



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued**

**Faculté des Sciences et de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Télécommunication**

**Spécialité : Systèmes de télécommunication**

**Thème**

**ETUDE D'UNE ANTENNE IMPRIMÉE À LA  
FRÉQUENCE 2.4GHZ**

**Réalisé par :**

- Berrehouma Asia
- Hasnaoui Saida
- Zengui Maroua

**Soutenu le juin 2018 devant le jury composé de :**

**Président :** Mr. A. KHALIL Maitre de conférences « A »  
**Examineur :** Mr. N. LAKHDAR Maitre de conférences « A »  
**Encadreur :** Mr. S. GHENDIR Maitre de conférences « A »

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020/2021**

## *Remerciements*

*Après avoir terminé ce travail, nous remercions Tout-Puissant pour le succès.*

*Nous remercions tout particulièrement notre mentor, M. Ghendir Said, d'avoir fourni toutes les conditions et toutes les possibilités pour faciliter la mise en œuvre de ce travail.*



## *Dédicace*

*Louange à Dieu Tout-Puissant pour son aide et son assistance pour mener à bien cette recherche.*

*A celui qui m'a donné tout ce qu'il possédait pour que je puisse réaliser ses espoirs pour lui, à celui qui m'a poussé en avant*

*en avant pour obtenir*

*Désiré, à l'homme qui possédait l'humanité de toutes ses forces, à celui qui veillait sur mon éducation avec de grands sacrifices*

*traduit dans son respect pour la science, à ma première école dans la vie.*

*Mon cher père, que Dieu prolonge sa vie.*

*A celle qui a donné à la douceur de son foie toute tendresse et tendresse, à celle qui a été patiente avec tout.*

*qui a pris soin de moi*

*Le droit aux soins, et elle était mon soutien dans l'adversité, et sa préention à moi était le succès.*

*Suivez-moi pas à pas*

*Dans mon travail, avec qui je me sens à l'aise chaque fois que je me souviens de son sourire sur mon visage, source de tendresse*

*Ma mère est mon ange le plus cher*

*Le cœur et l'œil, que Dieu la récompense en mon nom avec la meilleure récompense des deux mondes.*

*A eux je dédie cet humble acte afin d'apporter un peu de bonheur dans leur cœur pour mon frère*

*et mes sœurs qui ont partagé avec moi le fardeau de la vie.*



## *Assia*

# Dédicaces

*A son amour et à ses encouragements, ma chère  
mère, A l'âme immaculée de mon père.*

*A mes chères sœurs Maria et Kalthoum, A mon  
cher frère Mohamed.*

*A mon cher neveu Ali.*

*A mes amis Mouna Randa Maria Samiha  
Huoda Rania.*

*A Tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail.*

*Saida*

# *Dédicaces*

*À mon gracieux père, Dieu vous a donné  
la longévité. À mes frères et sœurs.*

*À mes collègues et amis et à tous ceux  
qui m'ont aidé à préparer le mémo, Dieu  
vous bénisse dans vos efforts.*

*Maroua*

## Résumé

Les nouvelles technologies ont révolutionné le domaine des communications, conduisant à un développement rapide dans la conception d'antennes qui permet d'offrir des antennes imprimées à hautes capacités.

Le but de ce travail est d'étudier les antennes imprimées, qui sont d'un grand intérêt par les chercheurs, qui sont des antennes ayant une surface de métal, et des substrats constitués de deux couches métalliques isolantes, Il a une trappe d'alimentation à travers laquelle en utilisant des techniques d'alimentation qui présentent de nombreux avantages, légers, de faible taille et de coût, faciles à fabriquer. Elles sont considérées comme les meilleures antennes en général.

La conception des antennes imprimées est simulée à l'aide du logiciel HFSS, en spécifiant coefficient de réflexion S11 et la VSWR, pour créer des antennes fonctionnant à une fréquence de 2,4 GHz.

### **Mots-clés:**

Antennes imprimées, bande passante, S11, techniques d'alimentation, couplage, HFSS.

## Abstrat

New technologies have revolutionized the field of communications, leading to rapid development in the design of antennas by large frequency scale and access to miniature antennas with high capacities.

The purpose of this note is to study the printed antennas, which are of great interest by researchers, which are antennas with an electromagnetic cavity, and substrates consisting of two insulating metal layers, It has a feeder hatch through which using feeding techniques, and have many advantages, lightweight, small size and cost, easy to manufacture. They are considered the best antennas in general.

The design of the printed antennas is simulated using HFSS software, specifying reflection coefficient S11 and VSWR, to create antennas operating at a frequency of 2.4 GHz

### **Keywords :**

Printed antennas, bandwidth, S11, power supply techniques, coupling, HFSS.

## ملخص

لقد أحدثت التكنولوجيات الجديدة ثورة كبيرة في مجال الاتصالات, أدى إلى التطوير السريع في تصميم الهوائيات على نطاق تردد واسع والوصول إلى هوائيات مصغرة ذات امكانيات عالية متعددة الاستخدامات في جميع القطاعات.

ان الهدف من هذا العمل هو دراسة الهوائيات المطبوعة التي تشهد اهتماما كبير من قبل الباحثين, وهي هوائيات ذات سطح معدني وركائز تتكون من طبقة عازلة و أخرى أرضية و التي من خلالها تستخدم تقنيات تغذية, وتتميز بمزايا كثيرة, خفيفة الوزن , منخفضة الحجم والتكلفة, سهلة التصنيع. فهي تعد الامثل من بين الهوائيات بشكل عام.

يتم محاكاة تصميم الهوائيات المطبوعة باستخدام برنامج HFSS , بتحديد معامل انعكاس S11 ، و نسبة موجات مستقرة VSWR لإنشاء هوائيات تعمل على تردد 2.4 GHz.

الكلمات المفتاحية:

الهوائيات المطبوعة, عرض النطاق الترددي, نطاق التردد الواسع, تقنيات التغذية , اقتران, برنامج المحاكاة كهرو مغناطيسي HFSS.

# Sommaire

---

REMERCIEMENTS .....	I
DEDICASES .....	II
RESUME.....	V
SOMMAIRE .....	VII
LISTE DES FIGURES .....	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS .....	IX
LISTE DES SYMPOLES.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	1

## Chapitre I Caractéristiques des antennes

I.1. Introduction: .....	3
I.2. Pourquoi avons-nous besoin d'antennes? .....	4
I.3. Différents types des antennes: .....	4
I.4. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes: .....	7
I.4.1. Diagramme de Rayonnement: .....	8
I.4.2. Intensité de rayonnement: .....	9
I.4.3. Efficacité des rayonnements et gain de puissance: .....	11
I.4.3.1. Efficacité de rayonnement : .....	11
I.4.3.2. Gain de puissance:.....	12
I.4.4. Directivité et gain: .....	13
I.4.4.1. Directivité:.....	13
I.4.4.2. Gain: .....	13
I.4.5. Impédance d'entrée d'antenne: .....	14
I.4.6. Longueur effective : .....	15
I.4.7. Bande Passante ( Bandwidth): .....	15
I.4.8. Ouvertures d'antenne: .....	15
I.4.9. Polarisation de l'antenne:.....	18
I.4.9.1. Polarisation:.....	18
I.4.9.2. Catégories de polarisation:.....	19
I.5. Conclusion:.....	22

## Chapitre II Les Antennes imprimées

II.1. Introduction: .....	23
II.2. Définition et Généralité sur les Antennes imprimée:.....	24
II.3. Historique:.....	24
II.4. Structure de l'antenne imprimée: .....	25
II.4.1. L'élément rayonnant: .....	26
II.4.2. Le plan de masse:.....	26
II.4.3. Un substrat diélectrique: .....	26
II.5. Les techniques d'alimentations: .....	27
II.5.1. Avec contact:.....	27
II.5.1.1. Alimentation par ligne micro ruban:.....	27
II.5.1.2. Alimentation par sonde coaxial: .....	28
II.5.2. Sans contact: .....	28
II.5.2.1. Alimentation par couplage électromagnétique (ligne): .....	28
II.5.2.2. Alimentation par couplage à ouverture (fente):.....	29
II.6. Modélisation d'analyse de l'antenne imprimée:.....	30
II.6.1. Méthode de la ligne de transmission: .....	31
a) Calcul de la hauteur (h): .....	32
b) Calcul de la largeur (W):.....	32
c) Calcul de la constante diélectrique efficace ( $\epsilon_{eff}$ ):.....	32
d) Calcul de l'extension de longueur ( $\Delta L$ ):.....	33
e) Calcul de Fréquence de résonance $f_r$ :.....	33
f) Calcul de la longueur effective du patch ( $L_{eff}$ ):.....	33
g) de la longueur réelle (L) du patch : .....	34
h) Circuit équivalent:.....	34
i) Résistance d'entrée: .....	36
j) La directivité et l'angle d'ouverture : .....	37
II.6.2. Méthode de cavité:.....	38
II.7. Avantages et inconvénients des antennes imprimées: .....	41
II.8. Applications: .....	42

II.9. Conclusion: .....	43
<b>Chapitre III Simulation et résultats</b>	
III.1. Introduction:.....	46
III.2. Wi-Fi: .....	46
III.3. Bluetooth:.....	46
III.4. Zig Bee:.....	47
III.5. Contrôle radio: .....	47
III.6. Simulation avec HFSS:.....	47
III.6.1. Logiciel Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator):.....	47
III.6.2. Renseignements sur l'antenne: .....	48
III.6.2.1. Coefficient de réflexion S11: .....	49
III.6.2.2. Bande passante: .....	49
III.6.2.3. Gain: .....	50
III.6.2.4. Radiation pattern : .....	50
III.6.2.5.VSWR:.....	51
III.7. Solutions possibles.....	51
III.8. Conclusion: .....	54

Liste des figures

Figure (I.1): le diagramme de rayonnement de champ d'antennes dipôles Avec un demi-longueur d'onde et une longueur d'onde..... 9

Figure (I.2): Diagramme de champ de rayonnement du champ lointain à partir d'un dipôle idéal ou très court: (a); Diagramme de modèle tridimensionnel; (b) diagramme polaire du diagramme de rayonnement du plan E; et (c) tracé polaire du diagramme de rayonnement Hplane ..... 9

Figure (I.3): gain de puissance (Entrée et sortie d'alimentation d'antenne). ..... 12

Figure (I.4): une corne électromagnétique où l'onde entrante est une onde plane uniforme. .... 17

Figure (I.5): Une onde électromagnétique. .... 18

Figure (II.1): Structure d'un antenne patch rectangular. .... 25

Figure (II.2): Différentes formes d'antenne patch ..... 26

Figure (II.3) : alimentation par ligne micro-ruban. .... 27

Figure (II.4) : Antenne imprimée alimentée par sonde coaxial..... 28

Figure (II.5): Proximity Coupled Feed..... 29

Figure (II.6): Technique d'alimentation à couplage d'ouverture ..... 30

Figure (II.8): Electric Field Lines ..... 32

Figure (II.7): Microstrip Line ..... 32

Figure (II.9): Equivalent admittance circuit model ..... 36

Figure (II.10): Équivalence rayonnante de fente aux bords..... 36

Figure (II.11): Distribution des charges dans la cavité ..... 38

Figure (III.1) : Le HFSS ..... 48

Figure (III.2) : Illustration d'une antenne ..... 48

Figure (III.3) : Courbe graphique montrant la valeur de S11 par dB à 2,4GHz..... 49

Figure (III.4) : Courbe graphique montrant la bande passante par dB à 2.4GHz..... 49

Figure (III.5) : Graphique 3D de la valeur de gain par dB ..... 50

Figure (III .6) : Graphique de la diagramme du rayonnement par dB ..... 50

Figure (III.7) : Courbe graphique montrant VSWR par dB..... 51

Figure (III.8): Modèle appliqué à l'antenne patch en utilisant HFSS ..... 51

Figure (III.9): La fenêtre pour changer les dimensions du substrat..... 52

Figure (III.10): Courbe graphique montrant la valeur de S11 par dB à 2,4GHz Après le changement de surface de Substrat..... 52

Figure (III.11): Courbe graphique montrant la valeur de VSWR par dB à 2,4GHz Après le changement de surface de Substrat..... 53

Figure (III.12): Courbe graphique montrant la valeur de S11 par dB à 2,4GHz Après le deuxième changement de surface de Substrat..... 53

Figure (III.13): Courbe graphique montrant la valeur de VSWR par dB à 2,4GHz Après le deuxième changement de surface de Substrat ..... 54

### Liste des abréviations

**3D** : trois dimensions.

**BP**: Bande Passante

**eff**: effective.

**FBP**: Bande Passante Fractionnaire .

**GSM**: Global System For Mobile Communication.

**HFSS**: High Frequency Structure Simulator

**IEEE**: Institute of Electrical and Electronic Engineering .

**ISM**: Industrial, Scientific and Medical.

**LB**: Largeur de bande de rayonnement.

**RF**: Radio Fréquence

**UHF** : Ultra high frequency (Ultra haute fréquence)

**VSWR** : Voltage Standing Wave Ratio

**WIFI**: Wireless-Fidelity

**WLAN**: Wireless Local Area Network.

### Liste des symboles

$\alpha_n$ : Inconnu constant.

$E_\theta$ : Composante azimutale de l'électnc fiel

$\lambda_0$  : Longueur d'onde dans le vide.

$\epsilon_0$ : Permittivité électrique du vide.

$\epsilon_{eff}$ : Permittivité effective.

$\epsilon_r$ : Permittivité relative.

$\Delta$ : Profondeur de peau du conducteur

$\Delta L$ : est l'extension de longueur du patch.

$\delta_{eff}$ : tangente de perte Efficace.

$\delta$ : Conductivité.

$\varphi$ : Phase.

$\omega$ : Pulsation.

$\lambda$ : longueur d'onde ,

$Z$ : Impédance d'entrée

$Z_0$ : Impédance caractéristique.

$Z_{in}$ : Impédance d'entrée de l'antenne.

$\omega_r$ : fréquence de résonance ngular

$\beta$  : Constante de phase.

$\Gamma$ : Coefficient de réflexion

$\eta$  : Rendement de surface en fonction de la répartition de champ

$c$  : Vitesse de la lumière dans le vide

$\tan \delta$ : Tangente de perte de diélectrique.

$U$ : Intensité de rayonnement.

## Liste des symboles

---

$Q_c$ : Facteur de qualité du rayonnement.

$Q_d$ : Facteur de qualité du diélectrique.

$Q_T$ : Facteur de qualité total de l'antenne.

$R_{in}$ : résistance à l'entrée

$S_{11}$ : Coefficient de réflexion.

$E$ : Incident champ électrique.

$F(g)$ : Fonction de  $g$ .

$f_c$ : Fréquence central.

$f_r$ : Fréquence de résonance.

$f$ : Fréquence.

$p_c$ : perte de conducteur .

$P_e$  : Puissance d'émission.

$P_r$  : Puissance de reception.

$H$ : Champ magnétique.

$h$ : Hauteur du substrat diélectrique

$W_{rad}$ : densité de rayonnement ( $W /m^2$ ).

$W_{eff}$ : Largeur efficace de la ligne microruban.

$G$ : est la conductance associée à la puissance rayonnée du bord.

$W$ : Largeur du patch.

### **Introduction Générale:**

Le monde actuel a connu des nouvelles technologies, où le domaine des communications connaît une forte demande et de nombreuses utilisations des antennes, qu'elles soient militaires, ou de civil. Les chercheurs en électronique cherchent à développer et à améliorer la conception et les performances des antennes.

Les antennes miniatures qui sont appelées antennes imprimées, dont nous discuterons dans notre travail, où l'appelle aussi (antenne microruban ou antenne patch), elles sont répandue dans presque tous les systèmes de communication. Cette conception compose d'un connecteur métallique qui prend une forme spécifique placée sur le substrat par un plan de masse, et présente plusieurs avantages en termes de coût, de poids et de taille ainsi que de simplicité de fabrication.

Aujourd'hui, il est une source d'intérêt grâce à ses nombreuses applications, où les antennes patch sont utilisées dans les communications à haute fréquence (astronomie, systèmes militaires, téléphones mobiles...etc.).

Le but de notre travail est de présenter une étude sur la conception et la caractérisation des antennes imprimées à travers l'utilisation du programme de simulation électromagnétique HFSS, l'utilisation d'antennes à fréquence 2,4 GHz, et obtenir quelques résultats en terme du coefficient de réflexion  $S_{11}$ , le rapport des ondes stables VSWR. Cela pour atteindre l'objectif de cette étude, nous avons divisé le travail en trois chapitres:

Chapitre 1 : Consacré à fournir une étude générale sur les caractéristiques des antennes.

Chapitre 2: Dédié à fournir l'étude des antennes imprimées en mettant en évidence une description de leurs structures ainsi que des polarisations d'antennes à micro-

bande et en démontrant des techniques d'alimentation, et en présentant les domaines de leurs applications, et ses avantages et inconvénients.

Chapitre 3: Il est destiné à modéliser et simuler la conception de l'antenne imprimée par HFSS (simulateur de structure haute fréquence), et à conclure les résultats du coefficient de réflexion S11, le rapport des ondes stables VSWR.

