



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur et de La Recherche**  
**Scientifique**



**Université Larbi Tébessi-Tébessa**  
**Faculté des sciences et technologies**  
**Département De Génie Electrique**

**Mémoire**  
**De Fin D'études pour L'obtention Du Diplôme De Master**  
**Spécialité : Réseaux et Communication**

**THEME :**

**Miniaturisation d'une antenne PATCH à base de  
couches minces**

Réalisé par le binôme :

- ❖ **Halaimia Amira**
- ❖ **Mouaia Mounia**

Devant le jury :

- ❖ **Bouchemha Amel : Président**
- ❖ **Ouacifi Malika : Encadreur**
- ❖ **Djellab Hanane : Examinatrice**

Année Universitaire : 2019/2020

## **Résumé :**

Au cours de ces dernières années, le nombre des communications cellulaires a connu une évolution exponentielle. Cette dernière a bénéficié de l'amélioration des composants électroniques permettant aux terminaux portables de rester compacts. Pour faire face à la volonté d'intégrer une quantité plus importante de nouvelles fonctions, de nombreuses études portent sur la recherche de nouveaux concepts d'antennes intelligentes et de petites tailles.

L'objectif principal de cette étude consiste à la miniaturisation d'une antenne patch à base des couches minces. Le but est de réaliser une antenne pour des applications WIFI avec deux fréquences de fonctionnement 2.4GHz et 5GHz. Une antenne avec une fréquence de fonctionnement de 2.4GHz est de taille plus grande qu'une antenne de 5GHz. Par conséquent, nous avons incorporé une couche mince de matériaux ferroélectrique dans l'antenne patch de 5GHz afin de créer une autre bande de fréquence de 2.4GHz tout en conservant la taille de l'antenne de 5GHz. Le résultat est une antenne qui rayonne avec deux fréquences différentes et de taille réduite.

A partir des résultats obtenus on peut dire que l'incorporation des matériaux ferroélectriques dans les antennes patch offre une solution prometteuse pour la miniaturisation des antennes à base de couche mince.

**Mot clés :** miniaturisation, antenne, couches minces, matériaux ferroélectriques.

## **Abstract:**

In recent years, the number of cellular communications has grown exponentially. This latter has benefited from the improvement of electronic components allowing portable terminals to remain compact. To deal with the need to integrate a greater number of new functions, numerous studies have focused on the search for new concepts of smart antennas and small sizes.

The main objective of this study consists of the miniaturization of a patch antenna based on thin layers. The goal is to realize an antenna for WIFI applications with two operating frequencies 2.4GHz and 5GHz. An antenna with an operating frequency of 2.4GHz is larger in size than a 5GHz antenna. Therefore, we incorporate a thin film of ferroelectric material into the 5GHz patch antenna to create another frequency band of 2.4GHz while maintaining the size of the 5GHz antenna. The result is an antenna that radiates with two different frequencies and of reduced size.

From the obtained results one can say that the incorporation of ferroelectric materials in patch antennas offers a promising solution for the miniaturization of antennas based on thin layers.

**Keywords:** miniaturization, antenna, thin films, ferroelectric materials.

## المخلص:

في السنوات الأخيرة ، نما عدد الاتصالات الخلوية بشكل كبير. وقد استفاد ة هذه الأخيرة من تحسن المكونات الإلكترونية التي تسمح للمحطات المحمولة بالبقاء مضغوطة. للتعامل مع الرغبة في دمج عدد أكبر من الوظائف الجديدة، تركّز العديد من الدراسات على البحث عن مفاهيم جديدة للهوائيات الذكية وبأحجام صغيرة.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هي تصغير هوائي مطبوع على أساس الطبقات الرقيقة. الهدف هو إنشاء هوائي لتطبيقات WIFI بترددين تشغيل 2.4 جيجا هرتز و 5 جيجا هرتز. الهوائي بتردد تشغيل 2.4 جيجا هرتز أكبر في الحجم من هوائي 5 جيجا هرتز. لذلك ، قمنا بدمج طبقة رقيقة من المواد الحديدية الكهربائية في هوائي 5 جيجا هرتز لإنشاء نطاق تردد 2.4 جيجا هرتز آخر مع الحفاظ على حجم هوائي 5 جيجا هرتز. والنتيجة هي هوائي يشع بترددين مختلفين وحجم أصغر.

من النتائج التي تم الحصول عليها يمكن القول أن دمج المواد الحديدية الكهربائية في الهوائيات المطبوعة يوفر حلاً واعدًا لتصغير الهوائيات ذات الطبقات الرقيقة.

**كلمات المفتاحية:** التصغير ، الهوائي ، الطبقات الرقيقة ، مواد حديدية كهربائية

# Dédicace

*Nous dédions ce travail à :*

*Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le long de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour nous aider.*

*Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.*

*Notre grande famille (Halaimia, Mouaia)*

*Nos cher ami (e) s : Randa, bouthainas Saoussen, chaima, kaouther, et enseignants.*

*Tout qu'ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*AMIRA ; Mounia*

# Remerciements

*En premier lieu nous tenons à remercier « Allah », notre Créateur, pour nous avoir donné la force à accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur Mme OUACIFI.MALIKA pour le privilège qu'elle nous a fait en acceptant de diriger ce travail .Sa gentillesse, sa modestie ses conseils sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle nous a toujours réservé nous a inspiré une grande admiration a son regard.*

*Permettez-nous de vous remercier Dr. BOUCHEMHA Amel, pour ce grand honneur que vous nous faites, en acceptant de présider ce jury.*

*Nos remerciements vont également à Dr. DJELLAB Hanane pour avoir accepté d'être examinatrice de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier vivement nos enseignants de département de génie électrique de l'université de Tébessa.*

*Merci spéciale a nos collègues de la 2<sup>ème</sup> années master réseaux et communication pour le sens de l'humour et la tolérance qui était entre nous.*

*Sans oublier de remercie nos familles pour leur soutien et leur encouragement.*

### Sommaire :

#### Introduction Générale

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

#### Chapitre I:Etat de l'art sur les propriétés électriques des matériaux ferroélectriques

I. Introduction :.....	4
II. Description sur les matériaux :.....	4
II.1 Définition diélectrique :.....	4
II.2 Les propriétés diélectriques :.....	5
II.2.1 Permittivité :.....	5
II.2.2 Tangente de perte :.....	6
III. Les matériaux ferroélectriques :.....	7
III.1 Définition de matériaux ferroélectriques :.....	7
III.2.1 Polarisation électronique.....	7
III.2.2 Polarisation ionique.....	8
III.2.3 Polarisation macroscopique.....	8
III.2.4 Polarisation dipolaire :.....	8
Remarque :.....	9
III.3 Permittivité et pertes diélectriques :.....	10
III.3.1 Permittivité d'un ferroélectrique.....	10
III.3.2 Pertes diélectriques :.....	10
III.4 Applications des matériaux ferroélectriques :.....	11
IV. Caractéristiques des matériaux ferroélectriques :.....	11
IV.1 Polarisation spontanée :.....	11
IV.2 La permittivité complexe.....	12
IV.3 Les avantages des matériaux ferroélectriques.....	13
V. Conclusion :.....	13

#### Chapitre II: les antennes PATCH à base de couche mince

I. Introduction :.....	15
II. Généralité sur les antennes :.....	15
II.1 Définition:.....	15
II.2 Caractéristique d'une antenne :.....	15
II.2.1 Impédance d'entrée :.....	15
II.2.2 Coefficient de réflexion et Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) :.....	16
II.2.3 Bande passante et facteur de qualité:.....	17
II.2.4 Directivité :.....	18
II.2.5 Gain d'une antenne :.....	18
II.2.6 Rendement :.....	19

## Sommaire

---

II.2.7 Diagramme de rayonnement :.....	19
II.2.8 Puissance rayonnée par une antenne :.....	20
II.2.9 Angle d'ouverture :.....	21
II.2.10 Résistance de rayonnement :.....	21
II.2.11 Polarisation :.....	21
II.3 Types d'antennes :.....	22
II.4 Antennes imprimées ou patch.....	23
II.4.1 Définition :.....	23
II.4.2 Structure d'une antenne imprimée:.....	24
II.4.3 Types d'alimentation :.....	25
II.4.3.1 Alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban) :.....	26
II.4.3.2 Alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente) :..	27
II.4.4 Principe de fonctionnement :.....	28
II.4.5 Avantages et les inconvénients des antennes patches:.....	28
II.4.6 Application des antennes imprimées :.....	29
II.5 Techniques de miniaturisation :.....	29
II.5.1 Définition :.....	29
II.5.2 Techniques de miniaturisation :.....	29
II.5.3 Avantages et inconvénients de la miniaturisation :.....	31
III. Conclusion :.....	31

### Chapitre III: présentation du Logiciel HFSS

I. Introduction :.....	33
II. Le logiciel de simulation HFSS :.....	33
II.1 Un projet HFSS :.....	33
II.2 Définition du logiciel Ansoft HFSS:.....	33
II.3 La méthode des éléments finis (FEM) :.....	34
II.4 Comment commencer HFSS :.....	34
II.5 Un projet en HFSS :.....	34
II.5.1 Le Project Manager :.....	36
II.5.2 Fenêtre de la propriété :.....	36
II.5.3 Modeleur 3D :.....	37
II.5.4 Barres d'outils :.....	37
II.5.5 Comment ouvrir un nouveau projet :.....	37
II.5.6 Insérer une conception de HFSS :.....	38
II.5.7 L'Arrangement des Unités du Modèle de Mesure :.....	38
II.5.8 Dessiner un modèle :.....	39
II.5.9 Variables du projet :.....	39
II.5.10 Types de solution :.....	40
II.5.11 Création du Patch et la ligne d'alimentation :.....	41

## Sommaire

---

II.5.12	Créer le substrat : .....	42
II.5.13	Création du port (wave guide) : .....	43
II.5.14	Assigner les conditions aux frontières : .....	44
II.5.15	Excitation d'une structure : .....	45
II.5.16	Assigner les conditions aux limites : .....	46
II.5.17	Ajouter le champ de fréquence (AddFrequencySweep) : .....	48
II.5.18	Installation d'analyse (analysis setup) : .....	50
II.5.19	Résultats : .....	50
II.5.20	Inconvénients du HFSS: .....	51
III.	Conclusion : .....	52
<b>Chapitre IV: Conception et miniaturisation d'une antenne PATCH</b>		
I.	Introduction : .....	54
II.	Paramètres pour la conception d'une antenne patch rectangulaire : .....	54
II.1.1	Largeur ( <b>W</b> ) : .....	55
II.1.2	Constante diélectrique effective ( <b><math>\epsilon_{reff}</math></b> ) : .....	55
II.1.3	Extension de longueur : .....	55
II.1.4	Longueur de patch ( <b>L</b> ): .....	55
II.2	Description de l'antenne à réaliser : .....	56
II.3	Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 2.4 GHz.....	56
II.4	Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 5 GHz : .....	62
II.5	Conception d'une antenne patch avec deux fréquences de résonances 2.4 GHz et 5GHz : .....	65
II.5.1	Ajout de couche mince sur l'antenne : .....	65
II.5.2	Étude paramétrique : .....	66
II.5.3	Performance de l'antenne optimisée : .....	68
III.	Etude comparative entre les antennes : .....	70
IV.	Conclusion : .....	71
<b>Conclusion Générale</b>		
	Conclusion générale : .....	73
	Références bibliographiques .....	76

### Liste des figures :

<b>Figure I- 1:</b> sans et avec champ électrique.....	7
<b>Figure I- 2:</b> sans champ électrique.....	8
<b>Figure I- 3:</b> avec champ électrique .....	8
<b>Figure I- 4:</b> l'absence et la présence de polarisation .....	8
<b>Figure I- 5:</b> polarisation avec champ électrique et sans champ électrique E.....	9
<b>Figure I- 6:</b> polarisation avec et sans champ électrique.....	9
<b>Figure I- 7:</b> evolution de la valeur du constant diélectrique (permittivité) en fonction de température .....	10
<b>Figure II- 1:</b> bande passante et coefficient.....	17
<b>Figure II- 2:</b> représentation du diagramme du rayonnement d'une antenne .....	20
<b>Figure II- 3:</b> puissance rayonné par une antenne dans une direction de l'espace .....	20
<b>Figure II- 4:</b> diagramme de rayonnement et angle d'ouverture .....	21
<b>Figure II- 5:</b> polarisation d'une antenne :a)Linéaire,b)Circulaire,c)Elliptique .....	21
<b>Figure II- 6:</b> Antenne imprimé.....	24
<b>Figure II- 7:</b> Différentes forme d'élément rayonnant.....	24
<b>Figure II- 8:</b> Présentation d'une antenne imprimée .....	24
<b>Figure II- 9:</b> Rayonnement d'une antenne .....	28
<b>Figure III- 1:</b> Processus HFSS[26] .....	35
<b>Figure III- 2:</b> Fenetre principal du logiciel HFSS .....	35
<b>Figure III- 3:</b> Arbre de gestion d'une structure sous HFSS .....	36
<b>Figure III- 4:</b> Représentation des propriétés .....	36
<b>Figure III- 5:</b> Groupe de matériel[26].....	37
<b>Figure III- 6:</b> Fenêtre de barre d'outil .....	37
<b>Figure III- 7:</b> Création de projet .....	38
<b>Figure III- 8:</b> Boite d'unités de modele.....	39
<b>Figure III- 9:</b> Fenêtre de gestion des différentes modèle à dessiner sur HFSS .....	39
<b>Figure III- 10:</b> Utilisation des variables dans HFSS.....	40
<b>Figure III- 11:</b> Boite de dialogue du type de solution .....	40
<b>Figure III- 12:</b> Création de patch.....	41
<b>Figure III- 13:</b> La ligne d'alimentation et le patch sont représentés qu'un seul objet.	41
<b>Figure III- 14:</b> Patch et la ligne d'alimentation.....	42
<b>Figure III- 15:</b> Création de substrat .....	42
<b>Figure III- 16:</b> Substrat diélectrique .....	43
<b>Figure III- 17:</b> Création de plan de masse masse .....	43
<b>figure III- 18:</b> création de port .....	44
<b>Figure III- 19:</b> Port d'excitation .....	44
<b>Figure III- 20:</b> Le bitier d'air .....	45
<b>Figure III- 21:</b> Lumped port .....	46
<b>Figure III- 22:</b> Création des condition aux limites(boundaries) .....	47
<b>Figure III- 23:</b> Assignement de la condition "conducteur parfait" pour le patch ,la ligne microstrip d'excitation et le transformateur d'adaptation.....	47
<b>Figure III- 24:</b> Assignement de la condition "conducteur parfait" pour plan de masse .....	48
<b>Figure III- 25:</b> Assignement des frontiérentières .....	48
<b>Figure III- 26:</b> Ajouter la fréquence d'utilisation .....	49

## Liste des figures

---

<b>Figure III- 27:</b> Création des condition d'analyse setup.....	49
<b>Figure III- 28:</b> Test de validation .....	50
<b>Figure III- 29:</b> Analyse de projet.....	50
<b>Figure III- 30:</b> Représentation tous les option crée les résultats de simulation.....	51
<b>Figure IV- 1:</b> Structure typique d'une antenne micro-ruban.....	54
<b>Figure IV- 2:</b> Micro strip patch antenna calculator.....	56
<b>Figure IV- 3:</b> Géométrie de l'antenne patch.....	57
<b>Figure IV- 4:</b> Affichage du paramètre S11 .....	57
<b>Figure IV- 5:</b> Coefficient de réflexion en fonction de fréquence .....	58
<b>Figure IV- 6:</b> Affichage de vswr.....	58
<b>Figure IV- 7:</b> VSWR en fonction de fréquence .....	59
<b>Figure IV- 8:</b> Affichage du diagramme de rayonne ment en 3D .....	59
<b>Figure IV- 9:</b> Diagramme de rayonnement à la fréquence 2.4 GHz.....	60
<b>Figure IV- 10:</b> Création le diagramme de rayonnement en 2d .....	60
<b>Figure IV- 11:</b> Affichage du diagramme de rayonnement en 2d.....	61
<b>Figure IV- 12:</b> Diagramme de rayonnement en 2d pour ( $\phi=0^\circ$ )et ( $\phi=90^\circ$ ).....	61
<b>Figure IV- 13:</b> Géométrie de l'antenne patch utilisé en 3D .....	62
<b>Figure IV- 14:</b> Coefficient de réflexion en fonction de fréquence .....	63
<b>Figure IV- 15:</b> VSWR en fonction de la fréquence .....	63
<b>Figure IV- 16:</b> Diagramme de rayonnement en 3D.....	64
<b>Figure IV- 17:</b> Diagramme de rayonnement en 2d pour ( $\phi=0^\circ$ )et ( $\phi=90^\circ$ ).....	64
<b>Figure IV- 18:</b> Géométrie de l'antenne avec couche mince.....	65
<b>Figure IV- 19:</b> Effet du paramètre h sur le coefficient de réflexion .....	66
<b>Figure IV- 20:</b> L'effet de parametre $\epsilon$ sue le coefficient de réflexion.....	67
<b>Figure IV- 21 :</b> L'effet de paramètre W sur le coefficient de réflexion .....	68
<b>Figure IV- 22:</b> L'effet de paramètre L sur le coefficient de réflexion.....	68
<b>Figure IV- 23:</b> Coefficient de reflexion (paramètre S) .....	69
<b>Figure IV- 24:</b> Le rapport d'onde stationnaire .....	69

## Liste des tables

---

### Liste des tableaux :

<b>Tableau I- 1:</b> permittivité relative de certain matériaux communs à 100MHz [7].....	6
<b>Tableau II- 1:</b> Quelques types d'antenne [16].....	23
<b>Tableau II- 2:</b> Différentes techniques par contact .....	26
<b>Tableau II- 3:</b> Différentes techniques d'alimentation par proximité [3].....	27
<b>Tableau IV- 1:</b> Paramètres de l'antenne patch de 2.4 GHz.....	56
<b>Tableau IV- 2:</b> Paramètres de l'antenne patch 5 GHz .....	62
<b>Tableau IV- 3:</b> Etude comparative des antennes réalisées .....	70

## Liste des abréviations

---

### Liste des Symboles et des Abréviations :

<b>RF</b> :	Radio Fréquence
$\epsilon$ :	Permittivité du milieu.
$\sigma$ :	Conductivité totale du matériau en Siemens par mètre (S/m)
$\epsilon_0$ :	Permittivité de l'espace libre en farads par mètre (F / m).
$\omega$ :	Fréquence angulaire du champ en radians par seconde.
<b>d</b> :	Epaisseur séparant les armatures de diélectrique.
<b>F/m</b> :	Farads par mètre.
$\epsilon_0$ :	Permittivité dans le vide (espace libre)
$\epsilon_r$ :	Permittivité relative.
<b>E</b> :	Champs électrique, ( $Vm^{-1}$ ).
<b>A</b> :	Surface de la plaque, ( $m^2$ ).
<b>Q</b> :	Charge qui est uniformément répartie entre les plaques, (C)
<b>C</b> :	Capacité.
<b>d</b> :	Distance entre les deux plaques, (m).
<b>Tan<math>\delta</math></b> :	Tangente de perte.
<b>C</b> :	Constante de curie .
<b>T</b> :	Température absolue, mesurée en kelvins.
<b>T<sub>c</sub></b> :	Température de Curie , mesurée en kelvins
<b>L</b> :	Distance entre les centres de charge
$\vec{\mu}$ :	Moment dipolaire.
<b>q</b> :	Charge élémentaire de l'électron.
$\vec{u}$ :	Vecteur unitaire dirigé du centre des charges négatives vers le centre des charges Positives.
$\alpha$ :	Biais de polarisabilité.
<b>E</b> :	Champ électrique.
<b>P</b> :	Polarisation.
$\chi$ :	Susceptibilité diélectrique
<b>V<sub>in</sub></b> :	Tension d'entrée.
<b>I<sub>in</sub></b> :	Courant à l'entrée.
<b>X<sub>e</sub></b> :	Réactance.
<b>R<sub>e</sub></b> :	Résistance d'entrée.
<b>R<sub>r</sub></b> :	Résistance de rayonnement.
$\Gamma$ :	Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ).
<b>Z<sub>0</sub></b> :	Impédance de normalisation.
<b>Z<sub>e</sub></b> :	Impédance d'entrée.
<b>dB</b> :	Décibel.
<b>BP</b> :	Bande passante.
<b>f<sub>res</sub></b> :	Fréquence de résonance.
<b>R<sub>ant</sub></b> :	Résistance de l'antenne.
<b>Q</b> :	Facteur de qualité.
<b>D</b> :	Directivité.

## Liste des abréviations

---

<b>G</b> :	Gain.
<b><math>P_A</math></b> :	Puissance d'alimentation.
<b><math>P_r</math></b> :	Puissance rayonnée.
<b><math>\eta</math></b> :	Rendement.
<b><math>P_{tot}</math></b> :	Puissance rayonnée totale.
<b><math>P_r</math></b> :	Puissance active rayonnée par une antenne.
<b><math>I_Q</math></b> :	Courant en un point de cette antenne.
<b><math>\lambda</math></b> :	Longueur d'onde.
<b>W</b> :	Largeur du patch.
<b>h</b> :	Épaisseur du substrat.
<b>L</b> :	Longueur du patch.
<b>t</b> :	Épaisseur du patch.
<b><math>\mu_r</math></b> :	Perméabilité relative.
<b>ROS</b> :	Rapport d'onde stationnaire (VWSR)
<b>VSWR</b> :	Voltage Standing Wave Ratio
<b>TOS</b> :	Taux d'Ondes Stationnaires.
<b>RLC</b> :	Résistance, inductance, capacité (circuit électrique).
<b>HFSS</b> :	Simulateur de structure haute fréquence.
<b>FEM</b> :	Méthode des éléments finis.
<b><math>\epsilon_{reff}</math></b> :	Permittivité effective du substrat.
<b>C</b> :	Vitesse de la lumière.

# *Introduction générale*

### Introduction générale :

Le monde des communications personnelles se développe rapidement grâce aux progrès de la technologie des composants RF (Radio Fréquence). La simplicité des circuits et les exigences de moins de congestion et de faible volume, poids et les coûts sont toujours demandés par les fabricants.

En tant que composants importants des systèmes de communication sans fil, les antennes imprimées (patch) ont fait l'objet de nombreuses recherches dans un large éventail d'applications allant des systèmes de communication modernes aux applications biomédicales vitales, grâce à leur compacité, leur légèreté et leur faible coût de fabrication. Une antenne patch est constituée d'un substrat diélectrique avec une constante diélectrique fixe. Une pièce rayonnante (patch) est présente d'un côté du substrat diélectrique et le plan de masse de l'autre côté du substrat. Le patch rayonnant est conçu avec plusieurs formes comme circulaire, rectangulaire, triangulaire, elliptique,...etc [1]. La fréquence de résonance de ces antennes dépend de leurs propriétés physiques, des matériaux impliqués, des dimensions, de la forme géométrique et de l'emplacement et du type de point d'alimentation. Par conséquent, ces paramètres d'antenne peuvent être modifiés afin d'acquérir la fréquence de résonance souhaitée [2].

La nécessité d'incorporer plusieurs bandes de fréquences de fonctionnement dans les appareils de communication personnels a conduit à de nombreuses recherches sur la miniaturisation de la taille des antennes tout en maintenant des performances adéquates [1]. La multiplication des standards de communication renforce ces besoins d'intégration et de miniaturisation puisqu'aujourd'hui près d'une dizaine d'antennes peuvent être amenées à cohabiter sur un même terminal mobile par exemple [4].

Plusieurs techniques ont été proposées pour réduire la taille des antennes telles que la structure à défaut dans le plan de masse (DGS), l'utilisation des éléments inductifs ou capacitifs, la technologie de court-circuit, l'utilisation de résonateurs diélectriques, et l'incorporation d'une couches minces de matériaux ferroélectrique de permittivité très élevée [3]. Ces matériaux jouent le rôle d'élément rayonnant.

Dans ce mémoire nous proposons d'utiliser les matériaux ferroélectriques pour la miniaturisation des d'antennes patch. Le but de cette étude est de réaliser une antenne patch de taille réduite pour l'utilisée dans norme WIFI avec deux fréquences de résonances 2.4Ghz et 5 GHz.

## Introduction générale

---

Les structures d'antenne réalisées dans cette étude sont conçues et simulées à l'aide de logiciel HFSS (High-Frequency System Simulator : Simulateur de système à haute fréquence)

L'organisation de mémoire est structurée en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons donné une vue général sur les principales propriétés des matériaux ferroélectriques, leurs caractéristiques et les différents types de polarisation avec une présentation des applications.

Le deuxième chapitre présente une étude générale sur les antennes destinées aux réseaux de télécommunication et ces type. De plus, nous mettons particulièrement en lumière les antennes imprimés (patch), leurs propriétés, types et caractéristiques ainsi que les techniques de miniaturisation.

Chapitre trois englobe une présentation générale sur le logiciel HFSS (High Frequency structure simulator) dans laquelle nous expliquant le rôle de chaque fonction utilisée dans le logiciel pour réaliser nos simulations.

Les antennes réalisées sont présentées dans le chapitre quatre. Nous avons simuler et tester plusieurs solutions afin d'obtenir une antenne patch miniaturisée avec les performances désirées (fréquences de résonance, diagramme de rayonnement, rapport d'onde stationnaire...etc). Cette antenne est conçue pour fonctionner dans la norme WIFI.

Finalement, ce mémoire est achevé par une conclusion générale qui résume l'ensemble des travaux réalisés et donne les perspectives susceptibles du présent travail.

# Chapitre I: Etat de l'art sur les propriétés électrique des matériaux ferroélectriques

### I. Introduction :

Les matériaux ferroélectriques sont incontournables dans le domaine des composants passifs pour les dispositifs électroniques. Les fortes permittivités qui les caractérisent ont depuis longtemps fait de ces matériaux des candidats de choix pour l'élaboration de condensateurs céramiques, ou plus récemment pour l'élaboration de mémoires non-volatiles. Ces dernières nécessitent un contrôle des caractéristiques physiques du matériau (permittivité, température de transition, pertes diélectriques) [5]. Dans notre cas nous avons utilisé une couche mince de matériaux ferroélectrique pour créer une autre bande de fréquence dans une antenne.

Ce chapitre présente les principales propriétés des matériaux ferroélectriques, leurs caractéristiques et les domaines d'application.

### II. Description sur les matériaux :

#### II.1 Définition diélectrique :

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas des charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. Mais les charges liées peuvent se déplacer localement et induire un courant de polarisation.

