

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

Département d'Electronique

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Télécommunication

**Spécialité : Systèmes des télécommunications**

Par

➤ **Benmenni Manel**

➤ **Bensaloua Nour Elhouda**

*Intitulé*

***Etude et simulation d'antenne patch micro ruban omnidirectionnelle***

*Soutenu le : 03/07/2023*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<b><i>M. MESSAOUDENE Idris</i></b>	<b><i>MCA</i></b>	<b><i>Président</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>Mme. LAKHLEF Nora</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Encadreur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>M. BELAZOUG Massinissa</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>

## Remerciements

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre ALLAH de  
nos avoir donné la force et le Courage.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement **Dr. Nora Lakhlef**  
notre Encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses  
informations, ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier tous les professeurs du  
département et a tous ce qui furent à un moment ou à toute  
instante partie prenante de ce travail.*

*Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents, pour leurs sacrifices, et qui  
n'ont jamais cessé de m'encourager que ALLAH  
me les garde.*

*Mes très chers frères et ma grand-mère que  
ALLAH me le garde.*

*Toutes mes amies.*

**MANEL BENMENNI**

*Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A mes parents*

*A mes sœurs et mes frères*

*A mes amis*

*A l'entourage familial et amical.*

**BEN SALOUA NOUR EL HOUDA**

## Résumé

Ce travail concerne la simulation et la conception d'une antenne patch omnidirectionnelle. Le volume de l'antenne étudiée est de  $40 \times 40 \times 1,575 \text{ mm}^3$  avec un plan de masse partiel. Rogers RT 5880 est utilisé comme couche de substrat diélectrique. La fréquence de fonctionnement de l'antenne simulée est 2,67 GHz. La simulation est faite sous le simulateur électromagnétique HFSS.

**Mots-clés :** Antenne microbande, Rogers RT, HFSS, Omnidirectionnelle.

## Abstract

This work concerns the simulation and design of an omnidirectional patch antenna. The volume of the antenna studied is  $40 \times 40 \times 1.575 \text{ mm}^3$  with a partial ground plane. Rogers RT 5880 is used as the dielectric substrate. The operating frequency of the simulated antenna is 2.67 GHz. The simulation is realized with the HFSS electromagnetic simulator.

**Keywords:** Microstrip antenna, Rogers RT, HFSS, Omnidirectional.

## ملخص

يتعلق هذا العمل بمحاكاة وتصميم هوائي مطبوع • متساوي الاتجاهات. حجم الهوائي المدروس  $40 \times 40 \times 1.575$  ملم مكعب ذو مستوى أرضي جزئي. استخدم Rogers RT 5880 كطبقة ركيزة (substrat). يتراوح نطاق تشغيل الهوائي المحاكى 2.67 جيجاهرتز جيجاهرتز. تمت المحاكاة باستعمال برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسي HFSS .

**الكلمات المفتاحية:** Rogers RT, HFSS, هوائي المطبوع ثنائي النطاق، اتصال لاسلكي، متساوي الاتجاهات

# Sommaire

Remerciements.....	i
<i>Dédicaces</i> .....	ii
<i>Dédicaces</i> .....	iii
Résumé.....	iv
Abstract .....	iv
ملخص .....	iv
Sommaire.....	v
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	ix
Liste des abréviations .....	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur Les antennes.....	2
I.1 Introduction .....	2
I.2 Définition d'une antenne.....	2
I.3 Rôle d'une antenne.....	2
<b>I.3.1 Mode émission</b> .....	3
<b>I.3.2 Mode réception</b> .....	3
<b>I.3.3 Mode de réciprocité</b> .....	3
I.4 Classification des antennes .....	3
I.5 Types des antennes.....	4
<b>I.5.1 Antenne patch</b> .....	4
<b>I.5.2 Antennes à ouverture</b> .....	4
<b>I.5.3 Antennes filaires</b> .....	5
<b>I.5.4 Antennes à réseau</b> .....	5
<b>I.5.5 Antennes à réflecteur (Parabolique)</b> .....	6
<b>I.5.6 Antennes lentilles</b> .....	7
I.6 Mécanisme de rayonnement.....	7
<b>I.6.1 Antenne à fil unique</b> .....	7
<b>I.6.2 Antenne à deux fils</b> .....	8
I.7 Conception des antennes .....	9
I.8 Applications des antennes .....	10

I.9 Conclusion.....	11
<b>Chapitre II : Antennes Patches .....</b>	<b>12</b>
II.1 Introduction.....	12
II.2 Définition d'une antenne patch.....	12
II.3 Structure de l'antenne patch.....	12
II.4 Différentes formes d'une antenne patch.....	13
II.5 Principe de fonctionnement .....	13
II.6 Techniques d'alimentation.....	15
<b>II.6.1 Ligne micro ruban .....</b>	<b>15</b>
<b>II.6.2 Sonde coaxiale .....</b>	<b>16</b>
<b>II.6.3 Couplage par proximité .....</b>	<b>16</b>
<b>II.6.4 Couplage par ouverture .....</b>	<b>17</b>
II.7 Caractéristiques fondamentales .....	18
<b>II.7.1 Schéma de rayonnement .....</b>	<b>18</b>
<b>II.7.2 Gain d'antenne.....</b>	<b>20</b>
<b>II.7.3 La polarisation .....</b>	<b>20</b>
<b>II.7.4 La largeur de bande (Bandwidth).....</b>	<b>21</b>
<b>II.7.6 Directivité .....</b>	<b>22</b>
<b>II.7.7 Facteur de qualité .....</b>	<b>23</b>
II.8 Techniques d'analyse .....	23
<b>II.8.1 Modèle de la ligne de transmission .....</b>	<b>23</b>
<b>II.8.2 Modèle de la cavité multimode .....</b>	<b>24</b>
<b>II.8.3 Méthode du moment.....</b>	<b>25</b>
<b>II.8.4 Méthode de Différence finie dans le domaine temporel (FDTD) .....</b>	<b>25</b>
<b>II.8.5 Méthode des éléments finis (FEM).....</b>	<b>26</b>
II.9 Utilisation des antennes patch.....	27
II.10 Avantages et inconvénients.....	27
II.11 Conclusion .....	28
<b>Chapitre III : Simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS.....</b>	<b>29</b>
III.1 Introduction .....	29
III.2 Présentation du logiciel de simulation HFSS .....	29
III.3 Structure de l'antenne patch omnidirectionnelle.....	30
III.4 Simulation de l'antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS .....	32
<b>III.4.2 Coefficient de réflexion S11.....</b>	<b>32</b>
<b>III.4.3 Rapport d'onde stationnaire (VSWR).....</b>	<b>33</b>
<b>III.4.4 Impédance d'entrée du patch.....</b>	<b>34</b>
<b>III.4.5 Diagrammes de rayonnement en trois dimensions .....</b>	<b>34</b>

<b>III.4.6 Diagramme de rayonnement en deux dimensions .....</b>	<b>36</b>
<b>III.4.7 Etude paramétrique .....</b>	<b>38</b>
III.4.7.1 Effet d'élément parasite (PL) .....	38
III.4.7.2 Optimisation de l'antenne.....	39
III.5 Conclusion .....	41
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>42</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>43</b>



# Liste des figures

## *Chapitre I : Généralités sur Les antennes*

Figure I.1. Transmission entre deux antennes .....	2
Figure I.2: Quelques configurations des antennes à ouverture.....	4
Figure I.3 : Configuration des antennes filaires .....	5
Figure I.4 : Antenne à réseau .....	5
Figure I.5 : Différents types de montages de la source d'une antenne parabolique.....	6
Figure I.6: Un fil cylindrique à section circulaire .....	8
Figure I.7 : Antenne et les lignes champ électrique .....	9

## *Chapitre II : Antennes Patches*

Figure II.1 : Structure d'une antenne patch.....	13
Figure II.2: Forme des patches.....	13
Figure II.3 : méthodes d'alimentation capacitive .....	15
Figure II.4 : Alimentation de proximité sans contact par le dessous du patch.....	16
Figure II.5 : Alimentation de proximité sans contact à partir du bord du patch.....	17
Figure II.6 : Alimentation par couplage par ouverture.....	17
Figure II.7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.....	18
Figure II.8 : Diagramme de rayonnement typique d'un simple patch carré .....	19
Figure II.9 : formes typiques de diagramme de rayonnement.....	20
Figure II.10 : circuit électrique de l'impédance d'entrée d'une antenne .....	22
Figure II.12: Source de rayonnement représenté par deux fentes équivalentes .....	24
Figure II.13: Circuit équivalent d'un élément de patch en micro ruban .....	24
Figure II.14 : Répartition du champ électrique en mode fondamental d'une antenne patch.....	25

## *Chapitre III : Simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS*

Figure III.1 la structure de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS (vue de dessus)	30
Figure III.2 la structure de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS (élément parasite PL).....	30
Figure III.3 : Géométrie de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS .....	32
Figure III.4 Coefficient de réflexion S11 .....	32
Figure III.5 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR).....	33
Figure III.6 Impédance d'entrée.....	34
Figure III.7 : Gain de l'antenne optimisée .....	35
Figure III.8 Directivité de l'antenne optimisée .....	35
Figure III.9 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=90deg) .....	36
Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne optimisée (Phi=-180deg).....	37
Figure III.11 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=-172, Phi=-96).....	37
Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=0deg, Phi=90deg).....	38
Figure III.13 Effet de l'élément parasite (PL) sur le coefficient de réflexion (S11) .....	39
Figure III.14 Effet de l'élément parasite (pL) sur le rapport d'onde stationnaire (VSWR) .....	39
Figure.III.15 Effet de la longueur (L) et la largeur du patch (W) sur le coefficient de réflexion.....	40
Figure III.16 Coefficient de réflexions correspondant aux meilleures valeurs optimisées .....	40

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : Dimensions d'antenne omnidirectionnel .....	31
---	----

## Liste des abréviations

**HFSS** : High Frequency Structure Simulation

**ROS** : Rapport D'ondes Stationnaires

**S11** : Coefficient De Reflexion

**VSWR**: Voltage Standing Wave Ratio

**Wi-Fi** : Wireless Fidelity

**GPS**: Global positioning system

**VHF**: Very high frequency

**UHF**: Ultra high frequency

**FEM** : Méthode des éléments finis

**EDP**: Electronic data processing

**RF**: Radio Fréquence

**EM** : Onde électromagnétique

**FDTD**: Finit Difference Time Domain

**CST**: Computer Simulation Technology

**FEKO**: Filed Effect Knowledge Organizer

**D** : La Directivité

**( $\theta$ ,  $\varphi$ )** : Angles Des Coordonnées Sphériques

**Pr** : La Puissance Totale Rayonnée

**Pi** : L'impédance D'entrée

**Zant** : L'impédance D'entrée De L'antenne

**$\eta$**  : L'efficacité

**G** : Le Gain

**Q** : Facteur De Qualité

**Rant** : Partie réelle

**Xant** : Partie imaginaire

**LHCP**: Left-hand circular polarized

**RHCP**: Right-hand circular polarized

# Introduction Générale

L'une des premières formes d'antennes patch a été développée par Sir Jagadish Chandra Bose. Leur concept remonte lorsque des chercheurs ont commencé à explorer des structures d'antennes compactes et efficaces.

Cependant, les véritables avancées dans le domaine des antennes patch ont eu lieu au cours du XXe siècle. Dans les années 1950, des chercheurs tels que D.M. Pozar et J.R. Whinnery ont commencé à étudier les propriétés de rayonnement des antennes patch. Ils ont découvert que les antennes patch pouvaient être conçues pour fonctionner à des fréquences micro-ondes et offrir des performances améliorées par rapport aux antennes filaires [1].

Aujourd'hui, les antennes patchs sont largement utilisées dans de nombreux domaines des communications sans fil. Leur conception compacte et leur capacité à être intégrées dans des dispositifs électroniques en font un choix populaire pour les applications telles que les téléphones mobiles, les réseaux sans fil, les systèmes de navigation par satellite et bien d'autres encore.

Dans ce mémoire, notre objectif est d'explorer en détail les antennes patch omnidirectionnelles, tout en mettant en lumière leur évolution historique et leur impact significatif sur les systèmes de communication modernes.

Le premier chapitre traite différents aspects des antennes à savoir la nature de l'antenne et son rôle essentiel dans les systèmes de communication. Et également les différentes classifications et types des antennes. Enfin, nous nous penchons sur les multiples applications des antennes dans différents domaines.

Dans le deuxième chapitre, nous explorons les principaux aspects des antennes patchs. Nous examinons la conception, la structure et les différentes formes d'antennes patch. Nous mentionnons également brièvement les différentes techniques d'analyse utilisées pour étudier les antennes patchs.

Pour le troisième chapitre, notre objectif est d'étudier les principaux paramètres de dimensionnement de l'antenne en fonction des caractéristiques souhaitées. Nous procéderons à une analyse paramétrique en modifiant les dimensions de l'antenne afin d'obtenir les meilleurs résultats et d'optimiser sa structure.

*Chapitre I : Généralités sur  
Les antennes*

# Chapitre I : Généralités sur Les antennes

## I.1 Introduction

Pour les systèmes sans fil, l'antenne est l'un des composants essentiels. Les systèmes sans fil comprennent une grande variété de types différents, tels que les réseaux Wi-Fi, les communications cellulaires, les systèmes de navigation par satellite et les systèmes de transmission radio.

Dans ce chapitre, nous aborderons les antennes en général, y compris les principes du rayonnement, les types d'antennes et leur conception, ainsi que les paramètres clés utilisés pour décrire les performances des antennes.

## I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif électrique utilisé pour transmettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Elle se compose généralement d'éléments métalliques qui sont conçus pour rayonner ou capter ces ondes et les convertir en signaux électriques [2].

Une antenne est essentiellement un transducteur. Elle convertit le signal radiofréquence (RF) en une onde électromagnétique (EM) de la même fréquence. Elle fait partie des circuits de l'émetteur et du récepteur. Son circuit équivalent est caractérisé par la présence d'une résistance, d'une inductance et d'une capacité. Lorsqu'un courant circule, il crée un champ magnétique, tandis qu'une charge génère un champ électrostatique. Ces deux éléments contribuent ensemble à la formation d'un champ d'induction [3].

## I.3 Rôle d'une antenne

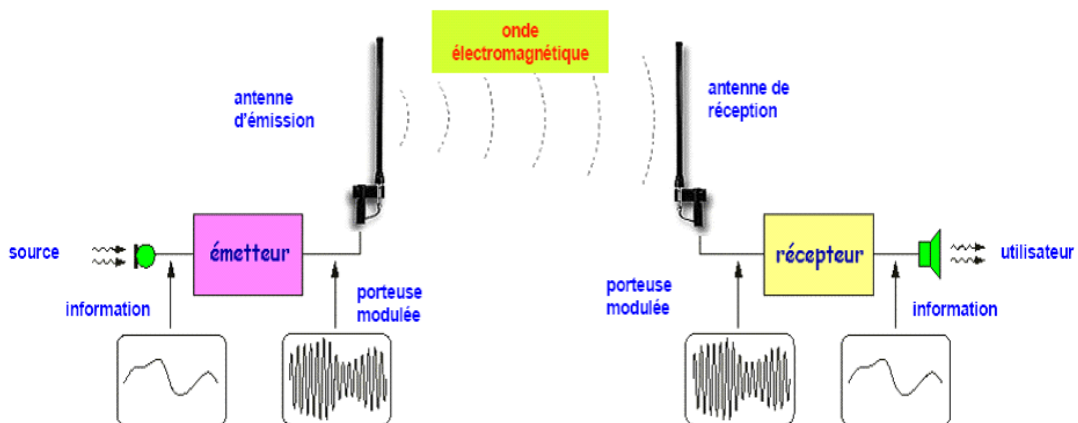


Figure I.1. Transmission entre deux antennes

### I.3.1 Mode émission

En mode émission, l'antenne est utilisée pour émettre des ondes électromagnétiques dans l'air. Lorsqu'un signal est appliqué à l'antenne, il génère un champ électromagnétique qui est transmis dans l'air sous forme d'ondes électromagnétiques. Les ondes émises peuvent être utilisées pour communiquer avec d'autres dispositifs sans fil ou pour transmettre des informations à distance.

### I.3.2 Mode réception

En mode réception, l'antenne est utilisée pour capter les ondes électromagnétiques qui sont présentes dans l'air. Lorsque les ondes électromagnétiques atteignent l'antenne, elles induisent un courant électrique dans le patch, qui est ensuite converti en un signal électrique utilisable par le dispositif récepteur. Les ondes reçues peuvent être utilisées pour communiquer avec d'autres dispositifs sans fil ou pour capter des signaux provenant de sources telles que les émissions radio ou télévisées.

### I.3.3 Mode de réciprocité

En mode de réciprocité, l'antenne peut être utilisée à la fois en émission et en réception. Cela est dû à la propriété fondamentale des ondes électromagnétiques selon laquelle leur comportement est le même, qu'elles soient émises ou reçues. Cela signifie que l'antenne peut être utilisée pour envoyer et recevoir des signaux en utilisant le même dispositif, ce qui est utile dans de nombreuses applications sans fil.

