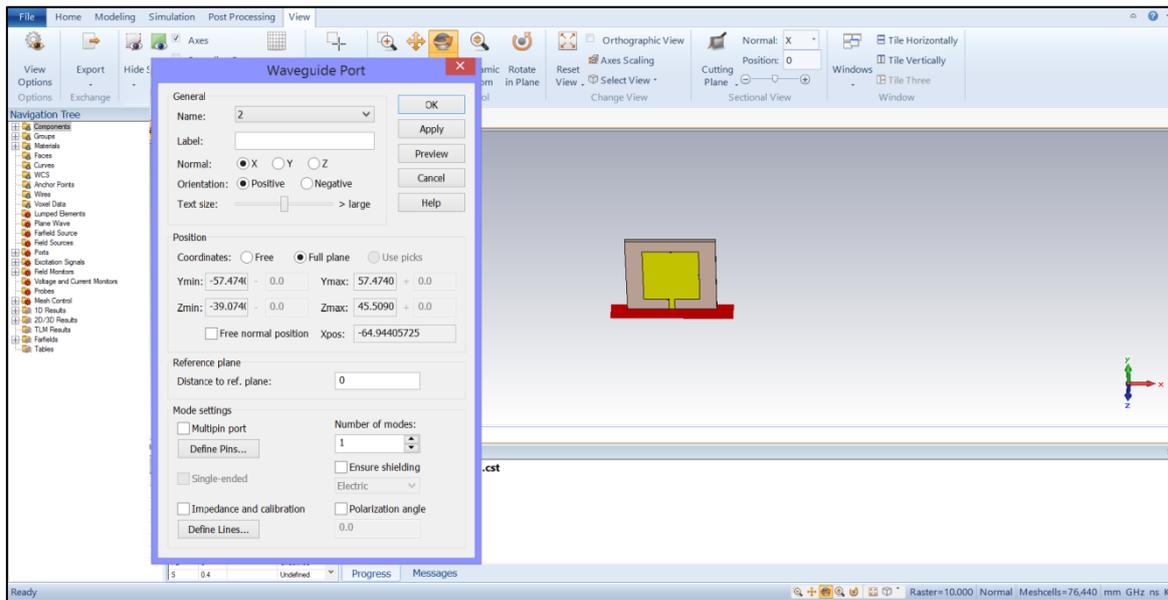


Figure A-7 : Le Waveguide port

### A.2 Optimisation de l'antenne avec le CST Optimizer :

CST microwave Studio donne la possibilité d'optimiser automatiquement les équipements et **systèmes électromagnétiques**. Les modules simulés sur Le CST microwave studio peuvent être paramétrés en fonction de leurs côtes géométriques ou des propriétés des matériaux. Cela permet aux utilisateurs d'étudier le comportement d'un équipement lorsque ses propriétés changent.

Les utilisateurs peuvent identifier les paramètres de conception optimaux afin d'obtenir l'effet souhaité ou d'atteindre l'objectif fixé. Ils peuvent également adapter les propriétés des matériaux selon les données mesurées [29].

Dans notre cas on a utilisé l'optimiser pour le réglage du coefficient de réflexion et la fréquence de résonance.

## ANNEXE A : OUTIL DE SIMULATION

D'abord on a sélectionné les paramètres de notre antenne longueur et largeur du patch (L) et (W)