Dans la pratique technologique la différence entre isolant et diélectrique ne découle pas de propriétés différentes mais de l'angle sous lequel est vu le problème. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlons d'isolant. Par contre notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité, nous utilisons plutôt le terme diélectrique. En fin de compte, les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme des synonymes [6]

La permittivité du diélectrique est en général complexe et est donnée par :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (\text{I.1})$$

$\varepsilon'$  : représente la partie réelle de la permittivité relative du matériau (constante diélectrique)

$\varepsilon''$  : est la partie imaginaire et indique le facteur de perte associé à celui-ci tel que :

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} d \quad (\text{I.2})$$

$\sigma$  : Conductivité totale du matériau en Siemens par mètre (S/m).

$\epsilon_0$  : Permittivité de l'espace libre en farads par mètre (F / m).

$\omega$ : Fréquence angulaire du champ en radians par seconde.

$d$  : Epaisseur séparant les armatures de diélectrique [3]

### II.2 Les propriétés diélectriques :

#### II.2.1 Permittivité :

La permittivité d'un milieu peut être considérée comme la qualité d'un matériau qui lui permet de stocker la charge électrique. L'unité de permittivité est Farads / mètre (F/m). La permittivité dans le vide (espace libre) est notée  $\epsilon_0$ , sa valeur est  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m. Les matériaux autres que le vide ont une permittivité supérieure à  $\epsilon_0$ , souvent ils sont désignés par leur permittivité relative  $\epsilon_r$ :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (I.3)$$

$\epsilon$ : permittivité du milieu,  $FM^{-1}$

$\epsilon_r$ : permittivité relative du milieu (sans unité)

La constante diélectrique est une fonction de la fréquence donc il est important de caractériser le matériau du substrat pour la gamme de fréquences de fonctionnement. Les matériaux diélectriques avec des pertes minimales sont préférés pour avoir une efficacité de rayonnement maximale de l'antenne. Cependant, il y a toujours des pertes associées aux diélectriques [7].

Pour deux plaques planes remplies d'un matériau diélectrique, la permittivité du matériau peut être écrite par :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = \frac{Q}{EA} \quad (I.4)$$

E : Champs électrique, ( $Vm^{-1}$ )

A : Surface de la plaque, ( $m^2$ )

Q : Charge qui est uniformément répartie entre les plaques, (C)

Par conséquent, une quantité donnée de matériau avec une permittivité élevée peut stocker plus de charges qu'un matériau ayant une permittivité inférieure. Une permittivité élevée tend à réduire tout champ électrique présent. La capacité C entre les plaques est donnée par:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (I.5)$$

$d$ : Distance entre les deux plaques, (m)

Lorsqu'en peut augmenter la capacité d'un condensateur en augmentant la permittivité du matériau diélectrique à l'intérieur.

Pour quantifier les pertes de matériaux diélectriques, on utilise un autre terme connu sous le nom de tangente de perte, qui est expliqué dans la section suivante.

### II.2.2 Tangente de perte :

La tangente de perte ( $\tan\delta$ ) appelée aussi facteur de dissipation définit la perte du milieu et caractérise la quantité de puissance transformée en chaleur dans le matériau. Elle est donnée par le rapport négatif de la partie imaginaire et la partie réelle de la permittivité du matériau à n'importe quelle fréquence particulière. La tangente de perte est donnée par la relation:

$$\tan(\delta(\omega)) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (I.6)$$

Lorsque la tangente de perte devient grande signifie que le matériau a beaucoup d'absorption diélectrique et une forte perte de puissance transmise à travers le diélectrique.

Matériau	Permittivité relative	Matériau	Permittivité relative
ABS (plastique)	2.4-3.8	Polypropylène	2.2
Air	1	Porcelaine	5.1-5.9
Alumine	9.8	PTFE-téflon	2.1
Silicate d'aluminium	5.3-5.5	PTFE-céramique	10.2
Bois de balsa	1.37 à 1 MHz 1,22 à 3 GHz	PTFE-verre	2.1-2.55
Béton	~8	Eau de mer	80
Cuivre	1	Silicium	11.7-12.9
Diamant	5.5-10	Sol	~10
Époxy (FR4)	4,4	Sol (sableux sec)	2.59 à 1MHz 2,55 à 3 GHz
Alcool éthylique (absolu)	24,5 à 1 MHz 6,5 à 3 GHz	Eau (32° F) (68° F) (212° F)	88,0 80,4
Verre	~4	Caoutchouc	3.0-4.0
Or	1	saphir	9.4
Glace (eau distillée pure)	4.15 à 1 MHz 3.2 à 3 GHz	Bois	~ 2

**Tableau I- 1:** Permittivité relative de certain matériaux communs à 100MHz [7]

Puisque l'efficacité de rayonnement d'une antenne est fortement liée au facteur de perte du matériau, donc une grande tangente de perte signifie une efficacité de rayonnement très basse de l'antenne [7].

Les permittivités relatives de certains matériaux communs sont énumérées au tableau I.1. Notez qu'ils sont des fonctions de fréquence et de température. Normalement, plus la fréquence est élevée, plus la permittivité dans la bande de fréquence radio est petite. Il convient également de souligner que presque tous les conducteurs ont une permittivité relative de 1.

### III. Les matériaux ferroélectriques :

#### III.1 Définition de matériaux ferroélectriques :

Le phénomène appelé aujourd'hui ferroélectricité a été mis en évidence pour la première fois par J. VALASEK en 1921. un matériau ferroélectrique possède une polarisation spontanée, autrement dit, même en l'absence du champ électrique extérieur. Le centre de gravité des charges négatives ne coïncide pas avec celui des charges positives, Le terme ferroélectrique est dû à l'analogie qui existe entre le comportement électrique des composés correspondants et le comportement magnétique des composés ferromagnétiques: cycle d'hystérésis, loi de Curie-Weiss au dessus de la température de transition, existence des domaines,...etc [8].

#### III.2 Différents types de polarisation :

##### III.2.1 Polarisation électronique :

La polarisation électronique est due à l'excursion du stratus d'électrons par rapport au noyau évident, sous l'action d'un champ E. dans ce cas, la polarisation se produit rapidement durant un bref moment (de l'ordre de  $10^{-15}$  s). Elle se produit dans les atomes et les ions.

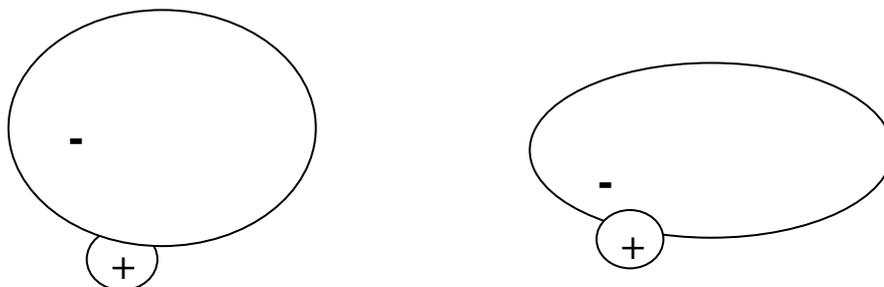


Figure I- 1: Sans et avec champ électrique

La transformation de la polarisation électronique peut être comprise en considération l'atome le plus simple, à savoir l'atome d'hydrogène (1 électron en orbite d'un noyau contenant un proton). L'orbite à gauche est celle qui existe avant l'application d'un champ électrique (pas de polarisation), tandis que celle de droite est obtenue après polarisation, et donc un déplacement d'orbite d'une distance  $a$ . durant la polarisation, l'atome acquiert un dipôle  $p = e a$  [10].

### III.2.2 Polarisation ionique :

Une polarisation ionique apparaît sous l'effet d'un champ électrique extérieur dans les matériaux à liaisons ioniques, il est dû au déplacement mutuel des ions formant ainsi une molécule asymétrique. Le temps requis pour ce déplacement, afin d'assurer la polarisation est de l'ordre de  $10^{-12}$  à  $10^{-13}$  s. Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges dans la direction du champ électrique (et non pas rotation).

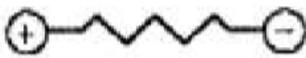


Figure I- 2: Sans champ électrique

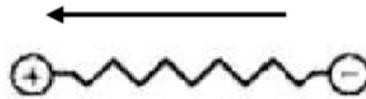


Figure I- 3: Avec champ électrique

### III.2.3 Polarisation macroscopique :

La polarisation macroscopique est due à des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau.

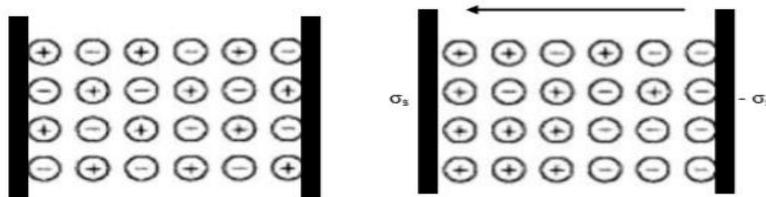


Figure I- 4: L'absence et la présence de polarisation

### III.2.4 Polarisation dipolaire :

La polarisation dipolaire est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué (voir figure I.5, I.6).

En l'absence de champ, les dipôles permanents du matériau sont orientés de manière aléatoire de sorte que le moment dipolaire global est nul. Pour cette raison, la

polarisation d'orientation est influencée et liée avec l'agitation thermique des molécules, la température exerce un effet appréciable sur ce type de polarisation.

La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont « figés » et ne peuvent être orientés. [10]



Figure I- 5: Polarisation avec champ électrique et sans champ électrique E

Un dipôle placé dans un champ électrique est soumis à un couple qui tend à l'aligner suivant la ligne de ce champ.

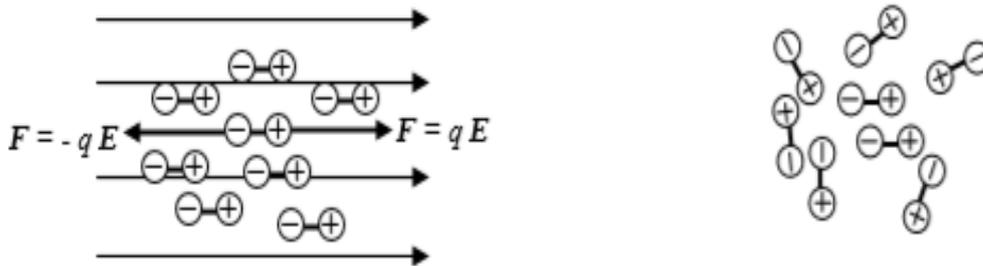


Figure I- 6: Polarisation avec et sans champ électrique

### Remarque :

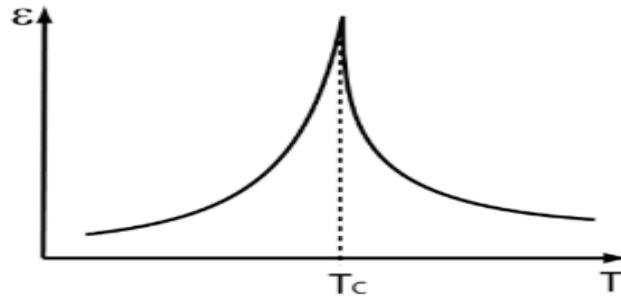
Le rassemblement d'orientation met plus de temps à s'établir (ou à disparaître) lors de l'application de la pression (ou la mise hors tension) par rapport aux autres types de polarisation. Il est clair en effet, que plus de temps est requis pour le mouvement des molécules, surtout les grandes molécules et la consistance dynamique (coefficient de frottement interne) élevé. Ce temps peut être de l'ordre d'une demi-période de la tension alternative.

Tous les types de polarisation provoquent des pertes diélectriques sous forme de chaleur suite aux frottements. En tension alternative les pertes sont beaucoup plus grandes qu'en tension continue. Par conséquent, la tension thermique de claquage est généralement plus faible pour les champs alternatifs, et elle diminue avec l'agrandissement de la fréquence de la tension appliquée [10].

### III.3 Permittivité et pertes diélectriques :

#### III.3.1 Permittivité d'un ferroélectrique :

Les matériaux ferroélectriques montrent généralement une permittivité diélectrique élevée par rapport aux autres matériaux diélectriques. De plus, une permittivité diélectrique maximale est atteinte à la température de Curie  $T_c$ , liée au changement de structure lors du passage de l'état para électrique à l'état ferroélectrique (Figure I.9).



**Figure I- 7:** Evolution de la valeur du constant diélectrique (permittivité) en fonction de température

Au-dessus de la température de Curie ( $T > T_c$ ), la permittivité diélectrique du matériau suit une loi de type Curie-Weiss : [9]

$$\varepsilon = \frac{C}{(T - T_c)} \quad (I.7)$$

C : Constante de Curie

T : Température absolue, mesurée en kelvins.

$T_c$  : Température de Curie, mesurée en kelvins

#### III.3.2 Pertes diélectriques :

Les pertes diélectriques (ou  $\tan \delta$ ) du matériau, définies comme étant l'énergie dissipée par le matériau, répondent au rapport des parties imaginaire et réelle de la permittivité diélectrique complexe :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (I.8)$$

Dans les matériaux ferroélectriques, les pertes constituent l'un des difficultés majeures à leur utilisation dans un grand nombre d'applications. Si des recherches sont toujours menées pour déterminer l'origine de ces pertes (afin de les limiter), il existe encore des zones d'ombre sur l'origine de ces pertes [9].

### **III.4 Applications des matériaux ferroélectriques :**

L'utilisation de matériaux déposés en couche mince est une solution actuellement largement déployée dans une vaste gamme de domaines. Le terme « couche mince » désigne un matériau solide sous forme de film recouvrant un support appelé substrat. Il existe une grande variété de substrats pouvant être utilisés et ils seront généralement sélectionnés en fonction de l'application souhaitée, de par leurs propriétés électriques (forte permittivité, bonne conductivité), optiques (transparence), mécaniques (souples, durs, résistants, avec un faible coefficient de dilation thermique), chimiques (chimiquement stable ou au contraire facilement attaquable) et pour leur coût. Enfin, dans le cas des matériaux ferroélectriques, les propriétés du matériau sont anisotropes et l'orientation des grains peut donc avoir une influence majeure sur ses propriétés. Le choix du substrat selon sa structure cristalline sera donc, dans de nombreux cas, de première importance, étant l'un des facteurs principaux permettant d'obtenir une organisation des grains et une orientation préférentielle.

Les matériaux ferroélectriques sont considérés dans de nombreuses applications. La possibilité de les préparer en couches minces, par voie céramique ou sous forme de monocristal leur confère un avantage certain suivant l'application visée.

Les matériaux ferroélectriques ont été utilisés pour le développement des différents types de condensateurs. Ces dispositifs sont réalisés à partir de diélectriques présentant un permis [9].

### **IV. Caractéristiques des matériaux ferroélectriques :**

#### **IV.1 Polarisation spontanée :**

Si deux éléments constituant une liaison possèdent deux charges partielles de signes opposés, la liaison est dite polarisée et possède donc un moment dipolaire. La polarisation spontanée d'un matériau ferroélectrique résulte de la dissymétrie des atomes qui la constituent et peut être définie comme la valeur du moment dipolaire par unité de volume ou encore la valeur de la charge par unité de surface calculée sur la surface perpendiculaire à l'axe de polarisation spontanée. Il est possible de calculer le moment dipolaire comme le produit de la valeur absolue de la charge par la distance entre les charges. Nous pouvons représenter le moment dipolaire par l'équation suivante :

$$\vec{\mu} = q \cdot l \cdot \vec{u} \quad (\text{I.9})$$

$l$  : Distance entre les centres de charge

$\vec{\mu}$  : Moment dipolaire

$q$  : Charge élémentaire de l'électron

$\vec{u}$  : Vecteur unitaire dirigé du centre des charges négatives vers le centre des charges Positives

Le moment dipolaire est proportionnel au champ appliqué  $E$  qui lui-même est lié à la polarisation. Nous pouvons relier la polarisation  $P$  au champ électrique  $E$  par le biais de polarisabilité  $\alpha$  : [11]

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot \alpha \quad (\text{I.10})$$

D'un point de vue macroscopique, il est possible de relier la polarisation au champ électrique global :

$$\vec{P} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}_{global} = 0 \quad (\text{I.11})$$

Avec  $\epsilon_r$  la permittivité relative définie à partir de sa susceptibilité diélectrique  $\chi$  via l'équation :

$$\chi = \epsilon_r - 1 \quad (\text{I.12})$$

Rappelons que la susceptibilité diélectrique est une grandeur caractérisant la polarisation créée par un champ électrique. Ce phénomène se produit uniquement par l'intermédiaire d'un milieu matériel (souvent un matériau diélectrique). Cette grandeur est sans dimension [11].

### IV.2 La permittivité complexe :

La polarisabilité résulte du déplacement des particules chargées sous l'action d'un champ électrique. Tout mécanisme faisant intervenir un déplacement est donc lié à une polarisabilité mais aussi à une durée d'établissement. En considérant un champ électrique sinusoïdal de la forme  $\vec{E}_0 \cdot e^{j\omega t}$  et en tenant compte de cette durée d'établissement, nous pouvons considérer un déphasage  $\delta$  dépendant de  $\omega$ . Donc on peut écrire :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (\text{I.13})$$

Donc un matériau possédant une permittivité complexe :

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j \cdot \epsilon''(\omega) \quad (\text{I.14})$$

avec :

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_r \cdot \cos(\delta) \quad (\text{I.15})$$

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_r \cdot \sin(\delta) \quad (\text{I.16})$$

Le rapport entre les parties imaginaire et réelle présente le facteur de pertes  $\tan(\delta)$  et est donné par la relation suivante :

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (\text{I.17})$$

### IV.3 Les avantages des matériaux ferroélectriques :

- ✓ La commande électrique est plus facile à intégrer que la commande magnétique de matériau ferromagnétique
- ✓ Les faibles valeurs du champ électrique de commande ainsi que le temps de commutation assez faible

**Parmi leur inconvénient majeur :** est leurs pertes diélectriques qui restent relativement importantes [12].

### V. Conclusion :

En raison de leurs fortes permittivités, les matériaux ferroélectriques sont très utilisés dans les composants électroniques. Dans ce chapitre une étude sur les matériaux ferroélectriques et leur propriété a été investie, sans oublier de donner un panorama des différents types de polarisation avec une présentation des applications et caractéristique des matériaux ferroélectrique. Ces derniers sont utilisés pour incorporer une autre bande de fréquence dans l'antenne étudié dans ce mémoire.

## Chapitre II: Les antennes patch à base de couche mince

### I. Introduction :

Nous sommes à l'heure actuelle entourés de nombreux systèmes de communications travaillant sans liaison physique, on parle de systèmes de communication sans fils, capteurs sans contacts et principalement les antennes.

Le but de ce chapitre est de revenir sur certaines notions fondamentales sur les antennes et ces types. Un intérêt particulier est porté sur les antennes imprimées, leur propriété, types et caractéristiques. De plus nous présentons dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour la miniaturisation de ces antennes.

### II. Généralité sur les antennes :

#### II.1 Définition:

Une antenne est un dispositif servant à faciliter le transfert d'énergie entre une ligne de transmission et l'espace libre. Une antenne peut servir à l'émission et à la réception des ondes électromagnétiques. De nombreux paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances des antennes tels que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, la directivité, le gain, l'efficacité ainsi que les diagrammes de rayonnement [3, 13].

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- Transmettre le plus fidèlement possible une information.
- Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation [13].

#### II.2 Caractéristique d'une antenne :

##### II.2.1 Impédance d'entrée :

On appelle impédance d'entrée ( $Z_e$ ) de l'antenne l'impédance vue à l'entrée de ce composant. Mathématiquement, l'impédance d'entrée est :

$$Z_e = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_e + jX_e \quad (\text{II.1})$$

Où  $V_{in}$  est la tension d'entrée et  $I_{in}$  est le courant à l'entrée de l'antenne.

La réactance  $X_e$  est liée à la puissance réactive stockée et concentrée au voisinage de l'antenne.

L'impédance d'entrée est un nombre complexe ; La partie réelle se compose de deux composantes :

$$R_e = R_r + R_1 \quad (\text{II.2})$$

La résistance d'entrée  $R_e$  représente un terme de dissipation. Il est lié, d'une part à la puissance rayonnée et d'autre part, à la puissance perdue par effet Joule . Cependant les pertes par effet Joule peuvent représenter des valeurs non négligeables en fonction de la géométrie de l'antenne.  $R_e$  est en général petite par rapport à la puissance rayonnée pour assurer le fonctionnement optimal de l'antenne.

La résistance de rayonnement est liée aux pertes de puissance qui est liée à l'onde électromagnétique rayonnée par l'antenne. Il s'agit donc d'une puissance active. Une grande résistance de rayonnement indique une forte capacité à convertir l'énergie électrique incidente (lié au courant qui « passe » dans la résistance de rayonnement) en énergie électromagnétique. En effet, la puissance électrique qui lui est fournie est une puissance égale à :

$$P_{rad} = \frac{1}{2} R_{rad} I_{in}^2 \quad (\text{II.3})$$

Il est possible de calculer la puissance rayonnée à partir de la connaissance du courant en tout point de l'antenne. Cette définition suppose que le courant soit constant en tout point de l'antenne. En pratique, on considèrera le point où le courant est maximum.

Le rendement d'une antenne est défini comme étant le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance dissipée totale. Elle dépend donc du rapport entre la résistance de rayonnement de l'antenne et ses pertes [13, 14].

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_a} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} \quad (\text{II.4})$$

### II.2.2 Coefficient de réflexion et Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) :

Le coefficient de réflexion  $\Gamma$  définit la discontinuité montrée à l'entrée de l'antenne. Celui-ci est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne par une relation classique :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0} = S_{11} \quad (\text{II.5})$$

Avec  $Z_0$  l'impédance de normalisation (égale à  $50\Omega$  en technologie microonde)

Ce paramètre permet de caractériser l'adaptation de l'antenne qui est réalisée idéalement pour  $\rho$  nul (absence d'onde réfléchie).

Dans la pratique, le "Rapport d'Onde Stationnaire" (R.O.S.) ou VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) est souvent caractérisé l'adaptation de l'antenne. Il est définie par :

$$\text{ROS} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{II.6})$$

Ce rapport prend des valeurs entre 1 et l'infini. En pratique, une bonne adaptation est réalisée lorsque le taux d'onde stationnaire est inférieur à 2

On peut utiliser le terme de TOS (Taux d'Ondes Stationnaires) à la place de ROS [14, 15].

### II.2.3 Bande passante et facteur de qualité:

La bande passante, appelée aussi la largeur de bande, d'une antenne est déterminée par le domaine de fréquence dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Il s'agit aussi de la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale.

La bande passante peut aussi être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur a -10 dB ou -15 dB. C'est-à-dire là où 90% de la puissance fournie à l'antenne est transformée et le reste est réfléchi (La bande passante relevée pour les antennes en télécommunication est celle d'une antenne avec un ROS ou TOS  $\leq 2 \leftrightarrow 9.5\text{dB}$  ; TOS=1.4  $\leftrightarrow$  S11=15dB). [13,14]

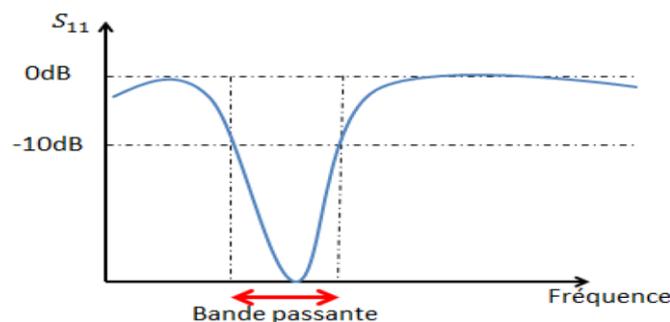


Figure II- 1: Bande passante et coefficient

D'un point de vue électrique, et comme l'antenne peut être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BP (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance  $f_{res}$  par :

$$Q = \frac{f_{res}}{BP} = \frac{2\pi f_{res} L_{ant}}{R_{ant}} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{res} L_{ant}} \quad (\text{II.8})$$

$R_{ant}$  : Résistance de l'antenne

Sur une bande de fréquence étroite, une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement. Ce qui peut limiter les interférences hors bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué [13, 14].

### II.2.4 Directivité :

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  est un paramètre intrinsèque de l'antenne, sans dimension. C'est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope  $P_r$  :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{II.9})$$

### II.2.5 Gain d'une antenne :

On appelle gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$ , le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes  $P_A$ . Le gain correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal  $(\theta_0, \varphi_0)$  :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (\text{II.10})$$

Le gain s'exprime en décibel (dB). Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB.

Le gain est proportionnel à la directivité. Il porte la même information sur les directions de rayonnement [13, 14].

### II.2.6 Rendement :

La puissance d'alimentation d'une antenne ( $P_A$ ) est transformée en une puissance rayonnée  $P_r$ . On définit le rendement  $\eta$  d'une antenne comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. L'antenne est un transformateur imparfait. Il y a des pertes lors de la transformation d'énergie, comme dans tout système. Le rendement de l'antenne est définie par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_A} \quad (\text{II.11})$$

On distingue que le rendement relie le gain et la directivité par :

$$P_r = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \quad (\text{II.12})$$

Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation, d'adaptation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations (II.9) et (II.10). Le gain, directivité et rendement permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière [13, 14].

### II.2.7 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne. L'axe de rayonnement de l'antenne présente la direction du maximum de rayonnement.

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée (appelée lobe principal) et des directions secondaires autour desquelles se répartissent la fraction de la puissance restante (appelée lobes secondaire). Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H. Le premier est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique, le deuxième, est déterminé comme le plan comportant l'axe de l'antenne et le champ magnétique.

Le diagramme de rayonnement, généralement en coordonnées logarithmiques, est présenté soit en coordonnées rectangulaires, soit en coordonnées polaires, dans les deux plans perpendiculaires (E et H) [13, 14].