## I.4 Classification des antennes

Une classification des antennes peut être basée sur :

- *Fréquence et taille*

Les antennes utilisées pour les HF sont différentes de celles utilisées pour les VHF, qui sont elles-mêmes différentes des antennes pour les micro-ondes. La longueur d'onde étant différente selon les fréquences, les antennes doivent être de taille différente pour émettre des signaux à la bonne longueur d'onde [4].

- *La directivité*

Les antennes peuvent être omnidirectionnelles, sectorielles ou directives. Les antennes omnidirectionnelles, qui font l'objet de notre attention dans cette mémoire, rayonnent le même motif tout autour de l'antenne, sur 360 degrés. Les antennes omnidirectionnelles les plus

populaires sont le type dipôle et le plan de sol. Le faisceau peut être aussi large que 180 degrés ou aussi étroit que 60 degrés [4].

- **La structure physique**

Les antennes peuvent être construites de différentes manières comme des simples fils, des paraboles [4].

## I.5 Types des antennes

### I.5.1 Antenne patch

Une antenne patch, également appelée antenne à plaque, est une antenne plane qui est souvent utilisée dans les systèmes de communication sans fil. Elle est constituée d'une plaque conductrice qui est généralement imprimée sur un substrat diélectrique. La plaque conductrice est souvent de forme carrée ou rectangulaire, avec une longueur d'onde de l'ordre de la taille de la plaque diélectrique. Lorsqu'elle est alimentée en courant, la plaque conductrice rayonne des ondes électromagnétiques dans l'espace environnant, ce qui permet de transmettre et de recevoir des signaux sans fil [5].

### I.5.2 Antennes à ouverture

Les antennes à ouverture sont des antennes qui émettent des ondes électromagnétiques à travers une ouverture. Ces antennes ont des analogues proches en acoustique, à savoir le mégaphone et le microphone parabolique [6].

Ces antennes sont très utiles pour les applications aéronautiques et spatiales, car elles peuvent être montées de manière pratique sur le revêtement de l'avion ou du vaisseau spatial

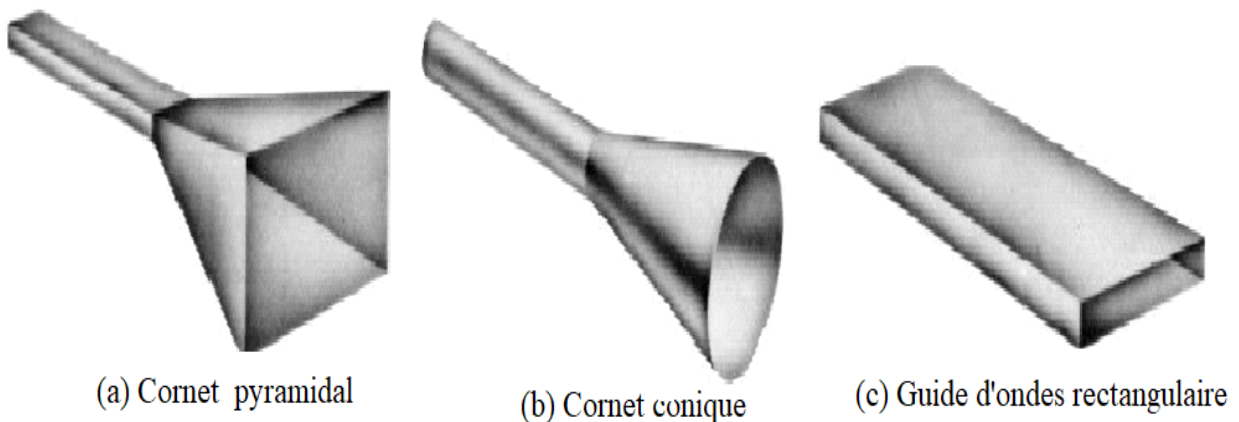


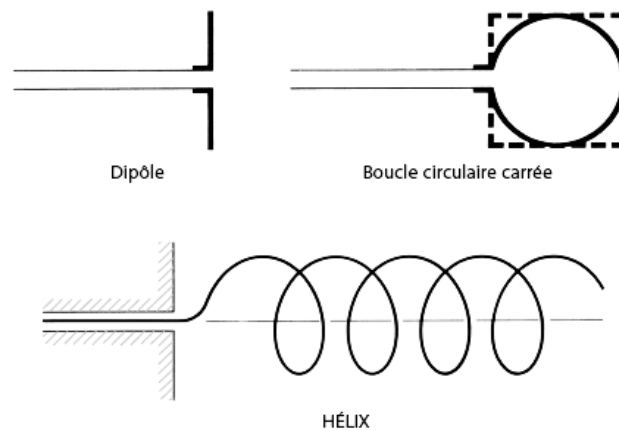
Figure I.2: Quelques configurations des antennes à ouverture



### I.5.3 Antennes filaires

Une antenne filaire est un type d'antenne qui utilise un conducteur métallique linéaire, tel qu'un fil, comme élément rayonnant. Ce fil est généralement suspendu au-dessus du sol ou fixé sur une structure pour assurer une performance optimale. L'antenne filaire est largement utilisée dans de nombreuses applications de communication pour transmettre ou recevoir des signaux électromagnétiques [7].

Il existe différentes formes d'antennes filaires telles que le fil droit (dipôle), la boucle et l'hélice sont illustrées à la figure I.3.



**Figure I.3 : Configuration des antennes filaires**

### I.5.4 Antennes à réseau

Une antenne à réseau est un type d'antenne utilisée en communication sans fil, où plusieurs éléments rayonnants sont disposés en réseau pour former un système d'antennes cohérent. Chaque élément rayonnant permettant de créer des motifs de rayonnement complexes et dirigés. Les antennes à réseau sont couramment utilisées dans les systèmes de communication, tels que les radars, les systèmes de télécommunication et les réseaux sans fil, en raison de leur capacité à former des faisceaux directionnels et à améliorer la directivité et la sensibilité des antennes. La figure I.4 montre un exemple de l'antenne à réseau [8].



**Figure I.4 : Antenne à réseau**

Il existe de nombreux types d'antennes à réseau, mais les types de base sont les suivants :

- Réseau colinéaire
- Réseau large
- Réseau en bout de ligne
- Réseau parasite
- Réseau Yagi-Uda
- Réseau log-périodique
- Réseau en tourniquet
- Réseau de super-tourniquets

### I.5.5 Antennes à réflecteur (Parabolique)

Est une antenne conçue pour réfléchir les signaux électromagnétiques incidents provenant d'une source distincte. Cette antenne est essentiellement destinée à fonctionner à des fréquences micro-ondes hautes. Elle est très populaire dans les systèmes d'antennes des engins spatiaux en raison de sa légèreté et de la simplicité de sa structure. Cette antenne est composée de différents réflecteurs dont la surface est hyperbolique, parabolique, sphéroïde ou ellipsoïde [9].

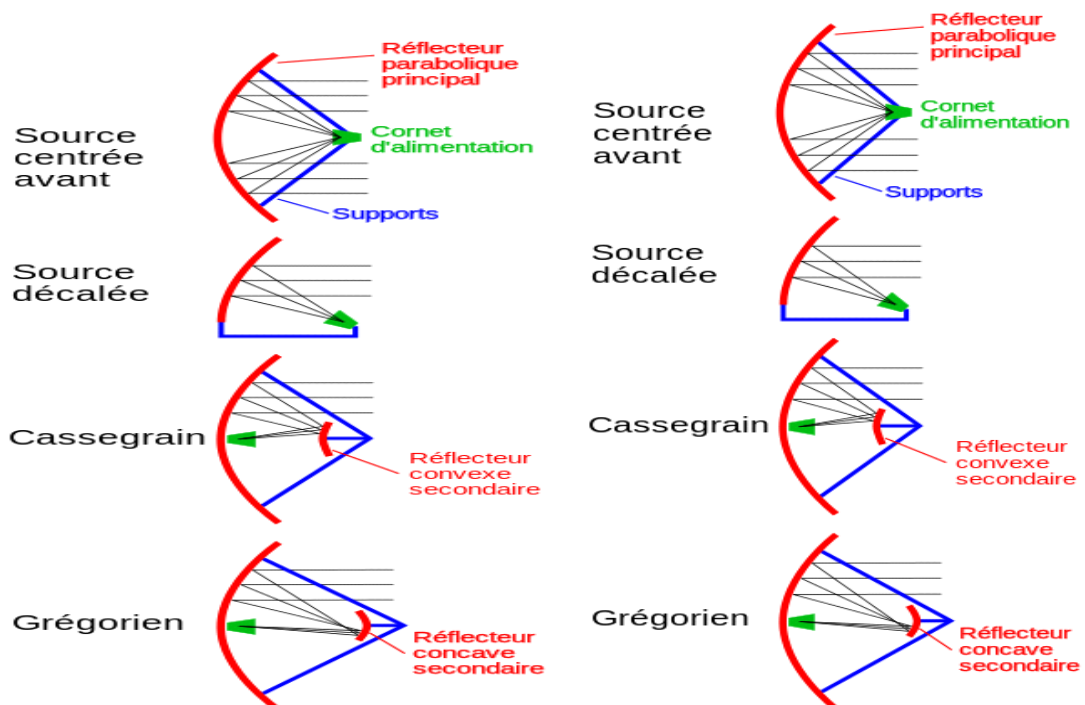


Figure I.5 : Différents types de montages de la source d'une antenne parabolique

### I.5.6 Antennes lentilles

Cette antenne comprend une lentille électromagnétique avec alimentation et elle est similaire à une lentille de verre utilisée dans le domaine optique. Cette antenne utilise une surface courbée pour la transmission et la réception des ondes électromagnétique. Ces antennes sont fabriquées avec du verre, où les propriétés des lentilles convergentes et divergentes sont respectées [10].

Les antennes lentilles sont classées en fonction du matériau avec lequel elles sont construites, ou en fonction de leur forme géométrique [11].

### I.6 Mécanisme de rayonnement

Lorsque des charges électriques subissent une accélération ou une décélération, un rayonnement électromagnétique est produit. C'est donc le mouvement des charges, c'est-à-dire le courant, qui est à l'origine du rayonnement. Il convient ici de souligner que toutes les distributions de courant ne produisent pas un rayonnement suffisamment fort pour la communication [12].

Les antennes émettent de l'énergie électromagnétique dans la direction souhaitée ou assignée. Une antenne peut être isotrope ou non directionnelle (omnidirectionnelle) et non isotrope ou directionnelle.

Le gain élevé et la directivité sont les exigences de base pour les antennes de transmission.

En parallèle, des lobes secondaires faibles et un rapport signal/bruit élevé sont des critères de sélection essentiels pour les antennes de réception. La taille des antennes peut varier de quelques millimètres (antennes en bande) à des milliers de pieds (antennes paraboliques pour les observations astronomiques) [12].

#### I.6.1 Antenne à fil unique

Une antenne à fil unique, également appelée monopôle, fonctionne sur la base du principe de charges électriques oscillantes. Lorsqu'un courant alternatif traverse le fil, cela crée un champ électrique variant dans le temps le long de la longueur du fil. Ce champ électrique se propage à partir du fil et forme des ondes électromagnétiques.

Lorsque le courant alternatif change de direction, les charges électriques sur le fil accélèrent d'avant en arrière. Cette accélération génère un champ électrique variant dans le temps qui rayonne de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Le champ électrique

changeant produit un champ magnétique perpendiculaire à celui-ci, et ensemble, ils forment une onde électromagnétique qui se propage à travers l'espace.

La longueur du fil joue un rôle clé dans la détermination de la bande de fréquences pour laquelle l'antenne est optimisée. Pour un rayonnement efficace, la longueur du fil doit être une fraction de la longueur d'onde de la fréquence souhaitée. Le fil agit comme une structure résonante, ce qui lui permet de rayonner efficacement de l'énergie électromagnétique à des fréquences spécifiques.

Pour améliorer l'efficacité de rayonnement d'une antenne monopôle, un plan de masse est souvent utilisé. Le plan de masse agit comme une surface réfléchissante positionnée sous l'antenne à fil. Il fournit une image ou un miroir pour le champ électrique généré par le fil, ce qui double effectivement la longueur effective de l'antenne. Cette technique améliore le diagramme de rayonnement et les performances de l'antenne [13].

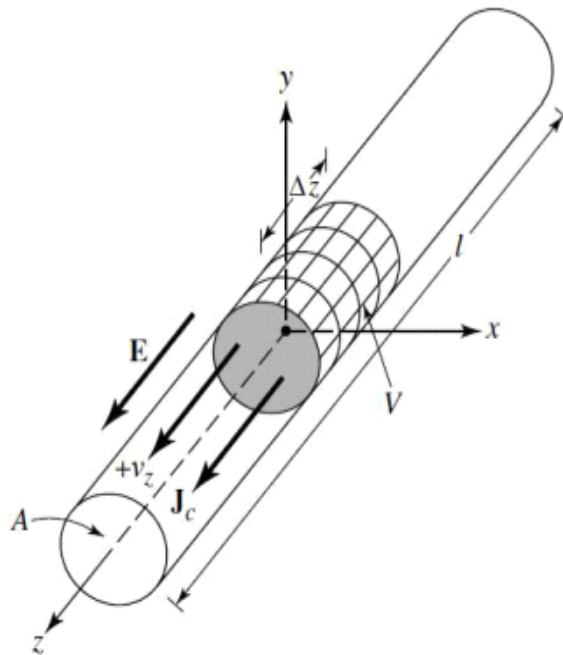


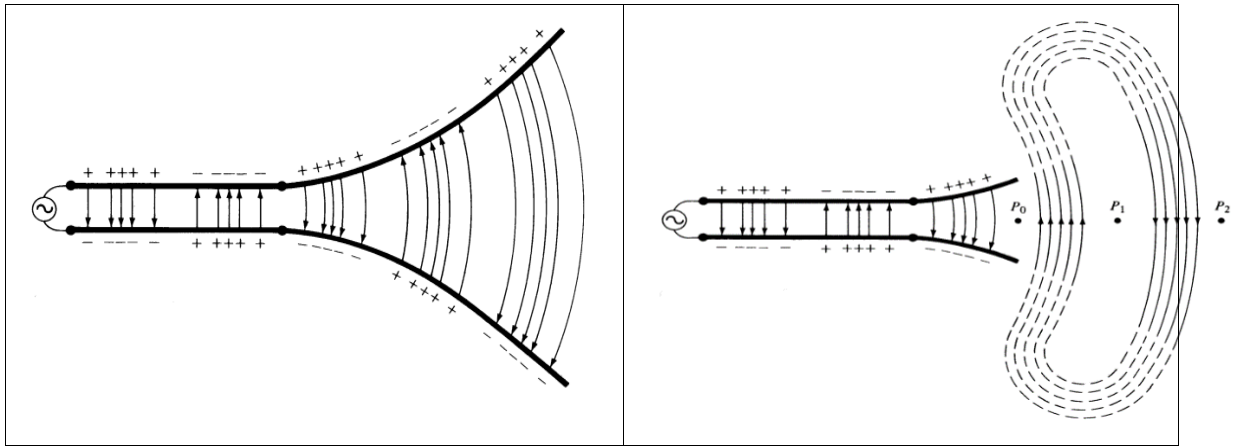
Figure I.6: Un fil cylindrique à section circulaire

### I.6.2 Antenne à deux fils

Le mécanisme de rayonnement pour une antenne à deux fils est un processus par lequel les fils de l'antenne émettent des ondes électromagnétiques dans l'espace. Lorsqu'un courant électrique circule à travers les fils de l'antenne, des champs électriques et magnétiques sont créés autour d'eux. Ces champs se propagent ensuite sous forme d'ondes électromagnétiques, générant ainsi un rayonnement [14].

Le rayonnement se produit en raison de l'interaction entre le courant électrique dans les fils et l'environnement électromagnétique qui les entoure. Les fils de l'antenne agissent comme des conducteurs pour permettre la propagation des ondes électromagnétiques dans l'air.

La direction et le modèle de rayonnement dépendent de plusieurs facteurs, tels que la longueur des fils, leur arrangement spatial, la fréquence du signal, et les propriétés électriques et magnétiques du milieu environnant. Ces caractéristiques influencent la forme et la direction du diagramme de rayonnement de l'antenne à deux fils [15].



**Figure I.7 : Antenne et les lignes champ électrique**

Les ondes électromagnétiques pénètrent dans l'antenne qui crée les charges électriques associées et les courants correspondants. En raison de la discontinuité de la structure, des ondes d'espace libre se forment, comme le montre la figure I.7.

## I.7 Conception des antennes

La conception d'une antenne est le processus de sélection et d'optimisation des caractéristiques physiques d'une antenne pour répondre à des exigences de performance spécifiques. Cela implique une série d'activités, depuis la sélection du type d'antenne et des dimensions appropriées jusqu'à la détermination de la structure d'alimentation et du réseau d'adaptation optimaux [16].

La conception d'une antenne implique généralement une combinaison de techniques de modélisation analytiques et numériques, ainsi que des mesures expérimentales. Le processus de conception nécessite une compréhension approfondie des principes électromagnétiques qui sous-tendent le fonctionnement de l'antenne, ainsi qu'une compréhension des exigences et des contraintes spécifiques de l'application [5].

Le but ultime de la conception d'une antenne est d'obtenir le diagramme de rayonnement, l'impédance, la largeur de bande et l'efficacité souhaités, tout en minimisant la taille, le poids et le coût. Avec la demande croissante de communication sans fil, la conception d'antennes est devenue un domaine important et en développement rapide, avec de nouveaux types d'antennes et de nouvelles techniques de conception émergeant en permanence . [17].