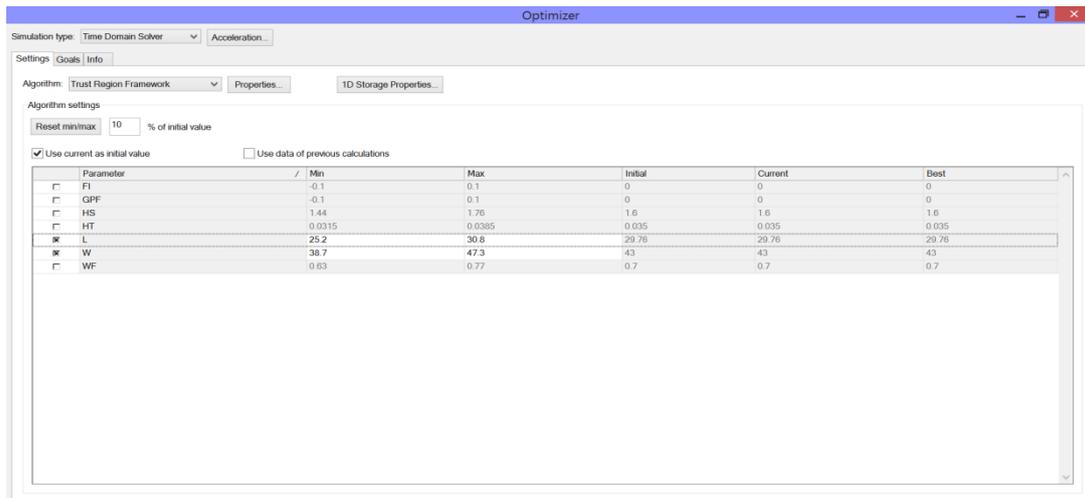


Figure A-8 : La fenêtre du CST Microwave studio optimizer

Puis on a sélectionné le but à atteindre dans « goals » ou on va cliquer sur « add a new goal » trouver plusieurs paramètres comme le coefficient de réflexion, le VSWR et autres paramètres d'adaptation de nôtre antenne

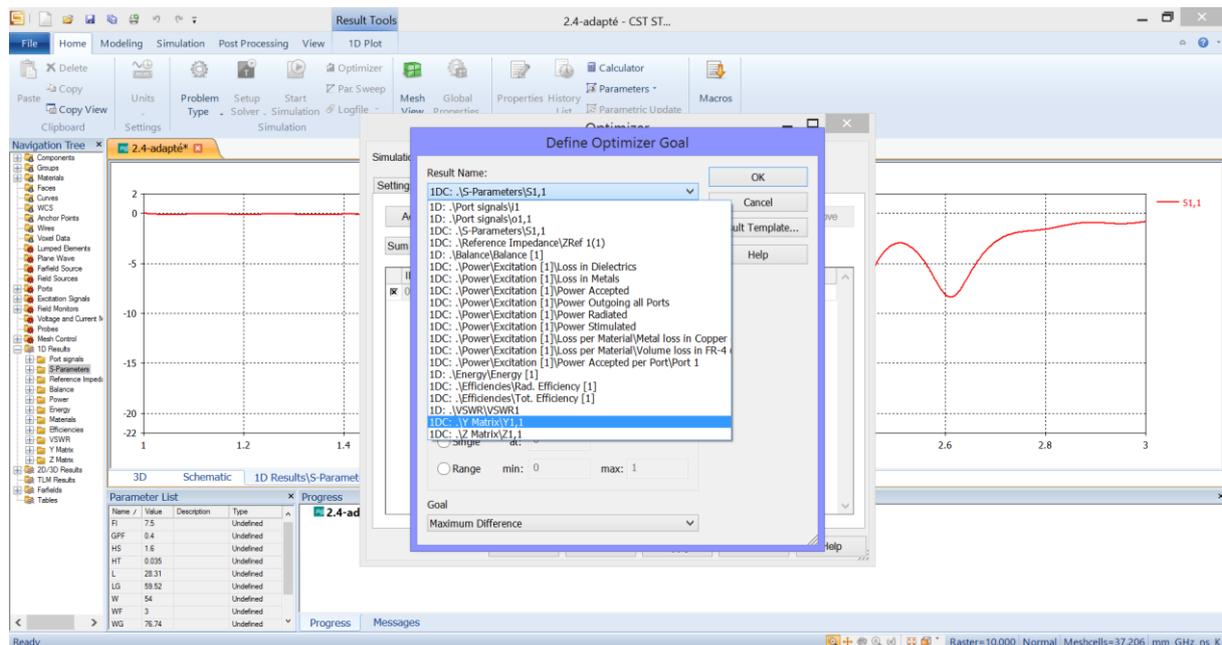


Figure A-9 : la sélection de but sur le CSTmicrowave optimizer

Une fois le but est sélectionné il faut définir les valeurs souhaitées pour chaque paramètres avant de lancer l'optimisation automatique.