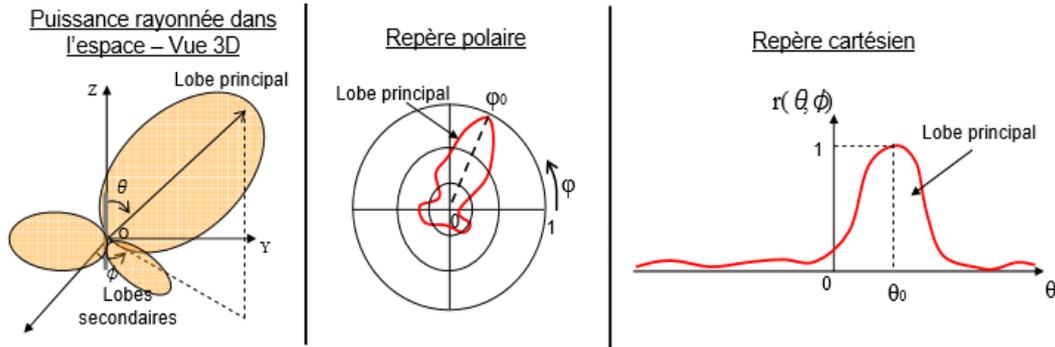


Figure II- 2: Représentation du diagramme du rayonnement d'une antenne

### II.2.8 Puissance rayonnée par une antenne :

Pour exprimer la puissance rayonnée par une antenne quelconque, dont le centre est placé au centre d'un repère sphérique et est connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique  $P_A$  , il faut définir :

- La puissance fournie à une surface élémentaire située à une distance  $r$ , donnée par l'équation (II.13) :

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega r^2} [W/m^2] \quad (II.13)$$

- La puissance rayonnée dans une direction  $(\theta, \varphi)$  dans un angle solide (exprimé en stéradian), donnée par l'équation (II.14)

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega} [W \text{ ou } \frac{W}{S_r}] \quad (II.14)$$

- Et la puissance rayonnée totale  $P_{tot}$  correspondant à la somme des puissances rayonnées dans toutes les directions de l'espace (équation II.15) [14] :

$$P_{tot} = \int_{\theta} \int_{\varphi} P(\theta, \varphi) d\varphi d\theta [W/m^2] \quad (II.15)$$

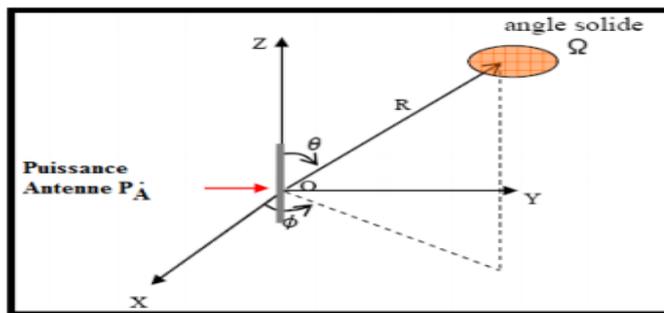


Figure II- 3: Puissance rayonné par une antenne dans une direction de l'espace

II.2.9 Angle d'ouverture :

Il s'agit de l'angle entre les deux directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. L'angle d'ouverture caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3dB  $2\theta_3$  représente la section de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. [14]

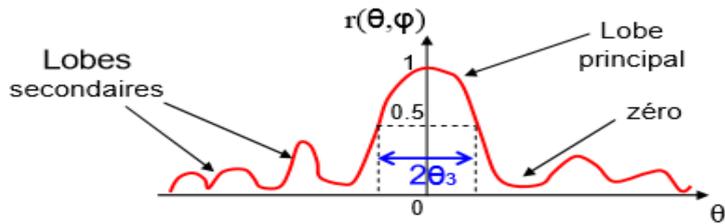


Figure II- 4:diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

II.2.10 Résistance de rayonnement :

Nous définissons la résistance de rayonnement en un point Q :

$$R_Q = \frac{2P_r}{I_Q^2} \tag{II.16}$$

$P_r$  : Puissance active rayonnée par une antenne.

$I_Q$  : Courant en un point de cette antenne [3].

II.2.11 Polarisation :

La polarisation de l'antenne est définie en conséquence avec la polarisation de l'onde électromagnétique. C'est la polarisation de l'onde générée par cette antenne dans une direction bien déterminée. Il y a trois façons fondamentales par lesquelles l'onde électromagnétique est rayonnée : linéairement (verticalement ou horizontalement), circulairement et elliptiquement (voir figure II-5) [3-14] :

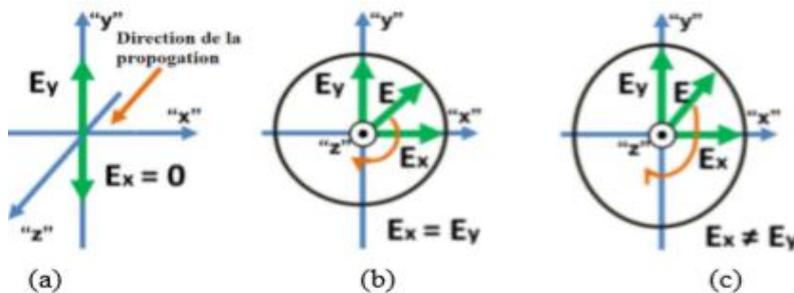


Figure II- 5: Polarisation d'une antenne :a)Linéaire,b)Circulaire,c)Elliptique

### II.3 Types d'antennes :

Les antennes sont réparties en plusieurs concepts selon la géométrie, la bande passante, la forme du faisceau et le gain. Ainsi, on peut les classer comme suit [15] :

#### Selon la forme géométrique :

- antennes à ouvertures : cornet, fente, antenne à réflecteur.
- antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
- antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.

#### Selon la largeur de bande :

- bande large : spirale.
- bande étroite : patch, fente.

#### Selon la forme du faisceau:

- omnidirectionnelle : dipôle.
- faisceau étroit : antenne réseau.
- faisceau large : planaire.

#### Selon le gain:

- gain bas : dipôle, fente, patch.
- gain moyen : planaire.
- gain élevé : cornet

Quelque types d'antenne sont illustrés dans le Tableau II- 1.

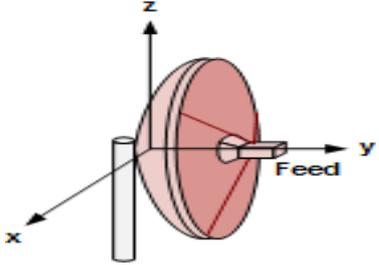
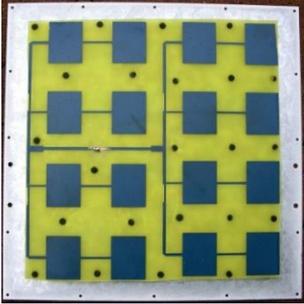
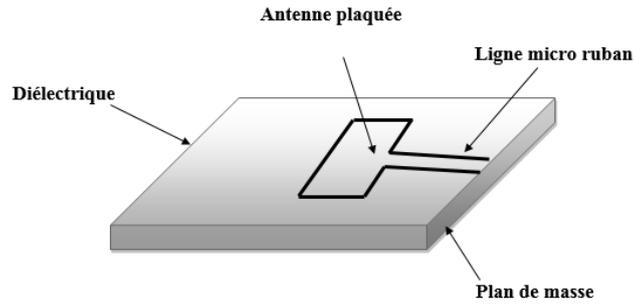
	<p><b>Antennes à réflecteur (parabolique) :</b> Une antenne à réflecteur ou antenne parabolique est constituée d'une source rayonnante qui est en générale une antenne dipôle ou cornet, placée au foyer d'un réflecteur parabolique qui assure la concentration des ondes reçues ou émises. Le but de la source est d'éclairer entièrement la surface du réflecteur avec le signal à émettre [16].</p>
	<p><b>Les antennes réseaux :</b> sont formées d'un groupement de plusieurs éléments rayonnants, en général identiques et travaillant dans la même bande de fréquences, pour former une ouverture rayonnante. Les éléments rayonnants peuvent être des patches imprimés, des fentes, des cornets ou des dipôles distribués dans l'espace [16].</p>
	<p><b>Antennes cornet :</b> Les cornets sont des guides d'onde à section progressivement grandissante se terminant par une ouverture rayonnante de contour rectangulaire ou circulaire [16].</p>

Tableau II- 1: Quelques types d'antenne [16]

## II.4 Antennes imprimées ou patch

### II.4.1 Définition :

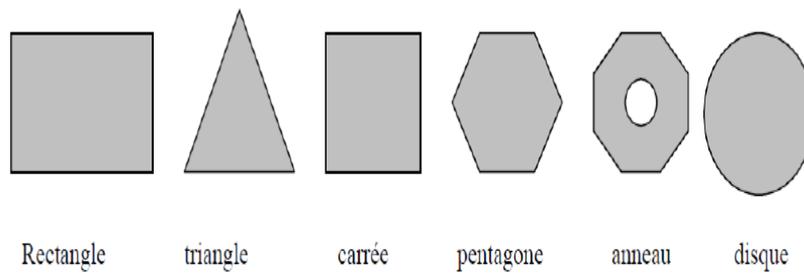
L'antenne imprimée, appelée aussi antenne patch, est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique. Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban.



**Figure II- 6:** Antenne imprimé

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée circulaire ou simplement un dipôle de dimension d'ordre de demi longueur d'onde ( $\lambda/2$ ).

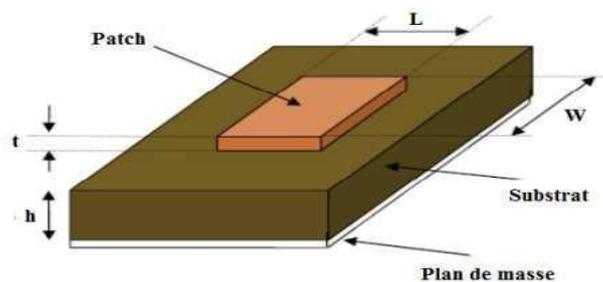
Les antennes imprimées présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant [15].



**Figure II- 7:** Différentes forme d'élément rayonnant

### II.4.2 Structure d'une antenne imprimée:

La structure de base d'une antenne patch est donnée par la figure suivante :



**Figure II- 8:** Présentation d'une antenne imprimée

Où :

W : Largeur du patch, h : épaisseur du substrat.

L : Longueur du patch, t : épaisseur du patch

Dans sa structure de base (figure II.8), une antenne imprimée est constituée d'un conducteur métallique de forme arbitraire, déposé sur un substrat diélectrique au-dessus d'un plan de masse.

Pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, il faut:

- Réduire les pertes par l'effet joule.
- Améliorer la bande passante de l'antenne.
- La face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse.
- Le patch doit être relié au reste du circuit à l'aide d'une ligne de transmission de type micro ruban. Cette ligne va également permettre d'adapter l'impédance de l'antenne au reste du circuit pour éviter un phénomène de réflexion.

La forme du patch conducteur peut être variée, mais elle influe sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antenne et donc sur la nature du rayonnement. En pratique, on trouve essentiellement des rectangles, des disques, et plus rarement des anneaux ou des triangles. Leurs dimensions sont faibles (de l'ordre de  $\lambda/2$  à  $\lambda$ ) [17].

### II.4.3 Types d'alimentation :

En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut agir directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne et en fonction de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les méthodes d'alimentation des antennes patch sont classées en deux catégories :

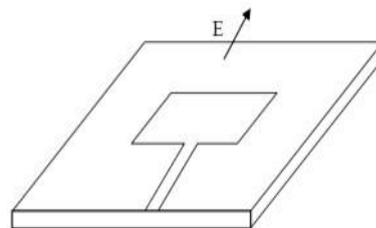
- ✓ Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- ✓ Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente) [18].

II.4. 3.1 Alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban) :

**Alimentation directe par une ligne micro ruban:** Dans ce type d'alimentation, une bande de cuivre est reliée directement au bord du patch de micro ruban. La bande de cuivre est plus petite dans la largeur par rapport au patch. Elle est facile à fabriquer et simple à adapter à la résonance, c'est la technique la plus utilisée dans les antennes imprimées.

**Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant:**

cette technique est l'une des méthodes les plus utilisées. Il existe une variation de l'impédance d'entrée car le point d'alimentation est déplacé le long de ce côté. Dans ce cas la ligne d'alimentation entre en connexion directement sur le côté rayonnant du patch



**Alimentation par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant:**

Dans cette technique les calculs sont plus complexes, car les courants de la ligne d'alimentation sont orthogonaux à ceux du patch. La ligne d'alimentation entre en contact avec le patch sur le bord non rayonnant.

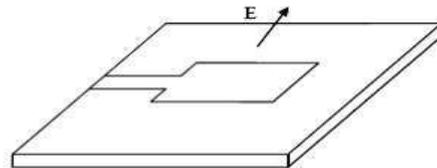


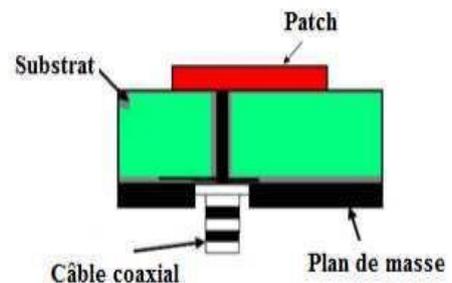
Tableau II- 2: Différentes techniques par contact

La méthode d'alimentation des antennes patch qui est utilisée dans notre mémoire est : L'alimentation par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant

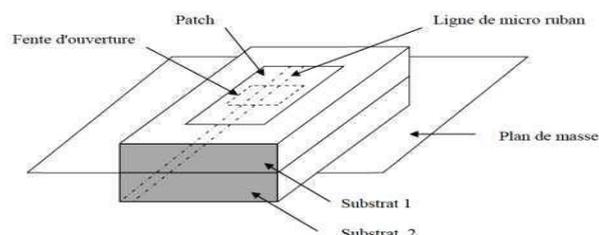
### II.4. 3.2 Alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente) :

#### Alimentation coaxiale:

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans. Dans ce cas le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et soudé au patch alors que le conducteur externe est relié au plan de masse. L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication.



**Alimentation couplée par ouverture:** Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indiqué sur la figure ci-dessous. Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch. Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre un élargissement de bande passante.



#### Alimentation couplée par proximité:

Dans ce type d'alimentation deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur. L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du faux rayonnement d'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ce par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne.

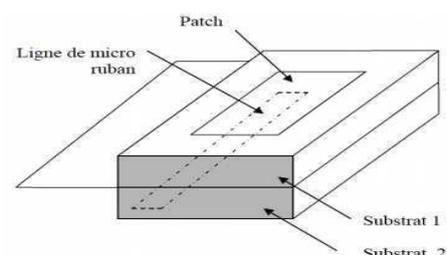


Tableau II- 3: Différentes techniques d'alimentation par proximité [3]

### II.4. 4 Principe de fonctionnement :

Dans sa configuration originale, le comportement de l'antenne est contrôlé à l'aide d'une sonde de courant connectée entre le patch rayonnant et le plan de masse, ce qui va provoquer l'apparition et la distribution de charges qui s'établit au-dessus et en dessous de l'élément, entre le plan de masse et le substrat.

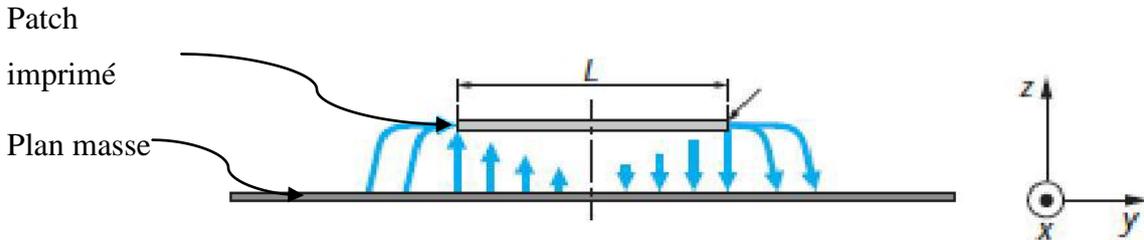


Figure II- 9: Rayonnement d'une antenne

Le champ présent entre les bords du patch et le plan de masse va déborder et contribuer à générer le champ électromagnétique rayonné : ce champ généré par les bords séparés par la longueur du patch  $L$  étant maximum et en opposition de phase vont avoir tendance à s'additionner de manière constructive et optimale, et générer un rayonnement inscrit dans le plan  $YZ$  (figure II.9) Ces 2 bords sont donc appelés bords rayonnants [19].

### II.4. 5 Avantages et les inconvénients des antennes patches:

Les antennes patches présentent de nombreux avantages et leurs utilisations couvrent un large domaine de fréquence allant de 100MHz jusqu'à 100GHz. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids,
- Faible coût de fabrication,
- Production en masse possible,
- Encombrement réduit,
- Compatibilité avec les circuits hybrides et l'VMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit),
- Les réseaux d'alimentation et d'adaptation sont fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Antennes multi bandes, multi polarisation possibles,
- La simplicité de leurs structures
- L'utilisation de deux fréquences de travail est possible

Cependant, ces antennes ont aussi des inconvénients et des limitations d'utilisations suivantes:

- Bande passante étroite,
- Un gain moyen,
- Un rayonnement limité à un demi-plan d'espace,
- Supportent uniquement des faibles puissances,
- Pertes de rayonnement par onde de surfaces. [20].

### II.4. 6 Application des antennes imprimées :

Les domaines d'application des antennes imprimées sont de plus en plus variés.

Les principales applications sont [21]:

- La téléphonie mobile
- Les radars
- Les télécommunications spatiales
- La télémétrie des missiles et télédétection
- Les antennes d'émissions utilisées en médecine
- Les récepteurs satellites de navigation
- La commande et le contrôle.

### II.5 Techniques de miniaturisation :

#### II.5.1 Définition :

La miniaturisation des antennes consiste à réduire les dimensions globales de l'antenne tout en conservant ses caractéristiques clés telles que l'impédance et les diagrammes de rayonnement. Aujourd'hui, les petites antennes sont principalement utilisées pour la communication mobile et d'autres systèmes sans fil. Ces systèmes sans fil sont utilisés pour la communication, la détection, le contrôle, l'utilisation médicale, la communication et les données corporelles [3].

#### II.5.2 Techniques de miniaturisation :

De nombreuses techniques, ont été utilisées pour réduire la taille des antennes pour une fréquence donnée. Parmi les techniques de miniaturisation des antennes, nous citons :

- **La modification de la géométrie** : cette technique s'intéresse à modifier les structure d'antenne en utilisant des fentes, le repliement, des formes fractales ou arbitraires.

- **Utilisation d'un substrat à haute constante diélectrique** :

Une technique de miniaturisation simple consiste à modifier les caractéristiques radioélectriques de l'environnement proche de l'antenne. Il est en effet bien connu que les matériaux à fort contraste permettent de réduire la taille physique de l'antenne en raison d'une longueur d'onde plus courte dans le matériau. En utilisant un diélectrique avec une permittivité relative élevée [28].

- **Modification de la forme de l'élément rayonnant** :

L'antenne imprimée peut prendre plusieurs formes d'élément, En forme triangulaire, En forme de nœud-papillon et Méandres verticaux ou repliement de la structure [29].

- **Ajout des courts circuits verticaux entre l'élément rayonnant et le plan de masse** :

Une des méthodes les plus utilisées dans le domaine des antennes imprimées consiste à introduire un ou plusieurs courts-circuits entre l'élément rayonnant et le plan de masse.

- **Utilisation des charge capacitif et ou inductif réalisé par des composante localisés** :

L'inconvénient de cette technique est l'introduction de pertes ohmiques, d'où une baisse de l'efficacité de l'antenne.

- **Les antennes DRA** :

- Métallisation d'une face du résonateur : l'insertion d'une plaque métallique sur l'antenne DRA

- DRA multicouches : l'insertion d'une couche de forte permittivité permet de faire baisser la fréquence d'adaptation [28].

- **L'incorporation d'une couche mince de matériaux ferroélectrique en dessous du plan de masse** :

Ces matériaux, de permittivité très élevée, vont jouer le rôle d'élément rayonnant, ce qui va créer d'autres bandes de fréquence. Cette technique est utilisée dans notre mémoire pour la miniaturisation des antennes patchs

### II.5.3 Avantages et inconvénients de la miniaturisation :

La miniaturisation des antennes présente plusieurs avantages et inconvénients qui sont :

#### Les avantages :

- Permet la réduction de la consommation d'énergie et de matière, du poids et des prix.
- Permet la réduction de l'espace occupé : les éléments qui prennent moins de place sont plus attrayants que les structures qui sont de plus en plus volumineux, car ils sont plus faciles à transporter, à stocker, à se mettre dans un réseau sans l'encombrer et souvent plus pratiques à utiliser.
- Admet la production d'appareils multifonctionnels.

#### Les inconvénients :

- La dégradation de performances de la miniaturisation des antennes est impliquée.
  - La complexité de l'opération de séparation des métaux lors du recyclage, ce qui limite d'autant l'avantage obtenu par les économies en matière et en énergie.
- [29]

### III. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons, dans un premier temps, donné quelque information générale sur les antennes destinées aux réseaux de télécommunication. Puis, on a présenté certaines notions fondamentales sur les antennes imprimées (patch) et leurs applications. Nous nous intéresseront plus particulièrement aux antennes imprimées, leur propriété, types et caractéristiques ainsi que les différentes techniques utilisées pour la miniaturisation de ces antennes. Dans le chapitre suivant nous allons présenter une description du logiciel HFSS et son environnement de travail dans lequel les différentes structures à étudiées sont implémentées.

# Chapitre III: Présentation du Logiciel HFSS

### I. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons attribuer une présentation générale du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) dans laquelle nous allons développer les différents aspects de mise en œuvre d'un projet HFSS depuis le dessin de la structure à étudier jusqu'à l'exécution "Analyze". Les structures développées dans ce mémoire sont effectués dans la version 19.2 de HFSS. Ce dernier est un logiciel de modélisation électromagnétique. Dans ce qui suit, nous présentons la structure physique de l'antenne à étudier et le projet HFSS correspondant avec quelques illustrations graphiques.

### II. Le logiciel de simulation HFSS :

Plusieurs logiciels commerciaux utilisent des méthodes fréquentielles purement volumiques (CST Microwave Studio, Ansoft HFSS par exemple), le logiciel que nous avons utilisé est le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator). HFSS est un logiciel de modélisation électromagnétique, il analyse des circuits passifs et les structures tridimensionnels. Il aide le concepteur à observer et analyser les diverses propriétés électromagnétiques de la structure tels que les caractéristiques de rayonnement et de la dispersion. Il est important de comprendre chaque étape du processus de modélisation en détail afin d'obtenir des résultats fiables. Les projets présentés dans ce mémoire sont réalisés dans la version 19.2 de HFSS. Le présent chapitre développe les différents aspects de mise en œuvre d'un projet HFSS depuis le dessin de la structure à étudier jusqu'à l'exécution "Analyze" [25-26].

#### II.1 Un projet HFSS :

Un projet HFSS est un dossier qui contient un ou plusieurs modèles appelés design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post-traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement HFSS [24].

#### II.2 Définition du logiciel Ansoft HFSS:

le logiciel HFSS qui est l'abréviation de 'High Frequency Structure Simulation' est un logiciel de simulation électromagnétique 3D permettant de concevoir et de simuler des produits électroniques haute fréquence tels que des antennes, des composants radiofréquences ou hyperfréquences, des réseaux d'antennes, des interconnexions à

haute vitesse, des connecteurs, des filtres, des cartes de circuits imprimés et des boîtiers de circuits intégrés. Il est utilisé par des les ingénieurs d'électronique pour concevoir des composants électroniques, haute fréquence et haute vitesse utilisés dans les systèmes de communication, les systèmes radar, les satellites, les produits internet des objets et d'autre produits radiofréquences et numériques haute vitesse.

### II.3 La méthode des éléments finis (FEM) :

HFSS utilise La méthode des éléments finis (FEM) à laquelle est incorporée une fonction de discrétisation adaptative pour générer les solutions, cette méthode (parfois appelé aussi l'analyse par élément finis) basée sur la résolution des équations de Maxwell et sur la description géométrique de la structure sous forme d'un maillage. Elle consiste à diviser l'espace en petits éléments homogènes mais de taille pratiquement très variable, ce qui constitue l'un des points forts de cette méthode. La FEM permet de calculer, en chaque point des éléments divisant l'espace, les champs électriques qui minimisent la fonction d'énergie. Ce moyen est implémenté dans quelques codes commerciaux tels que le fameux logiciel HFSS d'Ansoft qui peuvent être utilisé pour calculer des paramètres tels que les paramètres S Y, Z, la fréquence de résonance et les champs rayonnés [24-26].

### II.4 Comment commencer HFSS :

HFSS devrait être installé sur l'ordinateur que vous travaillez dessus. Il devrait y avoir une icône de HFSS sur l'ordinateur de bureau que vous pouvez double-cliquer dessus pour lancer HFSS. Dans notre travail en utilise la version 19.2 [24].