## I.8 Applications des antennes

Les antennes ont une large gamme d'applications dans la société moderne. Elles sont des composants essentiels des systèmes de communication, permettant la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques sur de longues distances. Certaines des applications les plus courantes des antennes sont : [18]

- Communication sans fil : Les antennes sont utilisées dans toutes les formes de communication sans fil, y compris la radio, la télévision, les téléphones cellulaires et le Wi-Fi. Dans ces applications, l'antenne est utilisée pour transmettre et recevoir des signaux entre l'émetteur et le récepteur.
- Radar : Les systèmes radar utilisent des antennes pour transmettre et recevoir des ondes électromagnétiques à haute fréquence. Ces ondes rebondissent sur les objets et reviennent vers l'antenne radar, ce qui permet au système de déterminer l'emplacement et la vitesse de l'objet.
- Télédétection : Les antennes sont utilisées dans les applications de la télédétection, telles que les prévisions météorologiques et l'observation de la terre. Dans ces applications, l'antenne est utilisée pour recevoir des signaux provenant de satellites et d'autres plates-formes de télédétection.
- Radioastronomie : Les antennes sont utilisées en radioastronomie pour détecter et étudier les ondes radio émises par les objets célestes. Les radiotélescopes utilisent de grandes antennes pour collecter et concentrer les ondes radio provenant de sources éloignées, ce qui permet aux astronomes d'étudier l'univers de manière nouvelle et passionnante.
- Imagerie médicale : Les antennes sont utilisées dans les applications d'imagerie médicale, telles que l'imagerie par résonance magnétique et la tomographie par émission de positons.
- Militaire : Les antennes ont un large éventail d'applications dans le domaine militaire, notamment la communication, le radar et la surveillance. Dans ces applications, les antennes sont généralement utilisées pour transmettre et recevoir des signaux à des

fins diverses, le suivi des avions et des missiles ennemis et la surveillance des activités de l'ennemi.

- Automobile : Les antennes sont utilisées dans les applications automobiles pour la navigation GPS et la radio satellite [18]

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux des antennes, y compris les configurations, les types d'antennes et les paramètres de performance clés. En conclusion, les antennes jouent un rôle essentiel dans la société moderne, en permettant la communication, la navigation et la recherche scientifique.

*Chapitre II*  
*Antennes PATCH*



# Chapitre II : Antennes Patches

## II.1 Introduction

Les antennes patch sont un type d'antennes micro ruban qui sont devenues de plus en plus populaires. Elles sont relativement simples à concevoir et à fabriquer et offrent un certain nombre d'avantages par rapport à d'autres types d'antennes.

Dans ce chapitre, nous allons étudier plus en détail la conception et le fonctionnement des antennes patch. Nous examinerons les différents types d'antennes patch, leurs caractéristiques de performance et les facteurs qui affectent leur performance.

## II.2 Définition d'une antenne patch

Une antenne patch, également appelée antenne imprimée, est une antenne plane qui est souvent utilisée dans les systèmes de communication sans fil. Elle est constituée d'une plaque conductrice qui est généralement fixée à une plaque diélectrique [1] Pour simplifier, c'est une antenne formée par la gravure d'une plaque de matériau conducteur sur une surface diélectrique est connue sous le nom d'antenne patch. Le matériau diélectrique est monté sur un plan de masse, où le plan de masse supporte l'ensemble de la structure. L'excitation de l'antenne est également assurée par des lignes d'alimentation connectées à travers l'antenne [11] [19].

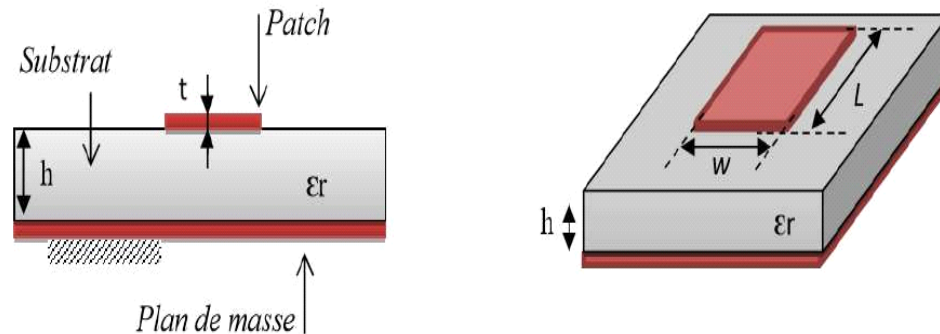
## II.3 Structure de l'antenne patch

Une antenne imprimée est constituée d'un fin conducteur métallique appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour constituer un plan de masse.

Les antennes patch ont une géométrie en 3D. Ces antennes se présentent sous différentes formes, dont la forme est définie par celle du patch métallique placé sur le matériau diélectrique. Les patches peuvent être rectangulaires, carrés, circulaires, triangulaires, annulaires ou elliptiques [11] [19].

Quand nous avons une antenne patch rectangulaire, qui est formée par la fabrication d'un patch métallique rectangulaire sur un plan de masse à revêtement diélectrique. En termes simples, on peut dire qu'un matériau diélectrique comportant un patch conducteur est soutenu

par un plan de masse [11] [19]. La figure II.1 représenté la vue de dessus de l'antenne micro ruban :

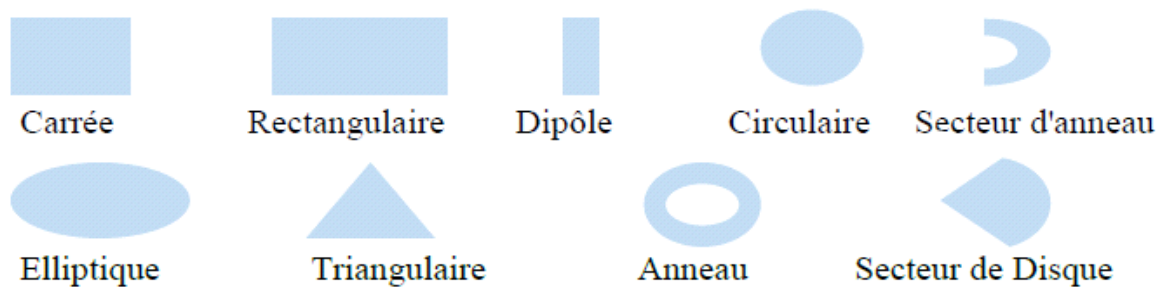


**Figure II.1 : Structure d'une antenne patch**

$L$  : Longueur du patch       $t$  : épaisseur du patch.  
 $W$  : Largeur du patch.       $h$  : épaisseur du substrat.

#### II.4 Différentes formes d'une antenne patch

Il existe une variété de conceptions pour les antennes patches, chacune ayant été développée pour répondre à des besoins spécifiques. Certains des types les plus courants sont illustrés à la figure (II.2). Pour les fréquences d'ondes millimétriques, les types les plus courants sont les patches rectangulaires, carrés et circulaires, rectangulaires, carrés et circulaires.



**Figure II.2: Forme des patches**

#### II.5 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une antenne patch repose sur la conversion d'un signal électrique en une onde électromagnétique et vice versa.

Lorsque le signal est appliqué à l'antenne patch, un courant électrique se propage à travers le patch. Ce courant génère un champ électromagnétique qui rayonne dans l'environnement, en émettant ainsi des ondes électromagnétiques. Le patch agit donc comme un émetteur d'ondes [11]. [20]

L'antenne patch est constituée d'un conducteur métallique appelé patch, qui agit comme un élément rayonnant. Lorsqu'un signal électrique est appliqué au patch, un courant électrique circule à sa surface, créant un champ électromagnétique. Ce champ électromagnétique rayonné permet la transmission et la réception des ondes radio. Le patch est généralement placé sur un substrat diélectrique, qui isole le patch du plan de masse sous-jacent. Ce substrat diélectrique joue un rôle important en permettant un rayonnement efficace des ondes [17].

L'alimentation de l'antenne patch se fait généralement par le biais d'un point d'alimentation situé à proximité du bord du patch. Ce point est connecté à une source de signal, telle qu'un générateur ou un récepteur, qui fournit ou récupère le signal électrique à travers l'antenne. L'emplacement et la conception de ce point d'alimentation sont cruciaux pour obtenir une bonne performance de l'antenne en termes de directivité, de bande passante et d'impédance [17].

La relation entre le patch, le substrat et le plan de masse, ainsi que les dimensions et la forme du patch, influencent les caractéristiques de rayonnement de l'antenne patch. Ces caractéristiques comprennent la directivité, qui indique la concentration du rayonnement dans une direction particulière, la polarisation, qui peut être linéaire ou circulaire, et la bande passante, qui détermine la plage de fréquences sur laquelle l'antenne peut fonctionner efficacement [21].

En conclusion, les antennes patch offrent une conception compacte, légère et efficace pour la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques. Leur principe de fonctionnement repose sur la conversion du signal électrique en une onde électromagnétique et vice versa, en exploitant les propriétés du patch métallique, du substrat diélectrique et du plan de masse [21].

Le champ électromagnétique rayonné par l'antenne patch est généré par les bords séparés par la longueur du patch  $L$ , qui sont en opposition de phase et se couvrent de manière constructive pour produire un rayonnement optimisé dans le plan  $YZ$ . Ces bords sont communément appelés bords rayonnants, car ils contribuent significativement à la génération du champ électromagnétique rayonné [22] [23].

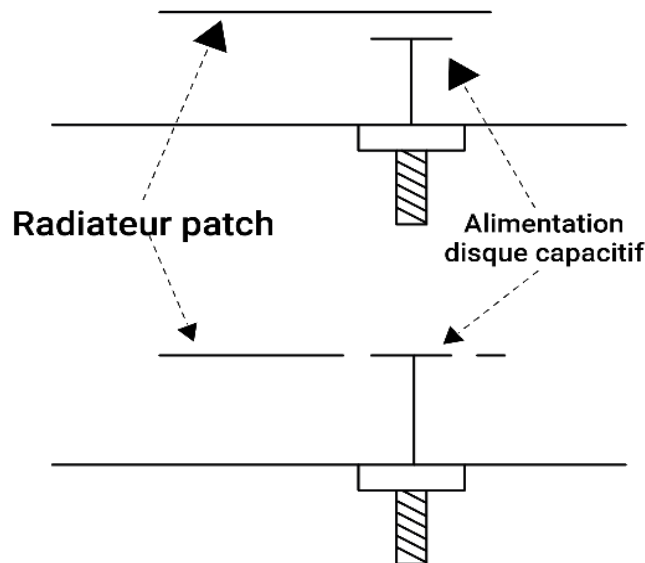
## II.6 Techniques d'alimentation

Il existe de nombreuses méthodes pour alimenter une antenne patch. Parmi les approches couramment utilisées, on peut citer les méthodes suivantes :

1. Ligne micro ruban.
2. Sonde coaxiale (alimentation coplanaire).
3. Couplage de proximité.
4. Couplage d'ouverture.

### II.6.1 Ligne micro ruban

Un patch micro ruban peut être connecté directement à une ligne de transmission micro ruban. Au bord d'un patch, l'impédance est généralement beaucoup plus élevée que celle d'une ligne de transmission micro ruban 0 ohms (par exemple, 200 ohms). Pour éviter la discordance d'impédance, des sections de transformateurs d'impédance d'un quart de longueur d'onde peuvent être utilisées pour transformer une grande impédance d'entrée en une ligne de 50 ohms [24].



**Figure II.3 : méthodes d'alimentation capacitive**

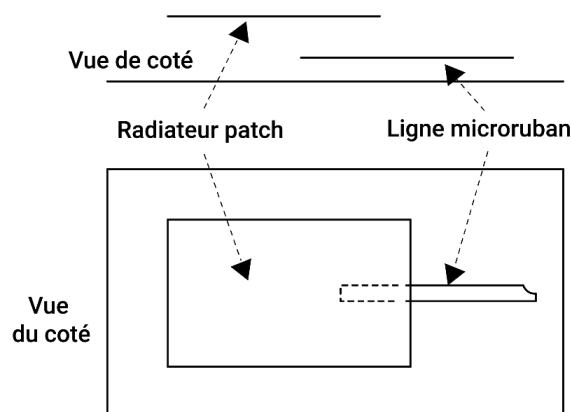
Pour cette approche d'alimentation, un réseau d'éléments patch et leurs lignes de division de puissance micro ruban peuvent tous être conçus et gravés chimiquement sur le même substrat, avec un coût de fabrication par élément relativement. Cependant, le rayonnement de fuite des lignes de transmission peut, dans certains cas, être suffisamment important pour augmenter le niveau des lobes secondaires ou de la polarisation croisée du réseau [25].

### II.6.2 Sonde coaxiale

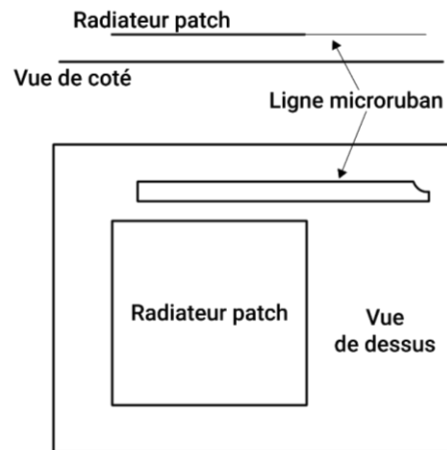
Un patch micro ruban peut être alimenté par une sonde coaxiale d'impédance comprise généralement entre 40 et 60 ohms, positionnée derrière le plan de masse. La broche du conducteur central traverse le substrat et le patch, puis est soudée au sommet du plan de masse est ensuite soudée à la partie supérieure du patch. L'emplacement de la sonde doit se situer à un point de 50 ohms de l'écusson pour obtenir une impédance suffisante du patch pour obtenir une adaptation d'impédance. Il existe différents types de sondes coaxiales pour différentes gammes de fréquences. Les sondes de type N, TNC ou BNC peuvent être utilisées pour les fréquences VHF, UHF ou micro-ondes basses micro-ondes [20].

### II.6.3 Couplage par proximité

Une ligne micro ruban à extrémité ouverte peut être utilisée pour alimenter une antenne patch par couplage de proximité. Par exemple, l'extrémité ouverte d'une ligne de 100 ohms peut être placée sous le patch à son emplacement de 100 ohms, comme la montre la figure II.4. La ligne micro ruban à extrémité ouverte peut également être placée en parallèle et très près du bord d'un patch, comme la montre la figure II.6.c, afin d'obtenir une excitation par champ de frange pour obtenir une excitation par couplage de champ frange. Ces deux méthodes permettent d'éviter toute soudure, ce qui, dans certains cas, pourrait améliorer la fiabilité mécanique [26]



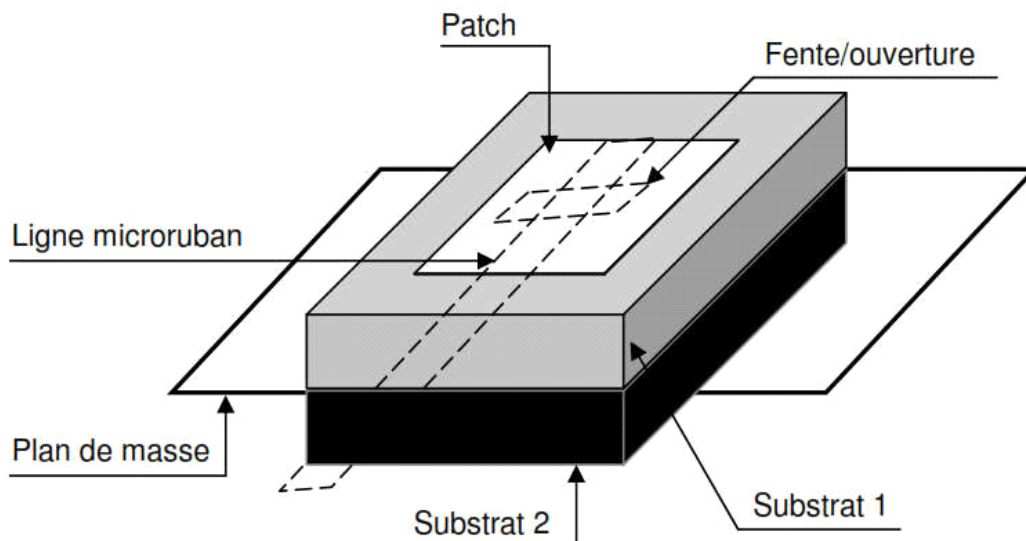
**Figure II.4 : Alimentation de proximité sans contact par le dessous du patch**



**Figure II.5 : Alimentation de proximité sans contact à partir du bord du patch**

#### II.6.4 Couplage par ouverture

Une ligne de transmission micro ruban ou strip-line ouverte peut être placée d'un côté du plan de masse pour exciter un patch situé de l'autre côté à travers une fente d'ouverture dans le plan de masse. Cette technique peut être utilisée pour éviter une connexion par soudure, ainsi que pour éviter le rayonnement de fuite des lignes qui interfère avec le rayonnement du patch [27].