# *CHAPITRE I*

## **Caractéristiques des antennes**

## I.1. Introduction:

En ce qui concerne les technologies sans fil, qui exige la disponibilité de dispositifs efficaces pouvant être utilisés dans les systèmes de communications. Les chercheurs de micro-onde ont travaillé au développement de RF avancé avant de répondre aux exigences. Diverses approches novatrices ont été explorées pour améliorer la performance de l'impression circuits et antennes.

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique.

Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

L'antenne imprimée est un composant important des télécommunications pour transmettre et recevoir des informations sous forme d'ondes électromagnétiques.

Les antennes peuvent servir à émettre ou à recevoir un signal sur différentes fréquences. Dans ce chapitre nous présentons Pourquoi avons-nous besoin d'antennes?, Différents types des antennes , Caractéristiques des antennes.

## I.2. Pourquoi avons-nous besoin d'antennes?

On connaît peut-être les antennes en général, que vous compreniez ou non le travail de l'antenne. Lorsqu'il y a une connexion radio, il y a une antenne. La forme, la taille et le type d'antenne peuvent être différents, mais aucune antenne n'est impliquée. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles nous avons besoin ou pourquoi nous utilisons des antennes, nous utilisons des antennes est qu'elles fournissent un moyen simple de transférer des signaux (ou des données). Ils sont des composants des systèmes de radio, de télévision et de radar qui dirigent les ondes radio entrantes et sortantes.

La communication sans fil est la seule option possible, et les antennes sont la passerelle pour cela. Il existe de nombreuses situations ou applications où les câbles sont préférés à la communication sans fil avec des antennes. [1]

## I.3. Différents types des antennes:

Il existe une grande variété d'antennes qui sont utilisées dans différentes branches des communications sans fil. Les antennes les plus simples et les plus couramment utilisées sont les antennes filaires qui sont utilisées comme dipôles, boucles ou antennes hélicoïdales. Une autre catégorie d'antenne majeure est les antennes à ouverture qui se présentent sous la forme de cornes ou de réflecteurs. [2]

Nous allons maintenant examiner certains types d'antennes:

- Antennes en treillis métallique:
  - Antenne dipôle courte.
  - Antenne dipole.
  - Antenne annulaire.
  - Antenne unipolaire.
- Enregistrer les antennes rotatives :
  - Antennes noeud papillon.
  - Antennes logarithmiques périodiques.

- Réseau dipolaire cyclique logarithmique.
- Antennes à ouverture:
  - Fente d'antenne.
  - Antenne corne.
- Antennes Microstrip:
  - Antenne rectangulaire.
  - Quart d'onde de correction d'antenne.
- Antennes réflecteurs:
  - Antenne réflecteur à écran plat.
  - Antenne à réflecteur d'angle.
  - Antenne réflecteur équivalente.
- Antennes à lentille.
- Antennes mobiles à ondes:
  - Antenne à câble long.
  - Antenne Yagi Oda.
  - Antenne en fil spiralé.
  - Antenne spirale.
- spirale Aérodynamique:
  - Antenne de lumière à deux éléments.
  - Antenne matricielle linéaire.
  - Antennes matricielles de phase.

Nous fournirons des définitions simplifiées pour tous les types d'antennes ci-dessus.

- Antennes filaires:

L'une des antennes les plus couramment utilisées est les antennes filaires. On les trouve dans les véhicules (voitures), les navires, les aéronefs, les bâtiments etc.

Les antennes filaires se présentent sous différentes formes et tailles, comme les fils droits (bipolaires), les boucles et les boucles. [3]

➤ Antenne bipolaire courte:

L'antenne la plus simple est peut-être l'antenne bipolaire courte. C'est un cas particulier d'antenne bipolaire.

Dans sa forme la plus simple, il s'agit essentiellement d'un fil en circuit ouvert avec alimentation du signal au centre. Le terme «court» dans une antenne bipolaire ne se réfère pas directement à sa taille, mais plutôt à la taille du fil par rapport à la longueur d'onde du signal.

Pour une antenne bipolaire courte, la longueur du fil est inférieure à un dixième de la longueur d'onde de la fréquence de traitement.

➤ Antenne bipolaire:

L'antenne bipolaire se compose de Conducteurs dans le même axe et la longueur du fil doit être petite par rapport à la longueur d'onde. [3]

➤ Gorges de l'Antenne:

L'antenne annulaire se compose d'un ou de plusieurs rouleaux de fil formant un anneau. Le rayonnement de l'antenne annulaire peut être comparé à une antenne bipolaire courte.

➤ Antenne unipolaire:

Un cas spécial d'une antenne bipolaire est une antenne unipolaire, i.e. c'est la moitié d'une antenne bipolaire.

➤ Antennes d'ouverture:

Une classe d'antennes directionnelles, l'ouverture de l'antenne une ouverture dans la surface. L'antenne d'ouverture se compose généralement d'une antenne bipolaire ou d'une antenne dans un guide de structure avec une ouverture pour produire des ondes radio.

➤ Fente de l'antenne:

Une sorte d'antenne à ouverture a une ou plusieurs ouvertures coupées sur la surface du guide de longueur d'onde. Il est utilisé pour les fréquences micro-ondes et un modèle de rayonnement multidirectionnel.

➤ Corne d'Antenne:

L'une des antennes les plus courantes est Horn Antenna, qui affecte la transmission entre la ligne de transmission et la propagation des ondes dans l'espace libre. C'est une extension naturelle de la forme d'onde.

➤ Dipole bipolaire:

Il est considéré comme le type le plus commun, étant deux fils de laiton ou aluminium stable, où chacun de leurs membres est épaissi par un câble double avec une longueur de fil égale à un quart de la longueur d'onde, où la longueur du fil est égale

à la moitié de la longueur d'onde conduisant à une meilleure réception et à une puissance supérieure au signal. [5]

➤ Antenne verrouillée:

C'est comme une antenne polaire, et elle est épaissie par un câble.

(LÉGÈREMENT PLUS LONG) Longueur d'onde. La connexion de la ligne de transmission au milieu d'une nervure rectangulaire augmente le courant passant à travers l'antenne à doubler, ce qui entraîne une plus grande transmission et la puissance de réception, et est utilisé pour les communications radio et antenne de télévision. [5]

#### **I.4. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes:**

Une antenne est caractérisée par différents paramètres qu'on peut classer soit en caractéristiques électriques, soit en caractéristiques de rayonnement. Diagramme de rayonnement de l'antenne.

Un certain nombre de paramètres importants existent, comme la puissance rayonnée, l'efficacité du rayonnement, la directivité, le gain et la polarisation de l'antenne.

#### **I.4.1. Diagramme de Rayonnement:**

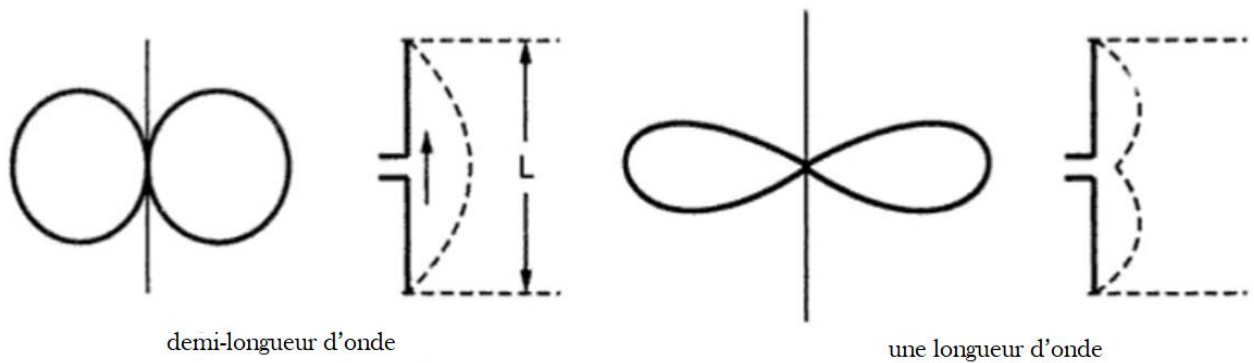
Une antenne pratique ne peut pas émettre autant d'énergie dans toutes les directions. Le rayonnement de l'antenne est généralement maximal dans une direction tandis que le minimum est ou est proche de zéro dans d'autres directions.

En termes graphiques, le champ de puissance est dessiné sous forme de graphique en trois dimensions car il mesure l'intensité. Le diagramme de rayonnement de toute antenne est défini comme la distribution relative de l'énergie électromagnétique ou de la puissance dans l'espace. Du fait que les antennes font partie intégrante de tous les systèmes de télécommunication, le diagramme de rayonnement est déterminé dans la région du champ lointain où aucun changement de diagramme avec la distance ne se produit. La figure montre que si nous plaçons une antenne à l'origine d'un système de coordonnées sphériques, les propriétés de rayonnement de l'antenne ne dépendront que des angles  $\varphi$  et  $\theta$  le long d'une trajectoire ou d'une surface de rayon constant.

Une trace de la puissance rayonnée (ou reçue) à un rayon fixe est connue sous le nom de modèle de puissance, tandis que la variation spatiale du champ électrique le long du même rayon est appelée modèle de champ d'amplitude.

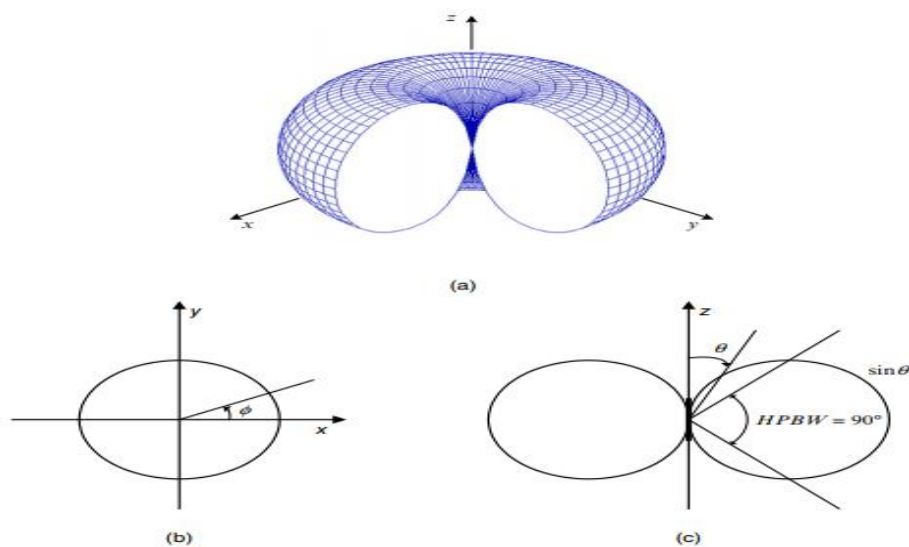
Bien qu'une visualisation **3D** d'un diagramme de rayonnement d'antenne soit utile, généralement, quelques tracés du diagramme en fonction de  $\theta$ , pour certaines valeurs particulières de  $\varphi$ , plus quelques tracés en fonction de  $\varphi$ , pour certains les valeurs de  $\theta$ , donnent des informations suffisantes. Par exemple, la figure **1.2a** représente le diagramme de rayonnement **3D** d'un dipôle idéal ou très court. La figure **1.2b** montre le plan **xy** (plan azimutal,  $\theta = \pi / 2$ ), appelé la coupe du plan **E** principal, et la figure **1.2c** est le plan **xz** (plan d'élévation,  $\varphi = 0$ ) ou la coupe du plan **H** principal.

L'image suivante montre le diagramme de rayonnement de champ d'antennes dipôles avec une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde.



**Figure (I.1):** le diagramme de rayonnement de champ d'antennes dipôles Avec un demi-longueur d'onde et une longueur d'onde [2]

Voir aussi la représentation **3D** du schéma de rayonnement.



**Figure (I.2):** Diagramme de champ de rayonnement du champ lointain à partir d'un dipôle idéal ou très court: **(a)**; Diagramme de modèle tridimensionnel; **(b)** diagramme polaire du diagramme de rayonnement du plan **E**; et **(c)** tracé polaire du diagramme de rayonnement Hplane [6]

#### I.4.2. Intensité de rayonnement:

Contrairement au diagramme de rayonnement, l'intensité du rayonnement ne montre pas de dépendance avec la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne

de réception. L'intensité du rayonnement est exprimée en puissance par unité d'angle solide. Son unité est watts / stéradian et s'écrit **W/sr**.

$$U = r^2 W_{rad} \quad (\text{I.1})$$

La puissance totale rayonnée devient:

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (\text{I.2})$$

$$P_{rad} = A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 \theta \, d\theta \, d\varphi = \pi^2 A_0 [W] \quad (\text{I.3})$$

Où

$W_{rad}$  = densité de rayonnement (**W /m<sup>2</sup>**)

L'onde électromagnétique rayonnée à distance suffisante de l'antenne se comporte comme une onde plane i.e. le champ électrique et le champ magnétique sont orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation de l'onde (celle-ci s'éloigne de l'antenne qui en est la source). Les concepts de l'onde plane peuvent donc être appliqués ici.

On sait que le vecteur de Poynting **P** indique la quantité de puissance électromagnétique instantanée qui se propage par unité de surface. Pour connaître la densité de puissance en moyenne dans le temps, il faut réaliser :

$$\langle \mathbf{P} \rangle = \frac{1}{T} \int_T \mathbf{P} \, dt = \mathbf{R}_e \frac{1}{2} \{ \mathbf{E} \times \mathbf{H} \} \quad (\text{I.4})$$

On obtient alors la densité de puissance moyenne  $\langle \mathbf{P} \rangle$ . Le nouveau vecteur  $\bar{\mathbf{P}}$  est appelé vecteur complexe de Poynting. Comme l'antenne a la propriété de concentrer la puissance émise dans une ou des directions privilégiées de manière similaire à une lentille, cette densité de puissance obtenue du vecteur de Poynting moyen varie selon la direction d'observation  $\Psi$ . Dans le système de coordonnées sphériques  $\Psi$  correspond à la paire  $(\theta, \varphi)$ , on écrit:

$$\langle \mathbf{P} \rangle = \langle \mathbf{P}(r, \theta, \varphi) \rangle, \text{ donc } \bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{E}}(r, \theta, \varphi) \quad (\text{I.5})$$

### I.4.3. Efficacité des rayonnements et gain de puissance:

#### I.4.3.1. Efficacité de rayonnement :

L'efficacité d'une antenne est un rapport de la puissance délivrée à l'antenne par rapport à la puissance rayonnée par l'antenne. Une antenne à haut rendement a la majeure partie de la puissance présente à l'entrée de l'antenne rayonnée. Une antenne à faible rendement a la plupart de la puissance absorbée sous forme de pertes à l'intérieur de l'antenne, ou réfléchi en raison d'une discordance d'impédance. [10]

Une belle propriété des antennes est que l'efficacité est la même que nous utilisons l'antenne comme antenne d'émission ou de réception. Par conséquent, nous pourrions définir l'efficacité de l'antenne comme le rapport de la «puissance potentielle reçue de tous les angles possibles», mais c'est plus compliqué. N'oubliez pas que l'efficacité des antennes d'émission et de réception est la même, et comme il est plus facile de comprendre l'efficacité en termes de puissance rayonnée par rapport à la puissance fournie, nous utiliserons simplement cette définition. Cette propriété des antennes est connue sous le nom de réciprocité d'antenne.

L'efficacité de l'antenne (ou efficacité de rayonnement) peut être écrite comme le rapport de la puissance rayonnée à la puissance d'entrée de l'antenne:

$$\epsilon_r = \frac{P_{\text{rayonné}}}{P_{\text{entrée}}} \quad (\text{I.6})$$

Comme dans tout circuit à pertes, une fraction plus ou moins appréciable de la puissance fournie se retrouve à la sortie. Dans le cas d'une antenne, la sortie

représente l'émission ; les pertes sont liées à la résistance de pertes. Plus faible est la résistance de pertes, meilleure est l'efficacité. L'efficacité de rayonnement de l'antenne qu'on note par  $\epsilon_r$  considère le rapport de la puissance rayonnée  $\langle P_t \rangle$  à la puissance fournie à l'entrée de l'antenne  $\langle P_{in} \rangle$ :

$$\epsilon_r = \frac{\langle P_t \rangle}{\langle P_{in} \rangle} = \frac{R_{ri}}{R_{ri} + R_{pertes}} \quad (\text{I.7})$$

### I.4.3.2. Gain de puissance:

Gain: rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée au intensité de rayonnement moyenne qui serait obtenue si toutes les la puissance d'entrée de l'antenne a été rayonnée de manière isotrope. [7]

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{I.8})$$

Où:

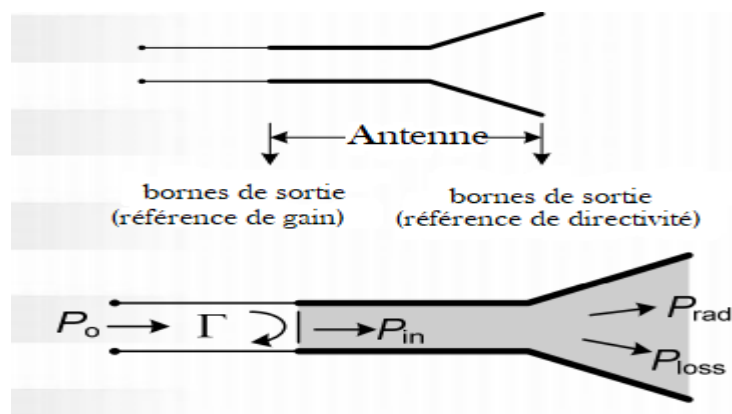
$P_{in}$ : entrée d'alimentation à l'antenne

$$P_{in} = (1 - |\Gamma|^2) P_0 = P_{rad} + P_{loss} \quad (\text{I.9})$$

$P_{loss}$ : Perte de puissance ohmique et diélectrique.