### II.5 Un projet en HFSS :

La fenêtre d'Ansoft HFSS a plusieurs panneaux facultatifs:

- **Le Project Manager:** contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager:** permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la simulation.
- **La fenêtre de Progress:** affiche les progressions de la solution.
- **La fenêtre de 3D Modeler:** contient le modèle et son arbre pour la conception active.
- **La fenêtre de Propriétés:** pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle. Le processus HFSS se déroule comme suit : [24]

## Chapitre III: Présentation du logiciel HFSS.

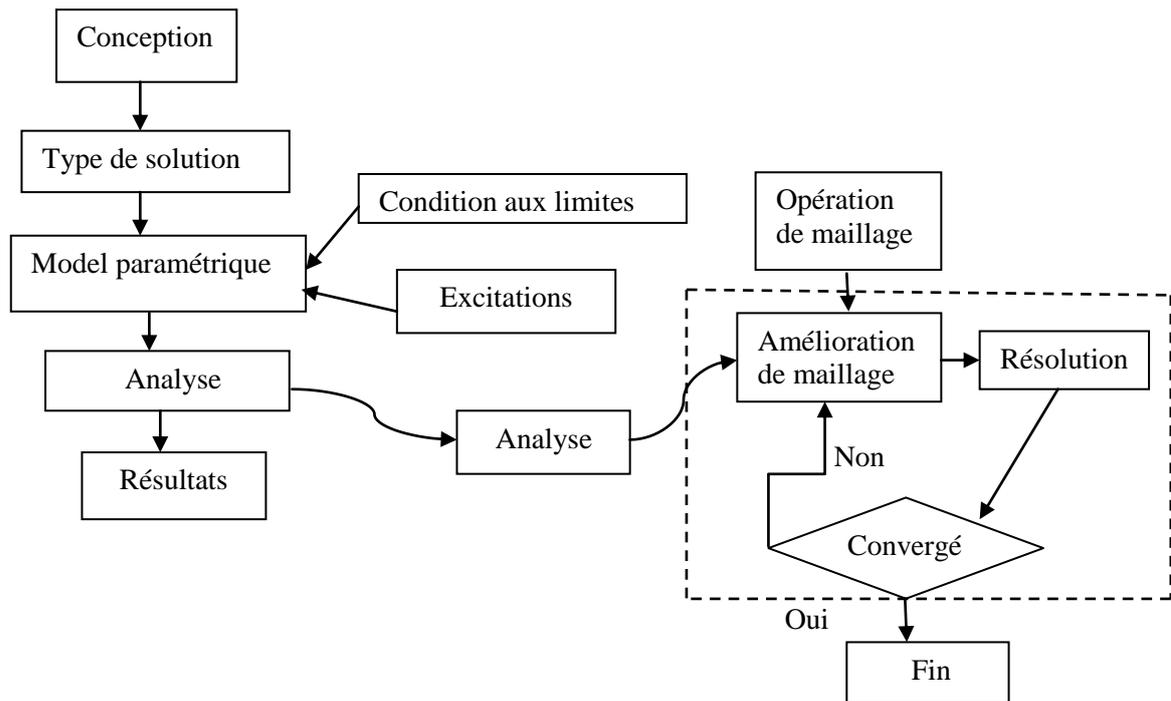


Figure III- 1: Processus HFSS[26]

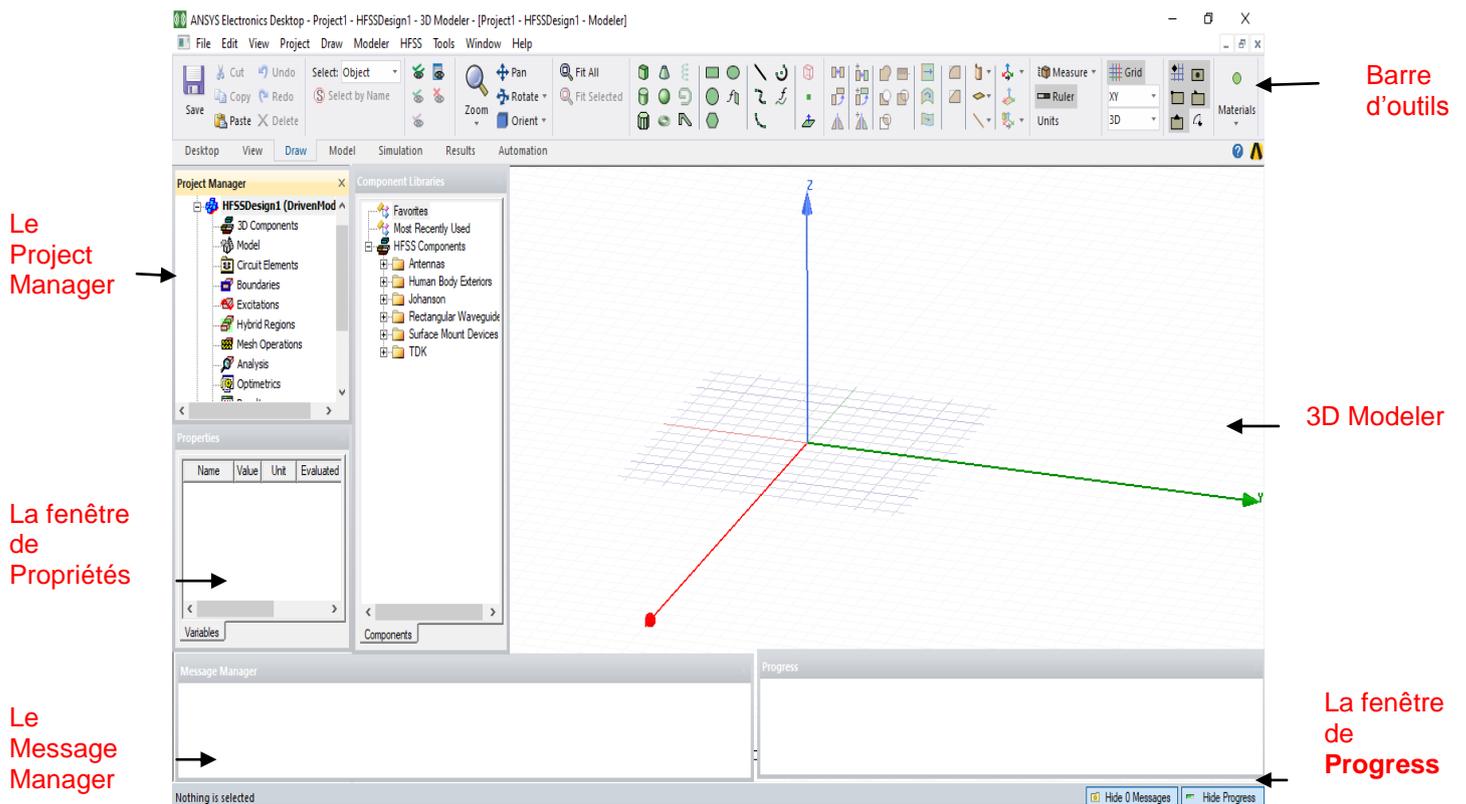


Figure III- 2: Fenêtre principal du logiciel HFSS

### II.5.1 Le Project Manager :

Cette fenêtre regroupe toutes les étapes de conception d'un modèle sous HFSS (Figure III.3) :[26]

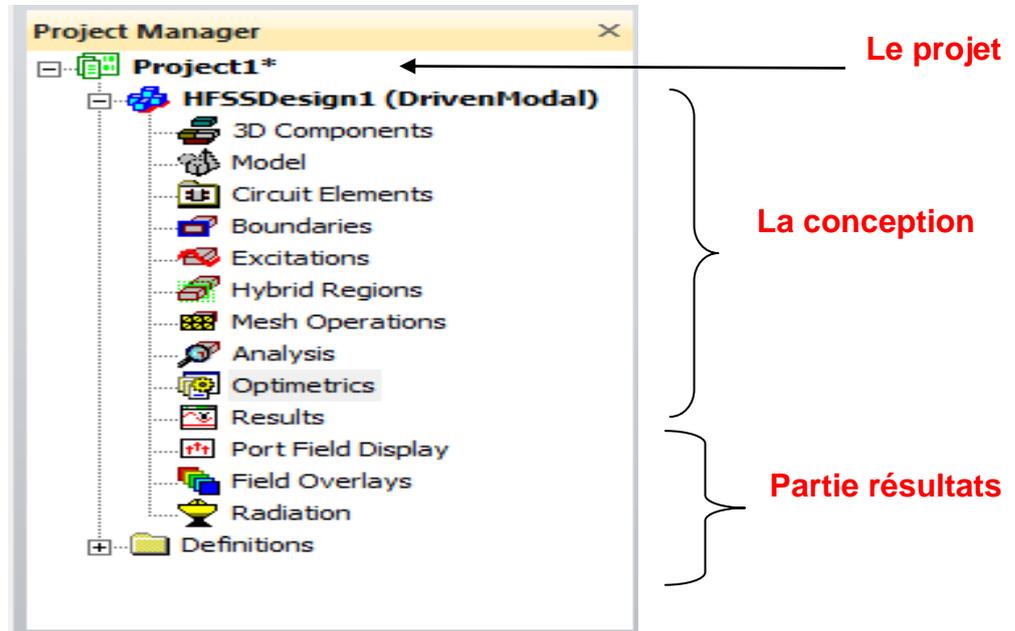


Figure III- 3: Arbre de gestion d'une structure sous HFSS

### II.5.2 Fenêtre de la propriété :

Cette fenêtre rassemble toutes les propriétés d'un modèle sous HFSS (Figure III.4) : [26]

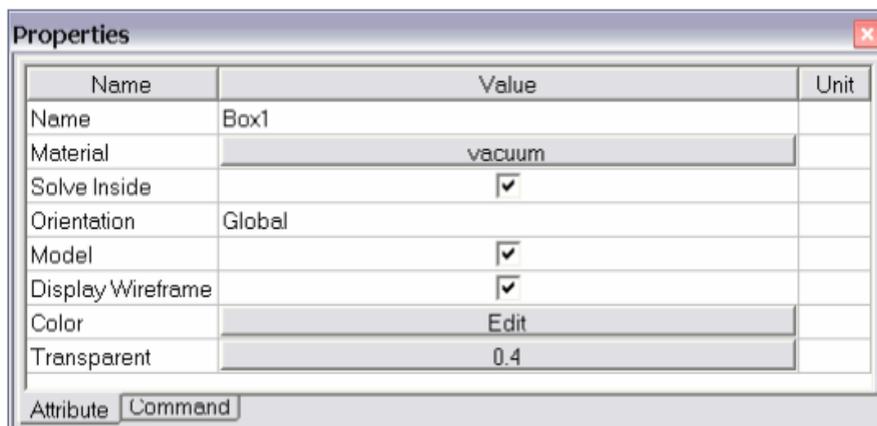


Figure III- 4: Représentation des propriétés

### II.5.3 Modeleur 3D :

Cette fenêtre rassemble toutes les Matériels d'un modèle sous HFSS (Figure .III.5)

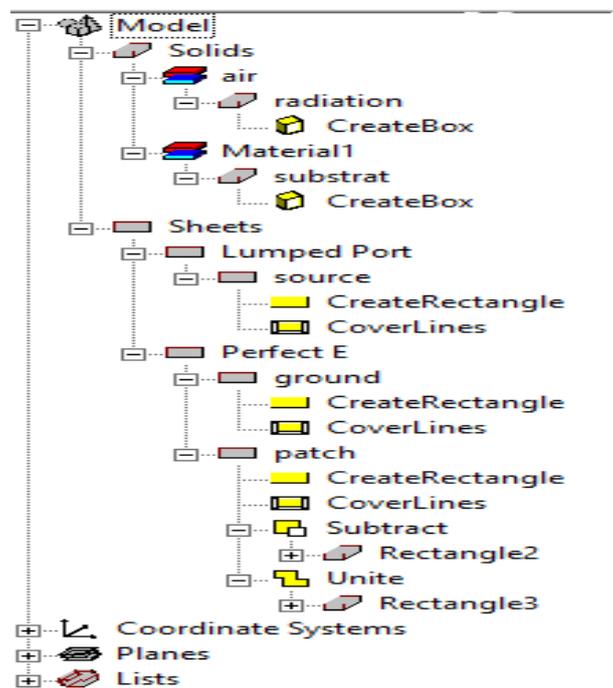


Figure III- 5: Groupe de matériel[26]

### II.5.4 Barres d'outils :

Cette fenêtre représente les boutons de barre d'outils qui sont des raccourcis pour des commandes fréquemment utilisées. La plupart des barres d'outils disponibles sont montrées dans cette illustration de l'écran initial d'Ansoft HFSS 19.2 (figure III.6) [26].

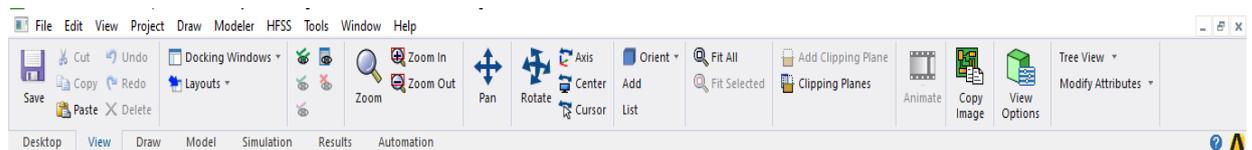


Figure III- 6: Fenêtre de barre d'outil

### II.5.5 Comment ouvrir un nouveau projet :

Quand vous commencez HFSS v 19, Sur le menu File, cliquer New. Un projet est énuméré dans l'axe de projet dans la fenêtre de Project Manager et est appelé project1 par défaut. Nous spécifions le nom du projet quand nous le sauvons utiliser le chemin : File>Save ou File>Save As. Pour un projet précédemment sauvé on utilise la commande : File>Open. (Figure III.7) [24,26].

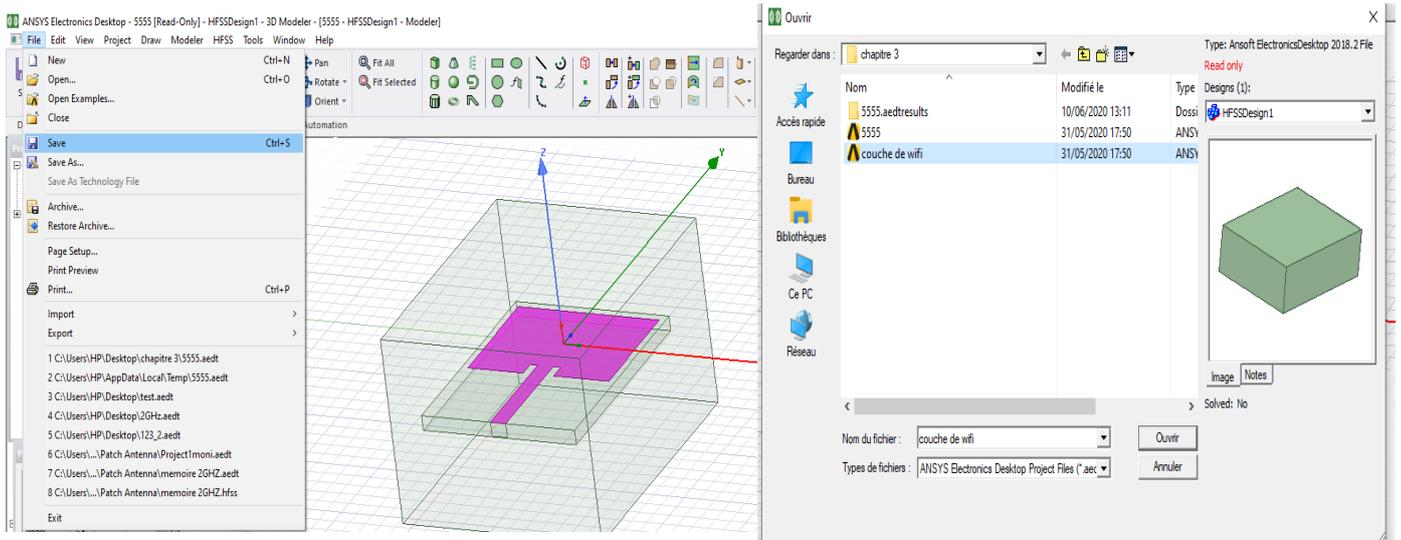


Figure III- 7: Création de projet

### II.5.6 Insérer une conception de HFSS :

Cliquer Insert HFSS Design sur le menu Project. La nouvelle conception est énumérée dans l'arbre de projet, il est appelé Model par défaut, où n est l'ordre dans lequel la conception a été ajoutée au dessin. La fenêtre 3D Modeler apparaît à la droite du Project Manager.

Nous pouvons choisir le Rescale à la nouvelle option d'unités pour adapter les dimensions aux nouvelles unités. Dégager le Rescale à la nouvelle option d'unités (par défaut) pour convertir les dimensions en nouvelles unités sans changer la structure. Cliquer sur OK pour appliquer les nouvelles unités au modèle [24,26].

### II.5.7 L'Arrangement des Unités du Modèle de Mesure :

Nous pouvons changer ou choisir les dimensions du modèle à une unité pertinente (mm), ou adapter les dimensions du modèle aux nouvelles unités. Par exemple. Cliquer sur "Unit", sur le menu "3DModeler", La boîte de dialogue "Set Model Units" apparaît (Figure III.8), dans cette boîte de dialogue, cliquons "mm" à partir de la liste déroulante.[25,27]



Figure III- 8: Boîte d'unités de modele

### II.5.8 Dessiner un modèle :

Pour créer une structure en 3D il suffit de la dessiner avec les outils mis à disposition par le logiciel.ici, en employant les commandes de l'aspiration de HFSS (HFSS>Draw> command). Des objets sont dessinés dans la fenêtre du modéliseur 3D (figure III.9) [26]

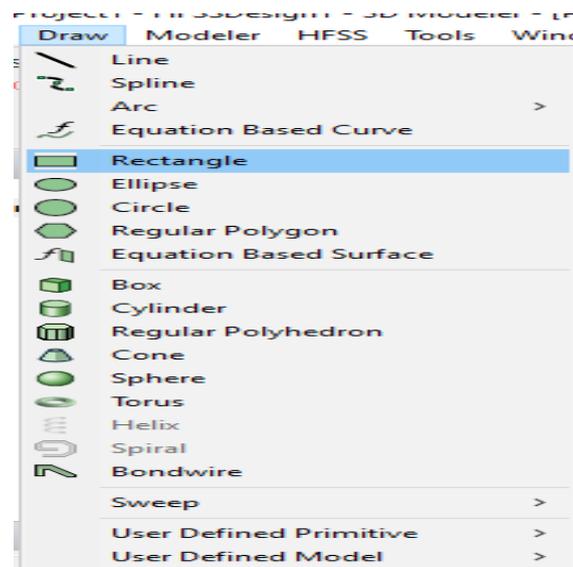


Figure III- 9: Fenêtre de gestion des différentes modéle à dessiner sur HFSS

### II.5.9 Variables du projet :

On peut définir les variables dans le logiciel HFSS pour les associer à certains paramètres de la structure, comme les dimensions, les propriétés des matériaux.

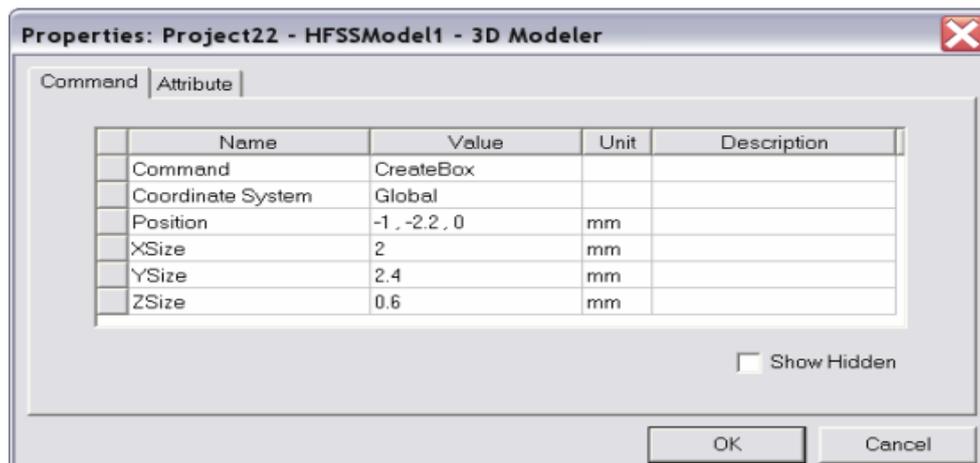


Figure III- 10: Utilisation des variables dans HFSS

### II.5.10 Types de solution :

La première étape de faire une simulation est de déterminer le mode de solution qu'on souhaite réaliser. Il existe trois types de solution :

- ✓ **Driven terminal**: calcule les paramètres  $S$  dans les structures hautes fréquence des ports des lignes de transmission multiconducteurs. Cette solution est exprimée en termes de tensions et courants terminaux
- ✓ **Driven Modal** : calcule des paramètres  $S$ . les solutions de la matrice  $S$  seront exprimés en termes de puissance incidente et réfléchi
- ✓ **Eigenmode** : calcule les modes propres, ou de résonances, d'une structure. La solution des Modes propre retourne les fréquences de résonance de la structure et les champs à ces fréquences de résonance [26].

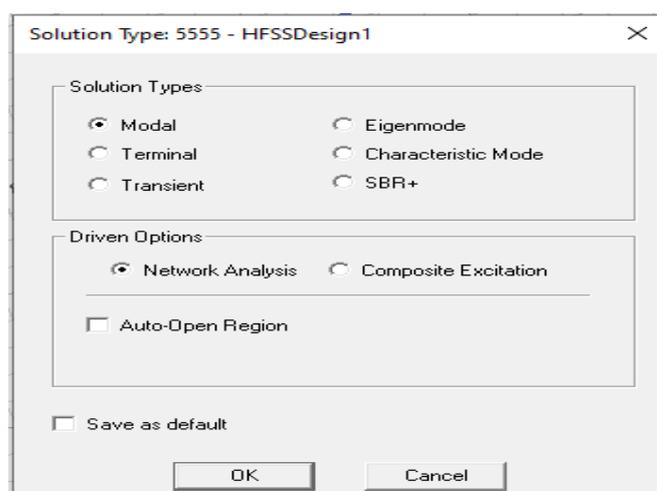


Figure III- 11: Boite de dialogue du type de solution

### II.5.11 Création du Patch et la ligne d'alimentation :

Pour dessiner le patch cliquer sur <rectangle> dans la barre d'outils. En utilisant les surfaces d'entrées du même rang, entrer la position et dimension de Box comme montré dans la figure ci-dessous:

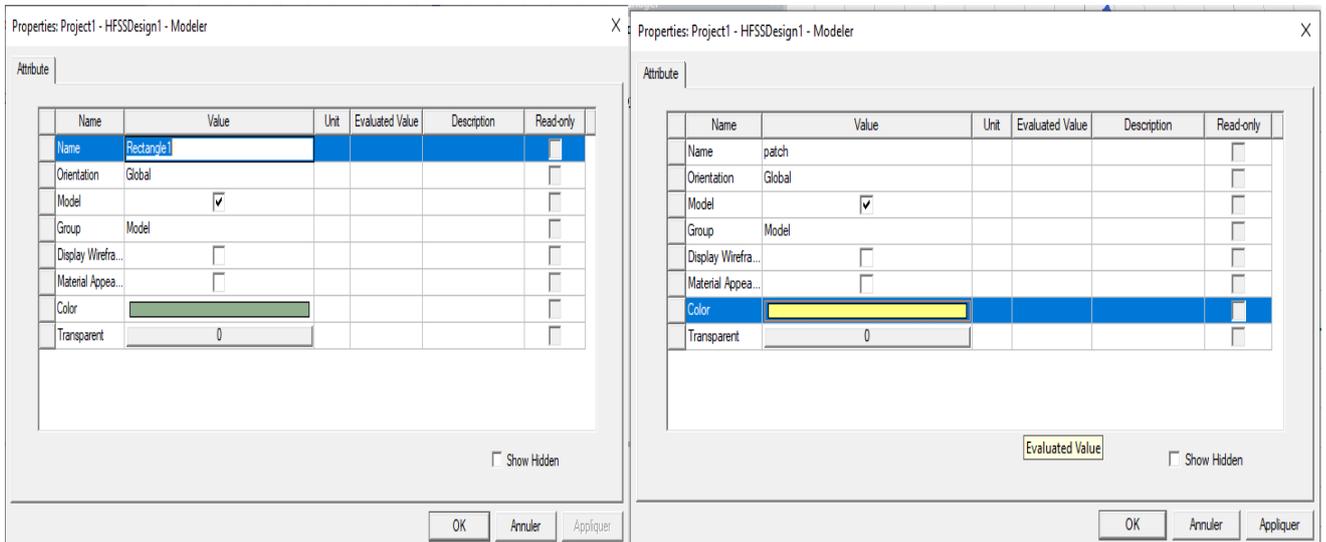


Figure III- 12: Création de patch

Après, dessiner la ligne d'alimentation et suivre les mêmes étapes avec la position. La longueur L est sur la plan y, la largeur W est sur le plan X et la hauteur (épaisseur) h sur le plan Z.

Nous devons unir la ligne d'alimentation et le patch pour représentés qu'un seul objet. Marquer que les deux objets sont du même matériau. Cliquer dessus les deux objets que vous devez unir, c.-à-d. patch et ligne d'alimentation. Cliquer dessus l'un des objets, en tenant la clef de CTRL enfoncée, et cliquer dessus sur l'autre objet. Cliquer sur< Unite > dans la barre d'outils. Les deux objets sont maintenant unis.