**Figure II.6 : Alimentation par couplage par ouverture**

Cette méthode d'alimentation permet au patch d'atteindre une large bande passante (>10%) avec un substrat épais ou une bande passante extrêmement large (>30%) avec des patchs parasites empilés. La largeur de bande supplémentaire obtenue par cette méthode par rapport à l'alimentation par sonde coaxiale est générée par la fente de couplage, qui est

également un résonateur et un radiateur. Lorsque la fente et le patch ont des tailles légèrement différentes, on obtient une bande passante plus large. Un autre avantage des alimentations sans contact est la réduction de la consommation d'énergie [14].

## II.7 Caractéristiques fondamentales

### II.7.1 Schéma de rayonnement

Le rayonnement des champs distants de l'antenne patch ne génère pas directement un diagramme de rayonnement dans la zone étendue. Les champs externes sont des champs électromagnétiques qui se déplacent hors des limites de l'antenne patch, mais ils ne contribuent pas directement au diagramme de rayonnement dans la zone éloignée. Le diagramme de rayonnement d'une antenne patch montre la distribution de la puissance rayonnée dans différentes directions sans spécifier de direction préférentielle. Il montre simplement comment l'antenne rayonne dans toutes les directions disponibles. On considère que l'antenne présente une certaine directivité :

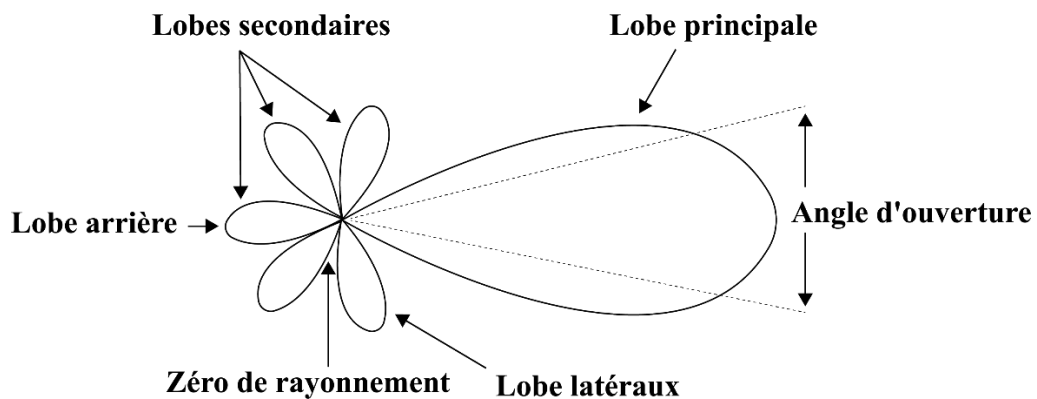
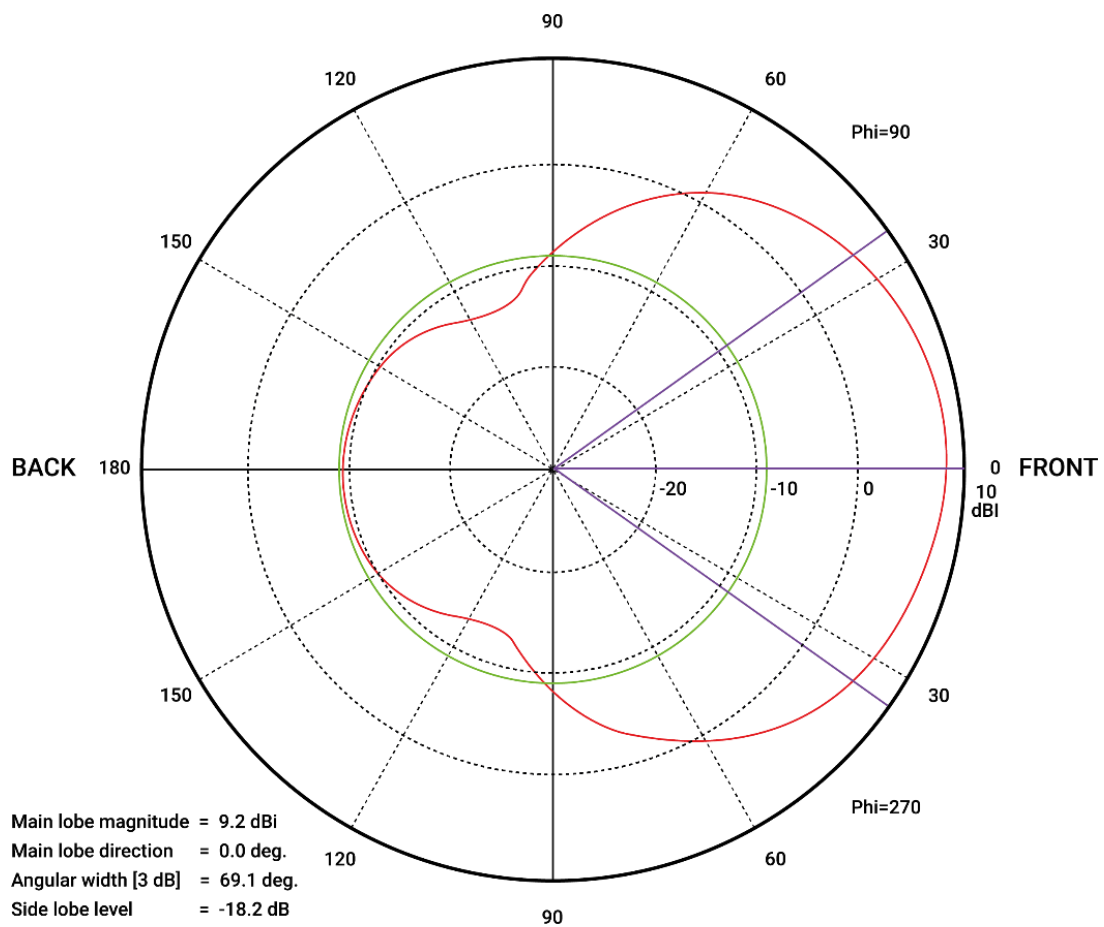


Figure II.7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive

Une estimation de la directivité attendue d'un patch peut être facilement dérivée. Les champs frangeants sur les bords rayonnants peuvent être considérés comme deux fentes rayonnantes placées au-dessus d'un plan de masse. En supposant que tout le rayonnement se produit dans la moitié de l'hémisphère, on peut obtenir une estimation de la directivité. Cependant, il est important de noter que l'ajout de fentes à une antenne patch peut améliorer ses performances, mais l'augmentation de 3 dB supplémentaires en raison de la présence de deux fentes n'est pas applicable universellement [14]. L'impact sur le gain peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la conception spécifique des fentes, leurs dimensions et la configuration globale de l'antenne patch. Par conséquent, il est nécessaire de

prendre en compte ces facteurs et de mener des analyses et simulations approfondies pour déterminer l'amélioration réelle du gain obtenue en incorporant des fentes dans la conception d'une antenne patch.

La directivité maximale du patch rectangulaire excité en mode fondamental se situe dans la direction perpendiculaire au patch (côté large), selon [28]. La directivité diminue lorsque l'on s'éloigne du côté large vers des élévations plus faibles. La largeur de faisceau de 3 dB (ou largeur angulaire) est le double de l'angle par rapport à l'angle de la directivité maximale, lorsque cette directivité a diminué de 3 dB par rapport à la directivité maximale. Vous trouverez ci-dessous un exemple de diagramme de rayonnement.

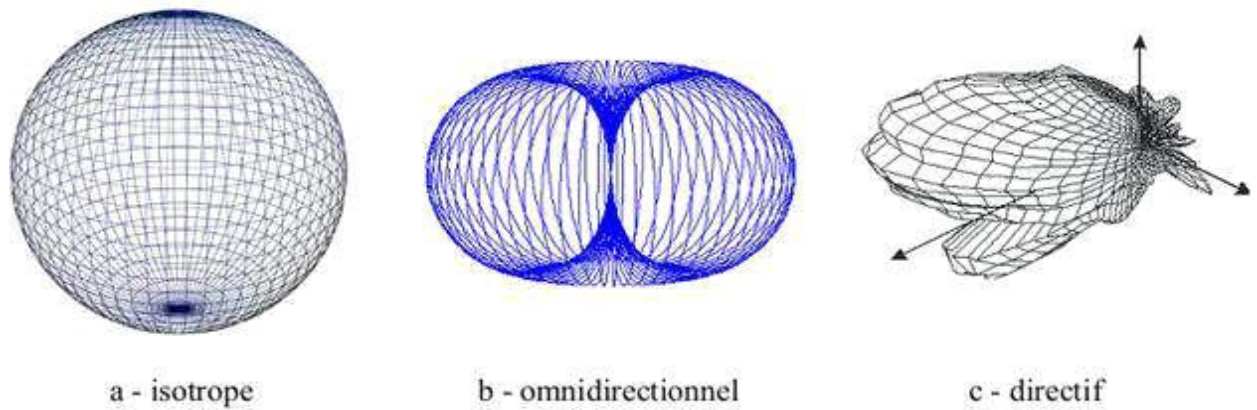


**Figure II.8 : Diagramme de rayonnement typique d'un simple patch carré**

La directivité a été définie par rapport à une source isotrope et est donc exprimée en dBi. Une source isotrope rayonne une quantité égale de puissance dans toutes les directions. Très souvent, la directivité de l'antenne est spécifiée par rapport à la directivité d'un dipôle. La directivité d'un dipôle est de 2,15 dBi par rapport à une source isotrope [29].

Il y a trois formes de diagramme de rayonnement : isotrope, omnidirectionnel et directif.





**Figure II.9 : formes typiques de diagramme de rayonnement.**

### II.7.2 Gain d'antenne

Le gain d'antenne est défini comme la directivité de l'antenne multipliée par un facteur représentant l'efficacité du rayonnement. Cette efficacité est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée ( $P_r$ ) et la puissance d'entrée ( $P_i$ ). La puissance d'entrée est transformée en puissance rayonnée et en puissance d'onde de surface, tandis qu'une petite partie est dissipée en raison des pertes de conducteur et de diélectrique des matériaux utilisés. Les ondes de surface sont des ondes guidées capturées dans le substrat et partiellement rayonnées et réfléchies sur les bords du substrat. Les ondes de surface sont plus facilement excitées lorsque des matériaux ayant une constante diélectrique plus élevée et/ou des matériaux plus épais sont utilisés. Les ondes de surface ne sont pas excitées lorsque le diélectrique de l'air est utilisé. [28].

Le gain de l'antenne peut également être spécifié en utilisant l'efficacité totale au lieu de l'efficacité de rayonnement uniquement. Cette efficacité totale est une combinaison de l'efficacité de rayonnement et de l'efficacité liée à l'adaptation d'impédance de l'antenne.

### II.7.3 La polarisation

Le plan dans lequel le champ électrique varie est également appelé plan de polarisation. Le patch de base peut avoir une polarisation linéaire ou circulaire, en fonction de sa conception et de son alimentation. La polarisation linéaire signifie que le champ électrique varie dans une seule direction, et la polarisation circulaire implique une rotation du champ électrique. Une antenne d'émission a besoin d'une antenne de réception ayant la même polarisation pour fonctionner de manière optimale [30]. Le patch de base donne une polarisation horizontale lorsque l'antenne est tournée de  $90^\circ$ , le courant circule dans le plan vertical et est alors polarisé verticalement.

Un grand nombre d'applications, y compris la communication par satellite, ont des problèmes avec la polarisation linéaire parce que l'orientation des antennes est variable ou inconnue. Heureusement, il existe un autre type de polarisation : la polarisation circulaire. Dans une antenne à polarisation circulaire, le champ électrique varie dans deux plans orthogonaux (direction  $x$  et  $y$ ) avec la même amplitude et une différence de phase de  $90^\circ$ . Il en résulte l'excitation simultanée de deux modes, à savoir le mode  $TM_{10}$  (Mode dans la direction  $x$ ) et le  $TM_{01}$  (mode dans la direction  $y$ ) [31]. L'un des modes est excité avec un retard de phase de  $90^\circ$  par rapport à l'autre mode. Une antenne à polarisation circulaire peut être soit à polarisation circulaire droite (RHCP), soit à polarisation circulaire gauche (LHCP). L'antenne est RHCP lorsque les phases sont de  $0^\circ$  et  $90^\circ$  pour l'antenne de la figure ci-dessous lorsqu'elle rayonne vers le lecteur, et elle est LHCP lorsque les phases sont de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . [22]

On voit ce qu'il faut faire pour obtenir une polarisation circulaire :

- Sélectionnez deux signaux de même amplitude en divisant le signal initial.
- Envoyez un signal à un radiateur horizontal et l'autre à un radiateur vertical (dans ce cas, chaque radiateur est une paire de bords rayonnants de l'antenne patch, comme indiqué dans la figure ci-dessous).
- Modifiez la phase de l'un des signaux de  $90^\circ$ .

Nous pouvons diviser le signal en deux à l'aide d'un diviseur de puissance de Wilkinson ou d'un diviseur similaire. Si une plaque carrée est alimentée par deux points d'alimentation comme indiqué dans la figure ci-dessous, un radiateur vertical et un radiateur horizontal sont créés simultanément. En créant un retard de  $90^\circ$  dans l'une des lignes de signal et en connectant chaque signal à une broche d'alimentation du patch, une antenne à polarisation circulaire est créée [22].

#### II.7.4 La largeur de bande (Bandwidth)

La largeur de bande d'une antenne patch fait référence à la plage de fréquences sur laquelle l'antenne peut fonctionner efficacement. Elle représente la gamme de fréquences dans laquelle l'antenne peut transmettre et recevoir des signaux avec une performance optimale. Une largeur de bande plus large permet à l'antenne de couvrir un spectre plus large de fréquences, ce qui est essentiel pour une communication fiable et polyvalente. Dans cette introduction, nous explorons les facteurs qui influencent la largeur de bande d'une antenne patch, ainsi que les méthodes utilisées pour l'améliorer et l'optimiser dans le cadre de diverses applications de communication.

- *Largeur de bande d'efficacité*

Il s'agit de la plage de fréquences dans laquelle l'antenne présente une efficacité raisonnable (en fonction de l'application) en termes de rayonnement/total.

- *Largeur de bande de polarisation*

Il s'agit de la plage de fréquences dans laquelle l'antenne conserve sa polarisation.

- *Largeur de bande du rapport axial*

Cette largeur de bande est liée à la largeur de bande de polarisation et ce nombre exprime la qualité de la polarisation circulaire d'une antenne [32].

### II.7.5 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne, notée  $Z_{ant}$ , est exprimée sous forme d'une somme de deux termes, la partie réelle  $R_{ant}$  et la partie imaginaire  $X_{ant}$ , selon l'équation suivante [24].

$$Z_{ant} = X_{ant} + j R_{ant} \quad (II.1)$$

Avec :

$$R_{ant} = R_{pertes} + R_{ray} \quad (II.2)$$

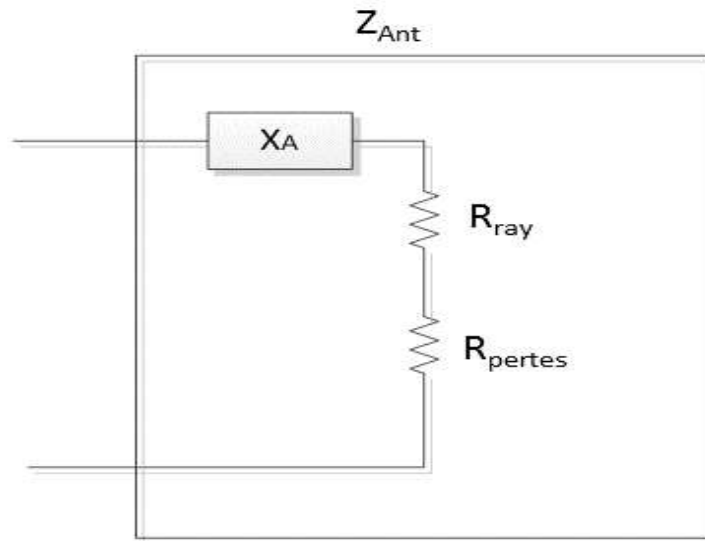


Figure II.10 : circuit électrique de l'impédance d'entrée d'une antenne

### II.7.6 Directivité

La directivité est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En se basant sur cette définition, une antenne à directivité élevée présente une ouverture de rayonnement restreinte, tandis qu'une antenne à directivité réduite offre une ouverture de rayonnement plus étendue [33].