Gain relatif: rapport du gain de puissance dans une direction donnée au gain de puissance d'une antenne de référence dans la même direction. La puissance d'entrée doit être la même pour les deux antennes. Si l'antenne de référence est une source isotrope sans perte, alors :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}(\text{source isotrope sans perte})} \quad (\text{I.10})$$



**Figure (I.3):** Gain de puissance (Entrée et sortie d'alimentation d'antenne). [9]

#### I.4.4. Directivité et gain:

##### I.4.4.1. Directivité:

Idéalement, une antenne qui rayonne de l'énergie dans toutes les directions également c.-à-d. une antenne omnidirectionnelle est appelée antenne isotrope. C'est une situation hypothétique et une antenne isotrope n'existe pas dans la pratique. [10]

Mais si nous considérons une antenne isotrope, alors sa densité de puissance sera la même à tous les points sur la sphère de rayonnement. Par conséquent, la puissance moyenne d'une antenne en fonction de la puissance rayonnée est :

$$P_{\text{avg}} = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi r^2} \text{ W/m}^2 \quad (\text{I.11})$$

##### I.4.4.2. Gain:

Selon la définition standard, «le gain d'une antenne est le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope.»

Simplement, le gain d'une antenne prend en compte la directivité de l'antenne ainsi que ses performances effectives. Si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope (c'est-à-dire dans toutes les directions), alors l'intensité de rayonnement que nous obtenons peut être prise comme référentiel.

- Le terme gain d'antenne décrit la quantité de puissance transmise dans la direction du rayonnement de crête vers celle d'une source isotrope.
- Le gain est généralement mesuré en **dB**.
- Contrairement à la directivité, le gain d'antenne prend également en compte les pertes qui se produisent et se concentre donc sur l'efficacité.

L'équation de gain, **G** est comme indiqué ci-dessous. [7]

$$G = n_e D \quad (\text{I.12})$$

### I.4.5 Impédance d'entrée d'antenne:

L'impédance d'alimentation d'une antenne est un élément clé associé à ses performances. Pour atteindre le maximum d'efficacité, son départ doit avoir la même impédance.

Généralement, l'impédance de l'antenne est donnée par:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + \mathbf{jX} \quad (\text{I.13})$$

Les antennes sont utilisées dans la communication sans fil afin de transmettre le signal sous forme d'ondes. Il est conçu pour transformer l'énergie électrique en signaux électromagnétiques à l'extrémité émettrice. Alors que le signal électromagnétique revient à celui électrique à l'extrémité de réception.

Ainsi, il intègre fondamentalement le champ électrique et le champ magnétique afin de générer de la tension et du courant afin d'actionner des dispositifs électriques. Ainsi, l'impédance de l'antenne en un point est également donnée comme le rapport du champ électrique au champ magnétique en ce point particulier.

On peut donc dire que l'impédance fournie par l'antenne à sa borne d'entrée est appelée impédance d'antenne.

Nous savons que lorsqu'une certaine tension est fournie à une antenne émettrice, elle génère du courant en suivant la loi d'Ohm.

$$\mathbf{V} = \mathbf{IR} \quad (\text{I.14})$$

Ici, R représente la résistance de la borne d'entrée de l'antenne.

Plus loin en considérant la partie imaginaire, nous aurons:

$$\mathbf{E} = \mathbf{IZ} \quad (\text{I.15})$$

Donc, si nous avons une antenne émettrice qui rayonne une certaine puissance, l'impédance  $\mathbf{Z}$  sera présente derrière elle. C'est ce qu'on appelle l'impédance de l'antenne.

Cette impédance est une fusion de résistance et de réactance formant ainsi une valeur complexe. [12]

#### I.4.6. Longueur effective:

La longueur d'une antenne linéaire imaginaire avec un courant uniformément réparti est définie comme la longueur effective d'une antenne de telle sorte que ces deux antennes ont le même champ lointain dans le plan  $\pi / 2$ . [15]

#### I.4.7. Bande Passante (Bandwidth):

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences sur laquelle un ou plusieurs paramètres d'antenne répondent à certaines spécifications. Dans la plupart des cas, **BP** se réfère au coefficient de réflexion  $G$  et est donc la plage sur laquelle  $G$  est inférieur à une valeur maximale admissible spécifiée, **Gmax**, avec l'hypothèse tacite que d'autres paramètres restent également dans leurs spécifications. BP dépend fortement de la valeur de **Gmax** et il est important que cela soit indiqué explicitement. Avec  $f_u$  et  $f_l$  désignant les limites supérieure et inférieure de la gamme de fréquences, respectivement, la bande passante fractionnaire (**FBP**) est à la condition que la fréquence centrale  $f_c$  coïncide avec la fréquence de fonctionnement. Lorsque plusieurs paramètres d'antenne doivent être pris en compte, **BP** est donné par la gamme minimale de fréquences sur laquelle les spécifications sont satisfaites. En règle générale, les calculs de bilan de liaison posent des exigences strictes sur le gain et la couverture d'antenne, sur l'efficacité de polarisation et sur le coefficient de réflexion sur la bande passante du système. [11]

#### I.4.8. Ouvertures d'antenne:

Les ouvertures d'antenne sont utilisées en référence à la zone de l'antenne. Il est défini comme la mesure de la capacité de l'antenne à recevoir efficacement la puissance rayonnée vers elle. Comme le terme est associé à la zone de l'antenne, montre ainsi les caractéristiques de capture de puissance des antennes de réception. L'ouverture dans un sens général signifie un trou ou une fente présent sur une surface. L'ouverture d'antenne est le terme utilisé pour les antennes qui contiennent une ouverture sur sa surface.

Ainsi, l'ouverture présente à la surface de l'antenne permet à l'énergie électromagnétique d'être émise à travers elle ou de recevoir l'énergie émise et de la transférer à la charge. c'est la zone dont l'orientation est normale à la direction d'où provient l'onde électromagnétique. Ceci est fait afin d'intercepter la puissance équivalente de l'onde entrante telle qu'elle peut être produite par l'antenne qui la reçoit. Il est défini comme le rapport de puissance reçu par l'antenne à la densité de puissance moyenne de l'onde incidente. Ainsi, est donné comme:

$$\text{Ouverture effective} = \frac{\text{puissance reçue}}{\text{densité de puissance moyenne}} \quad (\text{I.16})$$

$$A_e = \frac{w}{p}$$

**W:** est la puissance reçue en watts.

**P:** est la densité de puissance moyenne en **watts / m<sup>2</sup>**.

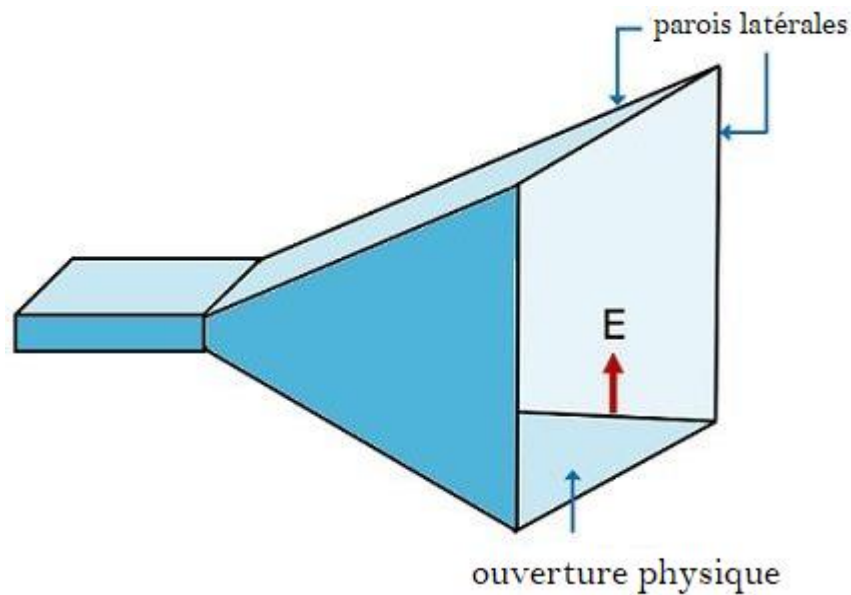
**A<sub>e</sub>:** est la surface effective en **m<sup>2</sup>**.

Cela signifie que le produit de la densité de puissance de l'onde électromagnétique et de son ouverture est égal à la puissance reçue par l'antenne.

Par conséquent, une antenne avec une ouverture plus grande collecte plus de puissance qu'une antenne avec une ouverture plus petite pour le même champ électromagnétique. Ainsi, il montre son utilité dans le calcul de la puissance reçue par une antenne. [13]

Nous savons qu'en raison du théorème de réciprocité, les gains d'antenne pour les modes de réception et d'émission sont les mêmes. D'une manière similaire, l'ouverture effective de l'antenne de réception peut être utilisée pour déterminer également les performances de l'antenne d'émission.

La figure ci-dessous représente une corne électromagnétique où l'onde entrante est une onde plane uniforme:



**Figure( I.4):** une corne électromagnétique où l'onde entrante est une onde plane uniforme.[12]

Nous savons que l'ouverture concerne la caractéristique de capture de l'antenne. Ainsi, lorsque l'onde incidente tombe à la surface de l'antenne, l'onde descendante induit une certaine tension sur l'antenne de réception. Cependant, la quantité de tension induite montre une dépendance aux caractéristiques de l'antenne.

Dans les antennes de réception, l'ouverture effective joue un rôle crucial dans la détermination de la quantité de tension induite dans celle-ci.

Les différents types d'ouvertures d'antenne sont les suivants:

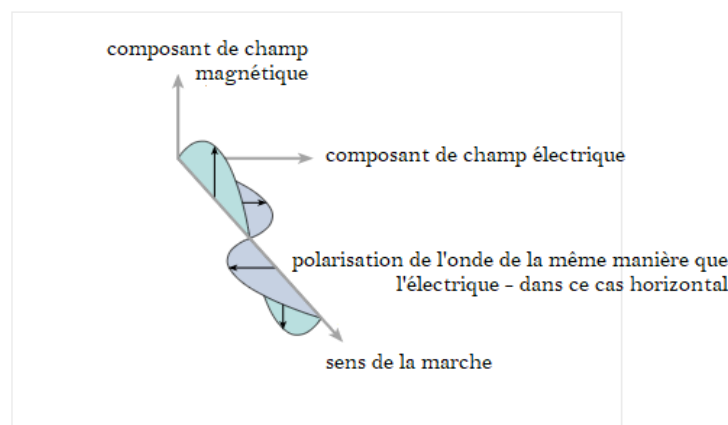
- Ouverture effective.
- Ouverture de diffusion.
- Ouverture de perte.
- Collecte d'ouverture.
- Ouverture physique.

## I.4.9. Polarisation de l'antenne:

### I.4.9.1. Polarisation:

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identique à la direction du champ électrique, c'est à dire à celle des brins rayonnants de l'antenne. Le plan E (électrique) est parallèle au vecteur E de l'onde émise. On parle de polarisation verticale si le plan E est perpendiculaire au sol; s'il est parallèle au sol, on parle de polarisation horizontale. Aussi le vecteur du champ électrique instantané trace dans le temps une figure. On réfère à ce phénomène simplement la polarisation du champ électrique. La figure est généralement une ellipse qui présente des cas particuliers. Pour la plupart des antennes, il est très facile de déterminer la polarisation. C'est simplement dans le même plan que les éléments de l'antenne. Ainsi, une antenne verticale (c'est-à-dire une avec des éléments verticaux) recevra le mieux des signaux polarisés verticalement et de même une antenne horizontale recevra des signaux polarisés horizontalement.

Ainsi, la polarisation est effectivement le plan dans lequel l'onde électrique vibre. Ceci est important lorsque l'on regarde les antennes car elles sont sensibles à la polarisation et ne reçoivent ou ne transmettent généralement qu'un signal avec une polarisation particulière.



**Figure (I.5):** Une onde électromagnétique. [14]

Il est important de faire correspondre la polarisation de l'antenne **RF** à celle du signal entrant. De cette manière, le signal maximum est obtenu. Si la polarisation de

l'antenne **RF** ne correspond pas à celle du signal, il y a une diminution correspondante du niveau du signal. Il est réduit d'un facteur cosinus de l'angle entre la polarisation de l'antenne **RF** et le signal.

En conséquence, la polarisation des antennes situées dans l'espace libre est très importante, et elles doivent évidemment être exactement dans le même plan pour fournir le signal optimal. S'ils étaient à angle droit l'un par rapport à l'autre (c'est-à-dire à polarisation croisée), alors en théorie aucun signal ne serait reçu.

Pour les applications de radiocommunications terrestres, on constate qu'une fois qu'un signal a été transmis, sa polarisation reste globalement la même. Cependant, les réflexions des objets sur la trajectoire peuvent modifier la polarisation. Comme le signal reçu est la somme du signal direct plus un certain nombre de signaux réfléchis, la polarisation globale du signal peut changer légèrement bien qu'elle reste globalement la même.

#### **I.4.9.2. Catégories de polarisation:**

Différents types de polarisation des ondes électromagnétiques se propagent de manière légèrement différente dans certaines circonstances.

Cela signifie que pour certaines formes de radiodiffusion, de radiocommunications ou pour certains systèmes sans fil, différentes formes de polarisation peuvent être utilisées.

En général, les avantages et les inconvénients des diverses formes de polarisation sont relativement subtils, mais sous certaines formes de radiodiffusion, de liaisons sans fil ou pour les communications radio ou les systèmes de communications mobiles, ces petites différences peuvent faire une grande différence.

Il existe plusieurs catégories de polarisation et, à l'intérieur de chaque type, plusieurs sous-catégories. Parallèlement à cela, les antennes concernées ont des polarisations correspondantes. [14]

➤ **Polarisation linéaire:** La polarisation linéaire est la forme la plus courante de polarisation d'antenne. Il se caractérise par le fait que tout le rayonnement est dans un seul plan - d'où le terme linéaire:

- **Polarisation horizontale:** Cette forme de polarisation d'antenne comporte des éléments horizontaux. Il capte et émet des signaux polarisés horizontalement, c'est-à-dire des ondes électromagnétiques avec le champ électrique dans le plan horizontal.

- **Polarisation verticale:** Cette forme d'antenne est caractérisée par les éléments verticaux à l'intérieur de l'antenne. Il peut s'agir d'un seul élément vertical. Une des raisons de l'utilisation de la polarisation verticale est que les antennes comportant un seul élément vertical peuvent rayonner également autour de lui dans le plan horizontal. Les antennes à polarisation verticale ont généralement ce que l'on appelle un faible angle de rayonnement permettant d'émettre une grande partie de leur puissance sous un angle proche de la surface de la Terre. Les antennes

à polarisation verticale sont également très pratiques pour une utilisation avec des automobiles.

- **Polarisation oblique:** Il s'agit d'une forme de polarisation d'antenne radio qui forme un angle par rapport aux plans horizontaux ou verticaux. De cette manière, les antennes polarisées verticalement et horizontalement peuvent recevoir le signal.

- **Polarisation circulaire:** Les antennes imprimée peuvent être conçues pour la polarisation circulaire en ajustant leurs dimensions physiques de manière à produire deux modes orthogonaux dégénérés dans la région de la cavité. Cela entraîne à son tour le rayonnement de deux ondes polarisées orthogonalement près de la direction large. Ainsi, le rayonnement polarisé circulairement est obtenu lorsque deux modes orthogonaux sont excités avec une amplitude égale et une quadrature en phase.[29]

Pour exciter la polarisation circulaire dans un patch, nous devons faire

trois choses:

- Divisez le signal en deux parties égales.
- Alimentez un signal vers le radiateur horizontal (**axe x**) et l'autre vers le radiateur vertical (**axe y**). Chaque radiateur se comporte comme une paire de fentes rayonnantes dans l'antenne patch.
- Modifier la phase de l'un des signaux de **90°**. [12]
- **Polarisation circulaire à gauche:** dans cette forme de polarisation, le vecteur tourne à gauche, c'est-à-dire à l'opposé de la droite.
- **Polarisation elliptique:** Sinon, la polarisation est elliptique et la direction du champ **E** varie dans le temps. Dans ce cas, l'extrémité du vecteur représentant le champ électrique décrit une ellipse lorsque de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation. Dans le cas particulier où les 2 composantes sont en quadrature  $\emptyset$ , la polarisation est alors circulaire. Il existe deux types de polarisation elliptique droite et gauche.