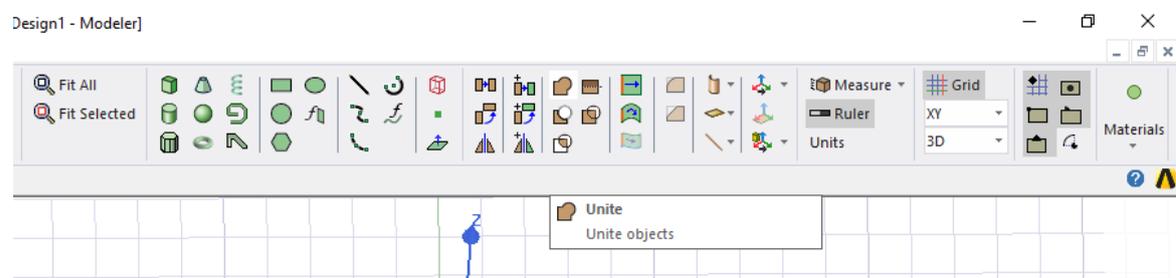


Figure III- 13: La ligne d'alimentation et le patch sont représentés qu'un seul objet

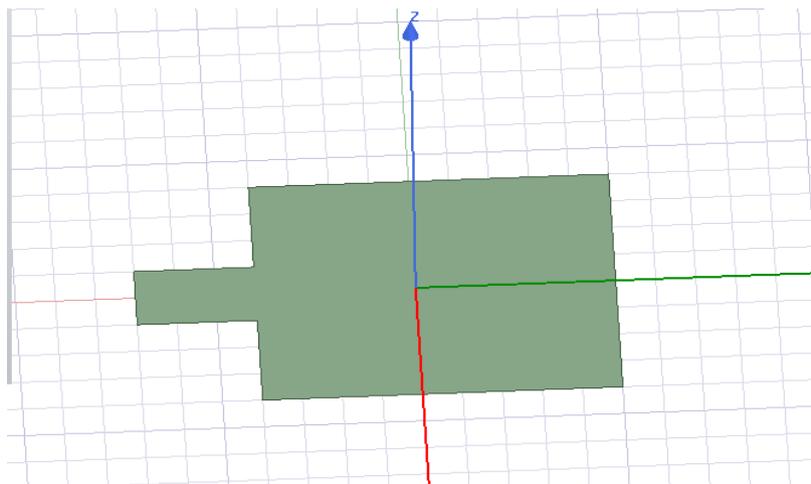


Figure III- 14: Patch et la ligne d'alimentation

### II.5.12 Créer le substrat :

Pour dessiner le substrat, cliquer sur <<draw>rectangle>> dans la barre d'outils. Dessiner alors une boîte. Entrer la position et dimension de **Box** en utilisant les surfaces d'entrées du même rang comme montré dans la figure (III.15)

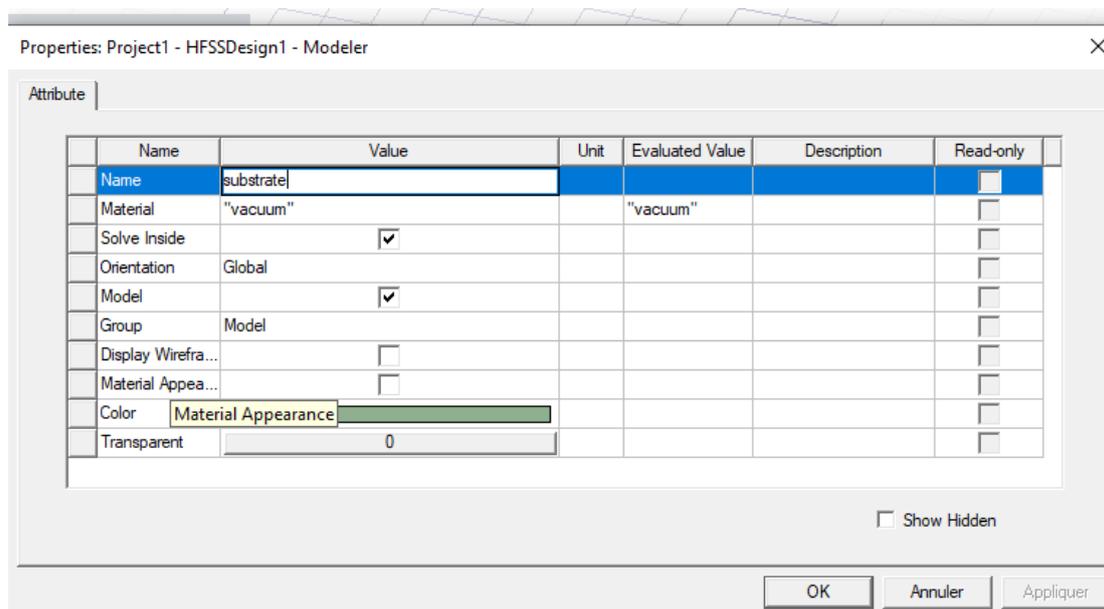
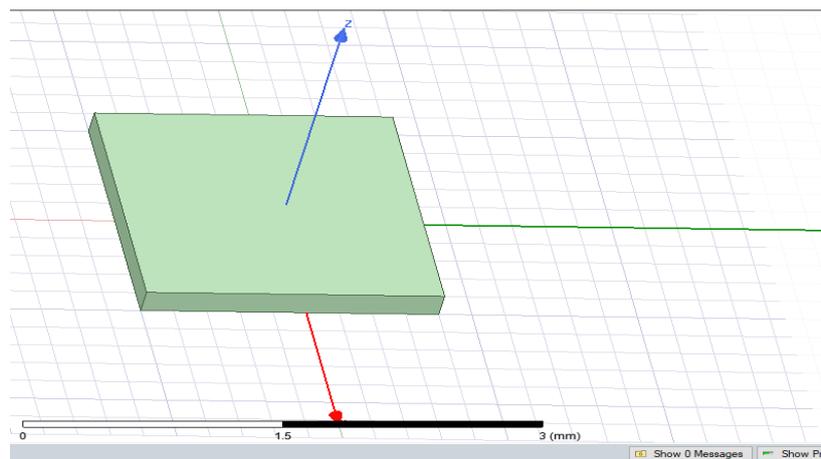


Figure III- 15: Création de substrat

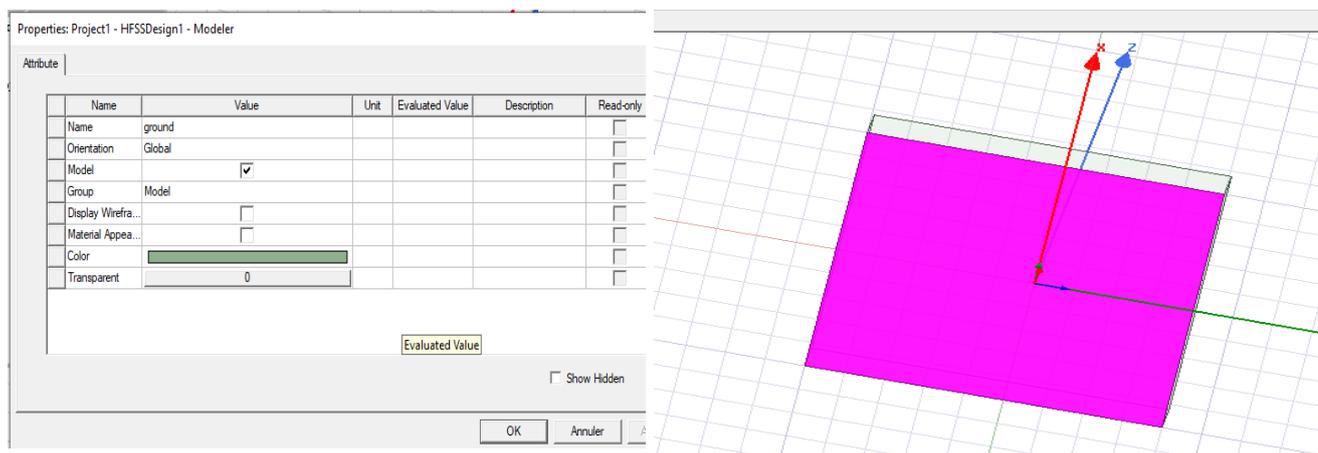
- Pour la Valeur du type Name: substrat
- Pour la Valeur du type Matériel :
- Cliquer sur le Bouton OK.
- Choisir dans le menu View> Fit All > Active View, Le substrat est revue dans la Figure (III.16).



**Figure III- 16:** Substrat diélectrique

- ✓ Pour le plan de masse (ground), on fait la même exécution. Le plan de masse est spécifié par la condition aux limites d'un matériau parfaitement conducteur.
- ✓ Les coordonnées sont assignées comme suit :
  - Le point de départ pour le plan de masse et le substrat
  - La longueur (L) du substrat
  - La largeur W [24].

La Figure(III.17) ci-dessous représente le plan de masse.

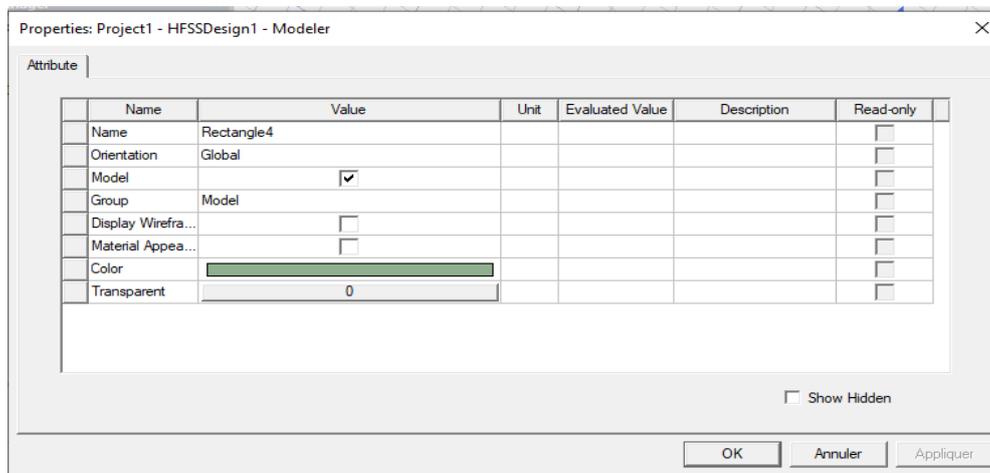


**Figure III- 17:** Création de plan de masse masse

### II.5.13 Création du port (wave guide) :

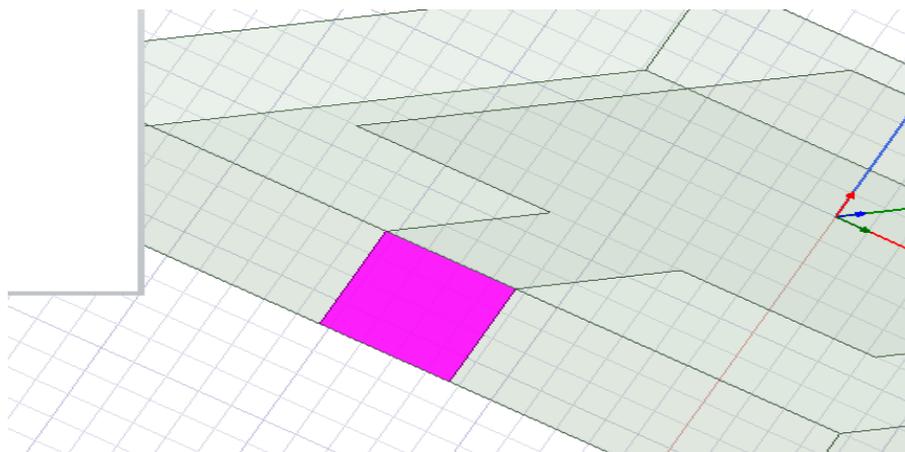
On doit spécifier le port de guide d'ondes au début de la ligne d'alimentation. Le plan de référence de ce port est situé directement au début du plan de rayonnement. Les antennes sont excitées par le port. Pour dessiner le port, cliquer sur <rectangle>

dessus la barre d'outils et dessiner en remplissant les données suivantes comme montré ci-dessous :



**Figure III- 18:** Création de port

La Figure (III.19) ci-dessous représente le port dans le plan

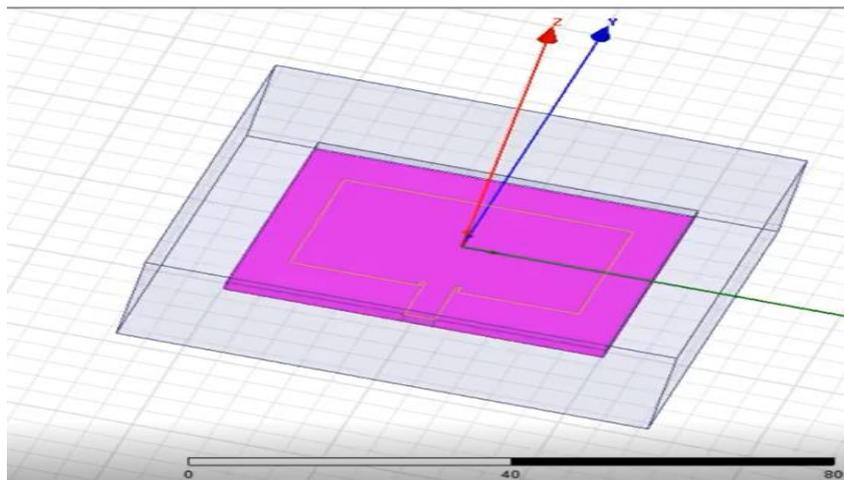


**Figure III- 19:** Port d'excitation

### II.5.14 Assigner les conditions aux frontières :

Une fois le modèle a été créé, on doit assigner les conditions aux limites de la structure. Dans le HFSS, des frontières rayonnantes sont utilisées pour simuler les problèmes à structure ouverte qui permettent une propagation infiniment lointaine dans l'espace. HFSS absorbe les ondes aux frontières rayonnant, en considérant essentiellement une sphère de rayon infini autour de la structure. Dans notre cas, nôtres frontières absorbantes est un box d'air.

Pour dessiner la boîte d'air, cliquer sur <box> dessus la barre d'outils. Dessiner alors une boîte en remplissant les mêmes étapes précédentes [24].



**Figure III- 20:** Le bitier d'air

### II.5.15 Excitation d'une structure :

Après avoir dessinée une structure, il faut exciter la structure pour que le logiciel soit capable de faire la simulation.

Pour le type de solution "Driven Model" nous avons les types d'excitations suivantes :

- ✓ **Wave Port** : Représente la surface par laquelle un signal entre ou sort de la géométrie.
- ✓ **Onde Incidente** : Représente la propagation d'une onde incidente sur la géométrie.
- ✓ **Lumped Port** : Représente une surface interne par laquelle un signal entre ou sort de la géométrie.
- ✓ **Incident Wave** : Représente un champ électrique constant à travers les points d'une alimentation.
- ✓ **Voltage Source** : Représente un courant électrique constant à travers les points d'une alimentation.
- ✓ **Magnetic Bias**: Utilisé pour définir le champ intérieur net qui influe sur un objet de matériau ferromagnétique en 3D

Choisir le port d'objet, cliquer par la droite et **assigner l'excitation**

Dans notre cas, On utilise < Lumped port > .cliquer sur lumped port, puis cliquer après, définir maintenant la ligne d'intégration qui est Normalement définie du point moyen inférieur au point moyen supérieur. Garder les autres valeurs en tant que par défaut. Cliquer terminer [24].

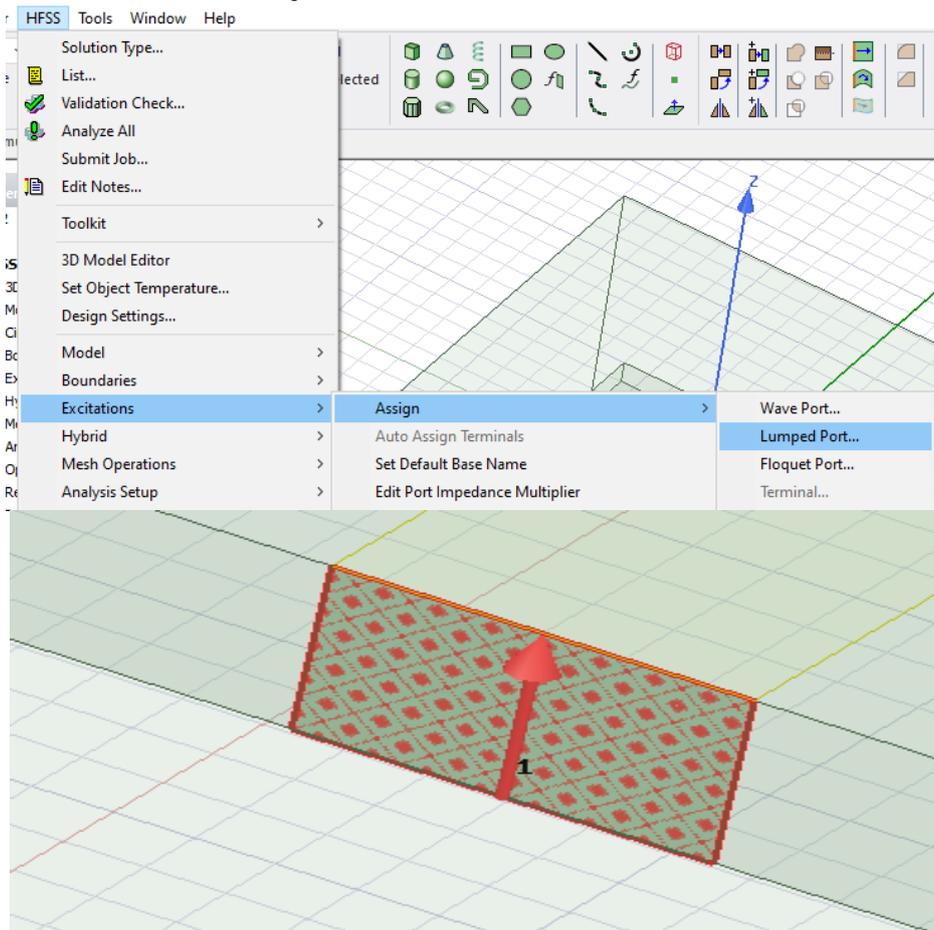


Figure III- 21: Lumped port

### II.5.16 Assigner les conditions aux limites :

Les frontières de rayonnement "Radiation Boundaries" sont utilisées dans Hfss pour simuler les problèmes à géométries ouvertes avec un rayonnement infini dans l'espace, comme dans le cas des antennes. Elles absorbent les ondes au niveau des 5 faces supérieures du box. On utilise deux types de conditions aux limites pour cette antenne, il s'agit de "**Perfect E**" et "**Radiation**"

Cliquer sur le bouton droit sur les surfaces ou les limites puis sélectionner :

Assign boundary> (perfectE, PerfectH, Radiation,...) à savoir la structure à étudiée et ses conditions.

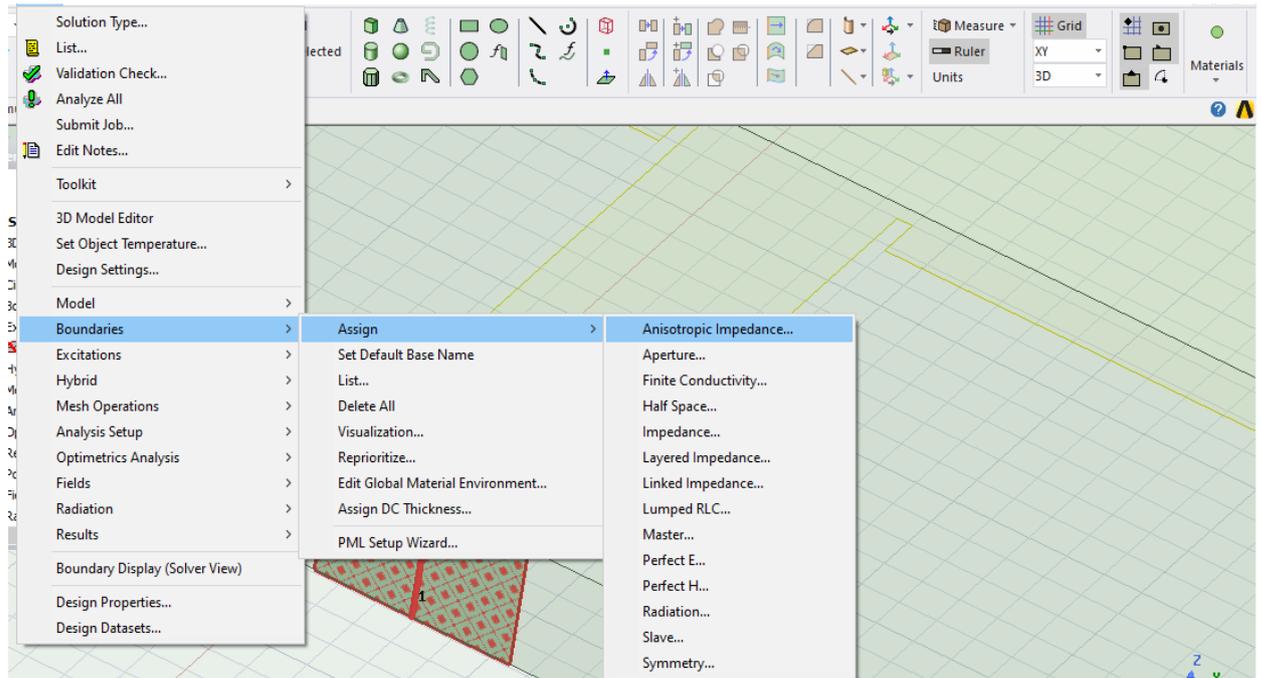


Figure III- 22: Création des condition aux limites(boundaries)

**Perfect E** : conducteur électrique parfait.

**Perfect H** : conducteur H parfait.

**Radiation** : sensible aux radiations

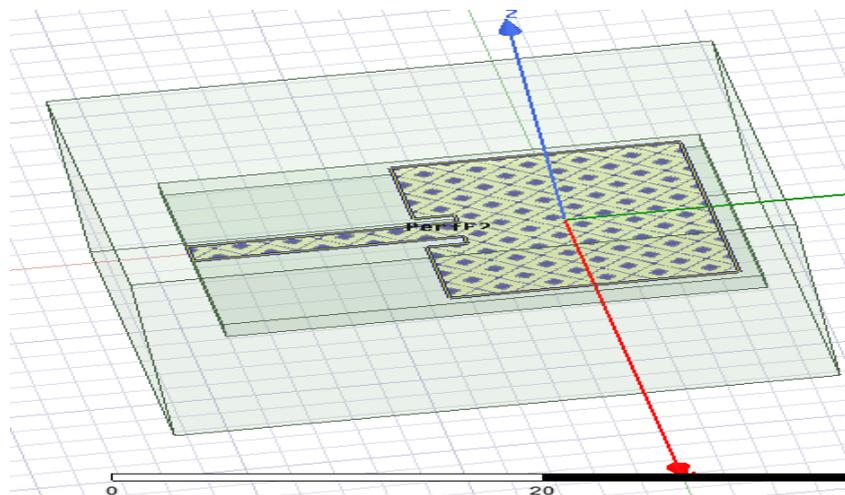


Figure III- 23: Assignement de la condition "conducteur parfait" pour le patch ,la ligne microstrip d'excitation et le transformateur d'adaptation

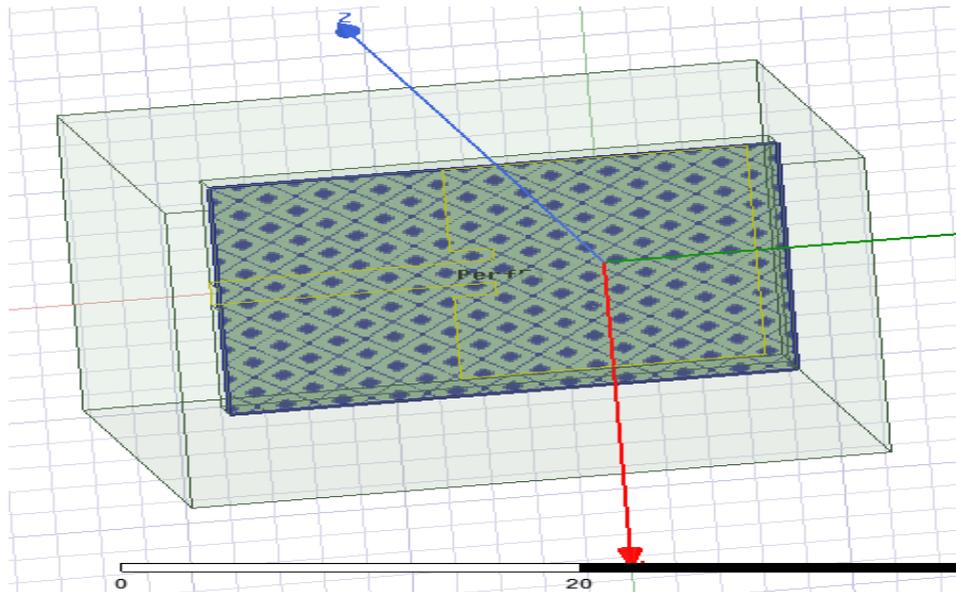


Figure III- 24: Assignement de la condition "conducteur parfait" pour plan de masse

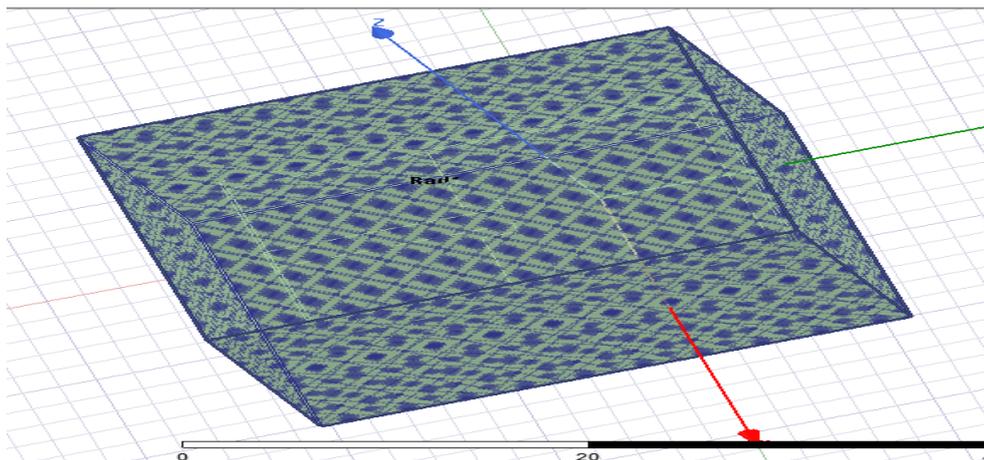


Figure III- 25: Assignement des frontiérentières

### II.5.17 Ajouter le champ de fréquence (AddFrequencySweep) :

On choisit (AddSweep) dans le menu HFSS >Analysis pour ajouter un champ de fréquence.

Setup >AddSweep. Choisir la solution pour installer : Setup1. Cliquer le bouton OK.