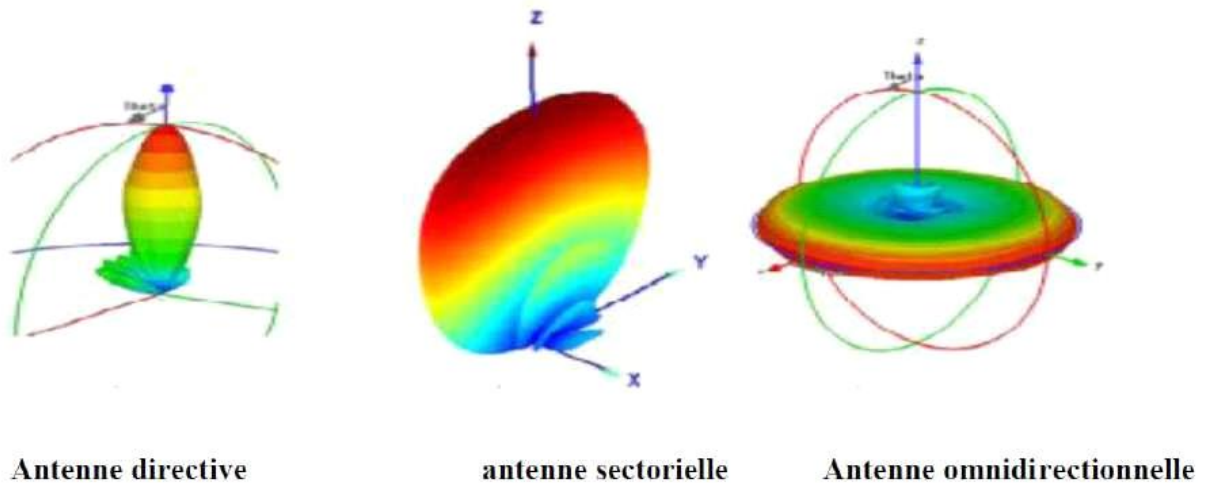


Figure II.11 : Diagramme de rayonnement d'une antenne

### II.7.7 Facteur de qualité

Le facteur de qualité est couramment calculé à la résonance et est lié à la bande passante. Pour une antenne, le facteur de qualité est généralement défini comme le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle de son impédance d'entrée, et peut être exprimé comme tel de la façon suivante : [24].

$$Q_{total} = \frac{Im(Z)}{Re(Z)} = W \frac{W_{stockée}}{P_{dissipée}} \quad (II.3)$$

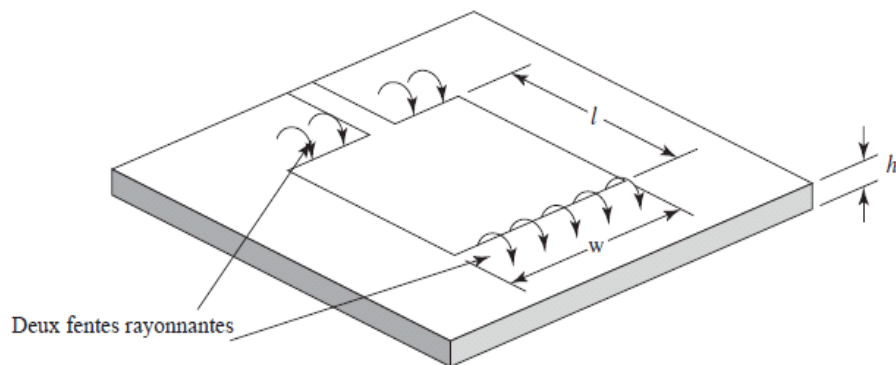
### II.8 Techniques d'analyse

La raison principale du développement d'un modèle analytique pour l'antenne patch est de fournir un moyen de concevoir l'antenne sans itération expérimentale coûteuse et fastidieuse. Il peut également permettre au concepteur de découvrir les mécanismes physiques du fonctionnement de l'antenne patch.

Avec une technique d'analyse, nous devrions pouvoir prédire les qualités de performance de l'antenne, telles que l'impédance d'entrée, la fréquence de résonance, la largeur de bande, les diagrammes de rayonnement et l'efficacité. De nombreuses techniques d'analyse différentes ont été développées pour analyser les antennes patch. Cependant, les plus populaires peuvent être classées en cinq groupes : modèle de circuit de ligne de transmission, modèle de cavité multimode, méthode des moments, méthode du domaine temporel à différences finies (FDTD) et méthode des éléments finis [34].

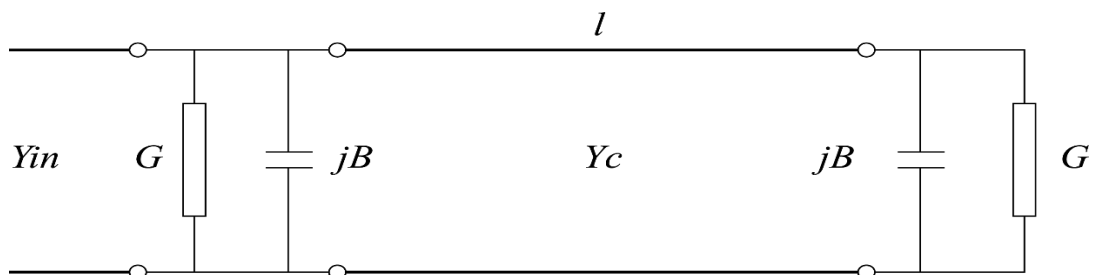
#### II.8.1 Modèle de la ligne de transmission

Un patch micro ruban, fonctionnant à son mode fondamental, est essentiellement une ligne de transmission micro ruban de  $\lambda$  de long et peut être représenté par un réseau de circuits équivalents [24]. Pour un patch rectangulaire ou carré, son rayonnement est essentiellement généré par ses deux bords avec deux fentes équivalentes le long de la dimension de résonance. Ainsi, l'antenne micro ruban peut être caractérisée par deux fentes et une ligne d'alimentation qui est généralement connectée à un point spécifique du patch, où chaque fente est représentée par un circuit parallèle de conductance ( $G$ ) et de susceptance ( $B$ ). L'antenne patch complète peut être représentée par le réseau équivalent. [30] [35].



**Figure II.12: Source de rayonnement représenté par deux fentes équivalentes**

Ce modèle de ligne de transmission est simple, intuitivement attrayant et rapide à calculer, mais il souffre d'une précision limitée. Par exemple, ce modèle ne tient pas compte du rayonnement des bords non rayonnants du patch, et il n'y a pas de couplage mutuel entre les deux bords. Bien que ce modèle ait donné lieu à une version nettement améliorée, il manque de la flexibilité et de la généralisation pour analyser d'autres formes de patches [30].



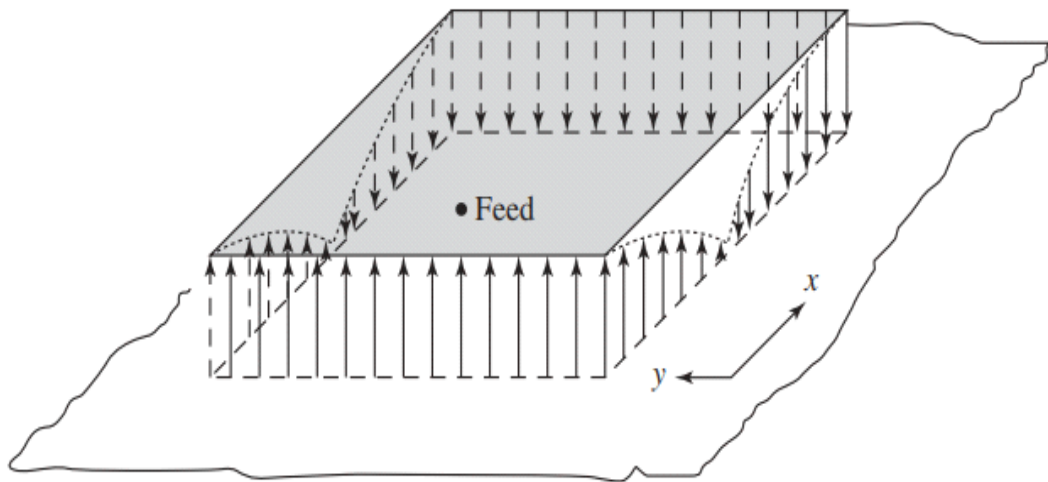
**Figure II.13: Circuit équivalent d'un élément de patch en micro ruban**

## II.8.2 Modèle de la cavité multimode

Toute antenne micro ruban peut être considérée comme une cavité ouverte délimitée par le patch et son plan de masse. Les bords ouverts peuvent également être représentés par des

parois magnétiques rayonnantes. Une telle cavité supportera plusieurs modes discrets similaires à ceux d'une cavité métallique complètement fermée. Par exemple, pour un patch rectangulaire ou carré avec une constante diélectrique relative  $\epsilon_r$ , une épaisseur de substrat  $h$  et des dimensions de patch  $L \times W$  le champ électrique total dans la cavité peut être exprimé comme la somme des champs associés à chaque mode sinusoïdal [35].

La variation du champ sous le patch pour le mode fondamental est illustrée à la figure II.14 [35].



**Figure II.14 : Répartition du champ électrique en mode fondamental d'une antenne patch**

### II.8.3 Méthode du moment

Les champs rayonnés d'une antenne patch peuvent être déterminés en intégrant tous les courants électriques sur ses surfaces métalliques via l'approche de l'équation intégrale dont la solution est obtenue par la méthode dite des moments. Cette approche par équation intégrale [36] est analysée en résolvant d'abord le potentiel vectoriel  $A(x,y,z)$ , qui satisfait l'équation d'onde avec  $J_s$  étant le courant de surface du patch.

### II.8.4 Méthode de Différence finie dans le domaine temporel (FDTD)

La méthode du moment précédent résout le courant de surface 2D sur le patch micro ruban. La méthode FDTD, quant à elle, est un solveur tridimensionnel. Elle résout les champs électromagnétiques dans un espace volumétrique 3D. Elle peut donc résoudre des problèmes plus complexes avec des interfaces et des connexions en 3D, comme l'antenne patch multicouche avec des connexions multicouches compliquées. Cependant, elle souffre d'un

temps de calcul laborieux et n'est pas adaptée à la résolution de grands problèmes de réseaux de micro rubans [36].

La méthode FDTD utilise l'algorithme de *Yee* pour discrétiser l'équation de *Maxwell* dans l'espace 3D et dans le temps. Le volume d'intérêt est discrétisé en de nombreuses cellules cubiques et les champs E et H sont alors résolus par les équations de Maxwell avec des conditions aux limites données d'une cellule à l'autre dans les cellules adjacentes [37].

### II.8.5 Méthode des éléments finis (FEM)

Cette méthode peut être décrite au mieux par une série d'étapes de mise en œuvre. Tout d'abord, il convient de définir le problème électromagnétique des valeurs limites par une équation aux dérivées partielles (EDP) appropriée. Ensuite, on obtient une formulation variationnelle pour l'EDP en termes de fonction liée à l'énergie ou d'expressions résiduelles pondérées [38].

Troisièmement, on subdivise les régions de champ en sous-régions discrètes (éléments finis), telles que des triangles et des quadrilatères. Quatrièmement, on choisit un essai ou une solution approximative (polynôme) définie en termes de valeurs nodales (points limites entre les éléments) de la solution à déterminer pour chaque élément [35]. Cinquièmement, on minimise la fonction (on fixe la dérivée de la fonction à zéro) par rapport aux potentiels des valeurs nodales. Enfin, l'ensemble d'équations algébriques qui en résulte est résolu et la solution du problème de champ requise est obtenue. La différence entre la méthode FEM et la méthode FDTD est que la méthode FDTD résout le problème cellule par cellule, la taille de la cellule servant de potentiel d'approximation, alors que la méthode FEM utilise une solution approximative pour chaque élément entier [38].

Ainsi, pour obtenir une bonne précision, la taille des cellules de la méthode FDTD doit être petite et généralement uniforme, tandis que la taille des éléments de la méthode FEM peut être grande ou petite en fonction de la géométrie ou de la variation du champ. Les deux méthodes prennent beaucoup de temps de calcul pour les structures électriques de grande taille. La méthode FDTD consacre moins de temps de calcul à chaque cellule mais avec plus de cellules, tandis que la méthode FEM consacre plus de temps à chaque élément mais avec moins d'éléments. La mise en œuvre de la FEM est plus compliquée que celle de la méthode FDTD.

La méthode FDTD est plus simple, alors que la FEM nécessite un développement analytique plus fin de la formulation avant la mise en œuvre, une connaissance plus

approfondie des méthodes d'algèbre linéaire et une procédure de prétraitement plus complexe. Bien que la FEM soit plus complexe, elle est plus polyvalente et plus souple dans la modélisation de géométries complexes. Elle produit des solutions plus stables et plus précises et peut traiter des matériaux non homogènes. Un logiciel commercial très populaire, High-Frequency System Simulator (HFSS), utilise la méthode des éléments finis pour résoudre de nombreuses structures électriquement petites mais complexes. Les antennes ou réseaux micro ruban avec un petit nombre d'éléments peuvent certainement être résolus par la méthode FEM ou FDTD, mais souvent la solution de la méthode des moments en 2D suffira avec une vitesse de calcul plus rapide [11]

## II.9 Utilisation des antennes patch

En raison de l'explosion technologique dans le domaine des télécommunications et de la recherche scientifique continue sur les antennes imprimées, les antennes patch ont de nombreuses applications :

- La structure des antennes patch permet une large utilisation dans les communications sans fil. C'est la raison pour laquelle ces antennes sont compatibles avec les appareils portatifs tels que les téléavertisseurs et les téléphones mobiles.
- En raison de leur structure fine, ces antennes sont utilisées comme antennes de communication sur les missiles [36].
- Les communications par satellite et les applications micro-ondes utilisent également les antennes patch en raison de leur petite taille.
- Le GPS (Global Positioning System) est l'un des principaux avantages des antennes patch. Il facilite en effet le suivi des véhicules et des marines.
- Ces antennes trouvent également des applications dans les radars à réseau phasé qui peuvent gérer la tolérance de la bande passante jusqu'à un certain pourcentage [14]

## II.10 Avantages et inconvénients

L'antenne patch présente des avantages et des inconvénients. En les comprenant bien, on peut facilement concevoir une antenne patch avec une efficacité optimale, un risque minimum et un coût inférieur pour une application particulière.

Les avantages des antennes patch sont les suivants : [33]

- L'antenne est de petite taille et peu encombrante.
- Elle offre un processus de fabrication facile.



- En raison de son faible volume et de sa petite taille, l'installation est facile.
- Elle s'intègre facilement à d'autres dispositifs.
- Elle peut effectuer des opérations à double et triple fréquence.
- Les réseaux d'antennes peuvent être facilement construits.
- Elle offre un haut degré de robustesse par rapport aux surfaces rigides.

Cependant, les antennes patch ont également certaines limites. Les inconvénients des antennes patch sont les suivants : [\[33\]](#)

- Largeur de bande étroite.
- Faible efficacité et faible gain de puissance.
- Pertes ohmiques plus importantes dans la structure d'alimentation du réseau.
- La pureté de la polarisation est difficile à obtenir.
- Excitation des ondes de surface.
- Niveau élevé de polarisation croisée et de couplage mutuel dans un environnement de réseau à hautes fréquences.

## **II.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons introduit les principes fondamentaux concernant les antennes patch. Nous avons parlé de leurs techniques d'alimentation et d'analyse, ensuite nous avons présenté leurs caractéristiques fondamentales et les avantages et inconvénients d'utilisation des antennes patch.

## *Chapitre III*

### *Simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS*

# **Chapitre III : Simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS**

## **III.1 Introduction**

La conception d'une antenne à l'aide d'un logiciel adapté est une étape essentielle pour gagner du temps et optimiser la structure en vue des réglages souhaités. Cette conception tient compte des paramètres diélectriques et permet d'estimer les performances des antennes à fabriquer. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser l'outil de simulation électromagnétique HFSS pour simuler une antenne omnidirectionnelle opérante à la fréquence 2.66 GHz. Les paramètres de conception sont pris de l'article (dimensions géométriques type du substrat) [39]

Dans ce chapitre, notre objectif est de faire une validation de l'article [39] (la simulation dans l'article était faite sous le logiciel CST). On fait une étude paramétrique dans le but est de régler les dimensions de l'antenne pour améliorer les caractéristiques de l'antenne.

## **III.2 Présentation du logiciel de simulation HFSS**

Les logiciels de simulation électromagnétique sont largement utilisés par les concepteurs d'antennes de nos jours. Ces logiciels permettent de réaliser des simulations bidimensionnelles multicouches ou des simulations tridimensionnelles (telles que HFSS d'ANSYS, FEKO d'Altair et CST Microwave Studio). Ces logiciels se distinguent non seulement par leur interface utilisateur, mais aussi par les méthodes numériques qu'ils utilisent pour calculer la réponse électromagnétique des structures modélisées.

Concernant le logiciel de simulation HFSS, il s'agit d'un puissant simulateur électromagnétique pour les modèles 3D, développé par ANSOFT. Il intègre la simulation, la visualisation et une interface conviviale pour des solutions rapides et efficaces aux problèmes électromagnétiques en 3D. Son code informatique repose sur la méthode des éléments finis, qui divise l'espace en de nombreuses petites régions résolues et représente les champs de chaque sous-région (élément) par des fonctions locales. Ainsi, il permet d'obtenir des résultats graphiques de haute qualité, offrant aux utilisateurs une vision claire des problèmes électromagnétiques en 3D.

HFSS est un outil polyvalent qui permet de calculer des paramètres tels que les paramètres S, la fréquence de résonance et les champs électromagnétiques. Il offre également des fonctionnalités de post-traitement pour une analyse détaillée approfondie, permettant de

calculer des grandeurs fondamentales en champ proche et lointain, l'impédance caractéristique du port et sa constante de propagation, ainsi que des paramètres S normalisés à une impédance de port spécifique. En résumé, HFSS est un outil essentiel pour étudier le comportement électromagnétique des structures d'antennes.