Il est possible que des antennes polarisées linéairement reçoivent des signaux polarisés circulairement et vice versa. La force sera égale que l'antenne polarisée linéairement soit montée verticalement, horizontalement ou dans tout autre plan mais dirigée vers le signal d'arrivée.

Il y aura une certaine dégradation parce que le niveau du signal sera de **3 dB** inférieur à celui si une antenne à polarisation circulaire du même sens était utilisée. La même situation existe lorsqu'une antenne à polarisation circulaire reçoit un signal à polarisation linéaire.

**I.5. Conclusion:**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un bref aperçu des caractéristiques des antennes, des raisons pour lesquelles nous en avons besoin dans la vie quotidienne, et de certaines caractéristiques, diagrammes de rayonnement et gain d'antenne.

## *CHAPITRE II*

### Les antennes imprimées

**II.1. Introduction:**

Le domaine des télécommunications subit le progrès et le développement technologiques avec l'aide du développement rapide de la technologie, à travers la demande croissante de la population et des industries. Il a eu recours à des antennes, qui sont d'une grande importance dans les communications filaires et sans fil, et sont l'un des éléments les plus massifs du système qui assurent le travail d'émission ou de réception d'ondes électromagnétiques par rayonnement.

Les nouvelles technologies, visant de plus en plus à miniaturiser le circuit, les composants électroniques et tout ce qui s'y rapporte, ont mis en évidence l'importance des antennes imprimées dans la communication radio, légères et peu coûteuses.

Dans ce chapitre, nous allons présenter de divers aspects liés aux antennes imprimées. où nous mettons en évidence la définition de ces dernières, puis nous étudierons les structures, les techniques d'alimentation utilisées, puis nous examinerons Modélisation d'analyse de l'antennes, et enfin, nous clôturerons le chapitre avec un bref aperçu de leurs avantages et inconvénients et des domaines de certains de ses application.

## II.2. Définition et Généralité sur les Antennes imprimée:

L'antenne imprimée est devenue largement connue, et elle est également très populaire dans le domaine des systèmes de communication. et ils sont utilisés dans une variété de communications mobiles. [16]

Lorsque les antennes imprimées offrent des gains significatifs et le large bande pour les connexions à très haut débit, ils sont réalisés avec la technologie des circuits imprimés. Ils sont définis comme des structures de procédure électrique, qui sont fabriquées en déposant des encres ou en les absorbant sur un substrat en une seule étape pratique. L'encre peut être déposée par un autre type de technique d'impression, comme la sérigraphie, la sérigraphie ou l'impression à réaction à l'encre. [17]

La technologie actuelle qui vise de plus en plus la miniaturisation des composants a permis de mettre en évidence l'importance et l'utilité des antennes imprimées. Suite à ça, beaucoup d'applications ont vu le jour, à savoir, les missiles intelligents, les communications sans fils, les applications radar etc. [18]

## II.3. Historique:

Les débuts de l'émergence des antennes imprimées au début des années **1950** du siècle dernier **20**, les scientifiques **Guttan** et **Baissimot** les ont appelés petites antennes à bande en **1953**, la bande a conduit à des pertes de rayonnement élevées qui ont provoqué des ruptures dans la région des lignes de la enregistrer.

La gestion des erreurs s'est poursuivie jusqu'à ce qu'ils développent l'antenne imprimée au début des années **1970**, car elle n'était destinée qu'à des applications militaires.

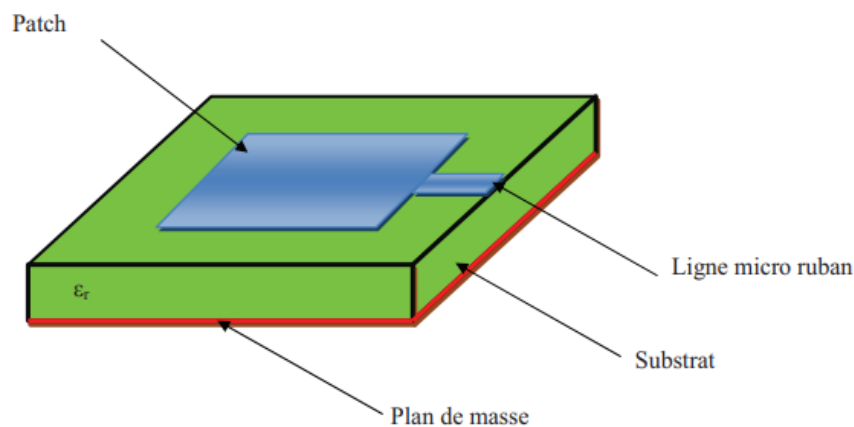
Dans les années **1990**, grâce à des recherches visant à les rendre faciles à fabriquer et peu coûteux, ainsi qu'à leur capacité d'intégration, ils ont suscité l'intérêt des applications industrielles (avions, satellites, missiles, etc.). C'est également le type d'antenne hyperfréquence préféré dans les systèmes de communication modernes.[19]

#### II.4. Structure de l'antenne imprimée:

L'antenne imprimée est conçue pour remplir deux fonctions de base qui définissent le principe de l'antenne en général, représentée dans l'émission et la réception des ondes électromagnétiques, et elle est considérée comme un élément transformateur.

Les structures planaires sont largement utilisées dans la conception d'antennes actives. [20]

Le structure de l'antenne patch se compose de :

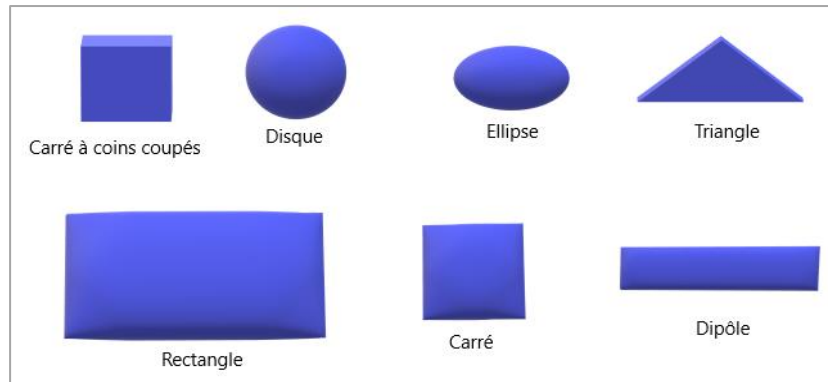


**Figure (II.1):** Structure d'un antenne patch rectangular.[18]

##### II.4.1. L'élément rayonnant:

C'est un mince conducteur métallique (habituellement de **17,5 à 35 $\mu\text{m}$**  d'épaisseur en hyperfréquence et **9 $\mu\text{m}$**  en millimétrique) de forme arbitraire. [21]

Ont de nombreuses formes géométriques et des dimensions telles que le rectangle, le carré, le cercle, le triangle et l'ellipse sont affichés, et une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante.



**Figure (II.2):** Différentes formes d'antenne patch.[24]

#### II.4.2. Le plan de masse:

Est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure. [22]

#### II.4.3. Un substrat diélectrique:

Est défini comme un isolant caractérisé par sa permittivité relative  $\epsilon_r$ , sa hauteur  $h$  et sa perte diélectrique tangente  $\tan \delta$ . Utilisée pour augmenter la puissance fournie par l'antenne, réduire les pertes par effet Joule et améliorer le passage de bande de l'antenne, la face inférieure est entièrement métallisée pour produire un niveau de sol. La nature du substrat joue un rôle majeur dans les performances finales du composant précipité. [20]

#### II.5. Les techniques d'alimentations:

L'alimentation guide l'énergie électromagnétique de la source à la région sous le patch. Une partie de cette énergie traverse la limite du patch et rayonne dans l'espace.[23]

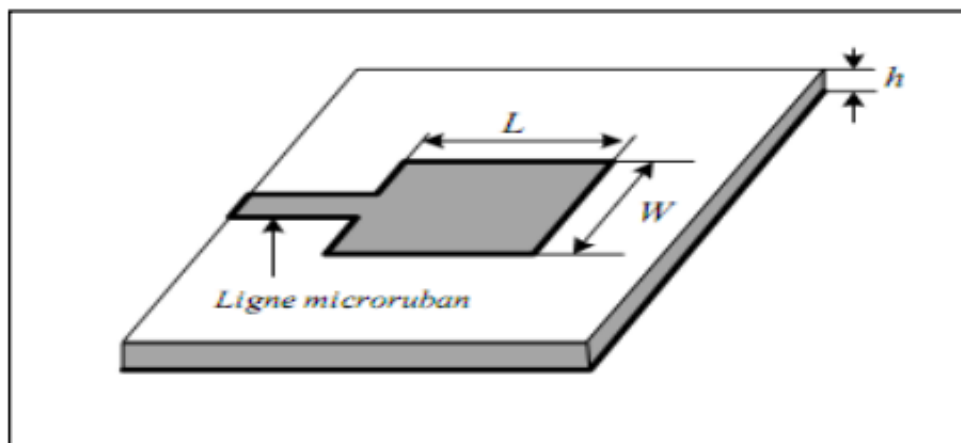
L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. [21]

Les antennes imprimées peuvent être alimentées par une variété de méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories: [24]

### II.5.1. Avec contact:

#### II.5.1.1. Alimentation par ligne micro ruban:

C'est technologie conviviale qui permet une résistance simple de la résistance et facilite l'adaptation d'impédance. La puissance est fournie par la conduction de la ligne conductrice en plus d'être de faible largeur par rapport à la correction de rayonnement. Il présente également un inconvénient car il génère un rayonnement parasite qui augmente les pertes.



**Figure (II.3) :** alimentation par ligne micro-ruban. [22]

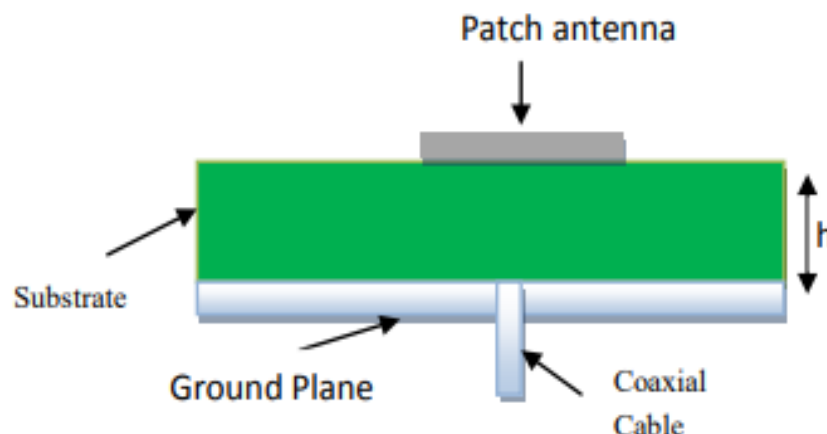
#### II.5.1.2. Alimentation par sonde coaxial:

La technique d'alimentation utilisée ici est appelée alimentation par câble axial ou alimentation par sonde. Le câble axial se compose d'un connecteur externe et d'un connecteur interne. Les antennes Microstrip sont alimentées d'en bas par une sonde qui relie le connecteur externe du câble axial au plan de masse, et le connecteur central est soudé à l'antenne patch.

Son principal inconvénient: il fournit une bande passante étroite. [25]

Ses avantages incluent:

- Pas de pertes par rayonnement de ligne.
- Obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde.
- Technique de perçage simple. [26]



**Figure (II.4) :** Antenne imprimée alimentée par sonde coaxial [44]

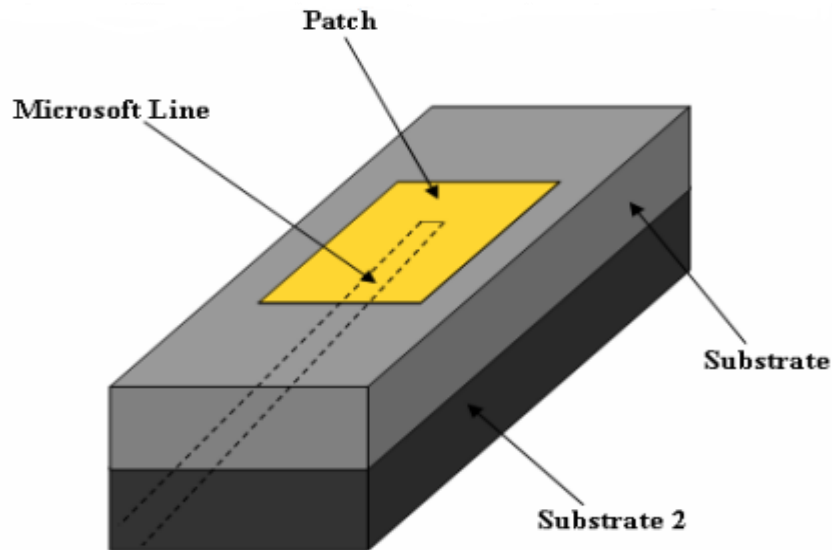
## II.5.2. Sans contact:

### II.5.2.1. Alimentation par couplage électromagnétique (ligne):

C'est une technique qui utilise deux substrats isolants: le substrat supérieur avec une permittivité inférieure sur lequel est imprimé l'élément rayonnant, le substrat inférieur avec une permittivité plus élevée, et la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats. De plus, cette technologie permet de délivrer la puissance entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant par un trou dans le sol qui les sépare, et ce trou garantit le couplage électromagnétique en général.

Des matériaux à faible diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur afin de réduire le rayonnement parasite, car la couche supérieure doit être épaisse et avoir une faible permittivité, tandis que le substrat inférieur est mince et a une permittivité élevée, et ses inconvénients résident dans la difficulté de fabrication en raison de son

installation de deux couches isolantes qui augmentent l'épaisseur de l'antenne, mais cela permet une expansion de la bande passante.



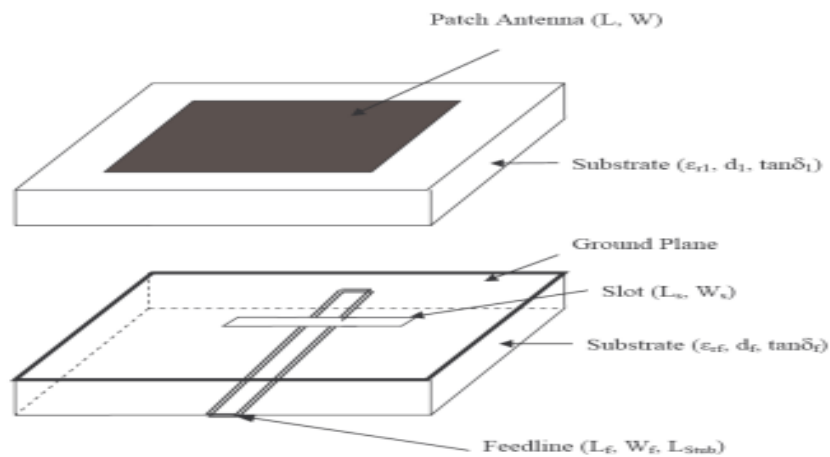
**Figure (II.5):** Alimentation couplée de proximité [42]

#### II.5.2.2. Alimentation par couplage à ouverture (fente):

Ce type d'alimentation permet un minimum de rayonnement parasite. Dans cette technique, la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant sont séparés de la petite bande dans le plan de masse, l'élément de rayonnement est gravé sur le substrat supérieur et la ligne d'alimentation est gravée sur le substrat inférieur, où ils sont placés des deux côtés de la plan de masse qui a une ouverture qui permet l'alimentation électrique entre l'élément rayonnant et la ligne envergé, cela détermine la quantité de couplage, en termes de forme, taille et emplacement du trou centré sous le patch et doit être localisé avec précision.