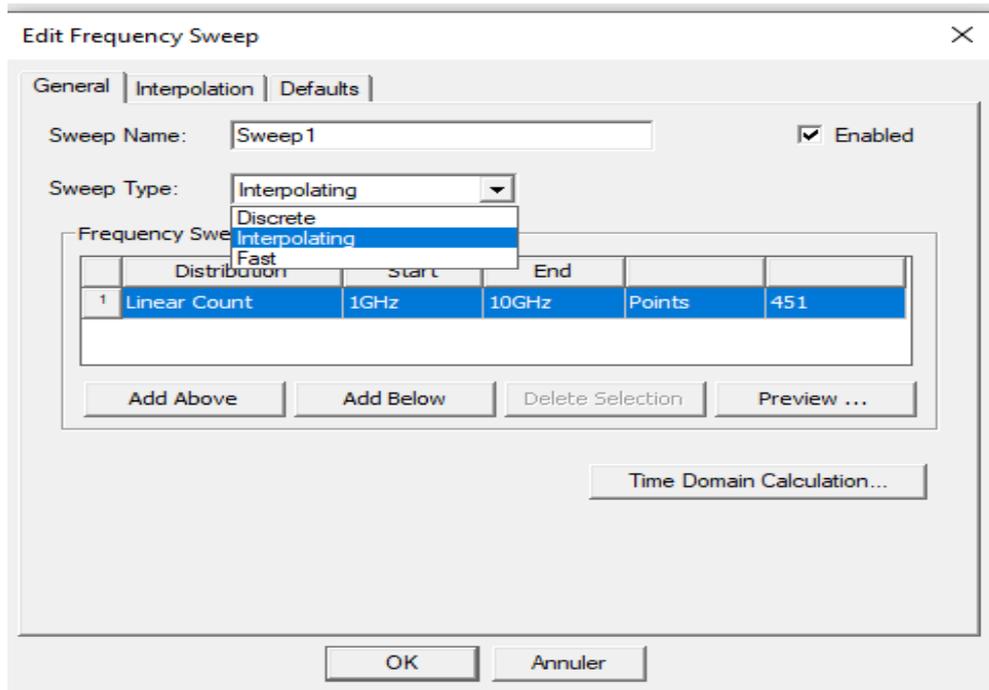
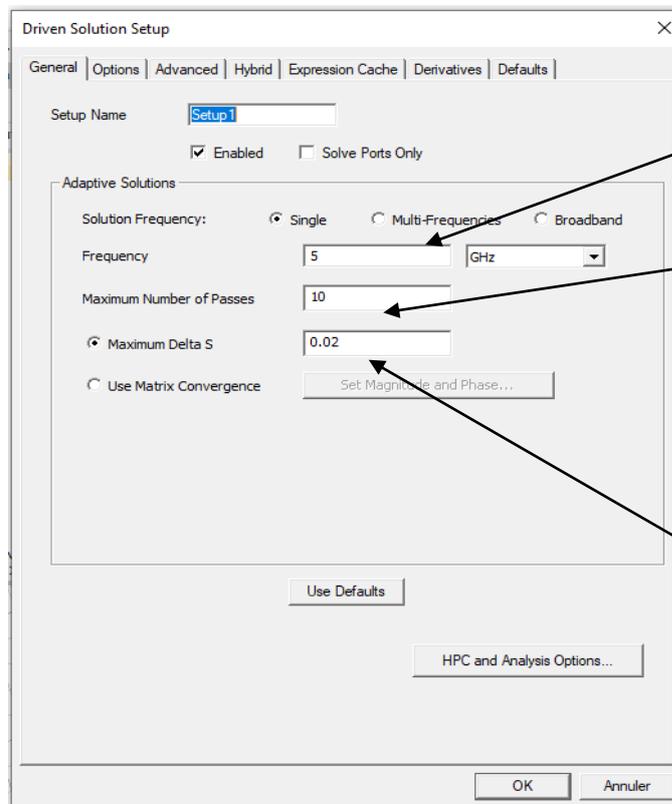


Figure III- 26: Ajouter la fréquence d'utilisation

- Add Solution Setup :



Fréquence d'utilisation

Le nombre de Calcul de det S pour avoir la convergence de la méthode

Le seuil du calcul det jusqu'à quel valeur du déterminent en arrêt

Figure III- 27: Création des condition d'analyse setup

### II.5.18 Installation d'analyse (analysis setup) :

- Pour valider le modèle:
- Choisir **Check** dans le menu HFSS > Validation > **Check**.
- Cliquer sur le Bouton **Close**. [24]

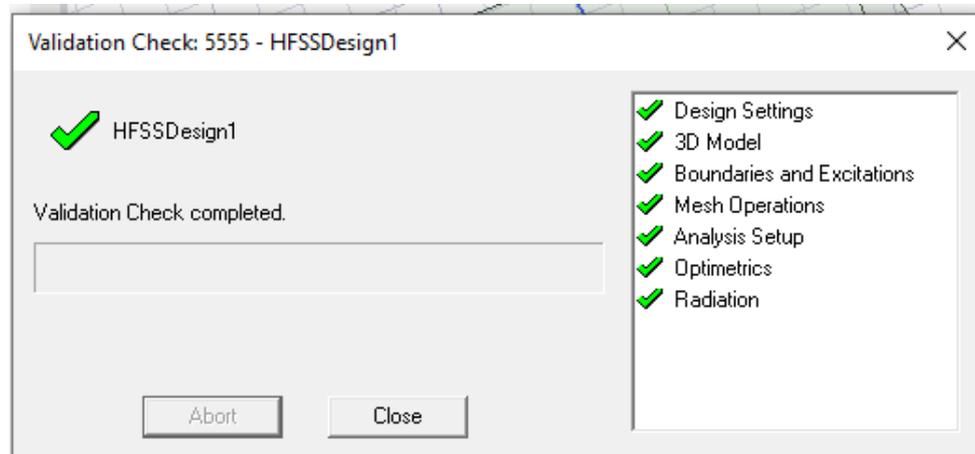


Figure III- 28: Test de validation

Pour commencer le processus de solution: Choisir dans le menu HFSS

- Analyze All.

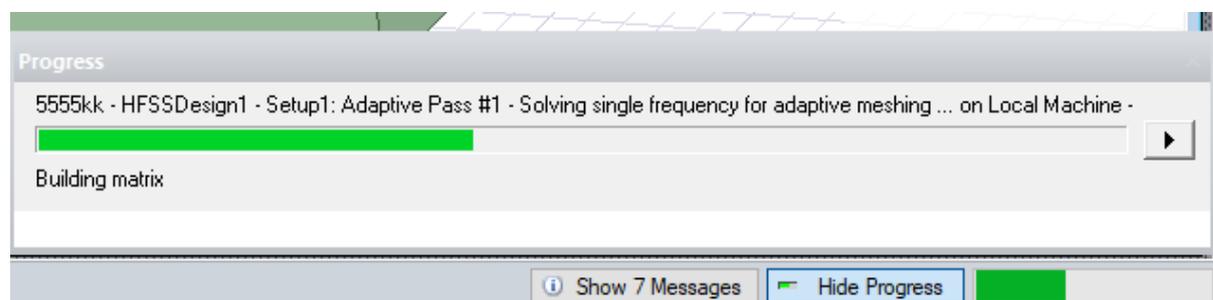


Figure III- 29: Analyse de projet

### II.5.19 Résultats :

Après la simulation, c'est la rubrique la plus intéressante parmi toutes les fonctionnalités de HFSS Les données de traçage peuvent prendre diverses formes.

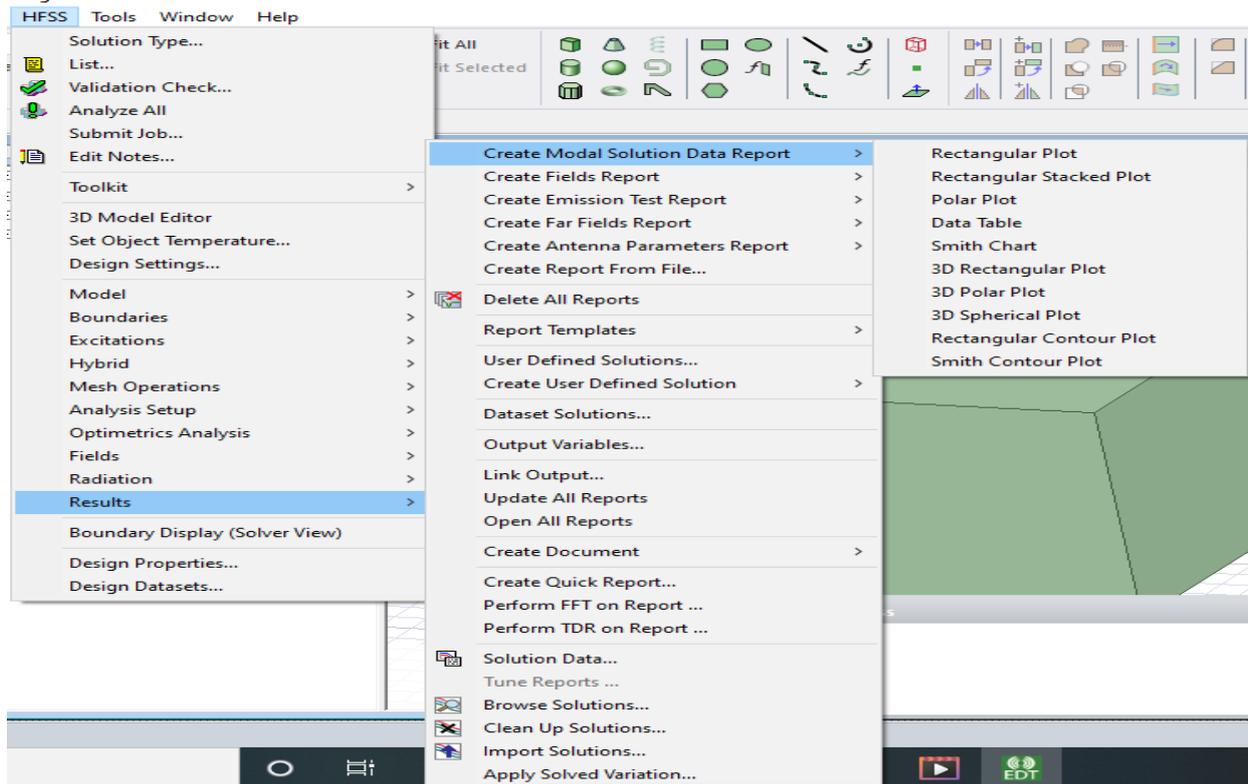


Figure III- 30: Représentation toutes les option crée les résultats de simulation

### II.5.20 Inconvénients du HFSS:

Les inconvénients de ce logiciel présentés dans les points suivants :

- La nécessité d'avoir maîtrisé l'utilisation du logiciel, avant d'aborder le projet, parce qu'on est obligé de se servir des opérations booléennes parfois, pour dessiner des surfaces ou formes n'ayant pas une forme géométrique bien définie. En plus on doit faire attention aux frontières (Boundaries), il ne faut pas avoir des conflits entre une surface de radiation par exemple et une surface conductrice.
- La simulation pourra prendre une durée de plusieurs heures jusqu'aux plusieurs jours parfois, surtout si le projet à simuler est d'un volume relativement grand, et présente beaucoup de détails.
- Complexité de travail et de création des structures ayant des larges détails de conception [27].

### III. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail les étapes de création d'une antenne patch en utilisant le simulateur électromagnétique HFSS. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier et calculer les paramètres de la structure d'antenne à patch rectangulaire pour la miniaturisation de cette dernière

# Chapitre IV: Conception et miniaturisation d'une antenne patch

### I. Introduction :

Généralement la conception d'une antenne passe par des simulations qui permettent de tester plusieurs solutions et de les optimiser facilement.

De nombreuses études portent sur la recherche de nouveaux concepts d'antennes intelligentes et de petites tailles. Dans ce chapitre nous proposons d'utiliser les matériaux ferroélectriques pour la miniaturisation des d'antennes à base des couches minces. Le but de cette étude est de réaliser une antenne patch pour la norme WIFI avec deux fréquences de résonances 2.4GHz et 5 GHz.

Ce chapitre est divisé en trois parties :

- Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 2.4 GHz
- Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 5 GHz
- Conception d'une antenne patch avec deux fréquences de résonances 2.4GHz et 5 GHz en ajoutant une couche de matériau ferroélectrique à l'antenne déjà réaliser de 5 GHz.

Dans ce chapitre, nous présentons la structure de l'antenne réalisée (antenne WIFI) dans la gamme de fréquence [2.4GHz, 5GHz] en examinant les fréquences de résonance, le diagramme de rayonnement, et le rapport d'onde stationnaire. De plus, nous allons faire une étude comparative des performances des trois d'antennes réalisées.

### II. Paramètres pour la conception d'une antenne patch rectangulaire :

Une antenne patch rectangulaire nécessite plusieurs paramètres pour la conception et la réalisation.

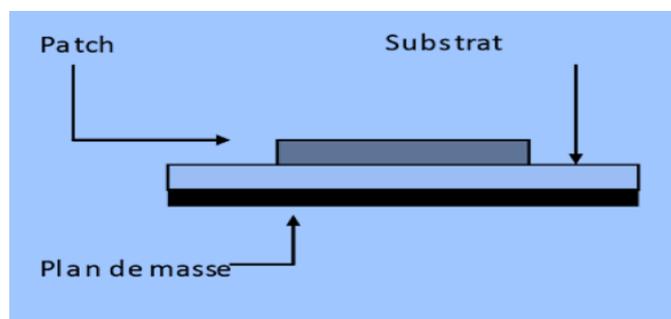


Figure IV- 1: Structure typique d'une antenne micro-ruban

La figure (IV-1) ci-dessus présente une structure d'une antenne patch qui se compose généralement de trois couches principales :

- ❖ Le patch : prend plusieurs formes (cercle, rectangle....etc.)
- ❖ Un substrat : c'est un diélectrique avec  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$
- ❖ Le plan de masse métallique.

### II.1.1 Largeur (W) :

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

### II.1.2 Constante diélectrique effective ( $\epsilon_{reff}$ ) :

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1)}{2} \left[ 1 + 12 \cdot \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad \text{si } W/h > 1 \quad (\text{IV-2})$$

### II.1.3 Extension de longueur :

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (\text{IV-3})$$

### II.1.4 Longueur de patch (L):

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (\text{IV-4})$$

Où

$W$  : La largeur du patch

$\epsilon_{reff}$  : La permittivité effective du substrat

$\epsilon_r$  : La permittivité relative

$L$  : La longueur du patch

$C$  : La vitesse de la lumière ( $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

On peut utiliser également « **Micro strip Patch Antenna Calculator** » pour déterminer les dimensions du patch  $W$  et  $L$ .

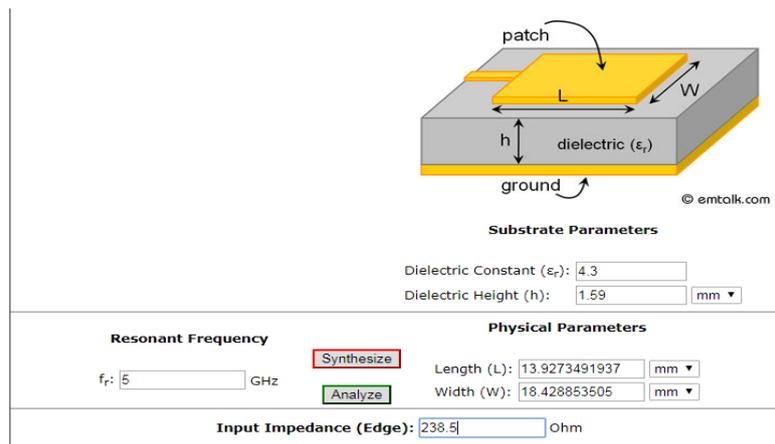


Figure IV- 2: Micro strip patch antenna calculator

### II.2 Description de l'antenne à réaliser :

L'objectif de ce travail consiste à miniaturiser une antenne patch pour qu'elle puisse travailler dans les bandes de fréquences ouvertes pour l'utilisation WIFI dont les normes de fréquence sont 2.4 GHz et 5GHz.

Pour mettre en évidence l'influence de cette miniaturisation nous avons effectué une étude comparative entre 3 antennes :

- Une antenne patch avec une fréquence de résonance 2.4 GHz
- Une antenne patch avec une fréquence de résonance 5 GHz
- Une antenne patch (miniaturisé) avec deux fréquences de résonances 2.4GHz et 5 GHz en ajoutant une couche de matériau ferroélectrique à l'antenne déjà réaliser de 5 GHz.

Les étapes de conception des ces trois antenne sont illustrées dans les sections suivantes

### II.3 Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 2.4 GHz

Fréquence de résonance (GHZ)	Dimension du patch		Substrat			
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	type	Hauteur (mm)	Permittivité Relative	Perméabilité relative
Fr=2.4GHZ	L=29.4	W=38	FR4-époxy	H=1.6	$\epsilon_r=4.4$	$\mu_r=1$

Tableau IV- 1: Paramètres de l'antenne patch de 2.4 GHz

## Chapitre IV: Conception et miniaturisation d'une antenne Patch

Dans cette partie, on a réalisé une antenne patch qui rayonne dans une fréquence de 2.4GHz où les paramètres géométrique de cette antenne son illustré dans le tableau ci-dessus.

La figure IV.3 présente la géométrie de l'antenne patch pour une fréquence de résonance de 2.4GHz. Il est à noter que les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator). Dans ce qui suit nous décrivons brièvement les étapes à suivre pour accomplir ces simulations. La conception d'une antenne sur HFSS, est présentée dans le chapitre III.

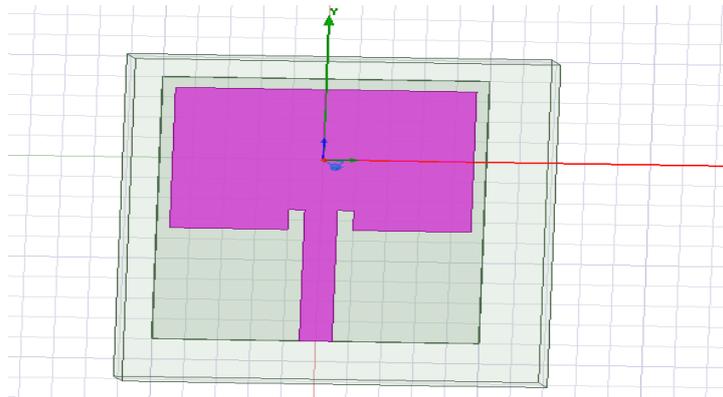


Figure IV- 3: Géométrie de l'antenne patch

### Paramètre $S(1,1)$ :

La figure suivante montre la procédure à suivre pour tracer le paramètre  $S_{11}$ .

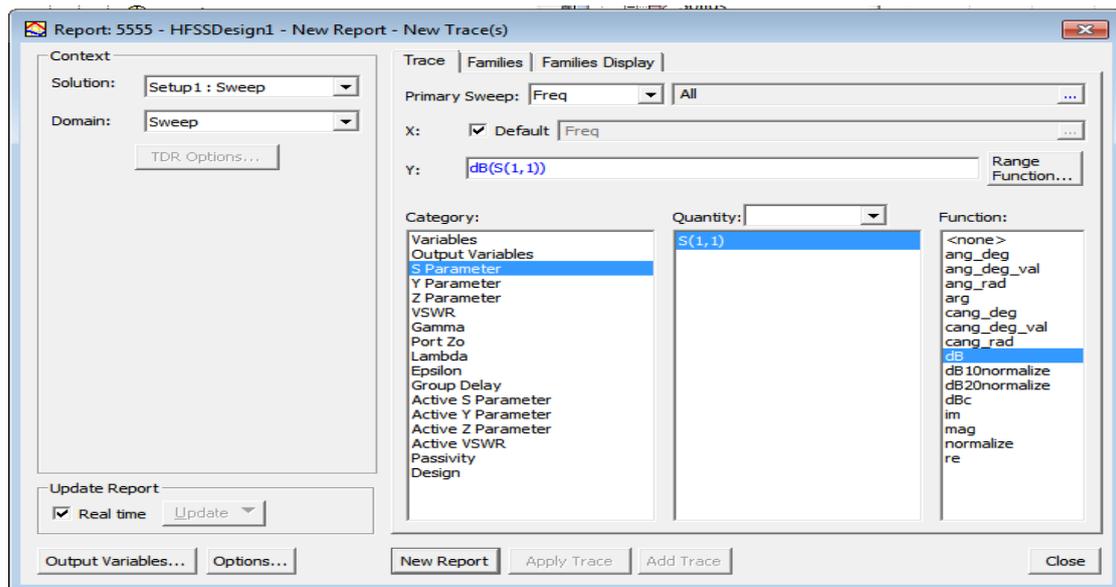


Figure IV- 4: Affichage du paramètre  $S_{11}$

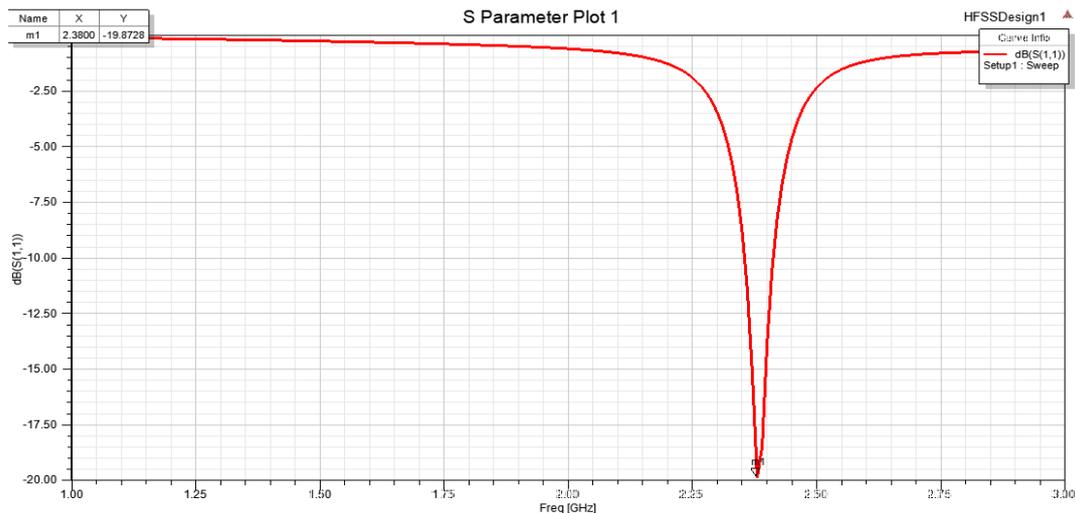


Figure IV- 5: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence

Cette figure (IV.5) présente le paramètre  $S(1,1)$  en dB en fonction de fréquence. Nous constatons que cette antenne rayonne dans la fréquence 2.4 GHz qui correspondant la fréquence de la bande WIFI avec une valeur : -19.87 dB et une bande passante à -10 dB de 60MHz

### Le rapport d'onde stationnaire (VSWR) :

Pour afficher le rapport d'onde stationnaire on suis les étape suivantes :

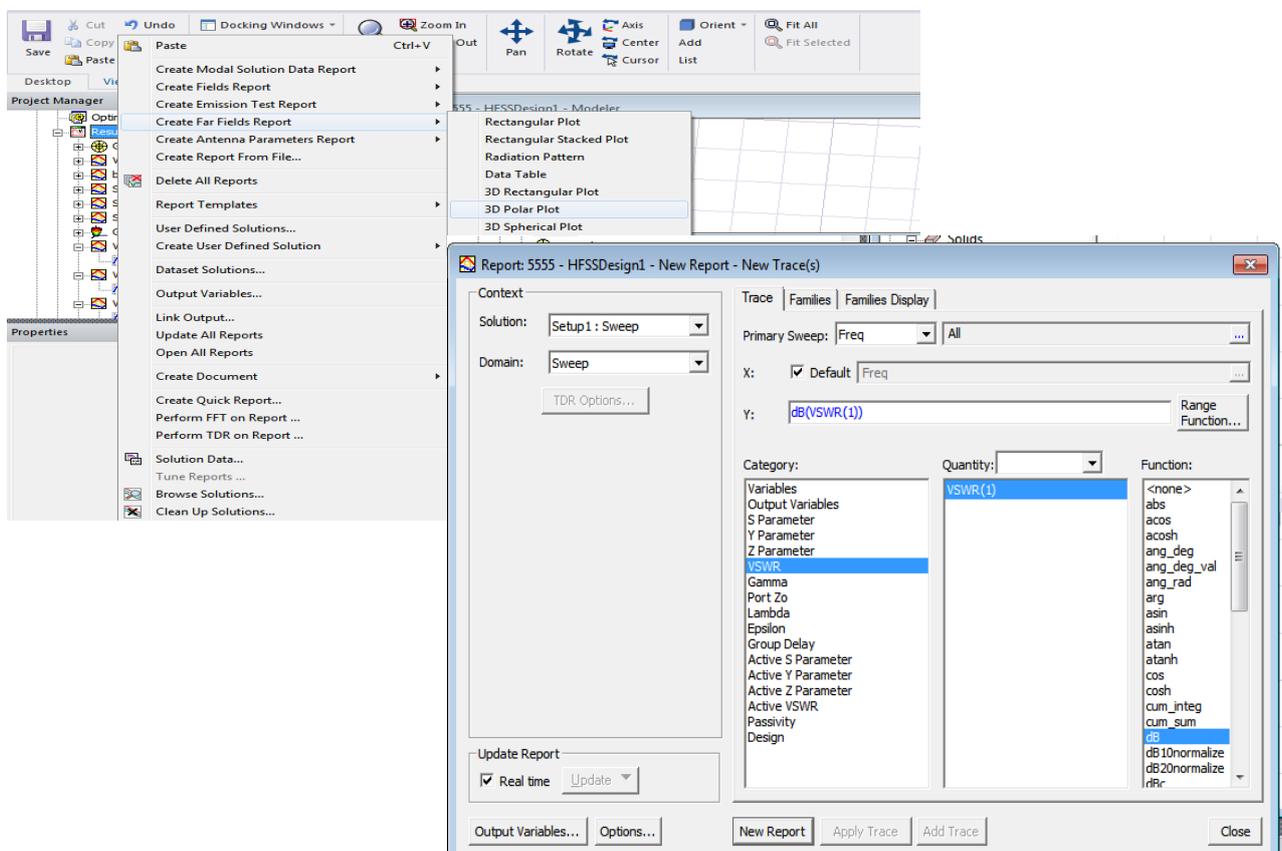


Figure IV- 6: Affichage de vswr

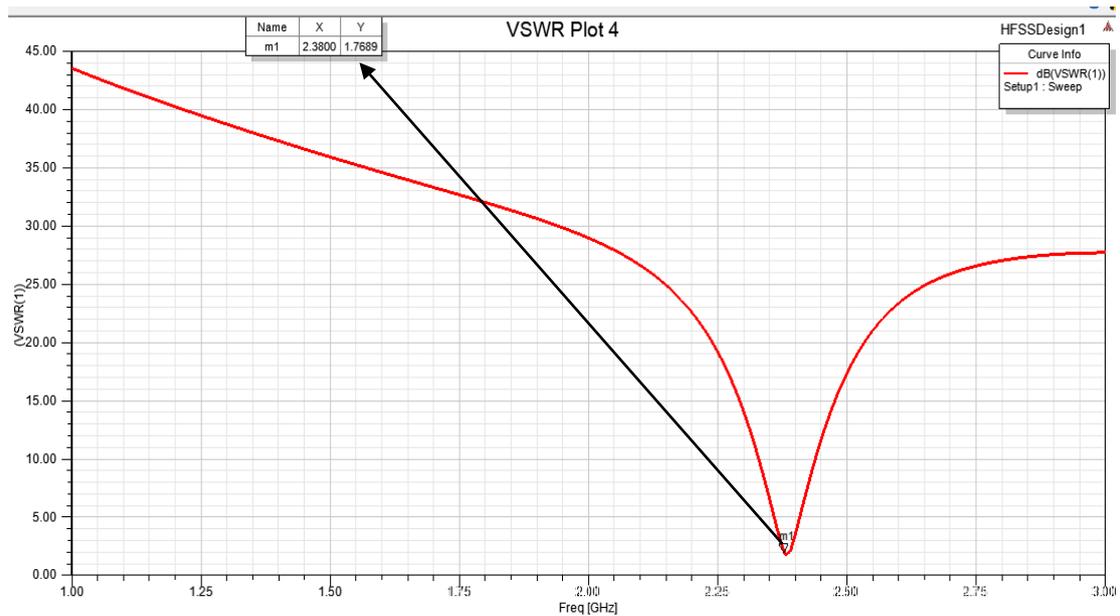


Figure IV- 7: VSWR en fonction de fréquence

La figure (IV.7) montre le rapport d'onde stationnaire(VSWR), la valeur de ce dernier est de 1.76. Donc l'antenne est bien adaptée ( $S_{11} \leq -10dB$ ,  $VSWR \leq 2$ )