### III.3 Structure de l'antenne patch omnidirectionnelle

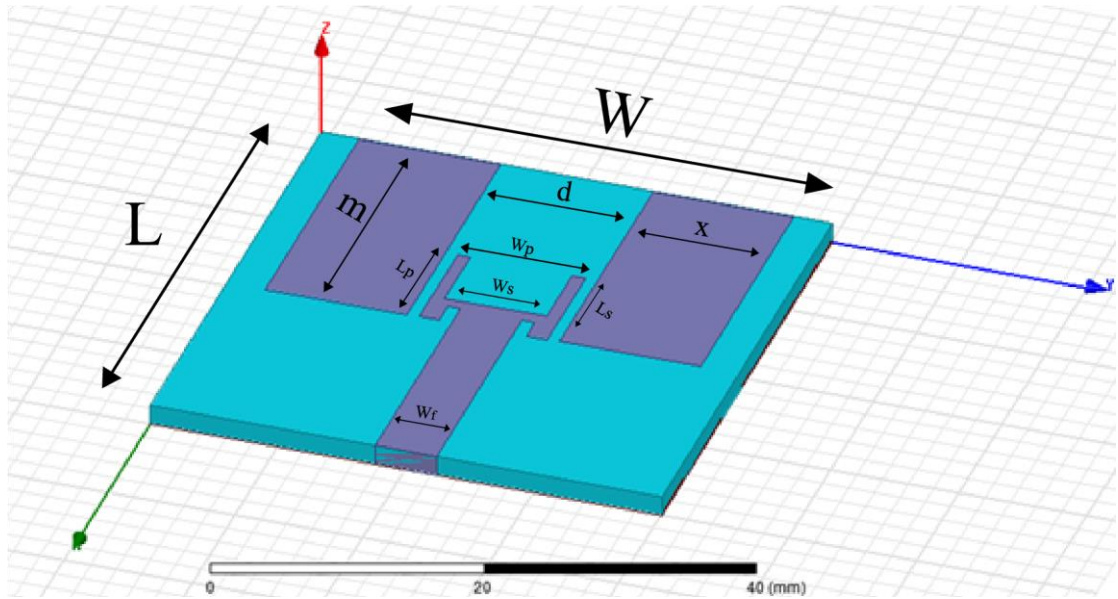


Figure III.1 la structure de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS (vue de dessus)

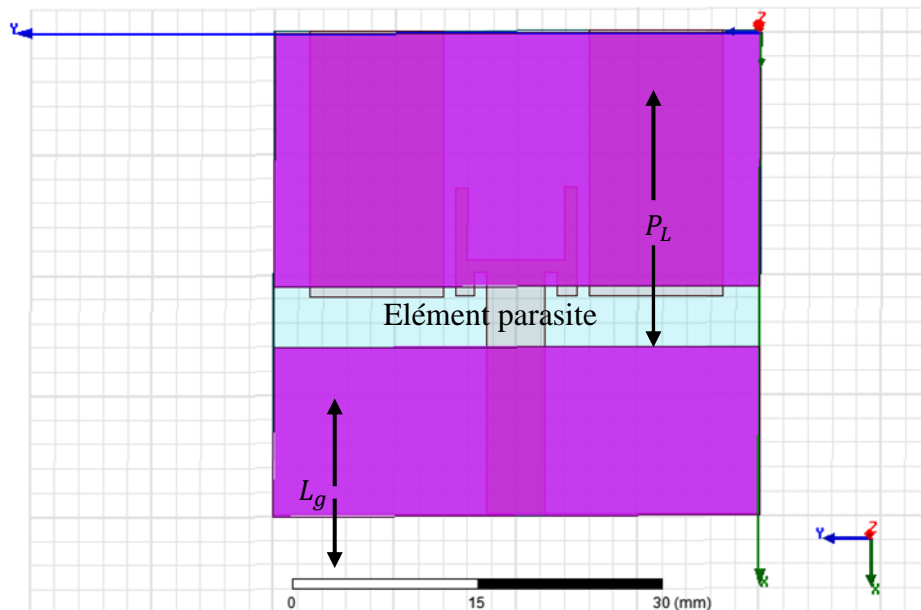


Figure III.2 la structure de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS (élément parasite PL)

L'antenne patch omnidirectionnelle simulée se compose principalement de trois éléments : le substrat diélectrique, le patch conducteur et le plan de masse. Sa structure est illustrée dans la figure III.1 (vue de dessus) et la figure III.2 (vue dessous). Leurs dimensions sont données le tableau III.1. L'alimentation de l'antenne se fait par une sonde coaxiale [8].

**Tableau III.1 :Dimensions d'antenne omnidirectionnelle**

Dimension paramétrique	Valeur (mm)
Longueur (L)	40
Largeur (W)	40
Épaisseur du Rogers RT 5880 (h)	1.575
Épaisseur du cuivre (t)	0.035
Longueur du patch (Lp)	9
Largeur du patch (Wp)	10
Longueur de la fente (Ls)	6
Largeur de la fente (Ws)	8
Longueur de l'élément parasite sur le patch (m)	22
Largeur de l'élément parasite sur le patch (x)	11
Distance entre deux éléments parasites du patch (d)	12
Longueur de l'alimentateur (Lf)	18
Largeur de l'alimentateur (Wf)	4.8
Longueur de l'élément parasite sur le plan de masse (PL)	21
Longueur du plan de masse (Lg)	14

### III.4 Simulation de l'antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS

Dans cette section, on a simulé sous HFSS l'antenne en utilisant les valeurs citées dans le tableau III.1. dans le but de valider l'article [39]. Puis on a fait une étude paramétrique dans le but de régler les dimensions pour avoir la fréquence de résonance exacte.

#### III.4.1 Géométrie de l'antenne sous HFSS

La figure III.3 présente la représentation de la géométrie de conception sous le logiciel HFSS. L'antenne patch conçue sous HFSS est positionnée dans le plan  $(X, Y)$  tandis que la hauteur du substrat est alignée selon la direction  $Z$ .

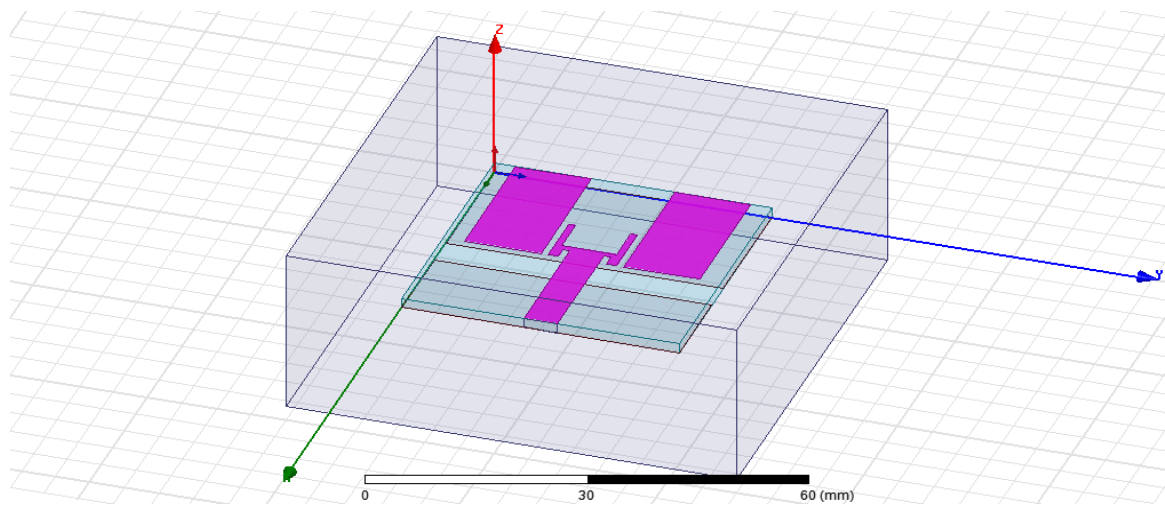


Figure III.3 : Géométrie de l'antenne patch omnidirectionnelle sous le logiciel HFSS

#### III.4.2 Coefficient de réflexion S11

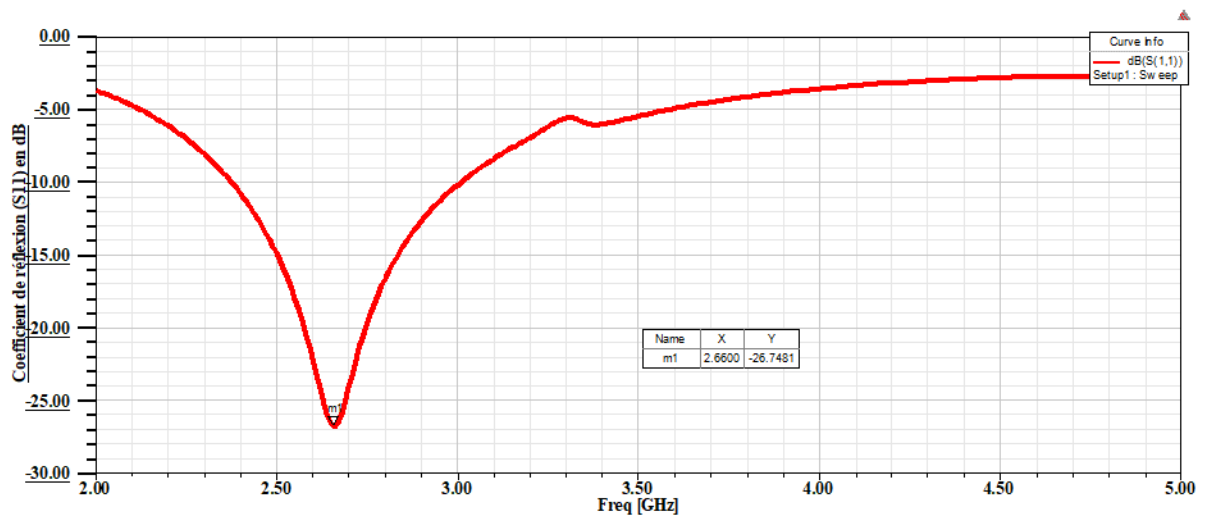


Figure III.4 Coefficient de réflexion S11

Le coefficient de réflexion qui présente le rapport de transfert d'énergie entre la source d'alimentation et l'entrée de l'antenne, est illustré dans la figure.III.4. D'après cette dernière on remarque que :

La résonance est pour la fréquence  $f=2.66$  GHz (valeur de  $S_{11}=-27.74$  dB), qui est similaire à la fréquence de résonance désirée (celle de l'article 2.60 GHz [39]). La largeur de la bande passante est d'ordre de 0.62 GHz

### III.4.3 Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

Le Rapport d'onde stationnaire (ROS) donne l'appréciation de l'adaptation, c'est un indicateur de bon fonctionnement du système d'alimentation de l'antenne. Le ROS en fonction de la fréquence est présenté dans la figure III.5. D'après cette dernière le ROS vaut 1.08 à la fréquence de (2.66 GHz), ce résultat est largement meilleure par rapport au ROS trouvé dans l'article (1.32) [39].

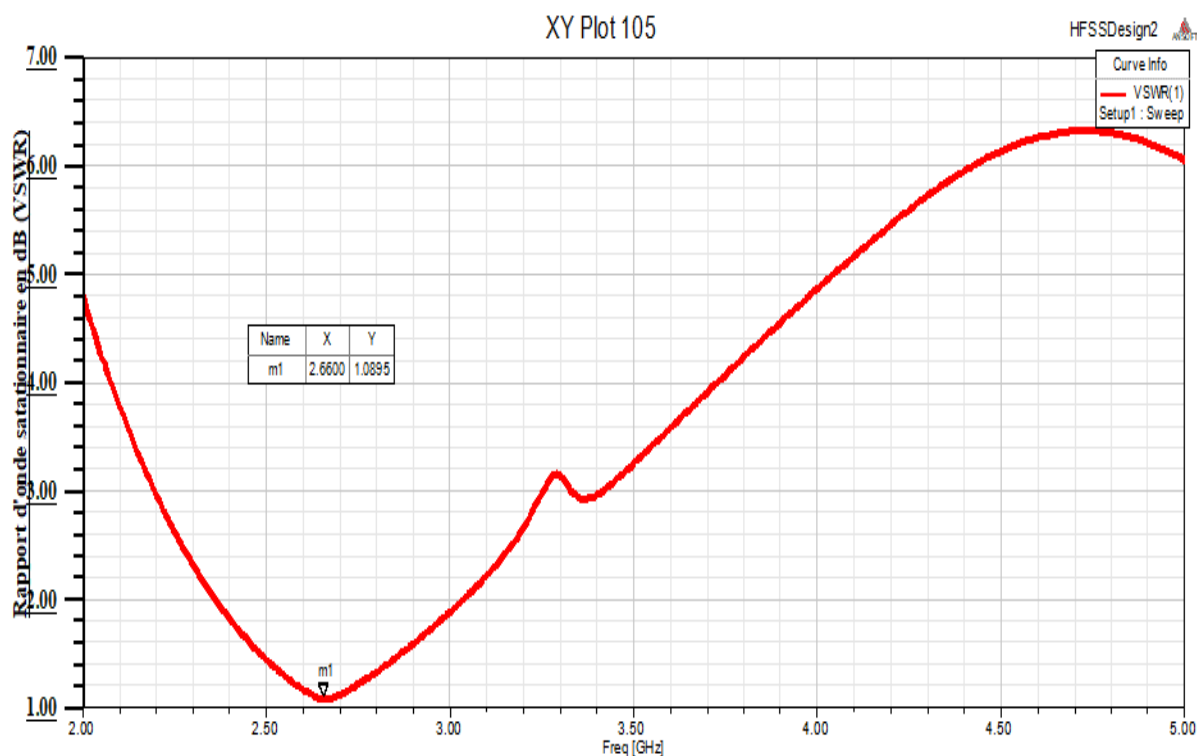


Figure III.5 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

### III.4.4 Impédance d'entrée du patch

L'impédance d'entrée (en utilisant les dimensions de l'article) est illustrée dans la figure.III.6. L'impédance d'entrée à la fréquence de résonance 2.66 GHz est  $Z_{in}=(46.22-j3.6)\Omega$  qui montre une bonne adaptation (résultat de l'article  $50\Omega$  [39]).

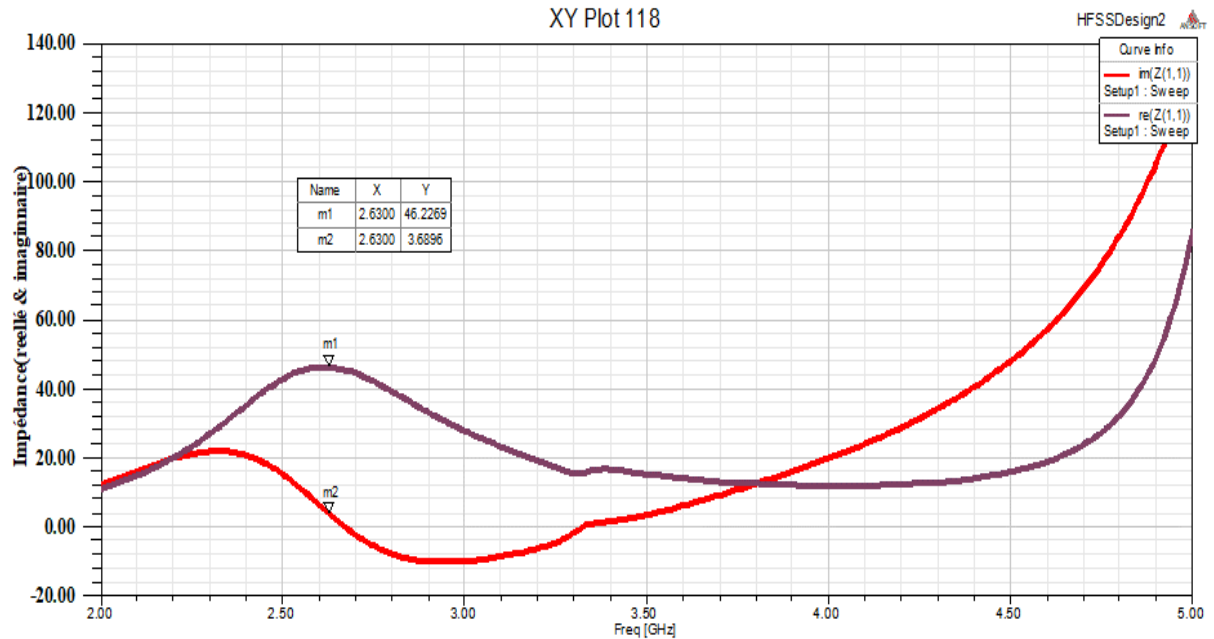


Figure III.6 Impédance d'entrée

### III.4.5 Diagrammes de rayonnement en trois dimensions

Les diagrammes en 3D, du gain et de la directivité de l'antenne, permettent l'observation dans quelle direction la densité de flux de puissance est-elle concentrée.

**Le gain :** le diagramme de gain est illustré dans la figure III.7. D'après cette dernière la valeur maximale du gain est égale à 3.22 dB, (la valeur donnée dans l'article [39] est 3.296 GHz), on remarque une bonne concordance.