Pour améliorer l'irradiance, une faible constante diélectrique pour le substrat supérieur et un constant diélectrique élevé pour le substrat inférieur sont utilisées. Parmi ses caractéristiques:

- ✓ L'utilisation de deux substrats évite l'effet délétère d'un substrat constant diélectrique élevé sur la bande passante et l'efficacité.
- ✓ Aucun contact direct entre l'alimentation et le patch évitant la grande sonde réaction ou large ligne de micros-trip aucun rayonnement de l'alimentation et des dispositifs actifs puisqu'un plan au sol les sépare du patch rayonnant. [27]



**Figure (II.6):** Technique d'alimentation à couplage d'ouverture [37].

## II.6. Modélisation d'analyse de l'antenne imprimée:

Les antennes imprimées, plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées. Parmi ces méthodes, les plus couramment utilisées sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité, qui sont basés sur la distribution du courant magnétique autour du patch:

### II.6.1. Méthode de la ligne de transmission:

La description analytique la plus simple d'un patch microruban rectangulaire utilise la théorie des lignes de transmission et modélise le patch comme deux fentes rayonnantes parallèles. [16] Séparées par une ligne de transmission  $Z_c$  de longueur égale à celle du patch. [28]

Une ligne de transmission microruban simple consiste en un endroit conducteur sur un matériau diélectrique monté sur un plan de masse conducteur. [29]

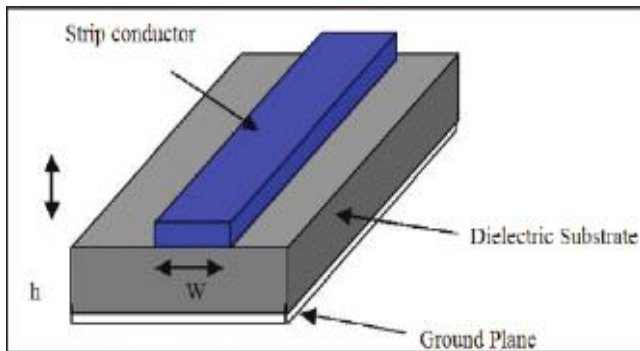
La conception d'une antenne basée sur le patch Micros-trip nécessite un énorme calcul et des considérations telles que la largeur (**W**) et la longueur (**L**) de l'antenne, la constante diélectrique effective ( $\epsilon_{eff}$ ) en fonction du substrat utilisé, efficace ( $\Delta L$ ) et longueur réelle (**L**) du patch [30], l'antenne utilise une fente rayonnante équivalente de largeur **W** et de hauteur **h** pour représenter chacun des bords rayonnants. L'intensité du rayonnement est fortement influencée par la longueur du conducteur, **L**, et la largeur, **W**, et dans une moindre mesure par la hauteur du substrat **h**. [31]

Il est utilisé pour déterminer les performances d'entrée d'une antenne patch rectangulaire. Ce modèle n'est utilisé que dans une antenne patch rectangulaire et non sous une autre forme patch. [32]

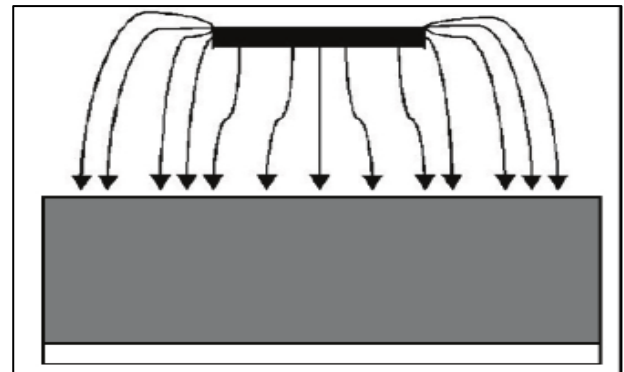
La démarche adoptée pour déterminer les paramètres géométriques du motif imprimé s'articule autour des deux étapes suivantes:

Calcul de la permittivité effective  $\epsilon_{eff}$  en fonction de la largeur du motif **W**.

Calcul de la longueur **L** du motif imprimé en fonction de la permittivité effective. [33]



**Figure (II.8):** Ligne microruban [35]



**Figure (II.7):** Lignes de champ électrique [35]

**a) Calcul de la hauteur (h):**

La minceur du substrat doit être choisie le plus grand possible pour maximiser la bande passante et l'efficacité, mais pas au même titre qu'elle risque l'excitation des ondes de surface. Pour la fréquence de fonctionnement maximale  $f_r$ , l'épaisseur du substrat (**h**) devrait satisfaire: [34]

$$h = \frac{0.3c}{2\pi f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.1})$$

**b) Calcul de la largeur (W):**

La largeur de l'antenne patch Micros-strip est donnée par équation:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (\text{II.2})$$

**c) Calcul de la constante diélectrique efficace ( $\epsilon_{eff}$ ):**

Le calcul de la permittivité effective d'une ligne microstrip repose sur la largeur de la ligne et sur la hauteur du substrat, lorsque la constante diélectrique du substrat. [33]

Est beaucoup plus grande que l'unité, la valeur effective de l' $\epsilon_{eff}$  sera plus proche de la valeur de l' $\epsilon_r$  constant diélectrique réel du substrat. La constante diélectrique

efficace est également fonction de la fréquence. À mesure que la fréquence de fonctionnement augmente, la constante diélectrique efficace s'approche de la valeur de la constante diélectrique du substrat est donnée L'expression pour  $\epsilon_{eff}$  est donnée comme: [35]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1} \quad \frac{h}{w} \geq 1 \quad (\text{II.3})$$

**d) Calcul de l'extension de longueur ( $\Delta L$ ):**

L'extension de longueur est la longueur supplémentaire à la fin du patch en raison du champ de franges le long de sa largeur. Il est calculé à l'aide de la formule donnée comme: [36]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{h}{w} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{h}{w} + 0.8\right)} \quad (\text{II.4})$$

**e) Calcul de Fréquence de résonance  $f_r$ :**

La fréquence résonnante de l'antenne microstrip est fonction de sa longueur, habituellement il est donné par:

$$f_r = \frac{c}{2 L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{II.5})$$

**f) Calcul de la longueur effective du patch ( $L_{eff}$ ):**

Par une fréquence de résonance donnée  $f_r$ , la longueur effective ( $L_{eff}$ ) est donnée comme:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{II.6})$$

La longueur effective du patch ( $L_{eff}$ ) devient :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.7})$$

**g) Calcul de la longueur réelle (L) du patch :**

En raison de la bande passante étroite inhérente de l'élément résonnant, la longueur est un paramètre critique, et l'équation suivante doit être utilisée pour obtenir une valeur précise pour la longueur du patch **L**: [35]

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \Rightarrow L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (\text{II.8})$$

**h) Circuit equivalent:**

Dans la fig. montrée ci-dessous, l'antenne de patch micros trip est représentée par deux fentes, séparées par une ligne de transmission de longueur **L** et ouvertes circuitées aux deux extrémités. Le long de la largeur du patch, la tension est maximale et le courant est minimum en raison des extrémités ouvertes. Les champs sur les bords peuvent être résolus en composants normaux et tangentiels par rapport au plan au sol. [32]

Dans ce modèle, l'impédance d'entrée d'un patch est la même que celle d'une ligne de transmission avec longueur à **L** et admission **Yc** [37]. Chaque fente rayonnante de fente **L** peut être représentée par une admission équivalente consistant en une conductance et une susceptance dans l'équation suivante [31]:

$$Y = G + jB \quad (\text{II.9})$$

Où, **G** est la conductance associée à la puissance rayonnée du bord, et **B** est la susceptance due à l'énergie stockée dans le champ de franges près du bord. [37]

$$G = \frac{1}{120 \pi^2} \quad (\text{II.10})$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{jC}\omega = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\Delta L}{Z_c} \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (\text{II.11})$$

La conductance et la susceptance équivalentes d'une fente de largeur finie  $\mathbf{W}$  sont données par les expressions: [II.23]

$$\mathbf{G} = \frac{w}{120 \lambda_0} \left[ 1 - \frac{1}{24} \left( \frac{2\pi h}{\lambda_0} \right)^2 \right] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (\text{II.12})$$

$$\mathbf{B} = \frac{w}{120 \lambda_0} \left[ 1 - 0.636 \ln \left( \frac{2\pi h}{\lambda_0} \right) \right] \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (\text{II.13})$$

$\mathbf{G}$  est la conductance apportée par le champ de rayonnement associé à chaque bord. Si  $W/\lambda_0 \ll 1$  et  $h \ll \lambda_0$  le  $\mathbf{G}$  est placé à travers le centre de chaque fente et est donné par la formule [30]:

$$\mathbf{G} = \begin{cases} \frac{w^2}{90\lambda_0} & \text{pour } w \ll \lambda_0 \\ \frac{w}{120\lambda_0} & \text{pour } w \gg \lambda_0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Où,  $Z_c$  est l'impédance caractéristique de la ligne de micro bande et  $\mathbf{C}$  est la vitesse de la lumière. Par conséquent, l'admission d'entrée de l'élément rayonnant peut être exprimée sous la forme: [35]:

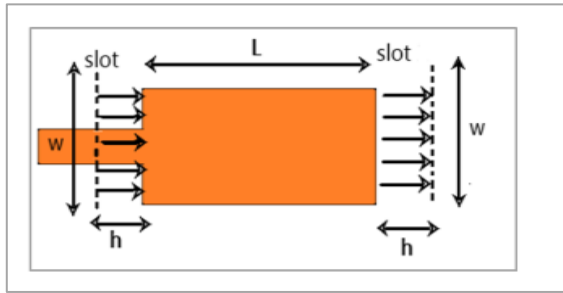
$$\mathbf{Y}_{in} = \mathbf{G} + \mathbf{jB} + \mathbf{Y}_0 \frac{j(\mathbf{B} + \mathbf{Y}_0 \tan \beta L)}{\mathbf{Y}_0 + j(\mathbf{G} + \mathbf{jB}) \tan \beta L} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Où: } \mathbf{B} = \frac{k_0 \Delta L \sqrt{\epsilon_{eff}}}{Z_c} = \frac{2\pi \Delta L \sqrt{\epsilon_{eff}}}{\lambda_0 Z_0} \quad (\text{II.16})$$

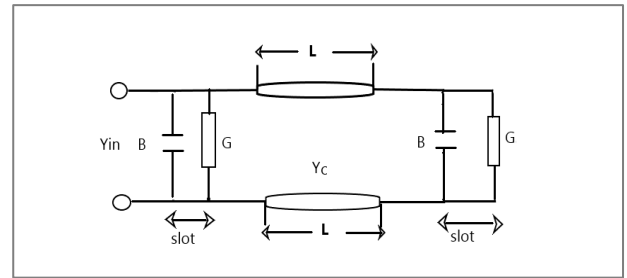
$$\beta \text{ est la constante de propagation} = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_{eff}}}{\lambda_0} / \mathbf{Y}_0 = \frac{1}{Z_c} / \mathbf{k}_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Admission en entrée à n'importe quel point d'alimentation arbitraire, telle qu'elle peut être obtenue en transformant les admissions d'emplacement à ce point. L'expression résultante est:

$$Y_{in}(z) = 2G \left[ \cos^2(\beta z) + \frac{G^2 + B^2}{Y_0^2} \sin(\beta z) - \frac{B}{Y_0} \sin(2\beta z) \right]^{-1} \quad (\text{II.17})$$



**Figure (II.10):** Équivalence rayonnante de fente aux bords



**Figure (II.9):** Equivalent admittance circuit model

**i) Résistance d'entrée:**

L'impédance d'entrée d'une antenne patch est assez difficile à calculer et de nombreuses formules approchées existent pour l'évaluer. L'impédance d'entrée dépend de plusieurs paramètres, tels que la constante diélectrique, l'épaisseur et la largeur du substrat, ainsi que de la position du point d'alimentation. [39]

La résistance à l'entrée résonnante du patch ( $R_{in}$ ), tel que dérivé de  $[ZI]$  et négligeant les effets de couplage mutuels. est obtenu en transférant l'admission des deuxième des terminaux de sortie aux terminaux d'entrée, à l'aide d'équations de permettent de déterminer approximativement la résistance d'entrée d'une antenne patch rectangulaire: [40]

$$R_{in} = \frac{1}{G} \quad (\text{II.18})$$

$$G = \begin{cases} \frac{w^2}{90\lambda_0^2} & \text{si } \frac{w}{\lambda_0} \ll 1 \\ \frac{w}{120\lambda_0} & \text{si } \frac{w}{\lambda_0} \gg 1 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Le cm de résistance aux entrées résonnantes doit être modifié en modifiant la largeur du patch ou en utilisant un flux d'encart encastré à une certaine distance de la fente en premier. Cette méthode peut être utilisée pour obtenir une meilleure correspondance entre une ligne d'alimentation microstrip et l'antenne patch, [40]

Où placé à une distance  $x_0$ , la résistance d'entrée est donnée par:

$$R_{in}(X = X_0) = R_{in}(X = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L}X_0\right) \quad (\text{II.20})$$

#### j) La directivité et l'angle d'ouverture :

Le rayonnement d'une antenne patch rectangulaire est similaire à celui d'un dipôle orienté dans l'axe  $x$ . La polarisation du champ rayonnée est rectiligne. Le rayonnement est dépendant de  $\theta$  et  $\varphi$ . Il est concentré dans un lobe principal orienté vers la verticale du patch ( $\theta = 0^\circ$ ). En raison du plan de masse, le rayonnement ne se fait que dans le demi-plan au-dessus du plan de masse. La directivité d'une antenne patch est approximée par les relations suivantes: [39]

$$D \approx \frac{1}{15G} \left(\frac{w}{\lambda_0}\right)^2 \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{cases} \text{si } \frac{w}{\lambda_0} \gg 1 & G \approx \frac{w}{120\lambda_0} \Rightarrow D = \frac{8w}{\lambda_0} \\ \text{si } \frac{w}{\lambda_0} \ll 1 & G \approx \frac{w^2}{90\lambda_0^2} \Rightarrow D = 6 \\ \text{si } \frac{1}{3} < \frac{w}{\lambda_0} < 3 & G \approx \frac{w}{120\lambda_0} - \frac{1}{60\pi^2} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

enfin, les largeurs de faisceau de demi-puissance dans les plans  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  sont, [II.24] où les angles d'ouverture sont donnés par les relations suivantes:

$$2\theta_{E\ 3dB} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{1}{7} (3\beta_0^2 L^2 + \beta_0^2 h^2) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.23})$$

$$2\theta_{H\ 3dB} = 2 \cos^{-1} \left( 2 \left( 1 + \frac{\pi w}{\lambda_0} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.24})$$

### II.6.2. Méthode de cavité:

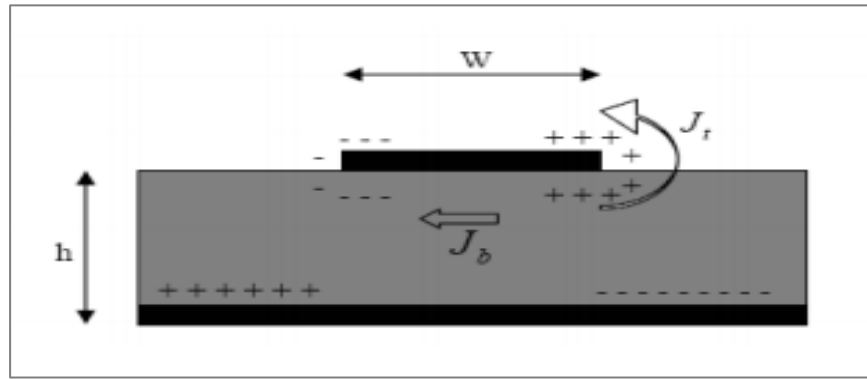
Modèle de ligne de transmission est facile à utiliser, mais il a une certaine divergence, il est ignoré les variations de champ le long du bord rayonnant, il n'est pas adaptable à l'inclusion de l'alimentation [16].

Le modèle de cavité est plus précis que comparer au modèle de ligne de transmission. [42]

Dans ce modèle, la région intérieure du substrat diélectrique est modélisée comme une cavité délimitée par des murs électriques sur le dessus et le bas. Cette hypothèse s'fonde est fondée sur les observations suivantes pour les substrats minces ( $h \ll \lambda$ ):

1) Puisque le substrat est mince, les champs dans la région intérieure ne varient pas beaucoup dans la direction  $\mathbf{Z}$  normale à la patch.

2) Le champ électrique est  $\mathbf{Z}$  dirigé seulement, et le champ magnétique a seulement les composants transversaux  $\mathbf{H}_x$  et  $\mathbf{H}_y$  dans la région délimitée par la métallisation de correction et le plan au sol. Cette observation prévoit les murs électriques en haut et en bas. [32]



**Figure (II.14):** Distribution des charges dans la cavité  
[43]

Mesurer l'amplitude absolue des champs électriques et magnétiques si l'antenne imprimée ne traitée que comme une cavité. En traitant les parois de la cavité, ainsi que le matériel en elle est sans perte, il ne rayonnerait pas et son impédance d'entrée sera purement réactive. Si le matériau est sans perte, la cavité n'irradie pas son entrée d'impédance est réactive. [16]

Par conséquent, afin de tenir compte du rayonnement et d'un mécanisme de perte, il faut introduire un  $R_R$  de résistance aux radiations et un  $R_L$  de résistance aux pertes. Une cavité représenterait maintenant une antenne et la perte est prise en compte par le  $\delta_{eff}$  tangente de perte effective qui est donné comme: [42]

$$\delta_{eff} = \frac{1}{Q_T} \quad (\text{II.25})$$

Où  $Q_T$  est le facteur de qualité totale de l'antenne. Il est égal à la forme:

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (\text{II.26})$$

Avec:

$Q_d$ : Représente le facteur qualité du diélectrique:

$$Q_d = \frac{\omega_r W_T}{P_d} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (\text{II.27})$$

Où:

$\omega_r$ : Pulsation de résonance.

$W_T$ : énergie stockée dans le patch à la résonance.

$P_d$ : Pertes dans le diélectrique.

$\tan \delta$ : Tangente de pertes de diélectrique.