### Diagramme de rayonnement :

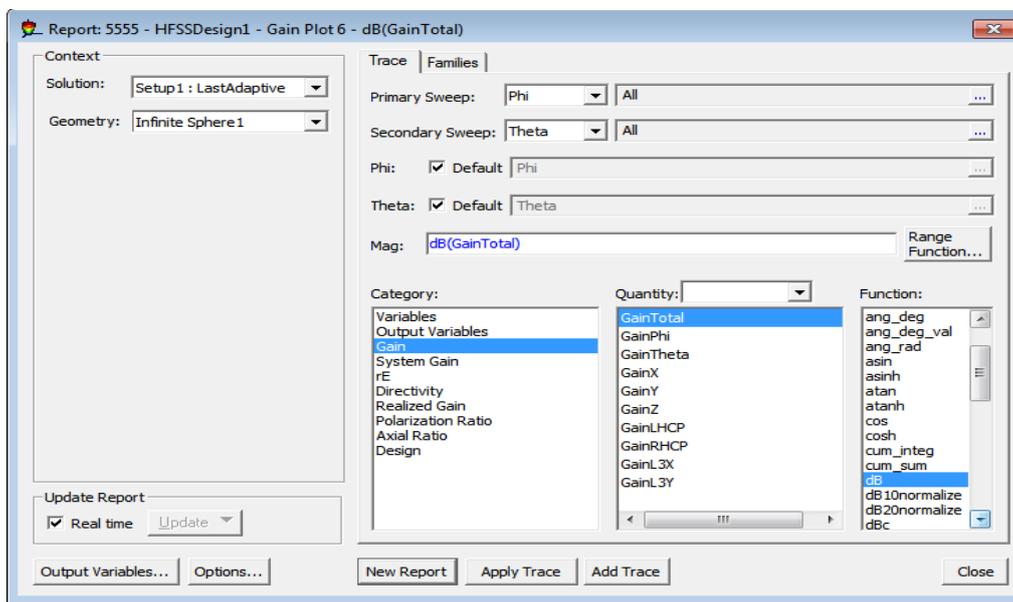
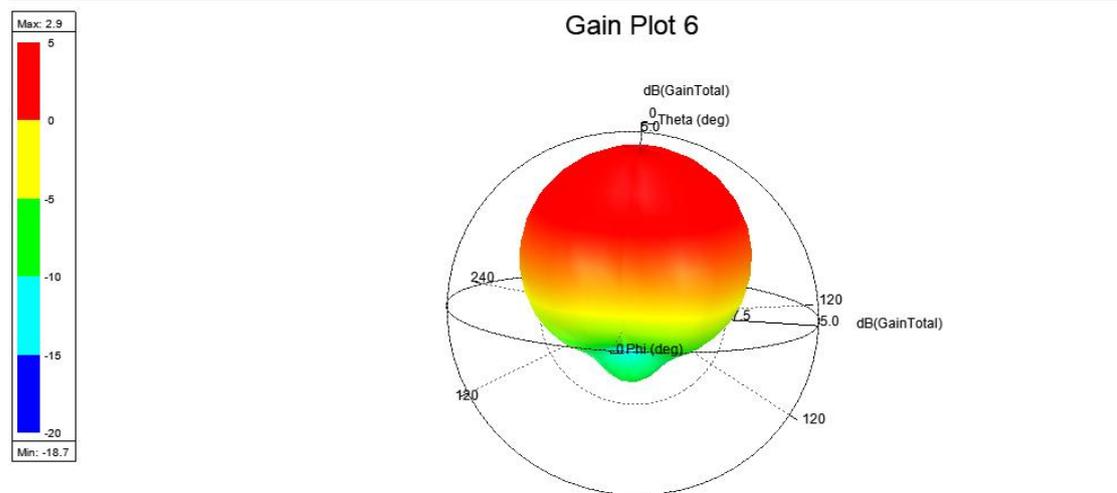


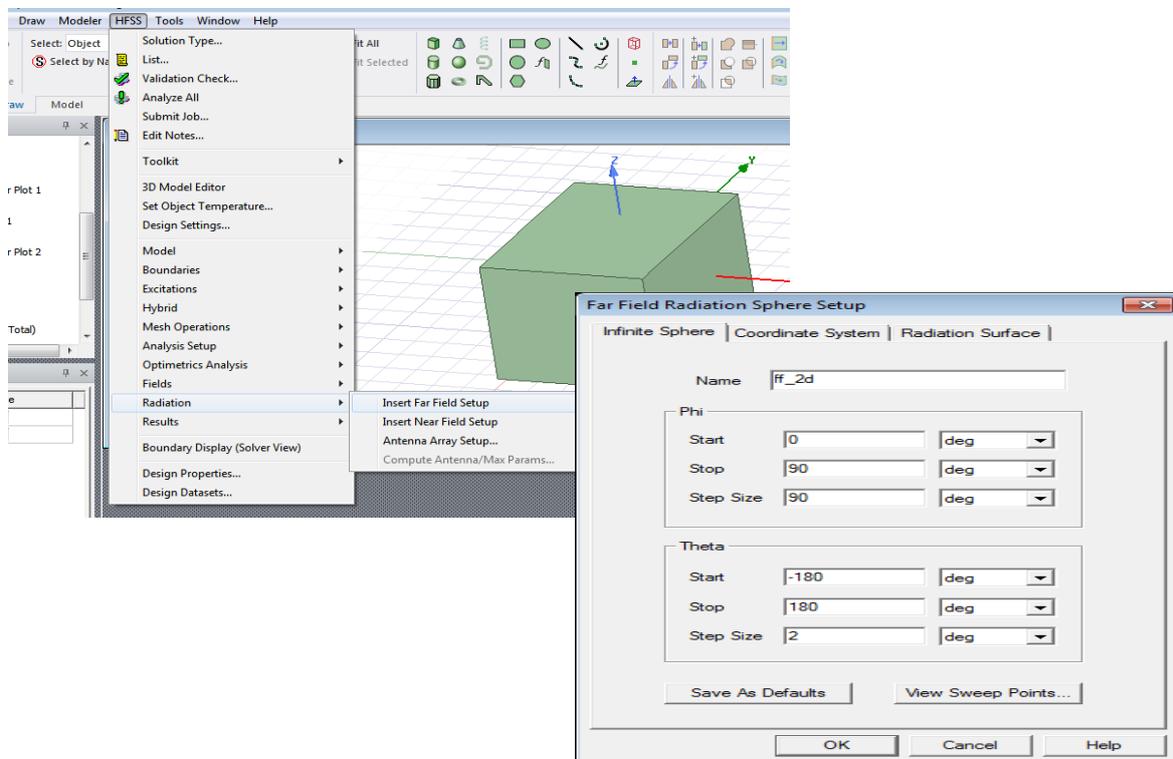
Figure IV- 8: Affichage du diagramme de rayonnement en 3D



**Figure IV- 9:** Diagramme de rayonnement à la fréquence 2.4 GHz

Le diagramme de rayonnement de l'antenne en 3D sous HFSS nous a donné un gain maximal de 2.9 dB.

**Le diagramme de rayonnement en 2D :**



**Figure IV- 10:** Création le diagramme de rayonnement en 2d

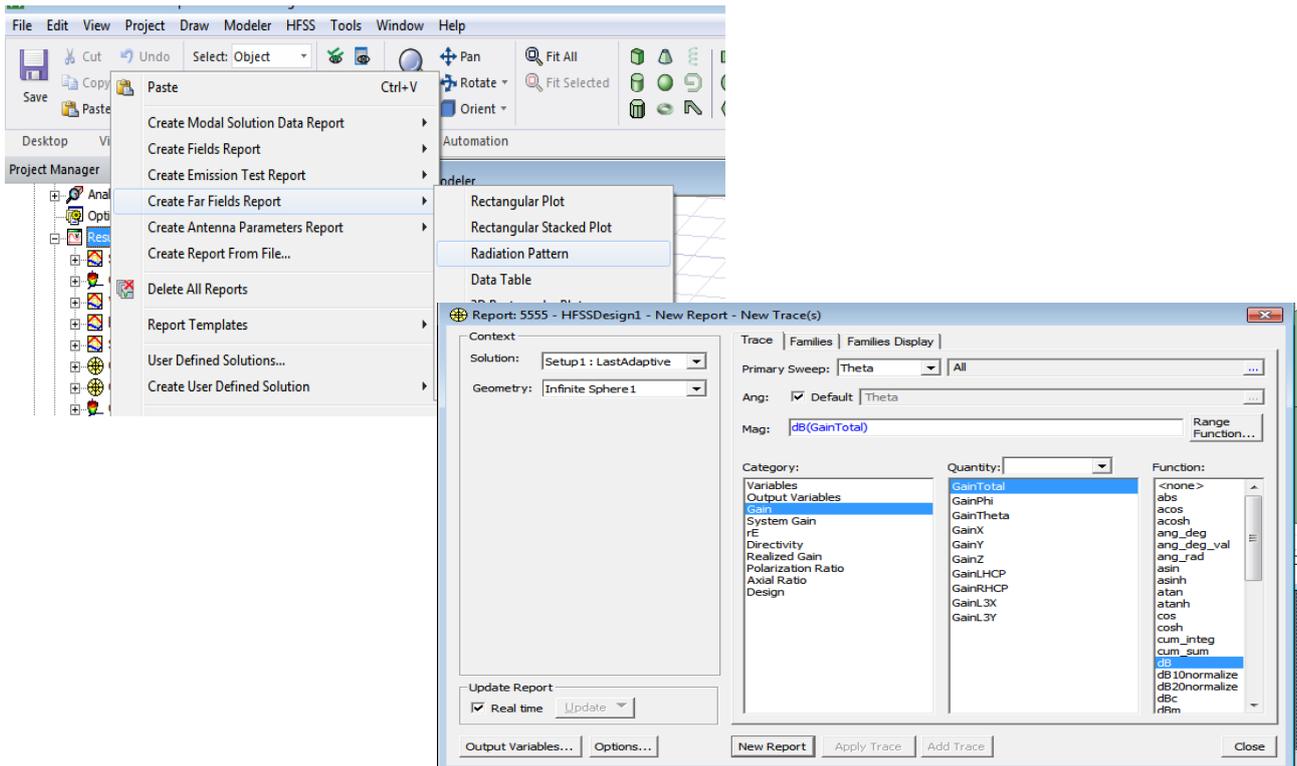


Figure IV- 11: Affichage du diagramme de rayonnement en 2d

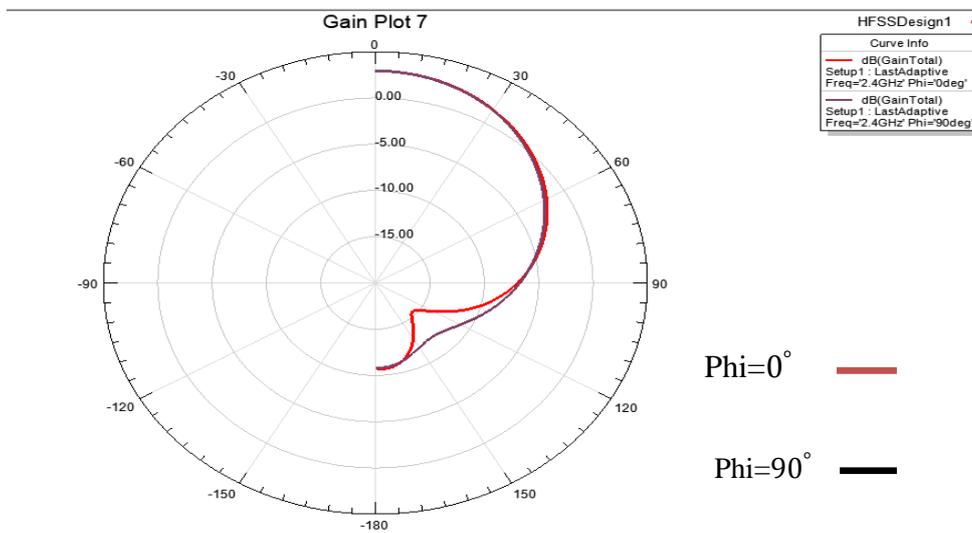


Figure IV- 12: Diagramme de rayonnement en 2d pour ( $\phi=0^\circ$ )et ( $\phi=90^\circ$ )

La figure (IV.12) montre le diagramme de rayonnement en 2D pour un déphasage ( $\phi=0^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ ), la magnitude d'angle  $0^\circ$  est : 2.92 dB et -6.72 pour l'angle  $90^\circ$ .

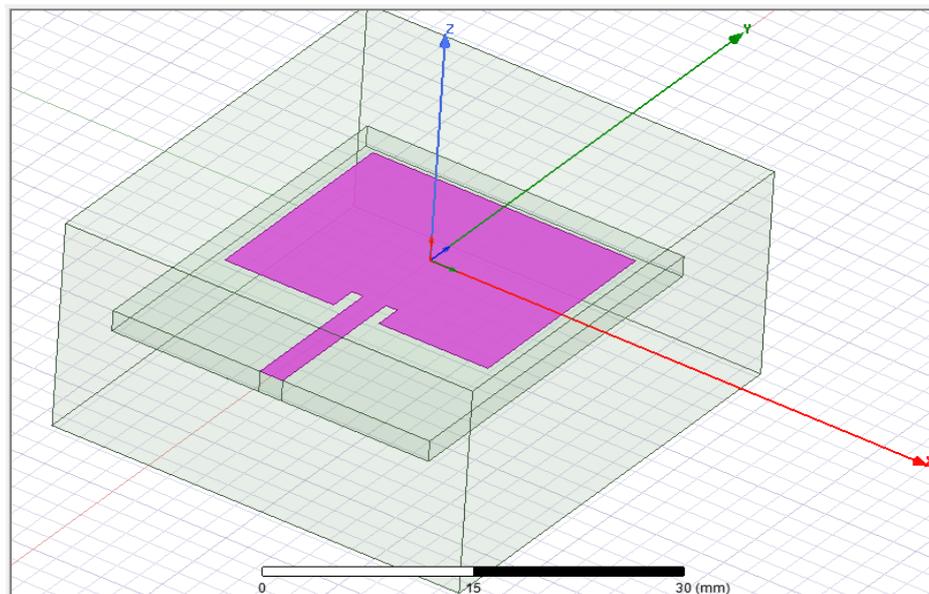
### II.4 Conception d'une antenne patch avec une fréquence de résonance 5 GHz :

De même que dans la section précédente, nous allons réaliser dans cette partie une antenne patch qui rayonne dans une fréquence de 5GHz. Les paramètres géométriques de cette antenne sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

fréquence de résonance (GHZ)	Dimension du patch		Substrat			
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	type	Hauteur (mm)	Permittivité Relative	Perméabilité relative
Fr=5GHZ	L=13.20	W=17.55	FR4-époxy	H=1.6	$\epsilon_r=4.4$	$\mu_r=1$

**Tableau IV- 2:** Paramètres de l'antenne patch 5 GHz

Il est également à noter que les dimensions de l'antenne à 5GHz (L=13.20mm et W=17.55) sont inférieures à celle de 2.4GHz (L=29.4mm et W=38mm).



**Figure IV- 13:** Géométrie de l'antenne patch utilisé en 3D

La figure IV.13 présente la géométrie de l'antenne patch pour une fréquence de résonance de 5GHz.

### Paramètre S (1.1) :

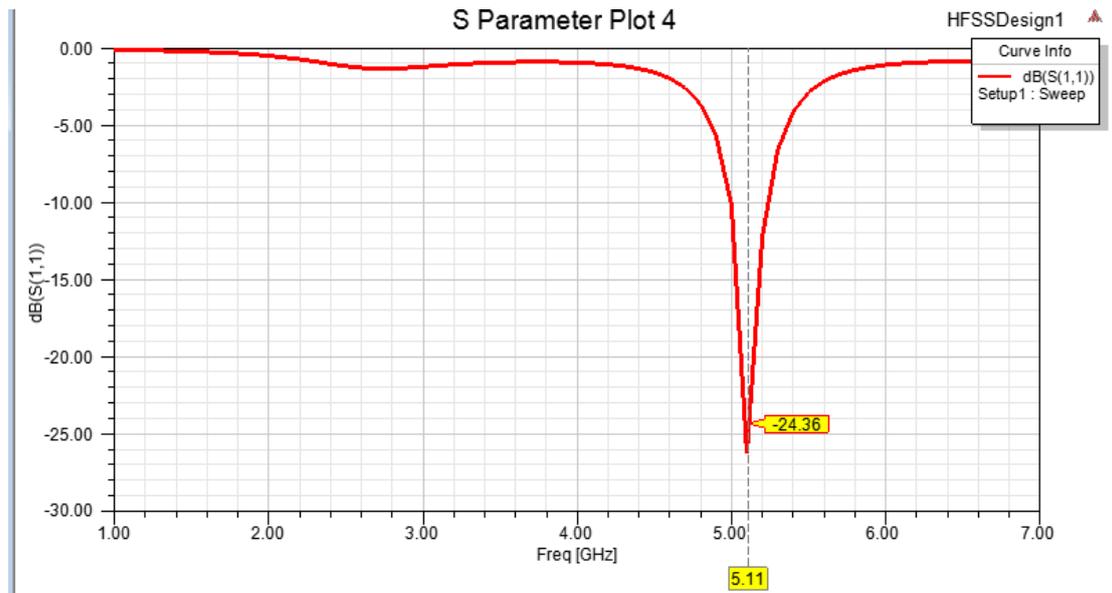


Figure IV- 14: Coefficient de réflexion en fonction de fréquence

La figure (IV-14) montre le coefficient de réflexion ou le paramètre S11 en dB tracé en fonction de la fréquence, notre antenne résonne à la fréquence 5GHz qui correspondant à la deuxième norme de la bande WIFI (la première norme 2.4GHz) avec un coefficient de réflexion à -24.36 dB. Et une bande passante a -10 dB de 230MHz

### VSWR (rapport d'onde stationnaire) :

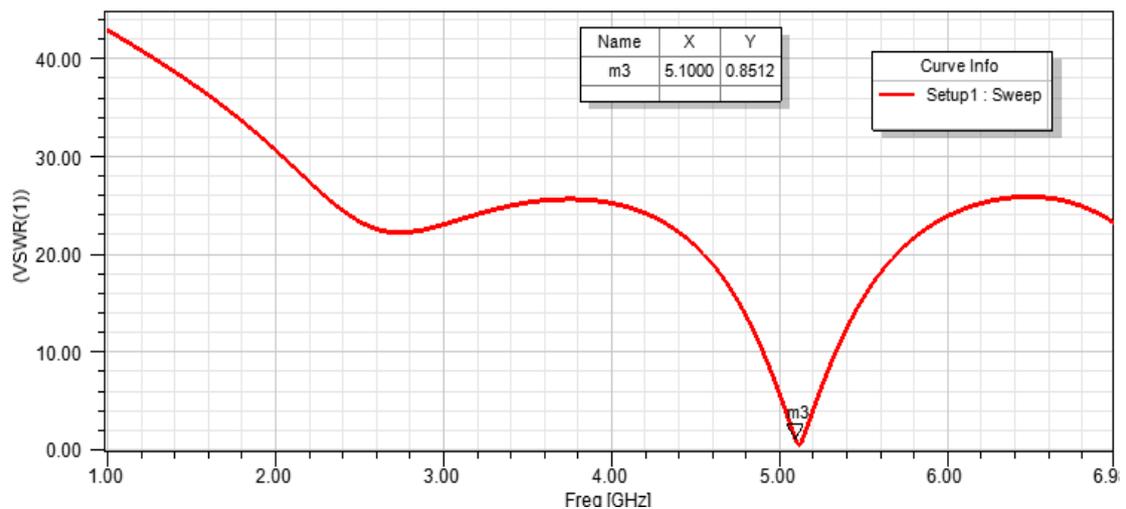


Figure IV- 15:VSWR en fonction de la fréquence

Dans La figure (IV-15) l'antenne simulée sous HFSS présente un rapport d'onde stationnaire (VSWR) de 0.85. Elle présente une bonne adaptation ( $VSWR \leq 2$ ).

### Diagramme de rayonnement :

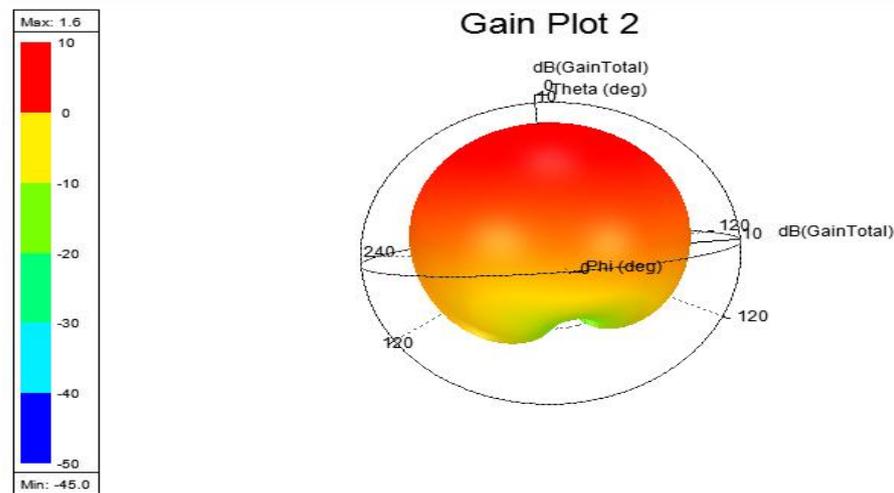


Figure IV- 16: Diagramme de rayonnement en 3D

Le diagramme de rayonnement de l'antenne en 3D présente un gain de 1.6 dB pour la fréquence 5 GHz.

### Diagramme de rayonnement en 2D :

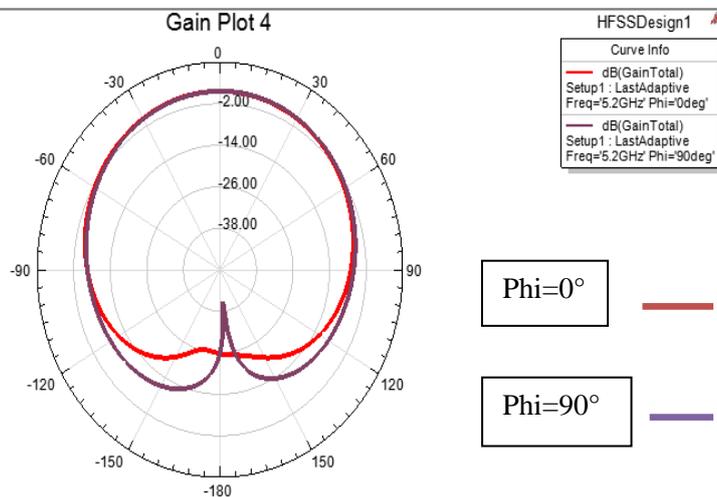


Figure IV- 17: Diagramme de rayonnement en 2d pour ( $\phi=0^\circ$ ) et ( $\phi=90^\circ$ )

La figure (IV-17) montre le diagramme de rayonnement en 2D pour un déphasage ( $\phi=0^\circ$  et  $\phi=90^\circ$ ) on remarque que pour  $\phi=0^\circ$  la magnitude dans cet angle est : 1.6095 dB et lorsque  $\phi=90^\circ$  la magnitude est : -6.0605 dB

### II.5 Conception d'une antenne patch avec deux fréquences de résonances 2.4 GHz et 5GHz :

#### II.5.1 Ajout de couche mince sur l'antenne :

Dans le travail précédent nous avons réalisés deux antennes, une pour la fréquence 5GHz et l'autre pour 2.4GHz avec des dimensions différents de chaque antenne. Aujourd'hui, la technologie cherche à minimiser le maximum la taille des antennes imprimées (patch). Et comme les dimensions de l'antenne à 5GHz ( $L=13.20\text{mm}$  et  $W=17.54$ ) sont inférieures à celle de l'antenne à 2.4GHz ( $L=29.4\text{mm}$  et  $W=38\text{mm}$ ), nous utiliserons l'antenne de 5GHz (petite taille) pour la réalisation de notre antenne patch pour la norme WIFI (qui utilise deux fréquences de résonances 2.4Ghz et 5 GHz). Cela est effectuer en ajoutant une couche mince (matériau ferroélectrique) sous l'antenne patch de 5GHz. Il est à noter que les paramètres (dimensions et permittivité  $\epsilon$ ) de cette dernière ne sont pas affectés, le seul changement est l'implantation de la couche mince.

##### a. La géométrie de base :

Dans cette partie on utilise la même antenne de fréquence 5GHz juste on ajoute la couche mince ferroélectrique dans la structure est présentée ci-dessous :

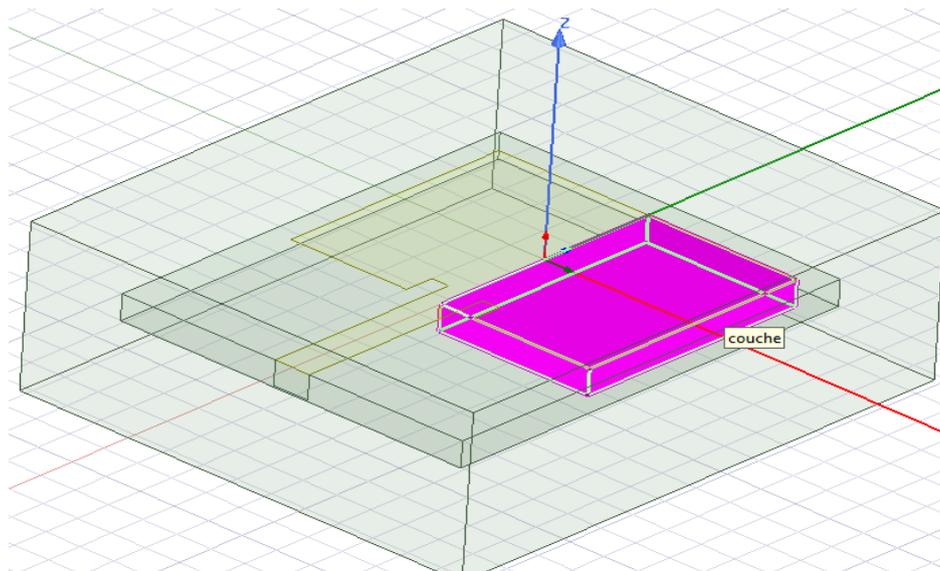


Figure IV- 18: Géométrie de l'antenne avec couche mince

### II.5.2 Étude paramétrique :

Les performances de l'antenne proposée peuvent être affectées par les géométries du Patch et sa permittivité. Nous allons discuter dans cette partie, les effets des paramètres, les épaisseurs  $h$  de la couche mince, la permittivité diélectrique  $\epsilon$  du matériau ferroélectrique sur le coefficient de réflexion et la géométrie de la couche mince.

L'étude de l'influence des paramètres de l'antenne sur le comportement électromagnétique, consiste à varier ces derniers pour essayer de tirer profit des caractéristiques du rayonnement afin de trouver l'antenne qui répond au fonctionnement désiré.