Figure III.7. : Gain de l'antenne optimisée

La directivité : d'après la figure III.8, qui présente la directivité en trois dimensions, la valeur maximale est égale 3.65 dB, on remarque que presque c'est la même trouvée dans l'article (la valeur donnée dans l'article est 3,381 dB)

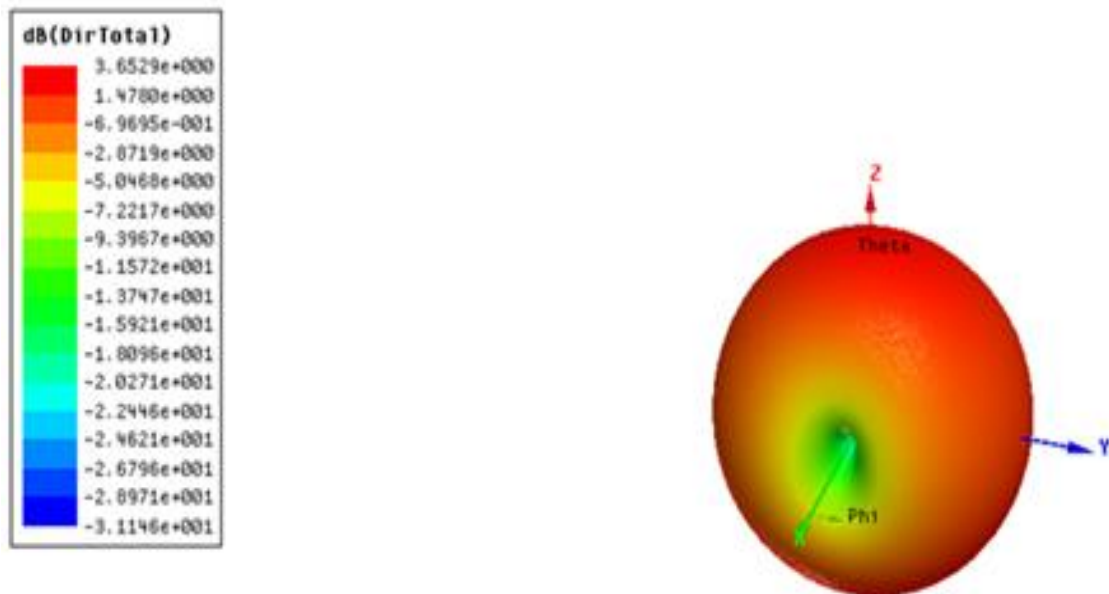


Figure III.8 Directivité de l'antenne optimisée

L'efficacité : Par définition c'est le rapport entre le gain (G) est la directivité (D) :

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

On a :

Le gain  $G(\theta, \varphi)=3.2283$  dB et la directivité  $D(\theta, \varphi)=3.6529$  dB, donc :

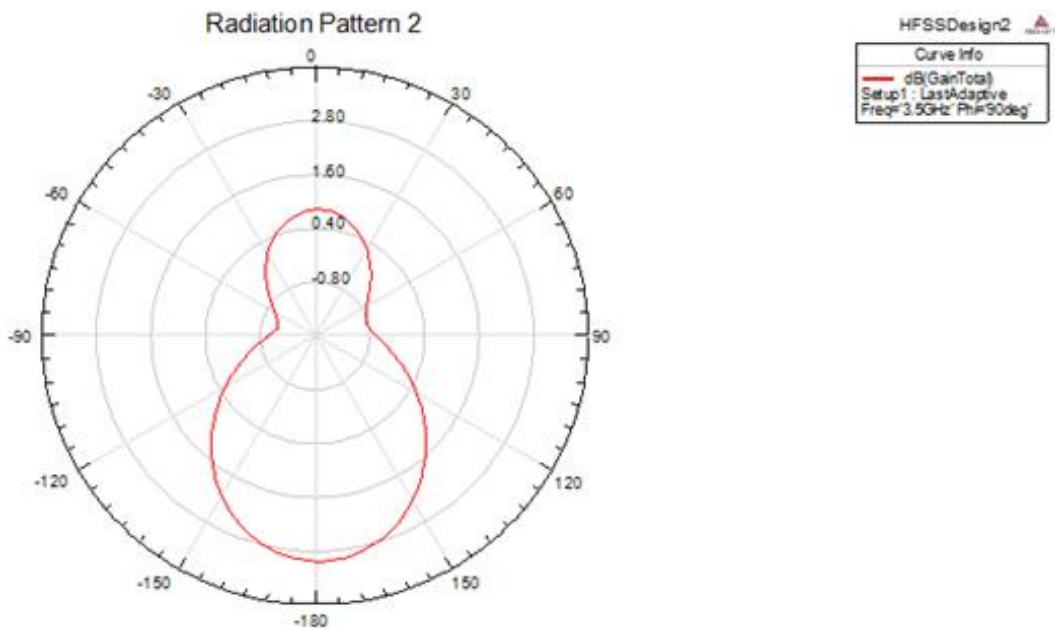
$$\eta = G/D = 3.2283/3.6529 = 0.88 \text{ (88\%)}$$

### III.4.6 Diagramme de rayonnement en deux dimensions

Le diagramme de rayonnement en 2D, affiche les niveaux de puissance rayonnée en fonction de l'angle de direction dans le plan de rayonnement.

Les figures (III.9), (III.10), (III.11), (III.12), montrent les diagrammes de rayonnement en deux dimensions pour différents angles Phi:

- Phi «90Ddeg»
- Phi «-180deg»
- Phi «-172deg»
- Phi «-96» «0deg»



**Figure III.9 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=90deg)**

La figure III.8 présente le diagramme de rayonnement en deux dimensions de l'antenne optimisée pour Phi (-180deg) à la fréquence (3.5GHz). On remarque ce diagramme comme ce de l'article [39].

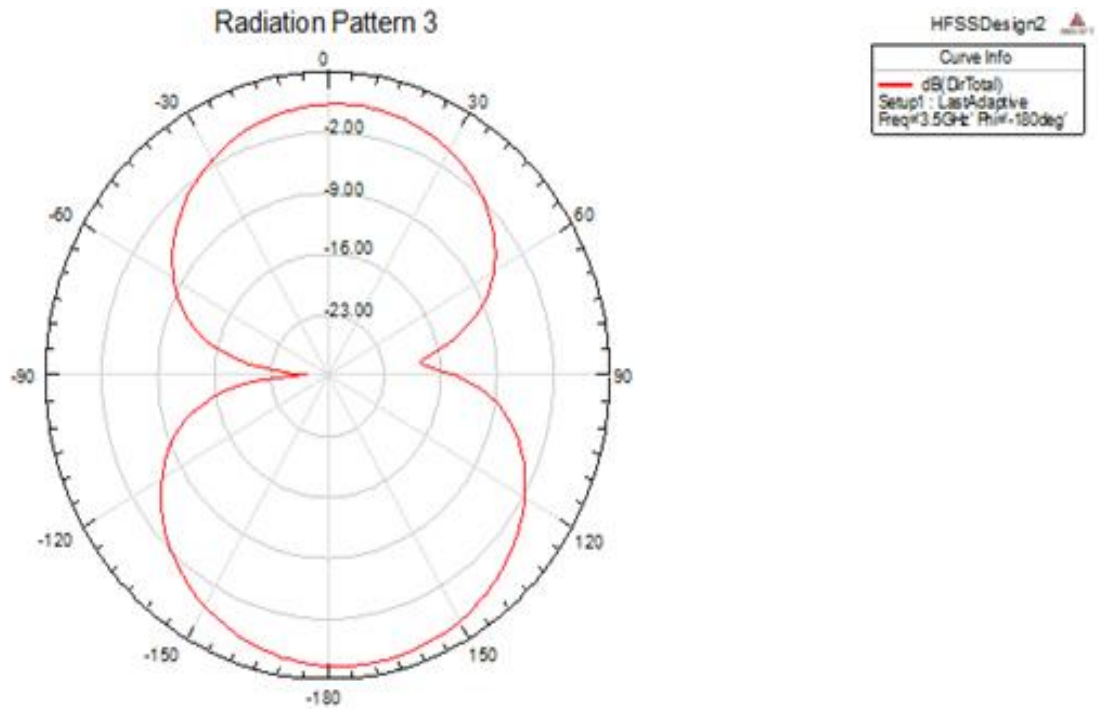


Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne optimisée (Phi=-180deg)

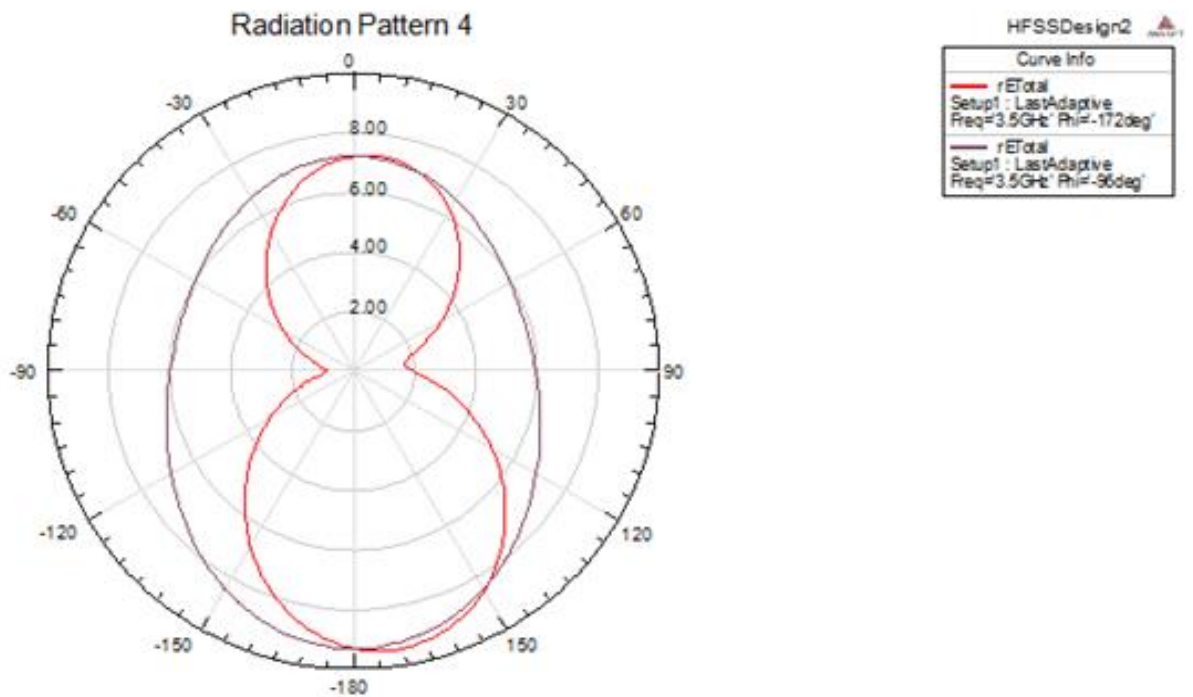


Figure III.11 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=-172, Phi=-96)

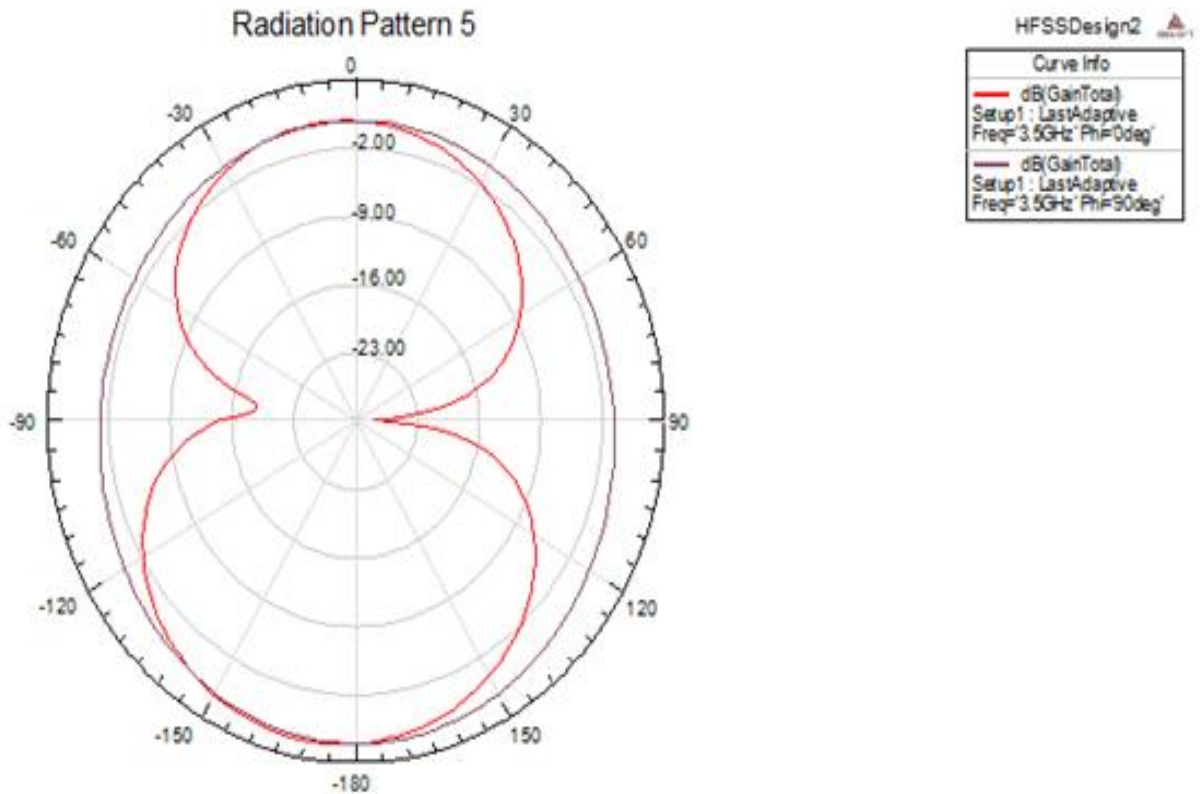


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 2D (Phi=0deg, Phi=90deg)

### III.4.7 Etude paramétrique

Dans cette partie, on présente l'effet de la largeur de l'élément parasite (PL) sur les caractéristiques de l'antenne (sur pour différent longueur sur : le coefficient de réflexion (S11), le rapport d'onde stationnaire (VSWR), l'impédance d'entrée(z) par apport aux fréquences).

#### III.4.7.1 Effet d'élément parasite (PL)

Pour étudier l'effet de l'élément parasite (PL), on a pris l'intervalle étalant de 9 mm à 21 mm avec un pas de 2mm. Les coefficients de réflexion correspondants sont illustrés dans la figure III.13.

D'après figure III.13, la valeur de PL qui égale 1 mm qui donne le meilleur résultat (f=3.14 GHz et S11=-25.35 dB)

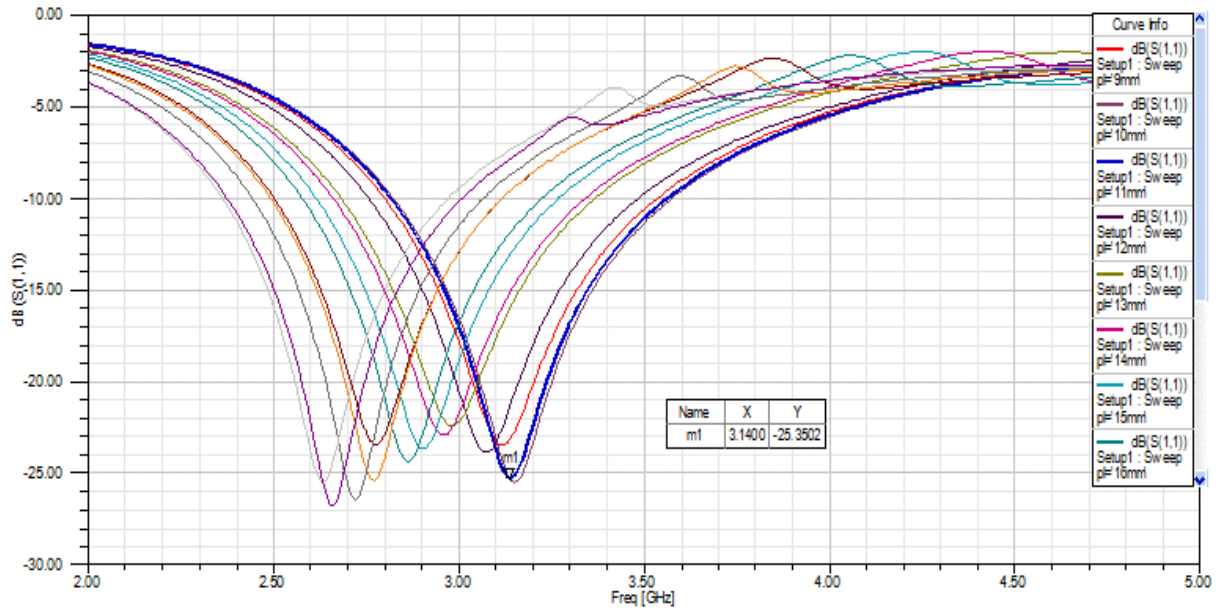


Figure III.13 Effet de l'élément parasite (PL) sur le coefficient de réflexion (S11)

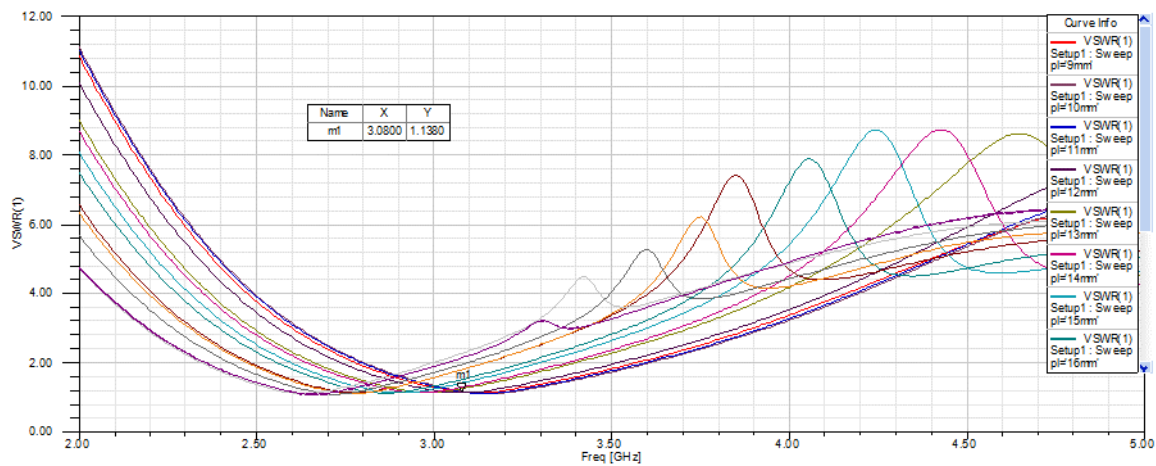


Figure III.14 Effet de l'élément parasite (pL) sur le rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La figure.III.14 montre l'effet de l'élément parasite (PL) sur le rapport d'onde stationnaire en variant PL (PL=9mm à PL=21mm). D'après cette dernière on remarque que pour PL = 11 mm, le ROS vaut 1.1380 à une fréquence 3.0800GHz sur l'intervalle [2GHz, 5GHz]. Cette valeur montre une très bonne adaptation.