$Q_c$ : représente le facteur de qualité pour de conducteur:

$$Q_c = \frac{\omega_r W_T}{P_c} = \frac{h}{\Delta} \quad (\text{II.28})$$

Où:

$P_c$  :est la perte de conducteur.

$\Delta$ : est la profondeur de peau du conducteur.

$h$ : est la hauteur du substrat.

$Q_r$ : Représente le facteur de qualité pour de rayonnement:

$$Q_r = \frac{\omega_r W_T}{P_r} \quad (\text{II.29})$$

Où:

$P_r$  : Puissance rayonnée par le patch.

D'après les équations (II.24), (II.25), (II.26), (II.27) et (II.28) on obtient :

$$\delta_{eff} = \tan \delta + \frac{\Delta}{h} + \frac{P_r}{\omega_r W_T} \quad (\text{II.30})$$

L'équation (II.29) décrit les pertes effectives dans le patch.

Comme c'est le cas pour une cavité conventionnelle délimitée entièrement par des murs électriques [43]. où les champs sous la cavité sont magnétiques transversaux, avec le champ électrique dans la direction  $\mathbf{Z}$  et indépendant de  $\mathbf{Z}$ . Il existe un nombre infini de modes, chacun caractérisé par une paire d'entiers  $(\mathbf{m}, \mathbf{n})$ , [27] le champ  $\mathbf{E}$  peut être considéré comme une superposition de modes:

$$\mathbf{E}_{mn} = \varphi_{mn} \hat{\mathbf{z}} \quad (\text{II.31})$$

Pour une plaque rectangulaire, les modes sont:

$$\varphi_{mn} = \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{W} \quad (\text{II.32})$$

Et détermine assez facilement les fréquences de résonances de l'antenne patch rectangulaire par:

$$f_{mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \sqrt{\left(\frac{\pi m}{L_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{W_{eff}}\right)^2} \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Où: } k_{mn} = \sqrt{\left(\frac{\pi m}{L_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{W_{eff}}\right)^2} \quad (\text{II.34})$$

## II.7. Avantages et inconvénients des antennes imprimées:

Antenne imprimée a plusieurs avantages par rapport aux antennes conventionnelles avec une similitude de gamme de fréquences de **100 MHz** à **100 GHz** même dans les deux types. Les différents avantages et inconvénients sont donnés dans le tableau, Certains avantages importants sont: [44]

- Faible poids.
- Faible volume et épaisseur réduite.
- Faible coût de fabrication.
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives).
- Réseau d'antennes.

Ces antennes présentent malheureusement, également des désavantages[33][35] :

- La largeur bande passante étroite des antennes imprimées.
- Faible gain.
- Faible efficacité.
- Faible pureté de polarisation
- Pertes d'antenne imprimée sont élevées
- Les antennes imprimées rayonnent dans la moitié de l'espace .
- Ils ont une capacité de maniabilité de faible puissance .
- Ils ont de mauvaises performances de rayonnement d'incendie final.

## II.8. Applications:

Les antennes imprimées sont bien connues pour leurs performances et leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. Les avantages de cette antenne imprimée sont de surmonter leurs démérites telles que facile à concevoir, léger etc., les applications sont dans les différents domaines. Certaines de ces applications parmi lesquelles on peut citer [44]:

- **GPS** par satellite de positionnement mondial.
- Portable.
- Système de communication personnelle.
- Réseaux locaux sans fil.
- Direct large chat télévision **DBS**.
- Vidéo cellulaire.

- Diffusion directe par satellite.
- Perception automatique des péages.
- Radar d'évitement des collisions.
- Réseaux informatiques étendus.

### **II.9. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des antennes imprimées dans les défis actuels des nouvelles technologies dans l'ombre de la communication. En décrivant leurs structures, et en montrant les techniques d'alimentation les plus couramment utilisées, où au point de contact il y a une alimentation via la ligne micro-ruban et via la sonde coaxiale, et/ou sans contact il y a une alimentation via couplage électromagnétique et via le couplage d'ouverture.

Afin d'illustrer le fonctionnement des antennes imprimées, nous avons expliqué les méthodes d'analyse de deux modèles conçus en fonction de leurs utilisations, tout d'abord, l'analyse de la conception du modèle de transmission de ligne est simple et moins précise, mais permet la description des étapes de la conception d'une antenne patch rectangulaire ou circulaire. Deuxièmement, l'analyse de la conception du modèle de cavité le plus précis et le plus complexe dans la nature, et donne une idée sur de distribuer les champs électromagnétiques dans la cavité.

Enfin, nous avons examiné les avantages et les inconvénients des antennes imprimées, ainsi que leurs nombreuses utilisations des applications, ainsi que leur faible poids, leur taille et leur simplicité de fabrication.

# *CHAPITRE III*

## Simulation et résultats

### III.1. Introduction:

Le but de ce chapitre est d'identifier les différentes applications de la fréquence **2,4 GHz** et utiliser, puis en utilisant le logiciel **HFSS** afin de concevoir une antenne imprimée fonctionnant sur la fréquence **2,4GHz**. Toute en donnant les différentes caractéristiques telles que **S11** et **VSWR** propre à cette antenne. La fréquence **2.4Ghz** est la fréquence de fonctionnement de l'antenne que on veut construire, où plusieurs appareil de transmission se base sur cette fréquence et d'ici vient l'importance de cette fréquence.

### III.2. Wi-Fi:

Le **Wi-Fi** est une technologie de réseau sans fil qui utilise des ondes radio pour fournir un accès Internet haute vitesse sans fil. Une idée fausse courante est que le terme **Wi-Fi** est l'abréviation de « fidélité sans fil », mais le **Wi-Fi** est une expression de marque qui fait référence aux normes **IEEE 802.11x**.

Le **Wi-Fi** est né à Hawaï en **1971**, où un réseau de paquets **UHF** sans fil appelé **ALOHAnet** a été utilisé pour connecter les îles. Des protocoles ultérieurs élaborés en **1991** par **NCR** et **AT&T** appelés **Wave LAN** sont devenus les précurseurs des normes **IEEE 802.11**.

La **Wi-Fi Alliance** a été créée en **1999** et possède actuellement la marque déposée **Wi-Fi**. Il définit spécifiquement le **Wi-Fi** comme « tout produit de réseau local sans fil (**WLAN**) basé sur les normes **802.11** de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (**IEEE**) ».Initialement, le **Wi-Fi** a été utilisé. [46]

### III.3. Bluetooth:

Bluetooth est un protocole sans fil pour l'échange de données sur de courtes distances à partir d'appareils fixes et mobiles, créant des réseaux locaux personnels.

Il existe deux paramètres importants des périphériques Bluetooth - les profils de classe et pris en charge. [47]

### III.4. Zig Bee:

Zig Bee est la seule solution **IoT** complète - du réseau maillé au langage universel qui permet aux objets intelligents de fonctionner ensemble. Zig Bee augmente le choix et la flexibilité pour les utilisateurs et les développeurs, et fournit la confiance que les produits et services vont travailler ensemble grâce à la normalisation et la mise à l'essai de toutes les couches de la pile.

Les produits certifiés Zig Bee peuvent se connecter et communiquer en utilisant le même langage **IoT** entre eux, et des millions de produits Zig Bee déjà déployés dans les maisons intelligentes et les bâtiments. Zig Bee est construit avec la compatibilité arrière et avant à l'esprit. [48]

### III.5. Contrôle radio:

La **RC** est autorisée dans la bande industrielle scientifique et médicale (**ISM**) de **2,4 GHz** en utilisant un spectre étendu technologie de **2,4 GHz** à **2,485 GHz**. [46]

### III.6. Simulation avec HFSS:

#### III.6.1. Logiciel Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator):

Simulateur de structure haute fréquence pour l'électromagnétique **3D**

**HFSS** version **15.0** est une plateforme qui comprend de multiples technologies de simulation pour la conception de composants ou de systèmes. Là l'offre **HFSS** de base comprend des interfaces **3D** et Lay-out, la méthode **2.5D** des moments, le mode Eigen mode et Simulation de circuit linéaire. [45]

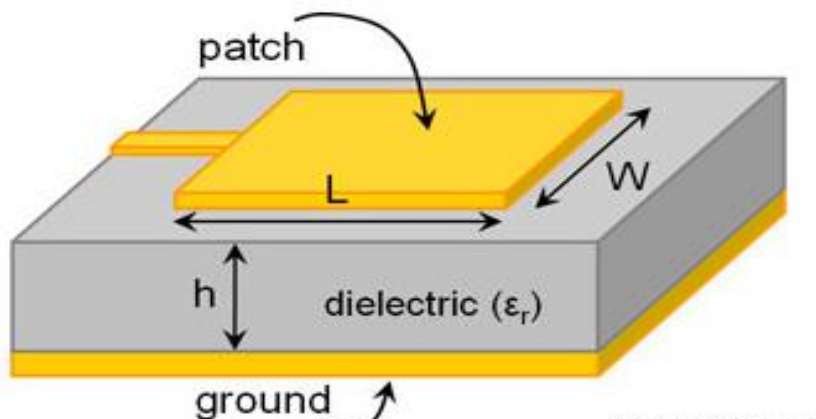


**Figure (III.1):** Le HFSS

### III.6.2. Renseignements sur l'antenne:

Nous utilisons une antenne patch contenant les paramètres suivants ;

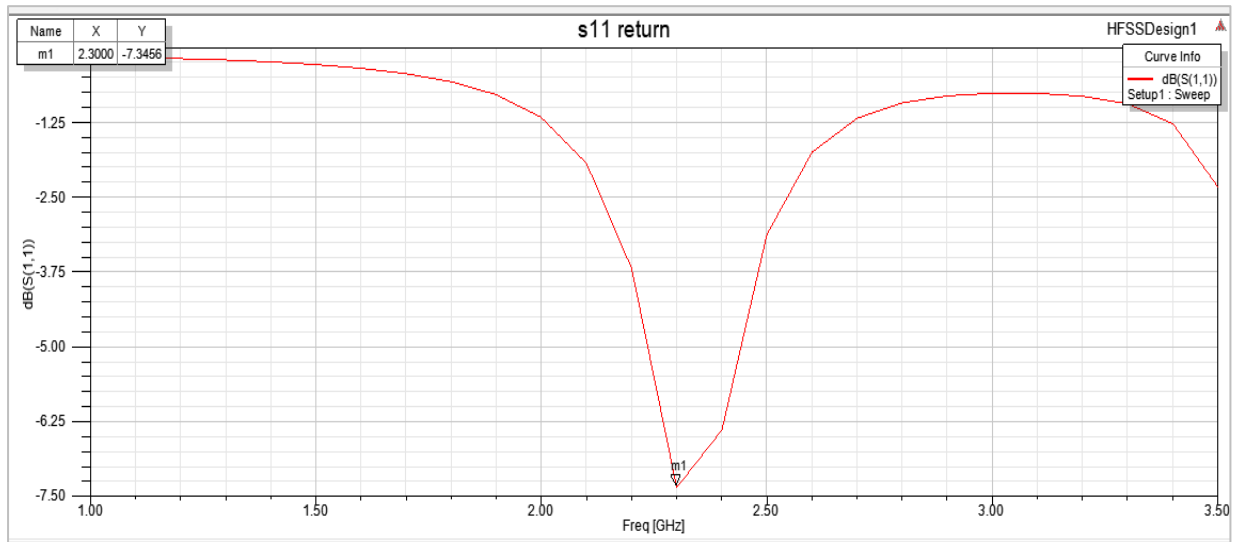
$F_r = 2.4\text{GHz}$ , length = 29.28mm, width = 38.03mm, h (Dielectric height) = 2mm, Dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) = 4.4, Input Impedance (Edge) = 243 Ohm.



**Figure (III.2) :** Illustration d'une antenne[49]

### III.6.2.1. Coefficient de réflexion S11:

Dans cette figure (III.2) on présente quelques résultats avant l'optimisation de l'antenne en termes de construction.

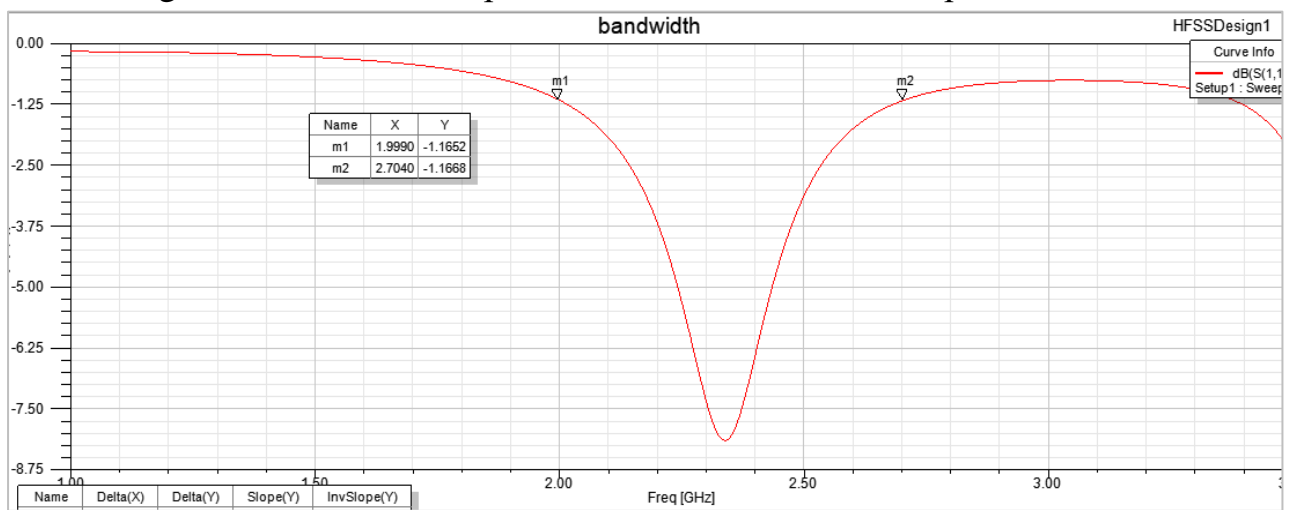


**Figure (III.3)** : Courbe graphique montrant la valeur de **S11** par dB à **2,4GHz**

Pour la courbe **S11**, à la valeur considérée de résonante fréquence de **2,4GHz**, nous remarquons que l'antenne émet **56,7%** de la puissance du signal, et **43,3%** de l'énergie réfléchie, donc le facteur de réflexion est **-6,3dB**.

### III.6.2.2. Bande passante:

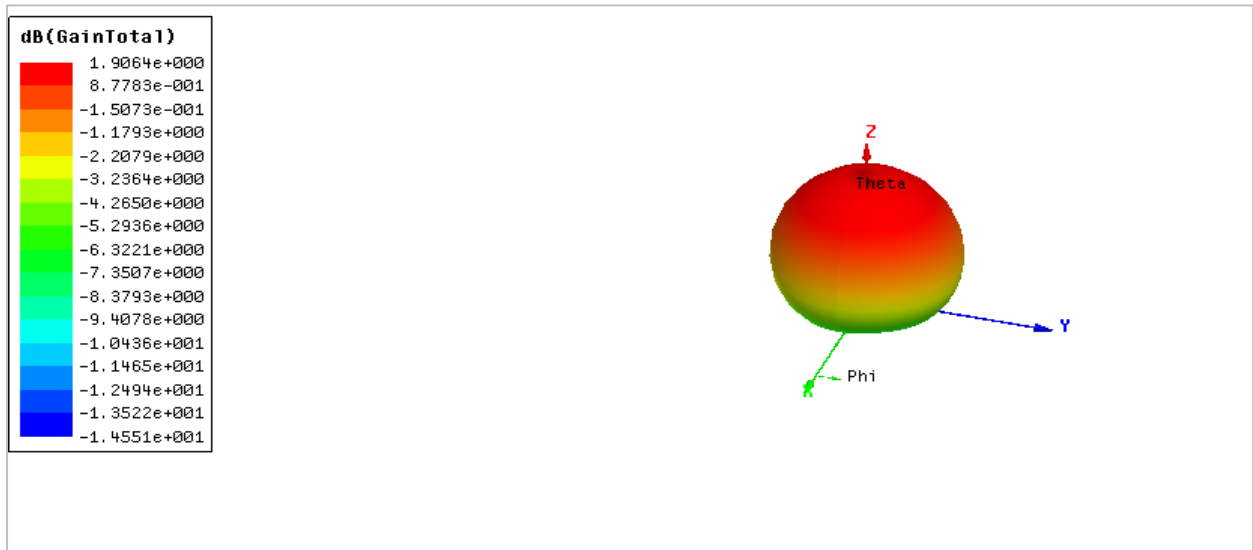
Cette figure montre la bande passante de l'antenne avant l'optimisation.