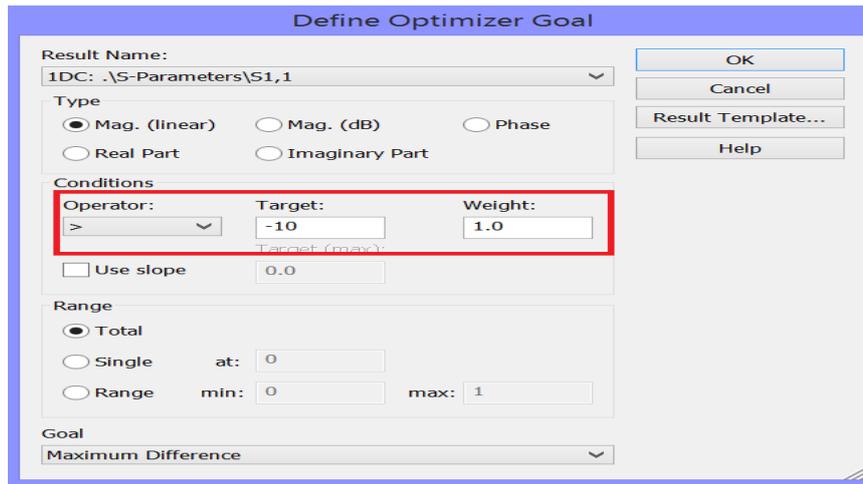


Figure A-10 : Définition des valeurs sur le CST microwave optimizer

Après la sélection des paramètres de l'antenne et la définition des valeurs de ces paramètres, on lance l'optimisation en cliquant sur « start ».

La simulation automatique se lance en donnant des informations sur la fenêtre des informations ou elle va nous indiquer les résultats à chaque simulation, ça peut prendre quelque temps pour arriver aux résultats voulus.

La figure suivante représente les résultats de l'optimisation de notre antenne dans la première partie du travail, on a adapté notre antenne en fonction des deux paramètres L et W.

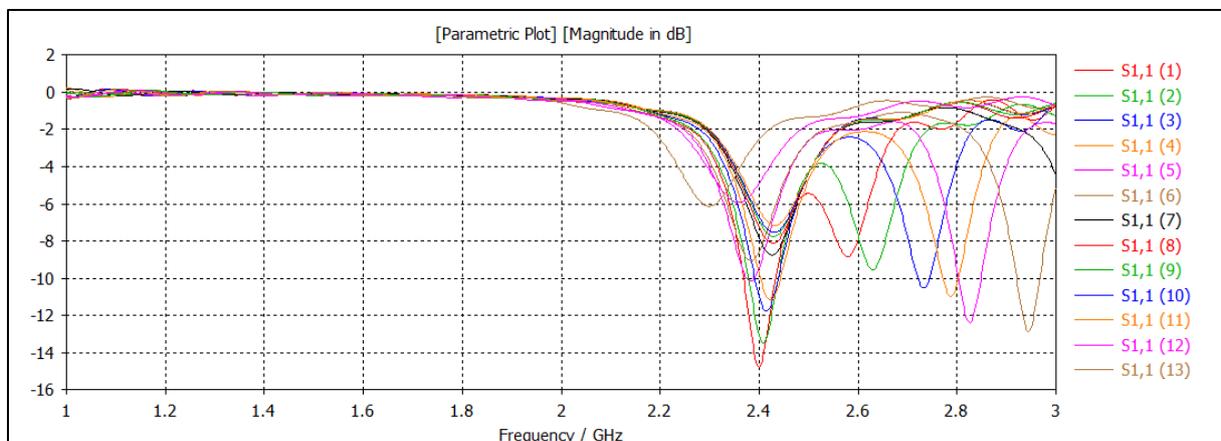


Figure A-11 : Courbes des résultats après l'optimisation.