### III.4.7.2 Optimisation de l'antenne

L'optimisation de l'antenne dans cette étude, est de chercher le meilleur couple (L, w : dimensions de substrat) qui rend exactement la fréquence de résonance 3.5 GHz. Donc, on a joué sur le deux paramètres, en les variant de 30 mm jusqu'à 40 mm avec un pas de 1 mm (pour L et pour w).

La figure III.15 représente l'effet de la longueur (L) et la largeur (W) sur le coefficient de réflexion (la solution désirée est la fréquence 3.5GHz sur un intervalle de fréquence de 5GHz). Cette dernière montre que chaque couple (L, W) présente une fréquence de résonance.

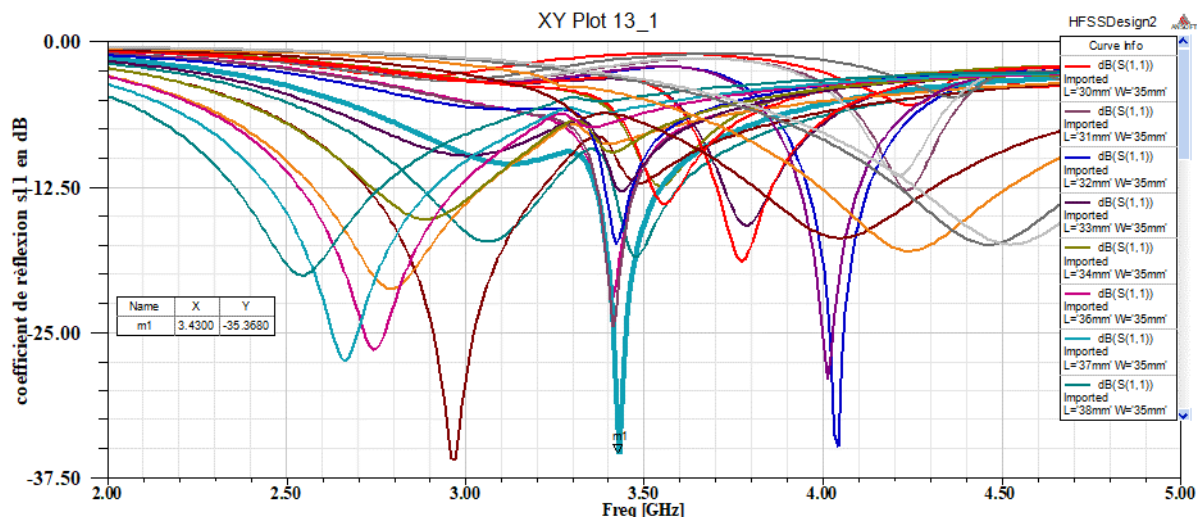


Figure.III.15 Effet de la longueur (L) et la largeur du patch (W) sur le coefficient de réflexion

La figure III.16 présente la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour le couple (L=37 mm et w=35mm) qui donne la fréquence souhaitée. D'après la figure, on remarque que le coefficient de la réflexion à la fréquence 3.43 GHz égale -35.36 dB.

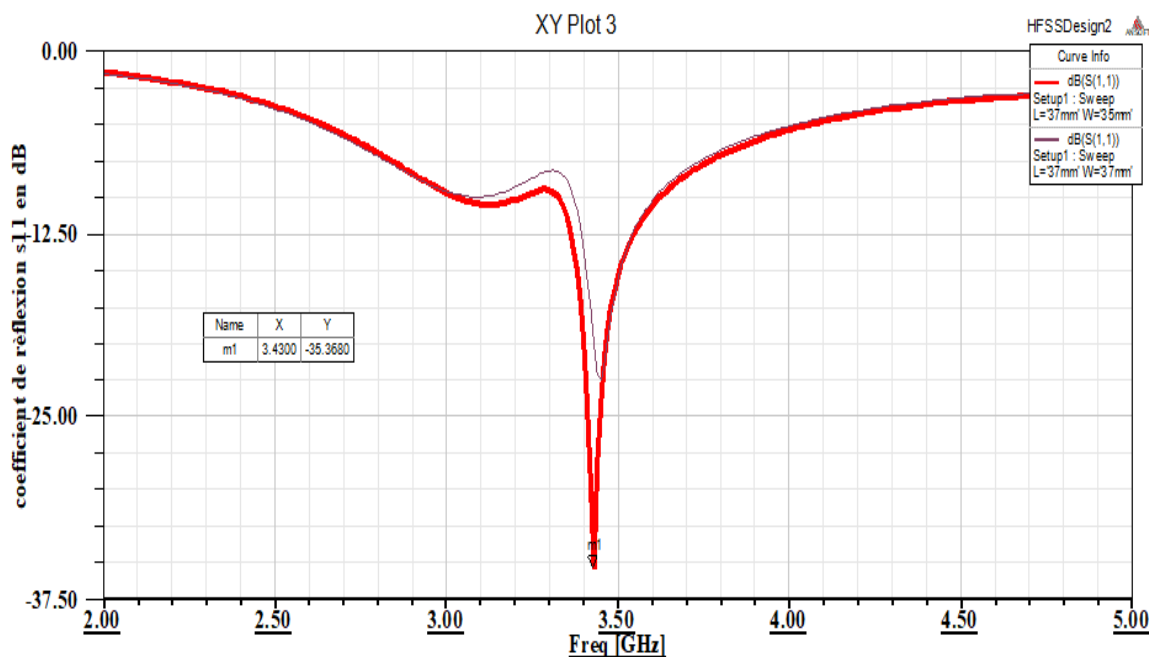


Figure III.16 Coefficient de réflexions correspondant aux meilleures valeurs optimisées

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté la conception et la simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HESS alimentée par une ligne microruban en cloches pour des applications au voisinage de 3.5 GHz.

Dans un premier lieu, la partie de simulation est consacré à la validation de l'article concernant le coefficient de réflexion, rapport d'onde stationnaire et l'impédance d'entrée (imaginaire & réel).

Dans second lieu une étude paramétrique des paramètres géométrique est faite.

En fin, la troisième partie est consacrée à l'optimisation de l'antenne pour donner les meilleures valeurs optimisées.

D'une façon générale nos résultats sont en bonne concordance avec ce de l'article [39].

## Conclusion générale

Ce projet que nous avons présenté, nous a permis de concevoir et simuler une antenne patch omnidirectionnelle de forme rectangulaire alimenté par une ligne de transmission en cloche.

Dans le premier chapitre on a présenté des généralités sur les antennes (Rôle d'une antenne, Classification des antennes, Types des antennes.....).

Le deuxième chapitre est consacré aux antennes patches (La structure de l'antenne patch, les différentes formes d'une antenne patch, principe de fonctionnement, le gain, l'impédance d'entrée, directivité...).

Le troisième chapitre est consacré à la description de la conception et la simulation d'antenne omnidirectionnelle. La conception est simulée à l'aide du logiciel HFSS 13.0 (High Frequency Structure Simulation). Les résultats obtenus sont acceptables concernant (le coefficient de réflexion, le rapport d'onde stationnaire, l'impédance d'entrée .....), d'après les résultats trouvés de la simulation, on remarque que nos résultats avec ceux de la référence [39] présente un décalage parfois une dégradation par rapport à ceux de l'article.

En conclusion, l'objectif de ce travail est la conception et la simulation d'une antenne patch omnidirectionnelle sous HFSS. On peut dire que l'objectif est accompli avec succès. Car d'une façon générale les résultats de la simulation sont similaires à ceux de l'article.

Comme perspectives ou continuités de ce travail, on propose d'utiliser d'autres types d'alimentation et de modifier la forme de patch, le matériau de substrat, nombre et forme d'élément parasite. Et comme idée principale est de fabriquer l'antenne et de faire des mesures



## Bibliographie

- [1] Mlle .OUALLI Lamia, «Sous HFSS (High Frequency Structure Simulator),» 2012.
- [2] Zürcher, J.-F. , *Antennes*. Dunod, 2012.
- [3] SATHYABAMA,, *UNIT – I - Antenna Fundamentals and Wire Antennas – SECA1504*.
- [4] «Antenna Basics Handbook C4,» [En ligne]. Available: [wireless.ictp.it/handbook/C4](http://wireless.ictp.it/handbook/C4).
- [5] Williamsburg Virginia, , «Microstrip Antennas," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation,*» pp. pp. 177-180, 1972.
- [6] «LECTURE 17: Radiation from Apertures; <https://www.ece.mcmaster.ca/>,» [En ligne]. Available: [www.ece.mcmaster.ca/10.03.2023](http://www.ece.mcmaster.ca/10.03.2023)
- [7] «Wire Antenna : Design, Working, Types & Its Applications,» [En ligne]. Available: [www.elprocus.com/wire-antenna/](http://www.elprocus.com/wire-antenna/).01.02.2023
- [8] Larbi Ben M'hidi, *Conception et caractérisation d'une antenne patch omnidirectionnelle*, 2021.
- [9] «Reflector Antenna : Working, Types & Its Applications,» [En ligne]. Available: [www.elprocus.com/reflector-antenna/](http://www.elprocus.com/reflector-antenna/).08.04.2023
- [10] «Lens Antenna : Working, Types & Its Applications,» [En ligne]. Available: [www.elprocus.com](http://www.elprocus.com).
- [11] Balanis, A, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Constantine .
- [12] Mr. M. SREEDHAR REDDY, Associate Professor, «ANTENNA AND WAVE PROPAGATION;Lecture Notes B.TECH,» 2019-20.
- [13] Warren L. Stutzman and Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design"*. John Wiley & Sons, 2012
- [14] W. H. Weedon, W. J. Payne, and G. M. Rebeiz, « MEMS-switched reconfigurable antennas, *Proc. IEEE Antennas Propag. Int.*,» vol. Vol. 3 , p. 654–657, July 2001.
- [15] [https://www.uni-saarland.de/fileadmin/upload/lehrstuhl/dyczij-edlinger/Downloads/Lehre/MA/AT1/VU/ANT1\\_Chapter2.le](https://www.uni-saarland.de/fileadmin/upload/lehrstuhl/dyczij-edlinger/Downloads/Lehre/MA/AT1/VU/ANT1_Chapter2.le) 10.04.2023
- [16] F. Edelvik, G. Ledfelt, P. Lotstedt, and D. J. Riley, «An unconditionally stable subcell model for arbitrarily oriented thin wires in the FDTD method, *IEEE Trans. Antennas Propag,*» vol. Vol. 51, n° %1 No. 8, p. pp. 1797–1805, August 2003.
- [17] C. Wu, A. Navarro, and J. Litva, «Combination of finite impulse response neural network technique with FDTD method for simulation of electromagnetic problems, *Electron. Lett., , , .*,» vol. Vol. 32, n° %1No. 12, p. pp. 1112–1113, 1996.
- [18] Roshni Y, «Antenna and Wave propogation,» [En ligne]. Available: [electronicsdesk.com/patch-antenna](http://electronicsdesk.com/patch-antenna) [https://books.google.dz/books/about/Antennas\\_and\\_Wave\\_Propagation](https://books.google.dz/books/about/Antennas_and_Wave_Propagation) .03.05.2023
- [19] [Https://electronicsdesk.com/patch-antenna.html](https://electronicsdesk.com/patch-antenna.html)

- [20] J. Litva, C. Wu, and E. Navarro, «On incorporating signal processing and neural networks techniques with the FDTD method for solving electromagnetic problems, *Int. Symp. Signals Systems Electron.*,» pp. pp. 327–330,, 1995.
- [21] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A., *Microstrip Antenna Design Handbook*, 2001.
- [22] R. Waterhouse, «Small microstrip patch antenna, *Electron. Lett.*,» vol. Vol. 31, p. pp. 604–605, April 1995.
- [23] M. Diblanc, «Développement du concept de l'antenne résonateur bie pour la génération De la polarisation circulaire,» Université de LIMOGES,, 2006.
- [24] Oumy DIOP, «Etude et Minimisation du Facteur de Qualité d'Antennes Miniatures conçues pour de Petits Objets Communicants", *Thèse de Doctorat*,» Université De Nice-Sophia Antipolis, Septembre 2013.
- [25] [J. Litva, C. Wu, and E. Navarro, «On incorporating signal processing and neural networks techniques with the FDTD method for solving electromagnetic problems, *Int. Symp. Signals Systems Electron.*,» p. pp. 327–330, 1995.
- [26] P. M. Piel et al, «Fast hybrid integral equation–neural network method for the modeling of multiconductor transmission lines, *IEEE MTT-S* , ,» p. pp. 11673–1676, 1999.
- [27] W. Chen, K. F. Lee, and J. S. Dahele, «Theoretical and experimental studies of the resonant frequencies of the equilateral triangular microstrip antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.*,» vol. Vol. 40, n° %1No. 10, p. pp. 1253–1256, 1992.
- [28] K. L. Wong, *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, 2002 Kin-Lu Wong' .
- [29] P. S. Hall, « Probe compensation in thick microstrip patches, *Electron. Lett.*,» Vols. %1 sur %2Vol. 23,, p. pp.606–607, 1987. May 1987
- [30] F. Bilotti, A. Toscano, and L. Vegni,, « FEM-BEM formulation for the analysis of cavity-backed patch antennas on chiral substrates, *IEEE Trans. Antennas Propag.*,» vol. Vol. 51, n° %1No. 2, p. pp.306–311, February 2003.
- [31] M. N. Vouvakis, C. A. Balanis, C. R. Birtcher, and A. C. Polycarpou, « Ferrite-loaded cavity-backed antennas including nonuniform and nonlinear magnetization effects, *IEEE Trans. Antennas Propag.*,» vol. Vol. 51, n° %1No. 5, p. pp. 1000–1010, May 2003.
- [32] H. Pues and A. Van de Capelle, «Accurate transmission-line model for the rectangular microstrip antenna, *Proc. IEE.*,» vol. Vol. 131, p. pp. 334–340, December 1984.
- [33] David R. Jackson Dept, *Introduction to Microstrip Antennas of ECE University of Houston* ;
- [34] «Antenna Theory - Antenna Arrays,» [En ligne]. Available: [www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory/antenna\\_theory\\_arrays.htm](http://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_arrays.htm).
- [35] C. J. Reddy, M. D. Deshpande, C. R. Cockrell, and F. B. Beck, « Radiation characteristics of cavity backed aperture antennas in finite ground plane using the hybrid FEM/MoM technique and geometrical theory of diffraction, *IEEE Tr.*,» February 2003.

## ***Bibliographie***

---

- [36] *D. Jiao and J. M. Jin, «Fast frequency-sweep analysis of cavity-backed microstrip patch antennas, Microwave Optical Technol. Lett.,» vol. Vol. 22, n° %1No. 6, pp. pp. 389–393,, September 1999.*
- [37] *D. Orban and G.J.K. Moernaut, The Basics of Patch Antennas.*
- [38] *[Z. Lou and J. M. Jin, « A dual-field domain-decomposition method for time-domain finite-element analysis of large finite arrays, J. Comput. Phys.,» vol. Vol. 222, p. pp. 408–427, March 2006.*
- [39] *Liton Chandra Paul ,Himel Kumar Saha ,Tithi Rani ,Md. Zulfiker Mahmud ,Tushar Kanti Roy ,and Wang-Sang Lee], An Omni-Directional Wideband Patch Antenna with Parasitic Elements for Sub-6 GHz Band Applications.*