**Figure (III.4)** : Courbe graphique montrant la bande passante par dB à **2.4GHz**

**III.6.2.3. Gain:**

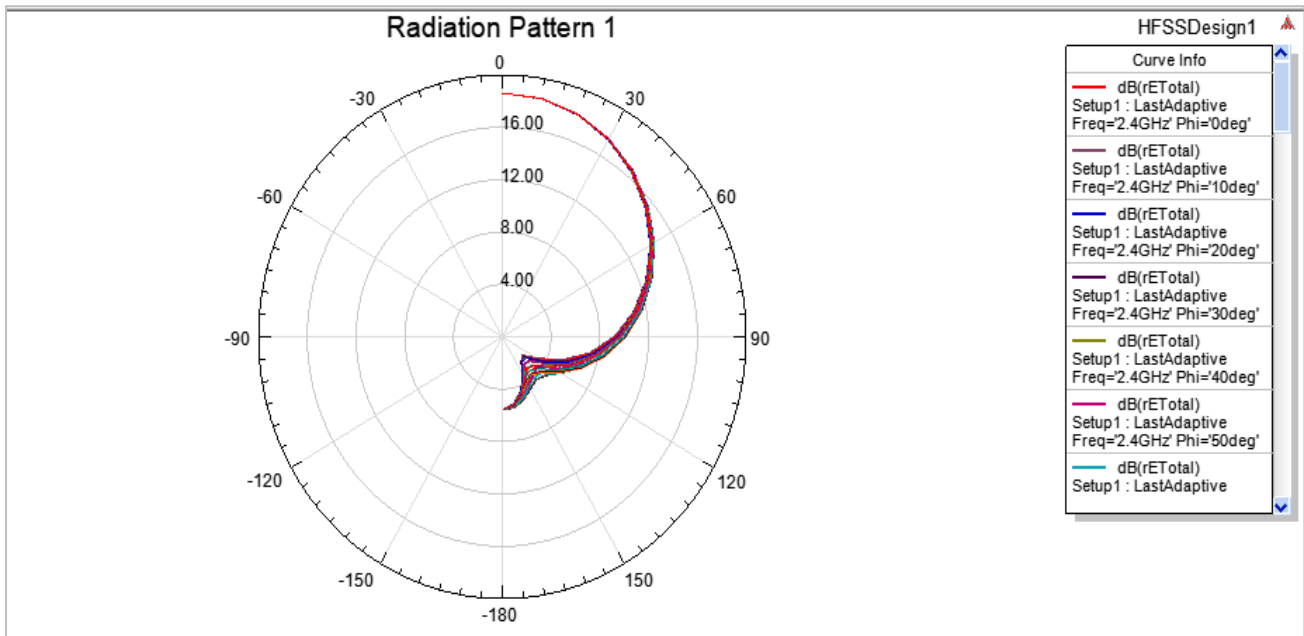
Cette figure présente le gain de l'antenne en 3D.



**Figure (III.5) : Graphique 3D de la valeur de gain par dB**

**III.6.2.4. Diagramme de rayonnement :**

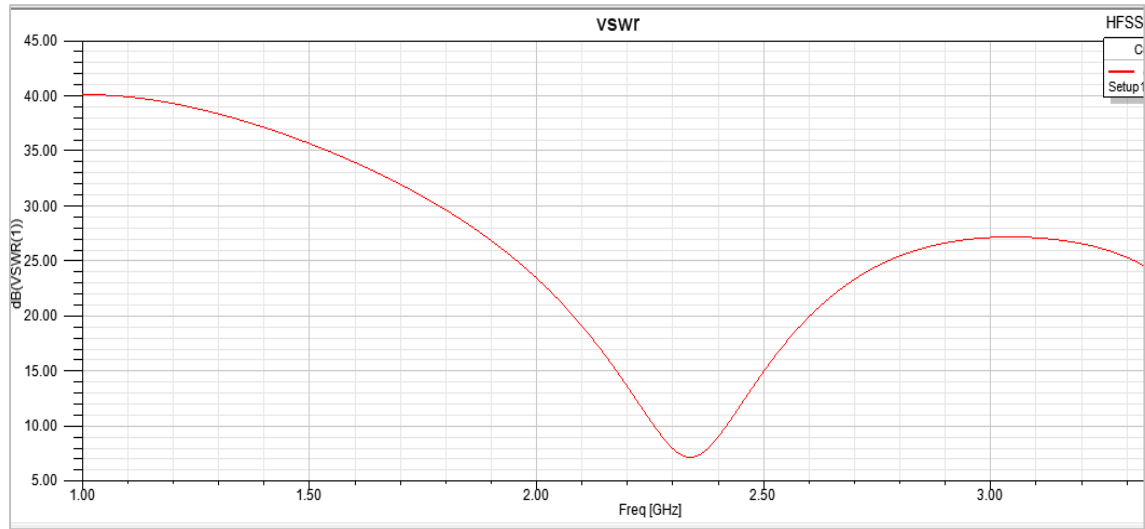
La figure suivante présente le diagramme de rayonnement de l'antenne désignée



**Figure (III .6) : Graphique du diagramme de rayonnement par dB**

### III.6.2.5.VSWR:

Ici on voit la courbe de VSWR

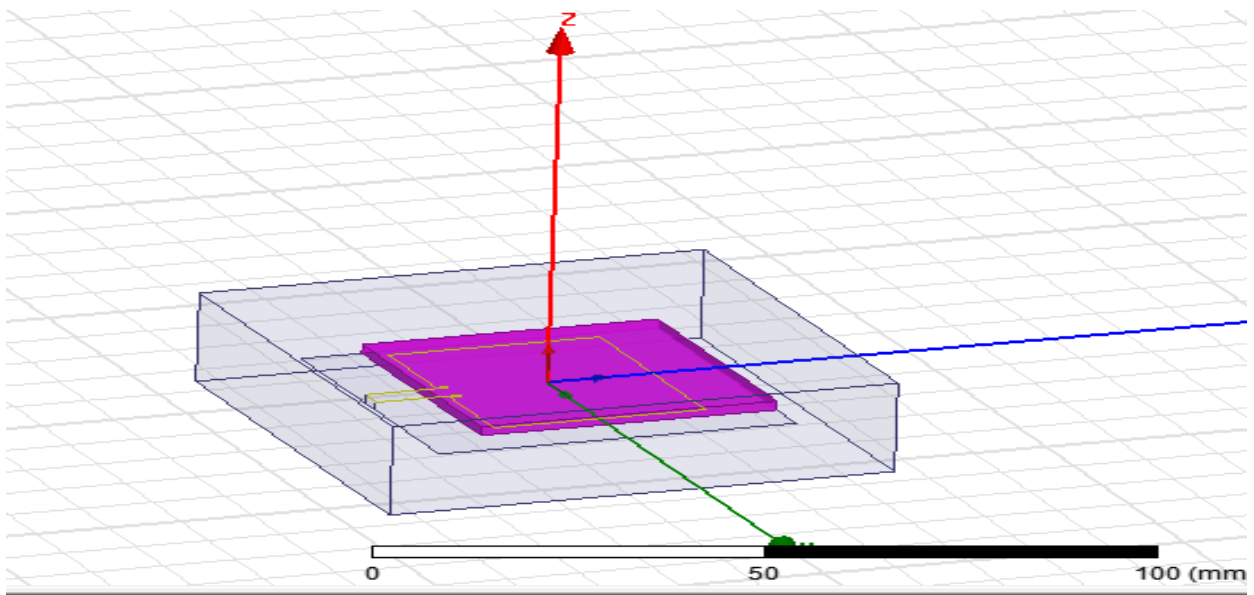


**Figure (III.7) :** Courbe graphique montrant VSWR par dB

La valeur de VSWR à **2,4** est égale à **9**, ce qui signifie que les adaptations d'antenne sont faibles, que l'antenne terminée n'est pas bien assortie.

### III.7. Solutions possibles:

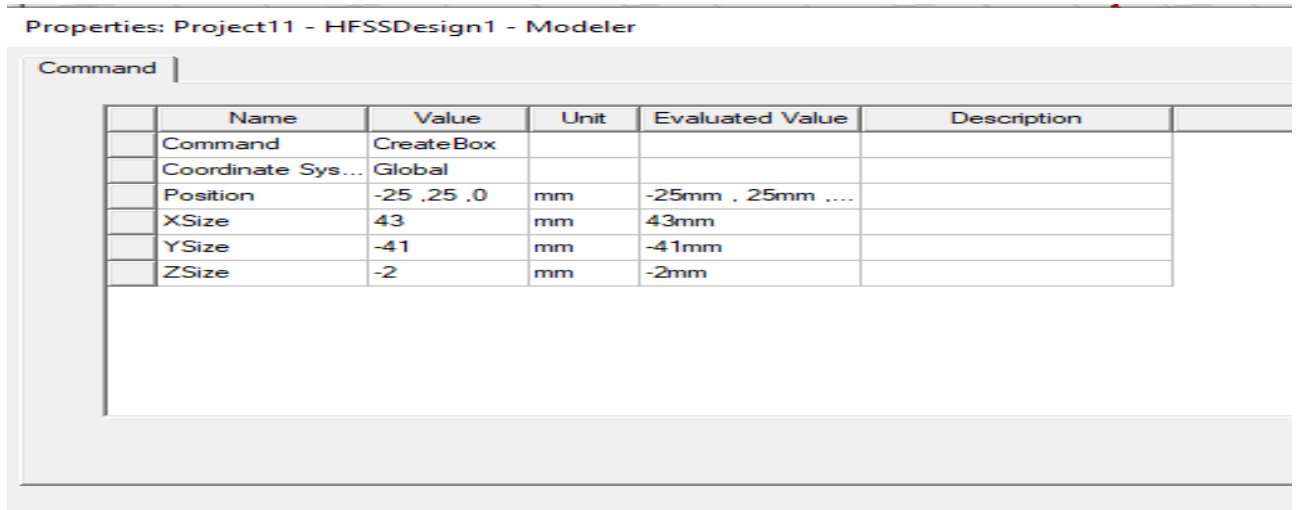
Pour obtenir les résultats requis à la fréquence **2.4GHz** qui convient avec un niveau de  $s_{11}$  désiré, nous avons effectué deux tests comme suit :



**Figure (III.8) :** Modèle appliqué à l'antenne patch en utilisant HFSS

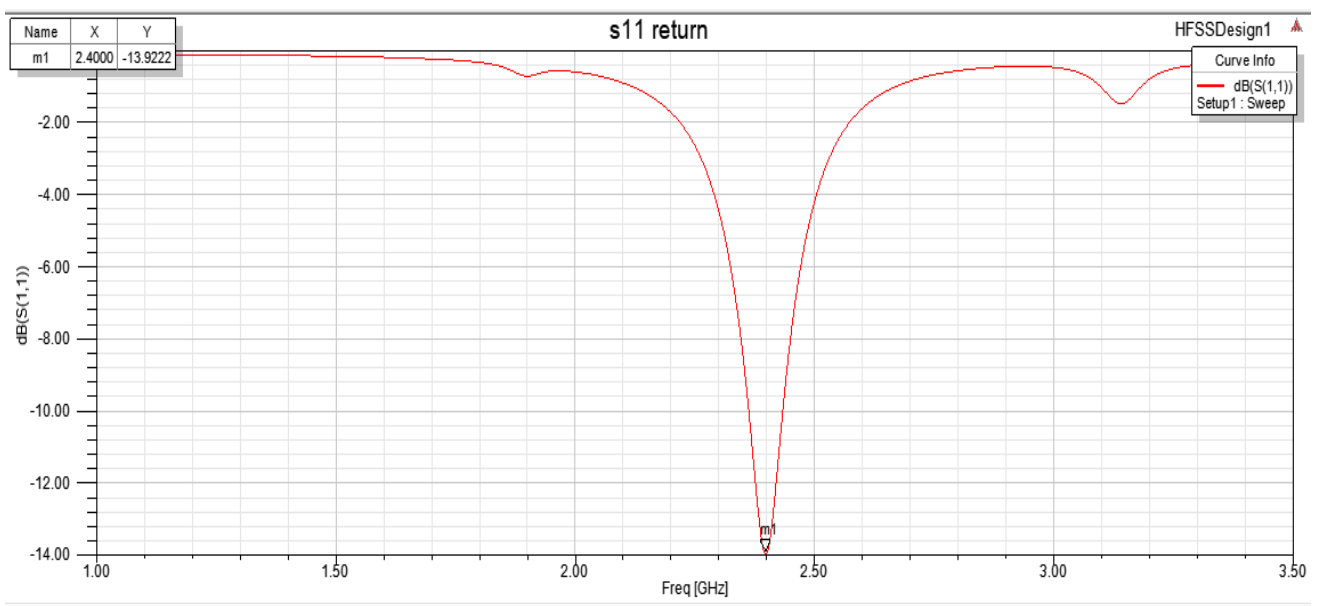
➤ **La première solution :**

Changement de substrat dimensions comme suit : Xsize=43, Ysize=-41, Zsize=-2



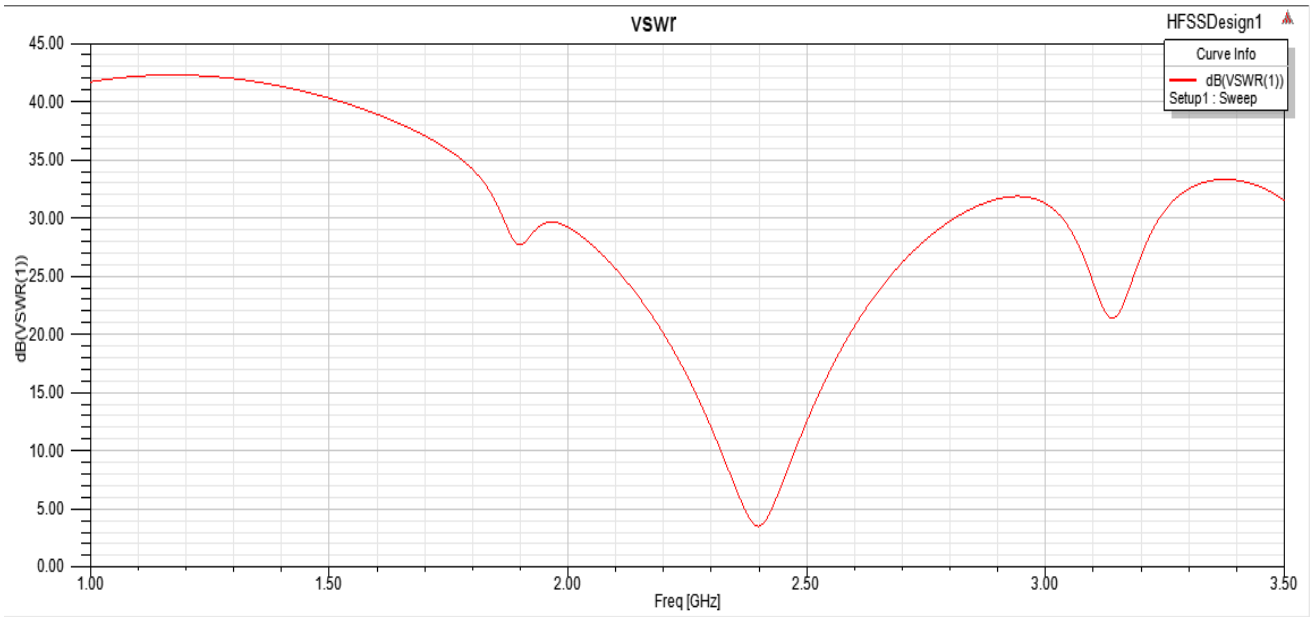
**Figure (III.9) :** La fenêtre pour changer les dimensions du substrat

Nous obtenons les résultats suivants :



**Figure (III.10) :** Courbe graphique montrant la valeur de  $s_{11}$  par dB à 2,4GHz

Après le changement de surface de Substart

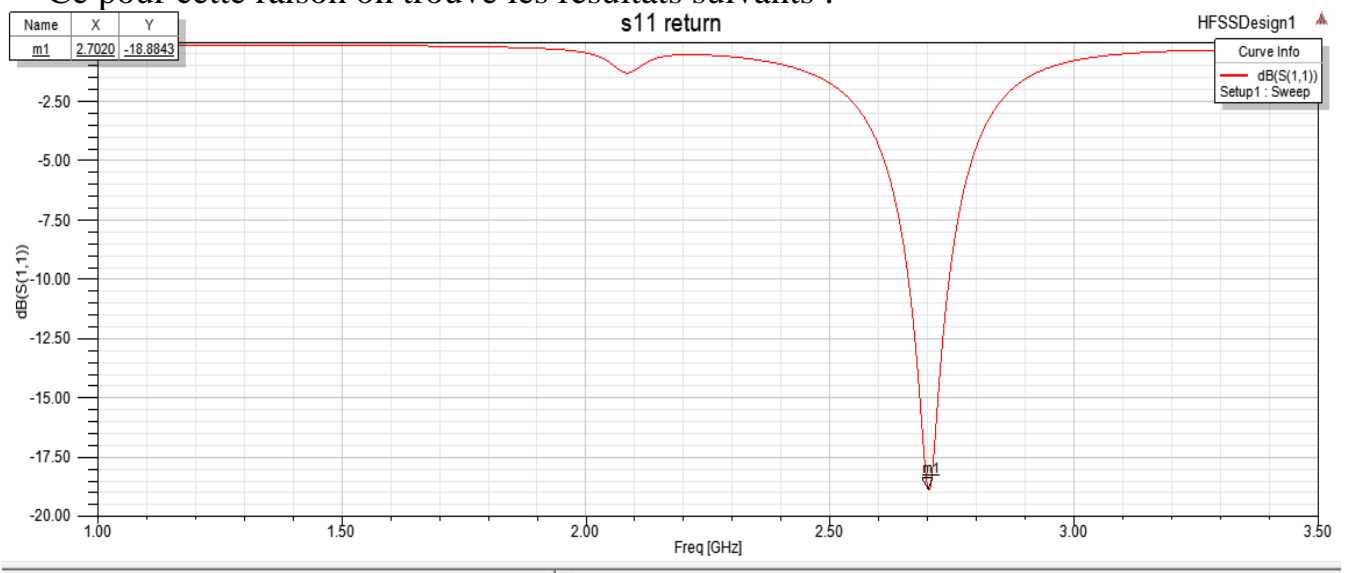


**Figure (III.11) :** Courbe graphique montrant VSWR par dB  
Après le changement de surface de Substart

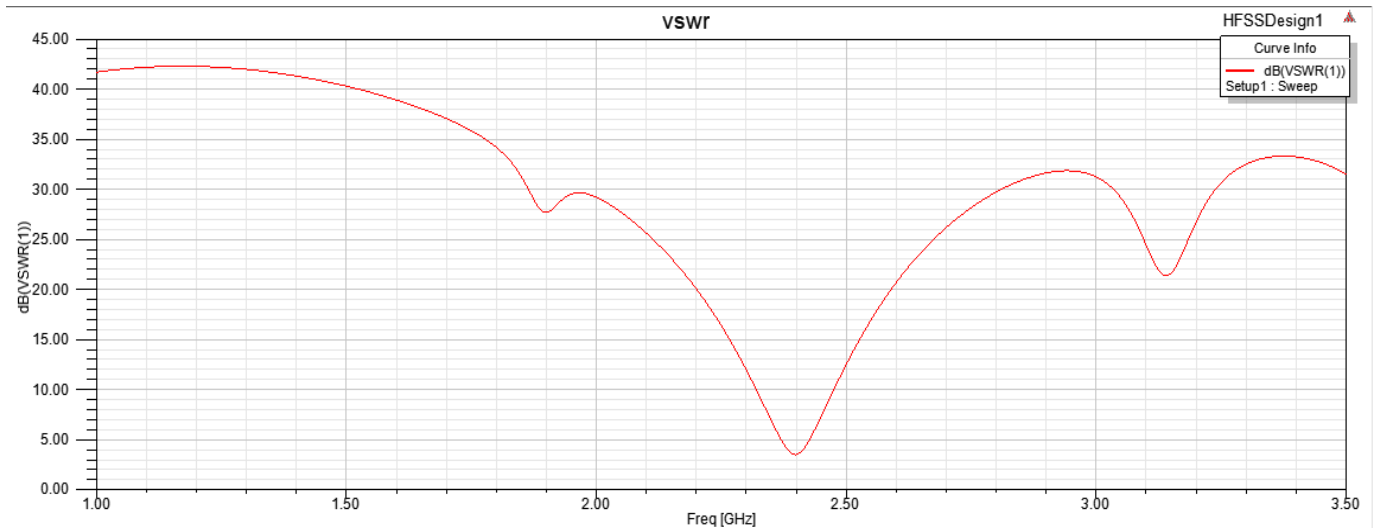
➤ **La deuxième solution :**

Changement de substrat dimensions comme suit : Xsize=40, Ysize=-36, Zsize=-2

Ce pour cette raison on trouve les résultats suivants :



**Figure (III.12) :** Courbe graphique montrant la valeur de s11 par dB à 2,4GHz  
Après le deuxième changement de surface de Substart



**Figure (III.13) :** Courbe graphique montrant VSWR par dB

Après le deuxième changement de surface de Substart

- De ces deux résultats, le premier est le meilleur.
- Dans ce changement au niveau de dimension de Substart, on note que la valeur de **S11** est acceptable à -10dB ce qui correspond à **90%** d'énergie transmise, c'est-à-dire **10%** d'énergie réfléchie, et pour VSWR elle est égale à **3,5dB** qui acceptable aussi.

### III.8. Conclusion:

La fréquence **2.4Ghz** est une fréquence très importante dans le domaine des communications radio. Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs applications de cette fréquence, où elle est une fréquence efficace et est utilisée dans plusieurs antennes.

Nous avons essayé de designer une antenne suivant quelque changement dans les dimensions et nous avons conclu que :

- La modification de dimension de substrat a un grand rôle pour déterminer la fréquence de fonctionnement désiré de l'antenne.
- On a atteint à notre objectif final qui est la désignation d'une antenne fonctionnant sur une fréquence de 2.4Ghz.

### **Conclusion Générale:**

Nous avons atteint lors de notre présentation de ce mémoire, le développement dans le domaine des antennes, et nous avons présenté leurs caractéristiques à travers notre étude de certains des éléments importants qui les caractérisent en général.

Cela a encouragé la conception d'antennes imprimées, faciles à fabriquer qui sont légères, de faible taille, et de faible coût, car notre travail est basé sur la description de ces antennes.

Les antennes imprimées ont des méthodes d'analyse, qui aident dans mettre en évidence les méthodes d'analyse en facilitant le calcul des paramètres et des équations pour déterminer leur domaine d'application de la caractérisation la plus importante des paramètres de fréquence des acouphènes, large bande passante de fréquence.

L'objectif principal de ce travail est de modéliser et de simuler la conception de l'antenne imprimée en l'appliquant au programme de simulation électromagnétique HFSS à une fréquence de 2,4 GHz.

Nos résultats que nous avons eu lors de la simulation pour créer une antenne imprimée à une fréquence 2,4 GHz ont été très satisfaisants, et nous avons obtenu les caractéristiques de l'antenne en identifiant le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , et le rapport d'ondes stables VSWR qui sont acceptable et conformes à sa structure conçue.

### Références bibliographiques

- [1] 2021 © Electronicshub.org 04/03/2019 [https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Why\\_do\\_we\\_need\\_Antennas](https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Why_do_we_need_Antennas) (Consulté le 23/03/2021)
- [2] Pourquoi avons-nous besoin d'antennes? 2021© Electronicshub.org 04/03/2019 [https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Why\\_do\\_we\\_need\\_Antennas](https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Why_do_we_need_Antennas) (Consulté le 23/03/2021)
- [3] Different Types of Antennas/ ©2021 Electronicshub.org 04/03/2019 [https://www.electronicshub.org/types-ofantennas/#Different\\_Types\\_of\\_Antennas](https://www.electronicshub.org/types-ofantennas/#Different_Types_of_Antennas) (Consulté le 23/03/2021)
- [4] DOMINIC GRENIER/ Antennas et propagation radio /Hiver 2020/page 20 [http://w3.gel.ulaval.ca/~dgre nier/ap\\_notes-e.pdf](http://w3.gel.ulaval.ca/~dgre nier/ap_notes-e.pdf) (Consulté le 26/03/2021)
- [5] College of Engineering / University of bqbylon Irqa /ANTENNAS<sup>1</sup> /FARAH FAHEM ESSARHAN 29/10/2013 (Consulté le 30/03/2021)
- [6] Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks: Terrestrial, Atmospheric, and Ionospheric, Second Edition. Nathan Blaunstein and Christos G. Christodoulou. © 2014 John Wiley & Sons, Inc. Published 2014 by John Wiley & Sons, Inc. <https://sci-hub.se/https://ieeexplore.ieee.org/document/8042843> (Consulté le 16/04/2021)
- [7] 2021© Electronicshub.org 04/03/2019 [https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Directivity\\_and\\_Gain](https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Directivity_and_Gain) (Consulté le 14/05/2021)
- [8] Chapter 2 : Fundamental parameters of antennas/ page 29 <http://pongsak.ee.engr.tu.ac.th/le428/chap2.pdf> (Consulté le 16/04/2021)
- [9] <https://electronicsdesk.com/input-impedance-of-antenna.html>
- [10] Alexandre Boyer alexandre.boyer @insa-toulouse.fr [www.alexandre-boyer.fr](http://www.alexandre-boyer.fr) (Consulté le 09/06/2021)
- [11] Antenna Basics/ Luigi Boccia<sup>1</sup> and Olav Breinbjerg<sup>2</sup> / <https://sci-hub.se/https://ieeexplore.ieee.org/document/8043316> page (9) (Consulté le 27/05/2021)
- [12] Copyright © 2021 Electronics Desk /Antenna and Wave propogation / By Roshni Y/ <https://electronicsdesk.com/antenna-apertures.html> (Consulté le 27/05/2021)
- [13] Hubregt. J. Visser, "Array and phased array antenna basics, "Antenna Engineer, the Netherlands 2005
- [14] © Electronics-notes.com/ antennatheory/polarization/ <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/antennatheory/polarisation-polarization.php> (Consulté le 20/05/2021)

## Références bibliographiques

---

- [15]2021 © ElectronicsHub.org 04/03/2019 [https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Effective\\_Length](https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/#Effective_Length) (Consulté le 22/05/2021)
- [16] KEITH R. CARVER, MEMBER, IEEE, AND JAMES W. MINK, MEMBER, IEEE, «Microstrip Antenna Technology», IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. "29, NO. 1, pp.2, JANUARY 1981.
- [17] R. Zichner and R. R. Baumann, «Printed antennas: from theory to praxis, challenges and applications», Adv. Radio Sci., 11, 271–276, 2013, [www.adv-radio-sci.net/11/271/2013/](http://www.adv-radio-sci.net/11/271/2013/)
- [18] T. Soufiane, «Méthodes des caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées», Mémoire présenté en vue de l'obtention du titre de MAGISTRE en Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskran, 25/06/2013.
- [19] VAUDON Patrick, « XII - Les antennes imprimées », Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM – Université de Limoges.
- [20] Fabien FERRERO, « Reconfiguration dynamique d'antennes imprimées en directivité et polarisation », Docteur en Sciences de l'UNIVERSITÉ de Nice-Sophia Antipolis Discipline : Électronique, le 19 Novembre 2007 devant le jury.
- [21] M.Sarz; A.Madiha; E. Taha, «Antennas PATCH», Ecole Nationale des Sciences Appliquée de khouribga, Département de Génie Electrique, Université Hassan 1<sup>er</sup>, 2014/2015.
- [22] M.Souhila; F-T.hinane, «Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation», Mémoire de fin d'études En vue d'obtention du diplôme Master en Télécommunication, Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia, 2016.
- [23] Salai Thilai Thilagam J. and P.K. Jawahar, « Design of microstrip antenna for wireless communication », International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Vol.6 No.18, Page No. 2373. (2011), © Research India Publications; <http://www.ripublication.com/ijaer.htm>.
- [24] R. NishaBegam, R. Srithulasiraman, « The Study of Microstrip Antenna and their applications », 2015 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET 2015), ME-Communication Systems Karpagam College of Engineering Coimbatore. Coimbatore.muhammednis93@gmail.com. Assistant Professor-ECE Karpagam College of Engineering. srithulasiraman@gmail.com.
- [25] Jinisha Bhanushali, Shreya Chakraborty, « Design and Comparison of Co-axial fed Patch Antenna Arrays at 30GHz », International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 11, p. 841. November-2016.

## Références bibliographiques

---

- [26] D. Orban and G.J.K. Moernaut, « The Basics of Patch Antennas, Updated», As seen in the September 29, 2009 edition of the RF Globalnet (www.rfglobalnet.com) newsletter.
- [27] Kai Fong Leea, and Kin-Fai Tongb, « Microstrip Patch Antennas », Department of Electrical Engineering, The University of Mississippi, University, USA , Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, London, UK, Springer Science+Business Media Singapore, p. 2 of 55, 2015.
- [28] H. Errifi; A. Baghdad; A. Sahel; A. Badri,« ETUDE COMPARATIVE DE L'INFLUENCE DES DEUX METHODES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE SUR LA PERFORMANCE DE L'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE A LA FREQUENCE 10 GHZ», Laboratoire EEA & TI, Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences et Techniques, Mohammedia, Maroc, p.2 May 2014.
- [29] A. Elrashidi, K. Elleithy, Hassan Bajwa, « THE FRINGING FIELD AND RESONANCE FREQUENCY OF CYLINDRICAL MICROSTRIP PRINTED ANTENNA AS A FUNCTION OF CURVATURE», Department of Computer and Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering University of Bridgeport, 221 University Ave, Bridgeport, CT, USA aelrashi@Bridgeport.edu.,December 2011.
- [30] Janmoni Borah, Tasher Ali Sheikh, Sahadev Roy, «Design and Development of a Patch Antenna forDual Band Applications», Dept of Computer Science and Engineering National Institute of Technology, Yupia, Arunachal Pradesh-791112, India, borah1989@gmail.com. P.307, 2014.
- [31] Kenneth Puglia, « TECHNICAL MEMORANDUM: A BRIEF TUTORIAL ON MICROSTRIP ANTENNAS», 3 LITCHFIELD DRIVE HAMPTON NH 03842-1564 USA, p.6-7, December 2019.
- [32] Madhuri Garg, Dr. Nisha Singh, « Rectangular Microstrip Patch Antenna», Dept. of Physics, Sri Sai University, Palampur, Himachal, Pradesh, India Dept. of Computer Application, TES College of Arts and Technology, Amritsar, Punjab, India, IJCST Vol. 6, Issue 4, p. 253- 255, Oct - Dec 2015.
- [33] F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher, G. Holtzmer, « Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz»,IUT Ville d'Avray, Dep GEII, 50 rue de Sèvres, 92410 Ville D'avray auteur@u-paris10.fr.
- [34] Rasid A.Saeed, S.Khatun, Borhanuddin, M. A,Khazani, Rania A. Mokhtar, Mahmoud Alshamary,«Design of Single Fed Aperture Coupled Microstrip Antennas for WLAN», Computer and Communications System Engineering, Engineering Faculty, Universiti Putra Malaysia, 43300, Kuala Lumpur,Malaysia Eng\_rashidWieee.org, Electronics

## Références bibliographiques

---

Department, Engineering Faculty, Sudan University of Science and Technology SUST 72, Eastern Diems, Khartoum, Sudan, p.7, Published 2005.

[35] D. RAMAKRISHNA, « DESIGN, TESTING AND ASSEMBLY OF RECTANGULAR PATCH ANTENNA », Master of Technology in Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela 2007.

[36] Adejoh Joshua, Okere B. I., Lanre Danian, « Design of an S-Band Rectangular Microstrip Patch Antenna », International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volume-4, Issue-5, p. 61-70, May 2017.

[37] Enrique Nova Lavado, « DESIGN OF A DUAL-BAND CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA FOR A GALILEO DEMONSTRATOR », p. 10-11, February 2009.

[38] Vasiliki Paraforou, « Design and full-wave analysis of supershaped patch antennas », MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL ENGINEERING, Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. November 2013

[39] Alexandre Boyer, « ANTENNES », INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE 5 ème Année Réseau et Télécom, SUPPORT DE COURS ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES, p.33-35-36.

[40] Sara M. Stout, B. Eng, « Compact Dielectric-Loaded Patch Antennas For L-band Mobile Satellite Applications », Master of Engineering in Electronics, Carleton University Ottawa, Canada, September 1999.

[41] Mehemt Kara, « Microstrip Antennas with Variuos substrate Thicknesses », Doctor of philosophy, Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, May 1996.

[42] T. Moaiz Yazdani, M. Islam, « DESIGN AND FABRICATION OF A MICRO-STRIP ANTENNA FOR WI-MAX APPLICATIONS », Master of Science in Electrical Engineering, Blekinge Institute of Technology October 2008.

[43] MANIK GUJRAL B.Eng.(Hons.), NUS, « BANDWIDTH ENHANCEMENT OF DUAL PATCH MICROSTRIP ANTENNA ARRAY USING DUMMY EBG PATTERNS ON FEEDLINE », MASTER OF ENGINEERING, NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE, 2007.

[44] Indrasen Singh, Dr. V.S. Tripathi, « Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey », Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad, Indrasen Singh et al, Int. J. Comp. Tech. Appl., Vol 2 (5), p. 1597-1598.

[45] Introduction to ANSYS HFSS- Lecture 2- April 15, 2015-page (9)

[46] Vangie Beal - <https://www.webopedia.com/definitions/wifi/> -May 24, 2021

## Références bibliographiques

---

[47] Bluetooth ( definition)- <https://www.gsmarena.com/glossary.php3?term=bluetooth> -27-05-2021

[48] What is Zigbee?- <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/> -April 21,2021

[49][http://www.emtalk.com/mpacalc.php?er=4.4&h=2&h\\_units\\_list=hmm&fr=2.4&Operation=Synthesize&La=29.2897006268&L\\_units\\_list=Lmm&Wa=38.0362887156&W\\_units\\_list=Wmm&Rin=243](http://www.emtalk.com/mpacalc.php?er=4.4&h=2&h_units_list=hmm&fr=2.4&Operation=Synthesize&La=29.2897006268&L_units_list=Lmm&Wa=38.0362887156&W_units_list=Wmm&Rin=243)