- **Influence de l'épaisseur  $h$  du "matériel 3" ( $\epsilon=18$ ) :**

La figure IV.20 présente la variation de coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur  $h$  de la couche mince du matériel 3. A partir des courbes de cette figure, on remarque que les épaisseurs  $h$  de la couche mince à très haute Permittivité ( $\epsilon=18$ ) influence fortement le fonctionnement de l'antenne proposé. On peut constater clairement qu'on a une bonne adaptation pour une l'hauteur  $h= 1.6$  mm.

**N.B :** le matériau ( $\epsilon=18$ ) que nous avons utilisées juste c'est un matériau de teste et qui n'est pas être réaliser

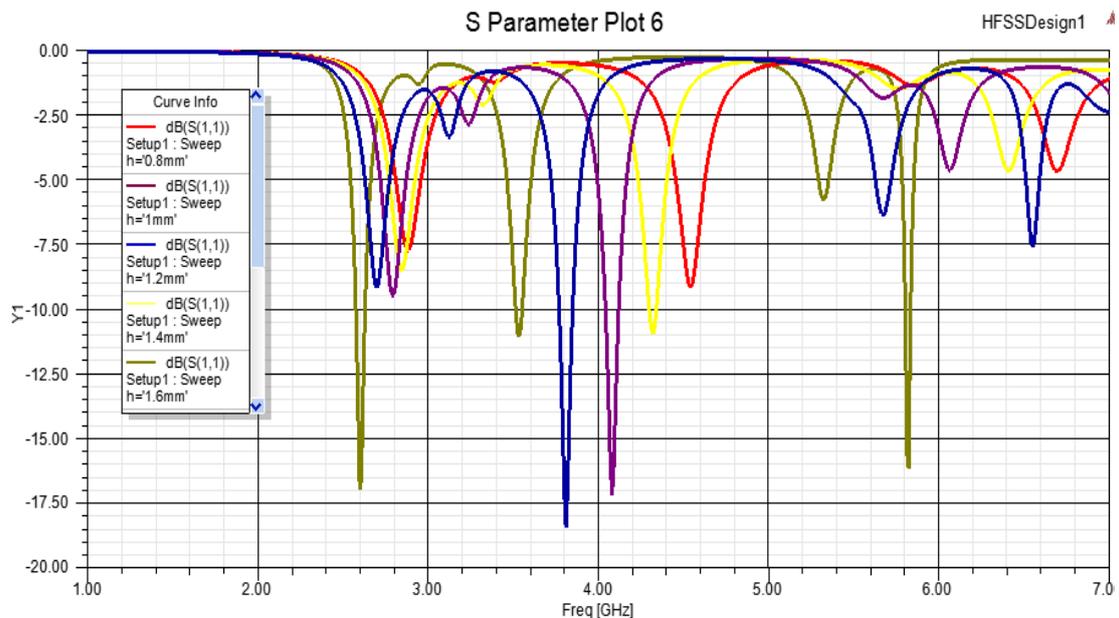
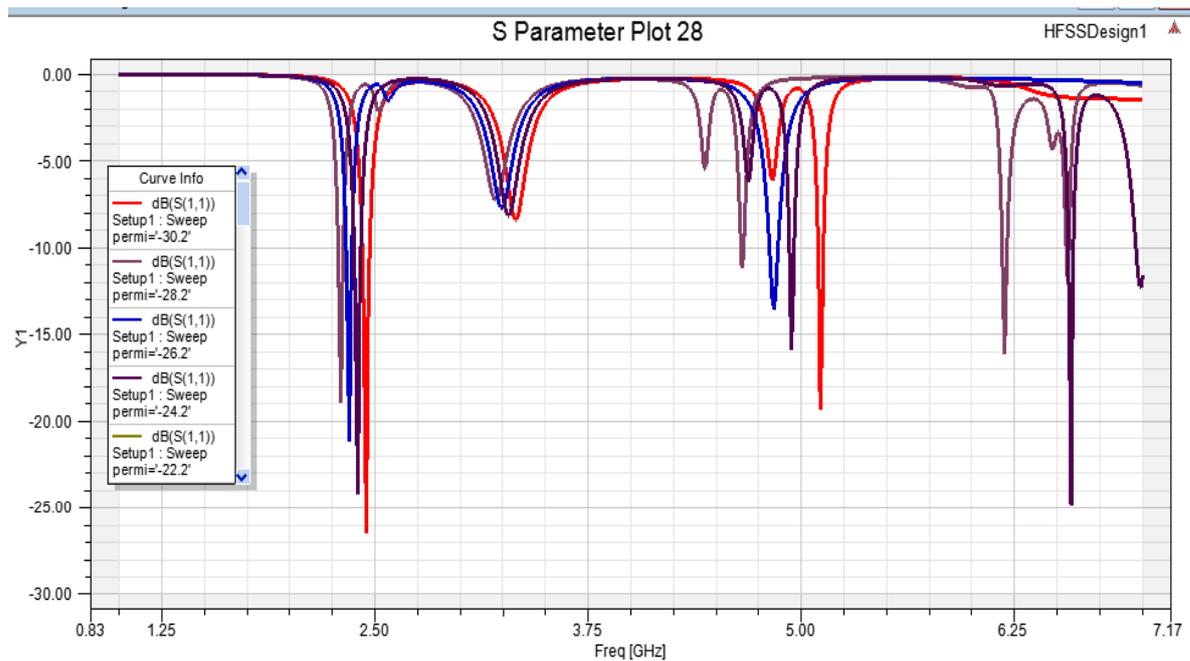


Figure IV- 19: Effet du paramètre  $h$  sur le coefficient de réflexion

- **Influence de la permittivité diélectrique  $\epsilon$  de la couche mince :**



**Figure IV- 20:** L'effet de parametre  $\epsilon$  sue le coefficient de réflexion

La figure IV.20 présente l'effet de la permittivité  $\epsilon$  de la couche mince sur le coefficient de réflexion, en gardant l'épaisseur de la couche mince constant ( $h = 1.6$  mm). Les valeurs de la permittivité sont choisies entre 32.2 et 24.2. Nous obtenons une meilleure adaptation concernant les deux fréquences pour une permittivité de 24.2.

- **Influence de la géométrie de couche mince (matériau ferroélectrique):**

Les figures (IV-21) et (IV-22) représentent les effets de la longueur et de la largeur de la couche mince sur le coefficient de réflexion de l'antenne. On remarque que la meilleur adaptation est enregistrée pour le cas où  $W=8.77$ mm et une longueur  $L=13.20$ mm.

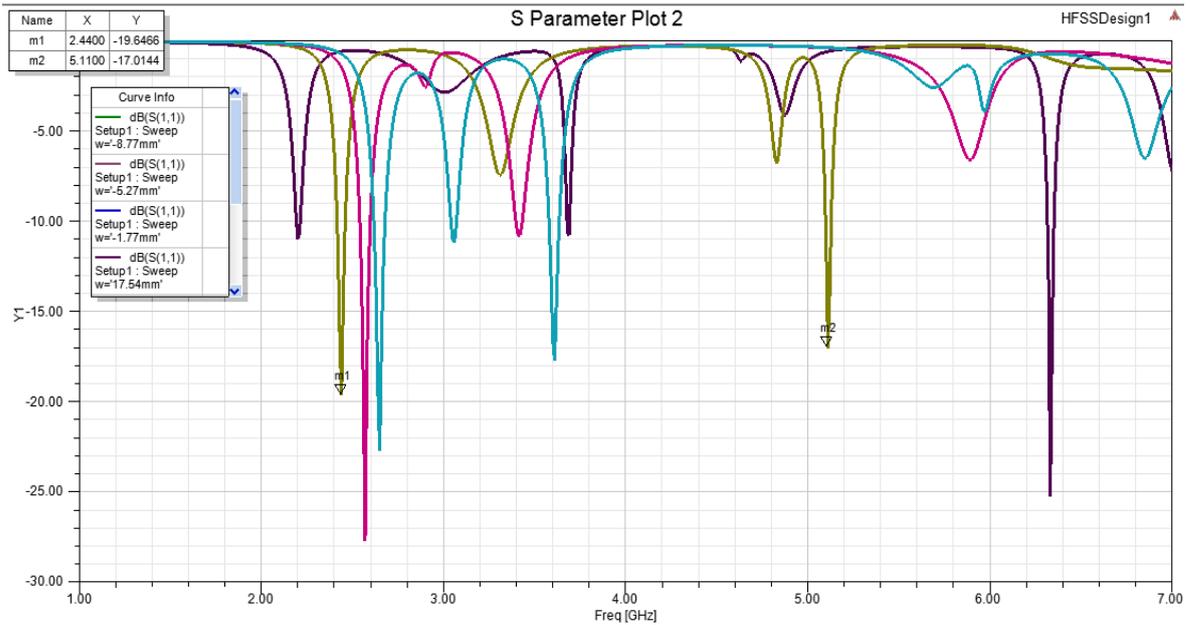


Figure IV- 21 :L'effet de paramètre W sur le coefficient de réflexion

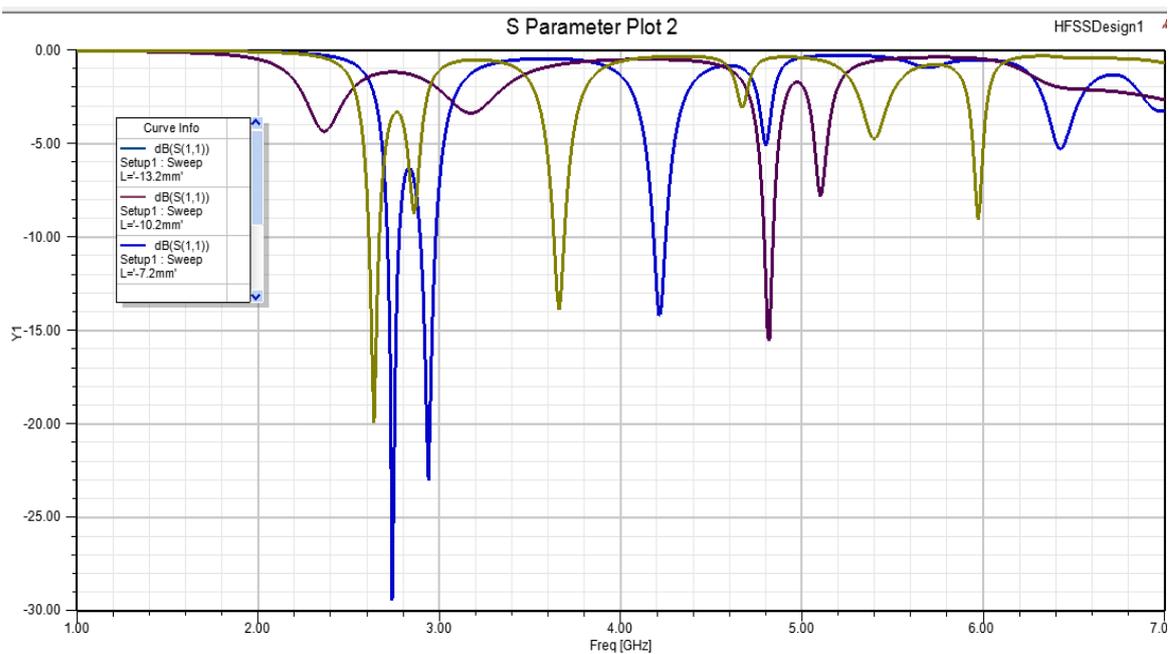


Figure IV- 22: L'effet de paramètre L sur le coefficient de réflexion

### II.5.3 Performance de l'antenne optimisée :

Dans cette section, nous présentons les résultats de la simulation de l'antenne optimisée. Les paramètres de la couche ferroélectrique utilisée sont:

- ✓ W=17.54 mm
- ✓ L=13.20 mm
- ✓ h=1.6 mm
- ✓ Matériel utilisé : « **matériel24** » avec une permittivité relative  $\epsilon_r = 24.2$

Il est à noter que ces paramètres ne sont pas choisis au hasard, on a effectué plusieurs simulations pour obtenir les résultats qui seront présentés dans les sections suivantes.

### Paramètre $S_{11}$

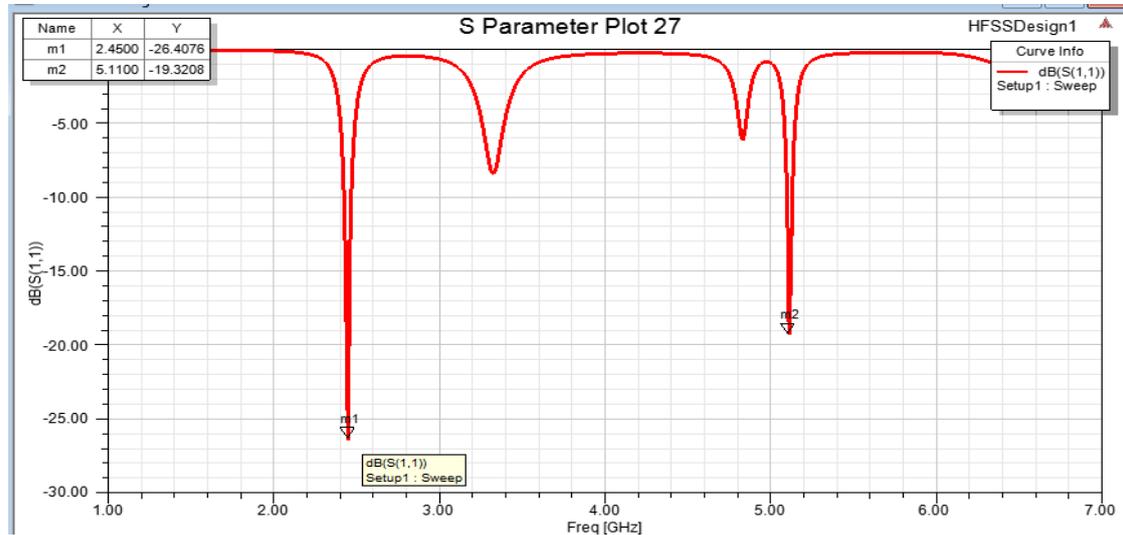


Figure IV- 23: Coefficient de réflexion (paramètre S)

L'antenne patch réalisées présente un coefficient de réflexion avec deux fréquences de résonance (2.45 GHz, 5.11GHz) :m1 (2.45 GHz avec une bande passante de 40MHz) et m2 (5.11 GHz avec une bande passante de 30MHz) comme montré dans la figure (IV.21). Les deux autres fréquences sont considérées comme parasites. En générale on ne les prend pas en considération.

### Le rapport d'onde stationnaire(VSWR) :

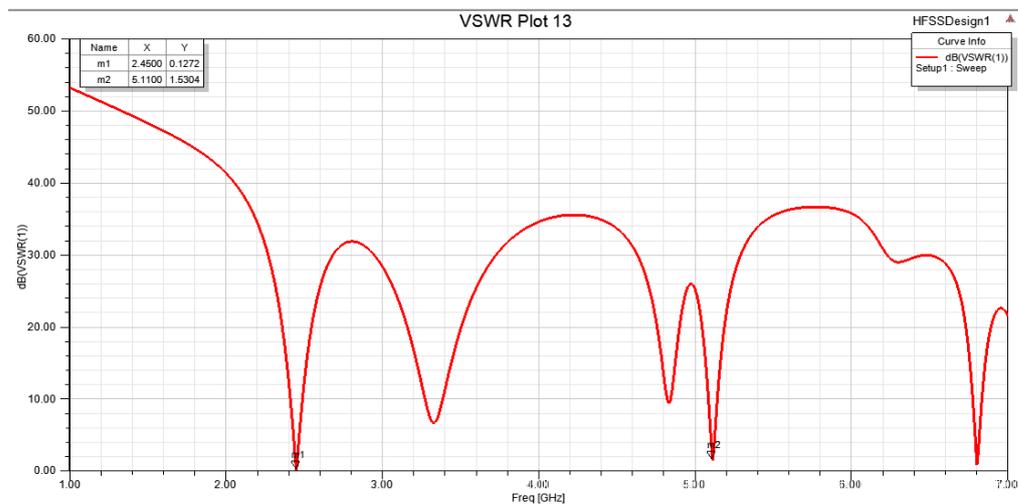


Figure IV- 24: Le rapport d'onde stationnaire

La figure (IV-22) présente le VSWR avec deux valeurs : 0.12 et 1.53 pour les fréquences de 2.45GHz et 5.11 GHz respectivement ce qui montre que l'antenne que est bien adaptée ( $S_{11} \leq -10\text{dB}$ ,  $\text{VSWR} \leq 2$ ).

### III. Etude comparative entre les antennes :

Le tableau (IV.3) suivant présente les résultats de simulation de trois antennes :

Caractéristiques	Antenne 2.4 GHz	Antenne 5GHz	Antenne [2.4GHz, 5GHz] +couche mince
Dimension (mm)	38×29.4	17.54 x 13.20	17.54 x 13.20
$S_{11}$ (dB)	-19.87	-24.36	-42.70 et -21.12
VSWR	1.76	0.86	0.12 et 1.53
Gain (dB)	2.9	1.6	1.6

**Tableau IV- 3:**Etude comparative des antennes réalisées

Les performances ont été améliorées durant le changement de chaque structure dans cette comparaison.

La taille d'antenne simple avec une fréquence de 2.4 GHz est :

$$\mathbf{W \times L = 38 \times 29.4 \text{ (mm)}}$$

La taille d'antenne avec une couche mince est :

$$\mathbf{W \times L = 17.54 \times 13.20 \text{ (mm)}}$$

En comparant les dimensions de l'antenne de 2.4GHz (38×29.4) avec les dimensions de l'antenne de [2.4GHz, 5GHz] +couche mince (17.54×13.20), on peut dire que l'ajout de couche mince ferroélectrique nous a permis de miniaturiser les dimensions de l'antenne de 79.28%.

L'ajout de couche mince permet à l'antenne de rayonner avec deux fréquences différentes simultanément (bande wifi) avec une taille réduite.

Donc on peut dire que l'objectif dans ce travail qui est la miniaturisation d'antenne patch à base de couche mince est achevé.

### IV. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les conceptions et les résultats de simulation des trois structures proposées réalisées avec le logiciel HFSS. L'utilisation des matériaux ferroélectriques nous a permis de créer une antenne patch miniaturisée qui fonctionne pour la norme WIFI dont les fréquences de résonance sont 2.4GHz et 5 GHz. Dans chaque étape de cette étude les performances de l'antenne : gain, coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement et la bande passante ont été présentés et analysés.

A partir des résultats obtenus on peut dire que l'incorporation des matériaux ferroélectriques dans les antennes patch offre une solution prometteuse pour la miniaturisation des antennes à base de couche mince.

# *Conclusion générale*

### Conclusion générale :

Ce mémoire a pour objectif d'explorer l'utilisation des couches minces ferroélectriques pour la miniaturisation de la taille des antennes des systèmes WIFI. La motivation de cette étude découle du désir de développer une antenne patch WIFI miniature qui opère avec deux fréquences de rayonnement 2.4GHz et 5GHz.

Dans ce mémoire:

- On a réalisé une antenne patch simple avec une fréquence de 2.4 GHz avec une taille **38×29.4 (mm)**
- On a réalisé une deuxième antenne qui rayonne dans la fréquence de 5GHz (bande wifi) avec des dimensions **17.54 × 13.20 (mm)**. On remarque que sa taille est plus petite que l'antenne de 2.4GHz (Lorsque la fréquence est élevée la taille d'antenne devient petite et l'inverse).
- On a gardé la même antenne de 5GHz et on a ajouté une couche mince ferroélectrique pour réaliser une antenne qui rayonne dans deux fréquences 2.4GHz et 5GHz. Par conséquent, nous avons miniaturisé notre antenne par rapport à l'antenne de 2.4GHz.

Afin d'obtenir les performances optimisées de notre antenne, il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres de l'antenne, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation d'une part, et de s'assurer qu'elle se conformera aux exigences des systèmes d'autre part. Par conséquent, une étude paramétrique est effectuée, dont nous avons étudié l'influence de la géométrie de la couche mince ferroélectrique, de son épaisseur, et de sa permittivité diélectrique sur le comportement électromagnétique de l'antenne proposée.

Les résultats obtenus sont exprimés en termes de coefficients de réflexion et de caractéristiques de rayonnement de l'antenne proposée. L'incorporation de la couche mince ferroélectrique nous a permis de miniaturiser les dimensions de l'antenne de 79.28%. L'antenne réalisée fonctionne autour de deux fréquences de résonances de 2.4GHz et 5GHz avec des bandes passantes de 40 MHz et 30 MHz respectivement. De plus cette antenne présente une bonne adaptation comme les rapports d'onde stationnaire pour les deux fréquences sont inférieurs à 2 (0.12 et 1.53). Avec ces caractéristiques, l'antenne proposée peut être un candidat approprié pour les systèmes de communications WIFI.

## Conclusion générale et perspective

---

Comme perspectives de ce travail, autre technique de miniaturisation des antennes peuvent être envisagées. La méthode développée au cours de notre mémoire peut être étendue à d'autre type d'antenne afin d'améliorer leur performances.

# Références bibliographiques

### Références bibliographiques

- [1] CHETOUAH, Farouk, BOUZIT, Nacerdine, MESSAOUDENE, Idris, et al. Miniaturized rectangular dielectric resonator antenna for WCS standards. In: 2016 12th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT). IEEE, 2016. p. 1-4.
- [2] DAOUT, F., JACQUET, S., DUROCHER, X., et al. Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz. J3eA, 2009, vol. 8, p. 0001.
- [3] CHETOUAH, Farouk. Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques. 2018. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas Setif-1.
- [4] GRANGE, François. Matériaux composites pour antenne miniature intégrée. 2010. Thèse de doctorat. Université Rennes 1, France.
- [5] LESSEUR, Julien. Imagerie 3D des matériaux et modélisations numériques: application aux multi-matériaux ferroélectriques. 2015. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux. France.
- [6] MADANI, Lakhdar. Etude du comportement diélectrique des isolateurs en composite. 2018. Thèse de doctorat. Université de Setif.
- [7] FANG, Da-Gang. Antenna theory and microstrip antennas. CRC Press Taylor & Francis, 2017.
- [8] KADDOUSSI, Hana. Étude de l'effet électrocalorique en corrélation avec les propriétés structurales, pyroélectrique et ferroélectrique de la solution  $Ba_{1-x}Ca_x(Zr_0, 1Ti_0, 9) 1-ySnyO_3$ . 2016. Thèse de doctorat. Amiens en cotutelle avec l'Université de Sfax. Tunisie.
- [9] ASPE, Barthélémy. Développement de couches minces ferroélectriques sans plomb et intégration dans des antennes miniatures reconfigurables. 2019. Thèse de doctorat. Université Rennes 1. France.
- [10] KHACHANE, Manar. Etude des matériaux ferroélectriques (céramiques et couches minces à base de niobates alcalino-terreux) et multicouches ferroélectriques-catalytiques pour capteur gaz. 2007. Thèse de doctorat. Université du Sud Toulon Var. France.

## Références bibliographiques

---

- [11] GHALEM, Areski. Caractérisations diélectriques très large bande de films minces ferroélectriques de  $BaxSr(1-x)TiO_3$  pour des applications de reconfigurabilité de dispositifs hyperfréquences. 2014. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. France.
- [12] NGUYEN, Viet Hung. Antennes miniatures et reconfigurables utilisant des matériaux diélectriques et ferroélectriques oxydes et oxynitrides en couches minces. 2013. Thèse de doctorat. Université Rennes 1. France.
- [13] TANG, Hui, TONG, Changwu, et CHEN, Jian-Xin. Differential dual-polarized filtering dielectric resonator antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no 8, p. 4298-4302.
- [14] BOYER, Alexandre. Antennes & outils et modèles pour la transmission, support de cours énoncé de travaux dirigés. 4<sup>ème</sup> année informatique & réseaux, 2014. Institut national des sciences appliquées de Toulouse. France.
- [15] PICON, Odile, CIRIO, Laurent, RIPOLL, Christian, et al. Les antennes: Théorie, conception et applications. Dunod, 2009
- [16] CHAABANE, Abdelhalim. Conception d'une antenne bip large bande a fort gain. 2018. These de doctorat. Université de Setif
- [17] NIKAM, Pritam B., BAIDYA, Achinta, et KUMAR, Jayendra. A Review on Reconfigurable Microstrip Antennas. In : International Conference on Innovation in Modern Science and Technology. Springer, Cham, 2019. p. 568-577.
- [18] AL SHARABATI, Taher et TAHA, Bilal S. Theoretical Modeling and Performance Assessment of the Effects of the Dissipation Factor (Loss Tangent) on Microstrip Patch Antennas Using Rogers' Kappa-438 Substrate. *Antenna and Propagation (IRECAP)*, 2019, Vol. 9, N. 6, p. 447..
- [19] BASILIO, Lorena I., KHAYAT, Michael A., WILLIAMS, Jeffery T., et al. The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line-fed patch antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, vol. 49, no 1, p. 45-47.

## Références bibliographiques

---

- [20] CHORFI, Hamid. Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique. 2012. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Canada.
- [21] MANSOURI, Mohamed et EZZEROUG, Elhaithem. Conception et simulation d'une antenne patch ultra large bande [1-8 GHZ].2019.thèse de doctorat. Université Blida
- [22] ALLABOUCHE, KAOUTAR, Etude, conception et caractérisation de nouvelles topologies d'antennes à Résonateurs Diélectriques : application aux nouveaux systèmes de communication sans fil.2017.thèse de doctorat. Université Sidi Mohamed ben Abdellah Maroc.
- [23] AGOUZOUL, Abderrahmane. Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHZ pour les applications sous terraines. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Canada.
- [24] DAOUIA, BELGUELLAOUI. Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire. 2016. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA.
- [25] ABDULHAMID, Mohanad et OCHIENG, Eugene. Review Design of Slot Antenna Based on Ansoft HFSS Software. Technological Engineering, 2019, vol. 16, no 1, p. 65-68.
- [26] BENOMAR, Ahmed. Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques.: Application aux Réseaux de Télécommunications. 2015. Thèse de doctorat. Université de Limoges. France
- [27] LALMI, Hadda et BENAKCHA, Abdelhamid. Conception et simulation d'un réseau d'antennes microrubans circulaires pour les applications radar. 2015. Mémoire Master. Université Mohamed Khider Biskra.
- [28] ARAB, Tarek. Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures. 2018. Thèse de doctorat. Université Setif-1.
- [29] BENAZZOUZ, Ghouti et BENSENANE, Ikram. Conception et réalisation d'une antenne miniature pour l'application LTE.2019. Thèse de doctorat. Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen.