

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Université A. MIRA-Bejaia  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire Fin De cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en télécommunication

Spécialité : ST/RT

**Conception d'une antenne fractale Bi-bandes pour les applications WLAN et WIMAX**

**Réalisé par :**

- Dib Wassila
- Younsaoui Yasmina

**Devant le jury composé de**

- **Présidente :** Mme Hamzaoui Dahbia
- **Examineur :** Mr Khireddine Abdelkrim
- **Promotrice :** Mme Bouncer Samira

Promotion 2021/2022

<b>Table des matières</b> .....	I
<b>Liste des figures</b> .....	II
<b>Liste des tableaux</b> .....	III
<b>Introduction général</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : Généralité sur les antennes</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des antennes .....	4
I. 3 Le rôle des antennes : .....	4
I.4 Caractéristiques des antennes.....	4
I .5 Les types des antennes .....	6
I.5.1 Les antennes filaires .....	6
I.5.2 Les antennes à ouverture rayonnante .....	7
I.5.3 Les antennes à réflecteurs.....	8
I.5.4 Les antennes imprimées .....	8
I.5.5 Les antennes à fentes .....	9
I.6 Les techniques d'alimentations .....	9
I.6.1 Alimentation avec contact .....	9
I.6.1.1 Sonde coaxiale .....	9
I.6.1.2 Ligne microbande .....	10
I.6.2 Alimentation sans contact (par proximité) .....	10
I.6.2.1 Ligne microbande en sandwich .....	10
I.6.2.2 Guide d'onde coplanaire .....	11
I.6.2.3 Couplage par fente .....	11
I.7 Différents domaines d'utilisation des antennes .....	12
I.7.1 Les systèmes de communications .....	12
I.7.2. Télévision et radiodiffusion FM.....	12
I.7.3. Les radars .....	12
I.7.4. La télédétection .....	12
I.7.5. La radioastronomie.....	13
I .8 Les antennes miniatures .....	13
I .8 .1 La définition de la miniaturisation .....	13
I .8 .2 Définition des antennes miniatures .....	13

I.8.3 Les techniques de miniaturisation .....	13
I.9 Les antennes multi-bandes : .....	14
I.10 Conclusion .....	15

## Chapitre II : Les antennes fractales

II.1 Introduction .....	15
II.2 Définition des fractales .....	15
II.3 Descripteurs fractales .....	15
II.3.1 Dimension fractale .....	15
II.3.2 L'autosimilarité .....	16
II.4 Présentation des fractales par leurs dimensions .....	16
II.4.1 Les courbes fractales .....	16
II.4.1.1 Fractal de Von Koch .....	16
II.4.1.2 Fractal de Hilbert et Peano .....	17
a) La fractales de Hilbert .....	17
b) Fractals de Peano .....	17
II.4.1.3 Fractale de Minkowski .....	18
II.4.2 Les surfaces fractales .....	19
II.4.2.1 Le triangle de SIERPINSKI .....	19
II.1.2.2 Le tapis de SIERPINSKI [9] : .....	20
II.4.3 Les volumes fractales .....	20
a) Le tétraèdre de Sierpinski .....	20
b) L'éponge de Sierpinski Menger .....	20
II.5 les domaines des fractale : .....	21
II .6 Les antennes fractales .....	21
II.7 Les type d'antennes fractales .....	22
II.7.1 L'antenne de Koch .....	22
II.7.2 L'antenne de Sierpinski .....	22
II.7.3 L'antenne de Minkowski : .....	23
II.7.4 L'antenne de l'arbre fractal : .....	23
II.7.5 L'antenne de Hilbert : .....	23
II.8 Les avantages .....	24
II.9 les inconvénients .....	24
II.10 Conclusion .....	24

## Chapitre III : Conception et simulation

I. Introduction.....	25
II. Présentation du logiciel et méthodologie de conception .....	25
II.1 Ansoft HFSS 13.0 .....	25
III. Familiarisation avec le simulateur.....	26
III.1. Conception et simulation de l’antenne patch rectangulaire 4.6GHz .....	27
III.2. Conception et simulation de l’antenne patch rectangulaire 3.56 GHz .....	28
IV. Conception et simulation d’antenne fractale Bi-bande pour les applications WLAN et WIMAX .....	29
IV.1 Définition de WIMAX et WLAN .....	29
IV.2 Evolution de la géométrie de l’antenne proposé 1 .....	29
IV.2.1 Conception.....	30
IV.2.2 Coefficient de réflexion des différentes itérations.....	31
IV.2.3 Etude paramétrique .....	31
IV.2.4 Les diagrammes de rayonnement .....	33
IV.2.5 La distribution de courant.....	33
IV.2.6 Le gain .....	34
IV. 3 Evolution de la géométrie de l’antenne proposé 2 .....	34
IV.3.1. Etudes paramétriques.....	35
IV.3.2. Les diagrammes de rayonnement .....	38
IV.3.3. La distribution du courant.....	38
IV.3.4 Le gain .....	39
V. Conclusion.....	39
Conclusion généralé.....	40

## Chapitre I

Figure I.1 : Utilisation des différentes bandes de fréquence .....	3
Figure I.2 : Principe de transmission par onde électromagnétique.....	4
Figure I.3: Exemples d'antennes filaires. ....	7
Figure I.4: Exemples d'antennes à ouverture rayonnante. ....	7
Figure I.5 Exemples d'Antennes à réflecteurs. ....	8
Figure I.6 : structure de base d'une antenne patch .....	8
Figure I.7 : Les antennes à fente (a) demi-onde, (b) quart d'onde .....	9
I.6 Les techniques d'alimentations .....	9
Figure I.8: Alimentation du patch par un câble coaxial.....	10
Figure I.9: Alimentation du patch par une ligne microbande.....	10
Figure I.10 : L'alimentation par une ligne microbande coaxiale(a), décalée (b) et avec Encoche (c).....	10
Figure I.11 : Ligne microbande en sandwich. ....	11
Figure I.12 : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire. ....	11
Figure I.13. Alimentation du patch par le couplage par fente.....	12

## Chapitre II

Figure II.1 : Construction des cinq premières itérations de fractale de Van Koch .....	16
Figure II.2 : fractale d'Hilbert. ....	17
Figure II.3 : Première itération de la géométrie. ....	18
Figure II.4 : Forme géométrique après plusieurs itérations. ....	18
Figure II.5 : Génération de la fractale de Minkowski .....	19
Figure II.6 : Génération des quatre premières itérations du triangle de Sierpinski.....	19
Figure II.7 : Quatre itérations du tapis de Sierpinski .....	20
Figure II.8 : Tétraèdre de Sierpinski. ....	20
Figure II.9 : Eponge de Sierpinski-Menger-ordre 3.....	21
Figure II.10 : Antenne étoile de koch.....	22
Figure II.11 : Antenne de sierpinski.....	23
Figure II .12 : Antenne de Minkowski .....	23

### CHPITRE III

Figure III.1 : Interface du projet HFSS .....	25
Figure III.2 : Description générale des utiles de HFSS.....	26
Figure III.3 : Structure d'une antenne patch.....	26
Figure III.4 : Antenne patch microstript.....	27
Figure III.5 : Coefficient S11 de l'antenne patch.....	28
Figure III.6 : Coefficeint S11 de l'antenne patch.....	28
Figure III.7 : Configuration de l'antenne proposé.....	30
Figure III.8 : Les itération de l'antenne fractale proposée.....	30
Figure III.9 : Paramètre de l'antenne à une seul fente.....	30
Figure III.10 : coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différente configuration .....	31
Figure III.11 : Variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence tenant compte de l'effet de la longueur de la fente a. ....	32
Figure III.12 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréqueuce de l'antenne proposée.....	32
Figure III. 13 : Diagrammes de rayonnement à 2.59 GHz (a) et 3.81 GHz (b) .....	33
Figure III. 14 : La distribution du courant surfacique de l'antenne proposée à :(a).....	33
2.6GHz ; (b)3.82GHz.....	34
Figure III.15. Le gain simulé de l'antenne proposée (a) pour 2.6 GHz et (b) pour 3.82 GHz. .	34
Figure III.16 : 2. Itérations de l'antenne Fractale proposée. ....	34
Figure III.17 : Géométrie de la structure proposée.....	35
Figure III.18 : Effet du paramètre distance entre la ligne microruban et le plan de masse g sur les coefficients deréflexion. ....	36
Figure III.19 : Effet du paramètre distance entre le patch et le plan de masse b sur les coefficients de réflexion .....	36
Figure III.20 : Coefficients de réflexion et la fréquence de l'antenne proposée.....	37
Figure III.21 : Diagrammes de rayonnement simulés de l'antenne proposée dans le plan H et E en (a) 3.7 GHz, (b) 5.89 GHz et (b) .....	38
Figure III.22 La distribution du courant surfacique de l'antenne proposée à (a) 3.7 GHz, (b) 5.89 GHz .....	38
Figure III.23. Le gain simulé de l'antenne proposée (a) pour 3.7 GHz et (b) pour 5.89 GHz. .	39

<b>Tableau I.1</b> : Caractéristiques des antennes.....	3
<b>Tableau III.1</b> : Dimensions des paramètres de l'antenne.....	27
<b>Tableau III.2</b> : Dimensions des paramètres de l'antenne.....	28
<b>Tableau III.3</b> : Paramètres Optimisés pour l'antenne proposée.....	36

# *Remerciement*

*Avant tout nous remercions dieu tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce travail.*

*Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.*

*Notre vif remerciement et notre profonde gratitude s'adressent à notre promotrice <sup>Mme</sup> Bouncer.S qui accepté de nous encadrer, nous le remercions infiniment pour sa grande patience, son aide et ses conseils judicieux, Sa présence moment de doute, ses instruction claires et ses encouragement.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail*

*Enfinement je remercie tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.*



# Dédicaces

*Je dédie ce travail A tous ceux  
qui me sont chers*

*A mes parents que je remercie  
infiniment pour leur Aide et  
d'être toujours à mes côtés que  
dieu les protégés et les garde  
en bonne santé*

*A l'homme de ma vie : mon  
épouse Halim*

*A mes chers frères : Mohamad  
et sa femme Thiziri, Chawki,  
Nadjemddinne, Kosaïla*

*A ma unique sœur : Siham*

*A toute ma famille et mes  
amies*

*A ma binôme yasmina et à  
toute sa famille.*

*« Wassila »*





## **DEDICACES**

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est tout simplement que Je dédie cette mémoire .*

### **A ma mère**

*Tu m'as donnée la vie et le courage pour réussir. Tous ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte En témoignage je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as entourée.*

### **A mon père**

*L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te préserve et te procure santé et langue vie .*

*A mon frère hamou et sa femme et surtout mon Nouvo fafo et bien sur mes sœurs la source de mon amour et de ma force .*

### **A mon mari**

*Pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail Sans oublier sa famille.*

*Mes amis et mes camarades Toute la famille YOUNSAOUI , AIT OUARET et Dib.*

*Sans oublier tous les professeures que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

**YASMINA.**



De nos jours, les antennes jouent un rôle très important dans plusieurs applications, qui s'étendent dans différents domaines, c'est un élément indispensable dans n'importe quel dispositif de communication sans fil.

Avec le développement et les progrès rapides de la technologie des systèmes de communication moderne, les exigences de l'élargissement de la bande passante en fréquence et le partage des bandes multifréquences sont augmentés pour les applications commerciales et militaires.

Les antennes multi-bandes et large bandes sont souhaitables dans le domaine personnel de système de communication, les terminaux de communication par satellite, et d'autres applications sans fil. Elles ont trouvé une application dans les véhicules aériens sans pilote (UAV), le camouflage, la dissimulation et la tromperie, les radars à ouverture synthétiques (SAR) et les indicateurs de cible mobile au sol.

Pour répondre à cette exigence, des antennes innovantes large bandes et multi-bandes avec un bon rayonnement ont été développées et de nombreuses techniques ont été rapporté. Parmi ces techniques, l'application de la théorie des fractales pour la conception d'un nouveau type d'antenne. Il a été démontré que les antennes fractales améliorent leurs propriétés en raison de leurs autosimilarité, citons l'exemple du monopôle de Sierpinski et la directivité élevée du patch de l'île de Koch[ref].

Le concept des fractales a été introduit pour la première fois par le mathématicien Français Benoît Mandelbrot. Il s'est inspiré des travaux effectués par plusieurs mathématiciens du siècle dernier ou du début du siècle : l'ensemble de Cantor, décrit par Georg Cantor en 1872, les courbes de Peano et de Hilbert, imaginées par Giuseppe Peano en 1890 et David Hilbert en 1891, les fonctions de Weierstrass, décrites par Karl Weierstrass en 1815, la courbe de Koch, décrite par Helge Von Koch en 1904, le tapis et le tamis de Sierpinski imaginés par Waclaw Sierpinski en 1916, ou l'ensemble de Julia décrit par Gaston Julia en 1918 [ ref]

Dans ce mémoire, nous allons concevoir des antennes bi-bandes pour les applications sans fils (communication WLAN, WIMAX ), généralement omnidirectionnelles et bidirectionnelles en termes de rayonnement, (c'est l'une des orientations principales fixées)

Une antennes portant sur l'insertion des fentes sur le plan de masse et une antenne fractale de forme fleur ont été conçues. Le logiciel de simulation HFSS sera utilisé.

Ce mémoire est organisé selon l'ordre suivant :

- Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu général sur les antennes utilisées dans les télécommunications en parlant de leurs rôles, de leurs caractéristiques, leurs types et les différentes techniques d'alimentations, ainsi que leurs différents domaines d'utilisation. Nous abordons également les techniques de miniaturisation dont l'utilisation de la géométrie fractale.
- Le second chapitre, englobera une étude théorique sur le concept des fractales. Nous parlerons de l'historique de naissance de la géométrie fractale ainsi que des différentes formes les plus connues. Nous aborderons ensuite les domaines d'applications des antennes. ensuite nous examinerons les différents avantages et inconvénients des antennes fractales.
- Le troisième chapitre sera dédié à la conception en premier d'une antenne bi-bandes en se basant sur l'insertion de fentes et l'utilisation des formes fractales récentes pour diverses applications sans fils.
  - La première structure est une antenne possédant des fentes sur le plan de masse (qui utilise une approche géométrique fractale). Cette antenne fonctionne dans deux bandes à 2,4 GHz et 3,75GHz pour les applications WLAN et WiMAX, respectivement.
  - La deuxième, une autre antenne fractale en forme de fleur alimentée par un guide d'ondes coplanaire (CPW). La configuration de cette antenne proposée provient de la combinaison de petits éléments hexagonaux ajoutés aux coins d'une simple antenne de forme hexagonale. En augmentant le nombre d'itérations dans cette conception, le nombre de fréquences de résonance peut être augmenté. L'antenne proposée fournit deux fréquences de résonance, qui pourraient convenir à différentes applications sans fil 3.6GHz (WiMAX) et 5.8 GHz (WLAN).
    - Nous terminerons par une conclusion générale.

# Chapitre I : Généralités sur les antennes

## I.1 Introduction

Une antenne d'émission est un élément conducteur qui transforme une énergie électrique en énergie de rayonnement électromagnétique. Une antenne de réception traduit un rayonnement électromagnétique en courant électrique induit. La même antenne peut servir à recevoir ou à émettre si elle est alimentée en courant (réciprocité des antennes). Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueur d'onde très différentes pour un très grand nombre d'applications dont nous citons quelques exemples:

- Ondes kilométriques (30 à 300 kHz) et hectométriques (300 à 30000 kHz) pour la radiodiffusion à modulation d'amplitude, les signaux horaires et les liaisons avec les sous-marins.
- Ondes décamétriques (3 à 30MHz) pour les liaisons intercontinentales ou maritimes.
- Ondes métriques (30 à 300MHz) pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision et les communications et radionavigation aéronautique.
- Ondes décimétriques (300 à 3000MHz) pour la télévision, le radar et les liaisons avec les mobiles.
- Ondes centimétriques (3 à 30GHz) pour les liaisons terrestres par faisceaux hertziens et les liaisons spatiales [1].

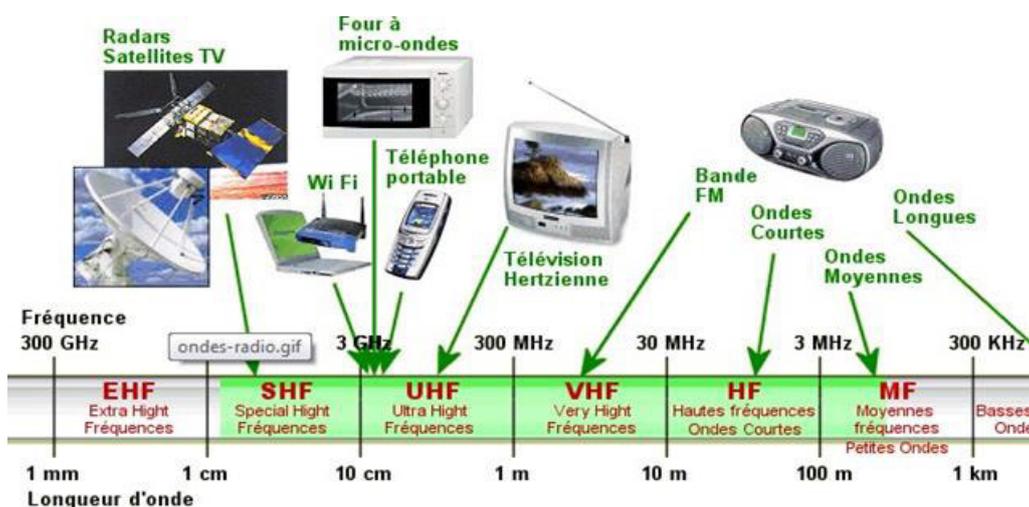


Figure I.1 : Utilisation des différentes bandes de fréquence

## I.2 Définition des antennes

Les antennes sont des dispositifs permettant de rayonner ou de capter les ondes électromagnétiques [2], ou, en d'autres termes, une structure de transition entre un espace libre et une onde guidée [3]. L'antenne d'émission transforme le courant modulé d'excitation en ondes électromagnétiques capables de se déplacer dans l'atmosphère. Tandis que l'antenne de réception convertit les ondes électromagnétiques reçues en courant susceptible d'être traité par le récepteur.

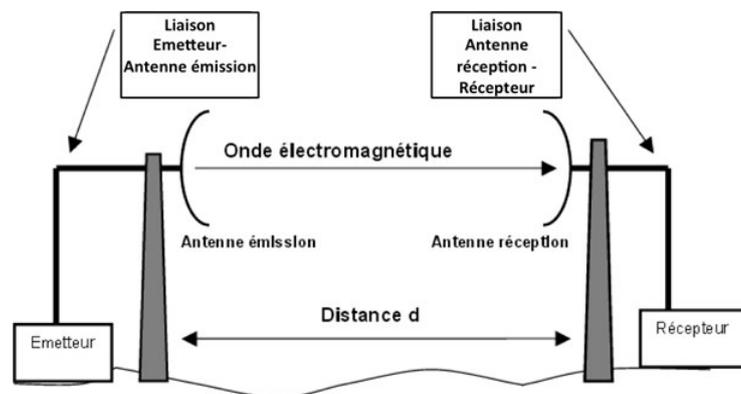


Figure I.2 : Principe de transmission par onde électromagnétique.

## I.3 Le rôle des antennes :

- L'antenne permet une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- Elle assure la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- Elle transmet le plus fidèlement possible une information.

Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple qui soit, celui-ci serait composé d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient séparés par un canal de propagation dans lequel le signal émis transite avant d'être reçu.

## I.4 Caractéristiques des antennes

Indifféremment du type de l'antenne et de son mode de fonctionnement, les principales caractéristiques qui définissent ses performances sont généralement : la bande passante, le diagramme de rayonnement, l'efficacité, la directivité et le gain.

Caractéristiques électriques	L'impédance d'entrée	$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Z : l'impédance d'entrée aux bornes a et b</li> <li>➤ <math>v_e</math> : la tension d'entrée</li> <li>➤ <math>I_e</math> : le courant d'entrée</li> <li>➤ R : la résistance de l'antenne aux bornes a et b</li> <li>➤ X : réaction de l'antenne aux bornes et b</li> </ul>
	Coefficient de réflexion [4]	$\Gamma = \frac{z_e - z_c}{z_e + z_c}$ $S_{11} = 20 \log(\Gamma)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>z_e</math> : l'impédance d'entrée</li> <li>➤ <math>z_c</math> : l'impédance Caractéristique</li> </ul>
	Rapport d'onde stationnaire (ROS) [5]	$ROS = \frac{1 +  \Gamma }{1 -  \Gamma }$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>\Gamma</math> : coefficient de réflexion</li> </ul>
Caractéristiques de rayonnement	Diagramme de rayonnement [6]	$r(\theta, \varphi)_{db} = 10 \log \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta_0, \varphi_0)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ P : puissance rayonnée</li> </ul>
	La directivité [7],[8]	$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}}$ $U_{iso} = \frac{p_{rad}}{4\pi}$ $D_0 = \max D(\theta, \varphi)$ $D(\theta, \varphi)_{db} = 10 \log D_0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ U ((<math>\theta, \varphi</math>)) : intensité de rayonnement d'antenne considérée</li> <li>➤ <math>U_{iso}</math> : intensité de rayonnement d'antenne isotrope</li> </ul>
	Gain[8]	$G(\theta, \varphi) = 4\pi\eta \left( \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \right)$ $= \eta D(\theta, \varphi)$ $\eta = \frac{p_{rad}}{P_f}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>\eta</math> : rendement</li> <li>➤ <math>p_{rad}</math> : puissance rayonné total</li> </ul>
	Résistance de rayonnement	$R_q = 2 \frac{p_r}{I_q^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>I_q</math> : courant en un point q</li> <li>➤ <math>p_r</math> : puissance active rayonné par l'antenne</li> </ul>

	Polarisation	Horizontal Vertical	
	La bande passante [9]	$Bp(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>f_s</math> : fréquence supérieure</li> <li>➤ <math>f_i</math> : fréquence inférieure</li> <li>➤ <math>f_c</math> : fréquence central</li> </ul>

Tableau I.1 : Caractéristiques des antennes

### I.5 Les types des antennes

Les antennes sont réparties en plusieurs catégories selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau, et la bande passante. Ainsi, on peut les classer comme suit [10]:

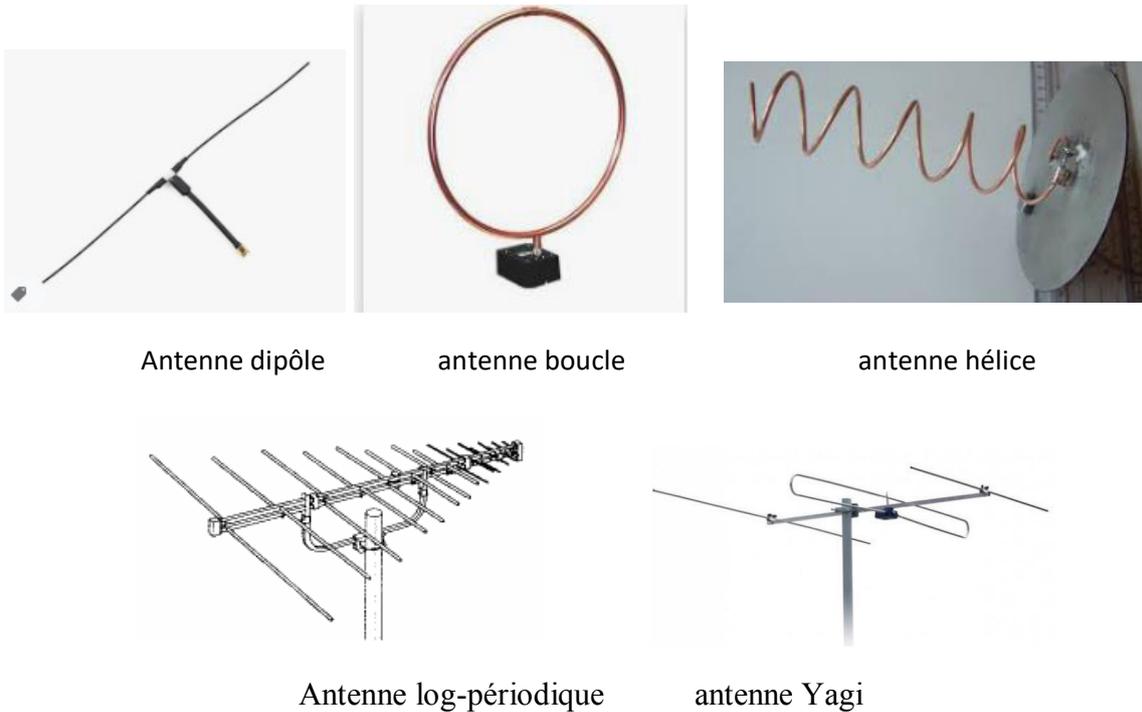
- Les antennes filaires,
- Les antennes à ouvertures rayonnantes,
- Les antennes à réflecteur
- Les antennes imprimées.

#### I.5.1 Les antennes filaires

Les antennes filaire ou filiformes sont faites à partir de brins conducteurs et sont généralement facile à fabriquer et à coût réduit. On cite comme exemples le dipôle, le monopole, l'antenne boucle, l'antenne à hélice, l'antenne Yagi-Uda et l'antenne log-périodique.

Elles sont utilisées pour des types de transmissions très différents : sur les véhicules, les bâtiments, les bateaux et les avions... etc . La combinaison de ces différentes formes de base pour former une antenne unique est également possible.

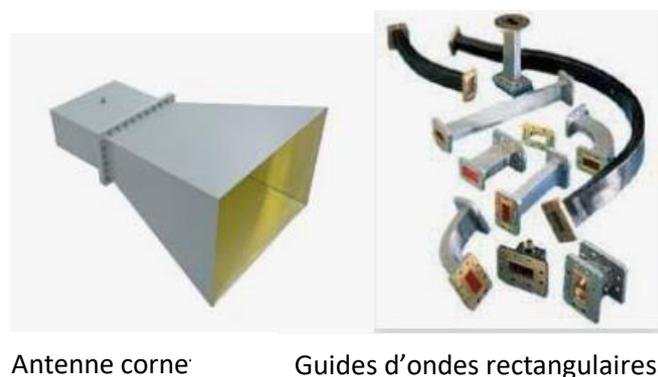
L'antenne dipôle est souvent utilisée comme antenne de référence dans les systèmes radio-mobiles. C'est en effet le type le plus simple.



**Figure I.3:** Exemples d'antennes filaires.

### I.5.2 Les antennes à ouverture rayonnante

Les antennes à ouverture rayonnante sont plus récentes que les précédentes. Leur utilisation est motivée par les émissions à des fréquences plus élevées. Compte tenu de leurs facilités de montage, ces antennes sont très couramment utilisées dans le domaine de l'aviation. Elles peuvent être couvertes d'un matériau diélectrique les protégeant contre les conditions aléatoires de l'environnement.

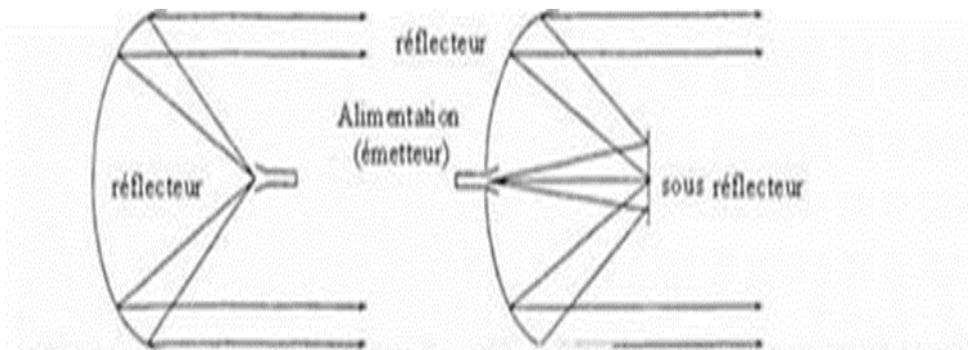


**Figure I.5:** Exemples d'antennes à ouverture rayonnante.

### I.5.3 Les antennes à réflecteurs

Ces antennes consistent principalement en une source illuminant une surface

réfléchissante. Les applications principales de ce type d'antennes se situent dans le domaine des communications spatiales qui nécessitent des antennes capables de communiquer sur des distances importantes de plusieurs millions de kilomètres. Le réflecteur parabolique est la forme la plus connue de ce type d'antennes.

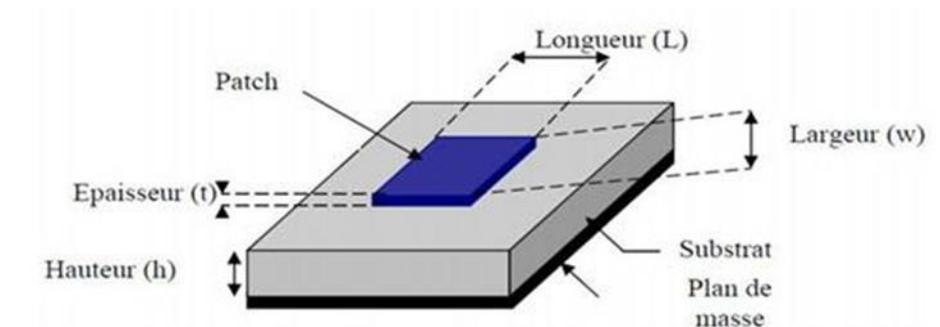


Réflecteur parabolique avec émetteur frontal      Réflecteur parabolique avec alimentation cassegrain

**Figure I.6** Exemples d'Antennes à réflecteurs.

#### I.5.4 Les antennes imprimées

En général, une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, d'une ou de plusieurs couches de substrat pouvant avoir des permittivités ( $\epsilon r$ ) égales ou différentes. La surface contient un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées).



**Figure I.7** : structure de base d'une antenne patch .

Les substrats diélectriques ont généralement une faible permittivité ( $\epsilon r < 3$ ) pour faciliter et favoriser le rayonnement, tout en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse. [11]

#### I.5.5 Les antennes à fentes

L'antenne à fente a le même comportement que le dipôle mais en inversant les champs **E** et **H**. Cette antenne se caractérise par son développement vertical ou horizontal en forme de

cornière, ou de guide d'ondes, avec des fentes de dimensions et d'emplacements particuliers qui sont fonctions de la fréquence. Elle est utilisée notamment pour le Wi-Fi.



**Figure I.8 :** Les antennes à fente (a) demi-onde, (b) quart d'onde

## I.6 Les techniques d'alimentations

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

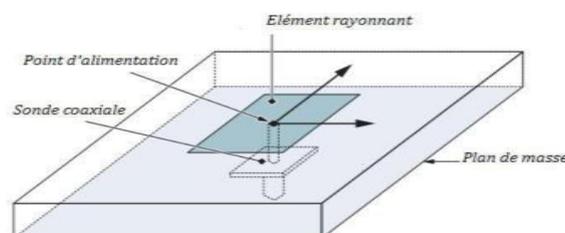
Les trois principaux types sont :

- **Alimentation par ligne** : une ligne micro-ruban est reliée au patch et lui amène l'énergie. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.
- **Alimentation par connecteur** : un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse qui est perforé pour permettre à l'âme central d'être reliée au patch en traversant le diélectrique. L'énergie est amenée par guide coaxial.
- **Alimentation par fente** : une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne.

### I.6.1 Alimentation avec contact

#### I.6.1.1 Sonde coaxiale

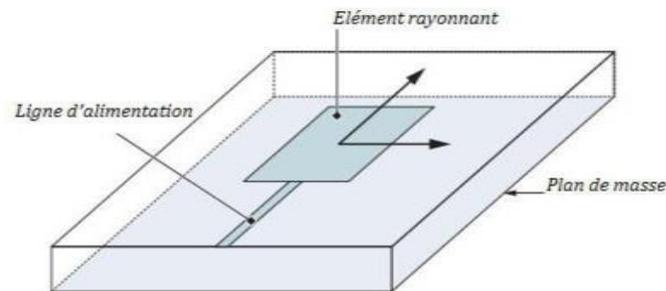
Le câble de la sonde coaxiale traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse [12] comme monter dans la figure (I.9), Cette alimentation est très utilisée avec les patches de formes circulaire et annulaire.



**Figure I.9:** Alimentation du patch par un câble coaxial.

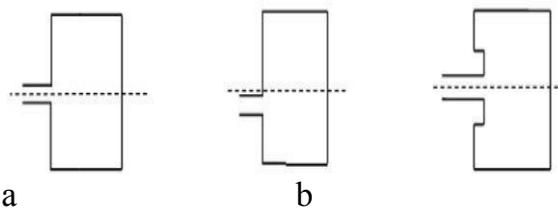
#### I.6.1.2 Ligne microbande

Faite par une ligne microbande de largeur plus petite par rapport au patch, cette ligne est gravée avec le patch en même temps (figure I.10). Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [12].



**Figure I.10:** Alimentation du patch par une ligne microbande.

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne microbande (Figure I.11), dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats [13], [14], Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes.



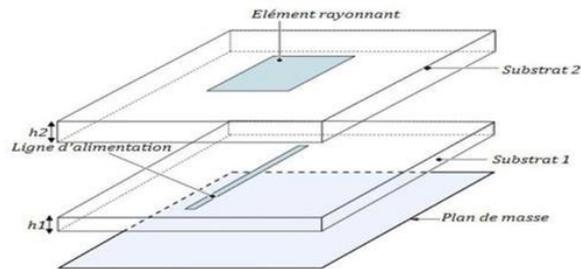
**Figure I.11 :** L'alimentation par une ligne microbande coaxiale(a), décalée (b) et avec Encoche (c)

## I.6.2 Alimentation sans contact (par proximité)

### I.6.2.1 Ligne microbande en sandwich

Une antenne plaquée peut être aussi alimentée par couplage électromagnétique de la ligne micro-ruban à l'élément rayonnant. Dans ce cas, le résonateur et la ligne d'alimentation sont situés du même côté du plan de masse (Figure I.12). L'antenne est formée de deux substrats, avec une ligne micro-ruban sur le substrat inférieur qui se termine en circuit ouvert sous le patch imprimé sur le substrat supérieur.

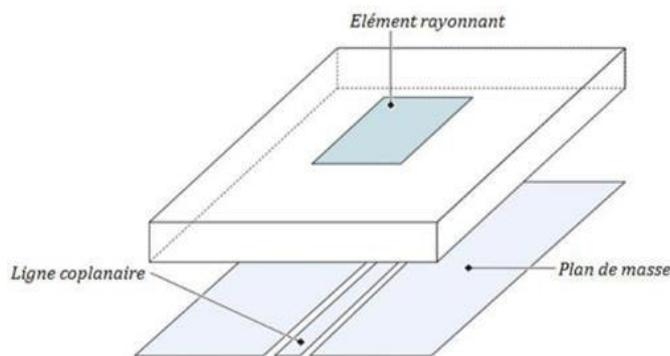
Le couplage électromagnétique a l'avantage de permettre la réalisation du patch rayonnant sur un substrat relativement épais, afin d'améliorer la bande passante, pendant que la ligne d'alimentation est imprimée sur un substrat plus mince, afin de réduire les rayonnements et les couplages parasites [15].



**Figure I.12 :** Ligne microbande en sandwich.

### I.6.2.2 Guide d'onde coplanaire

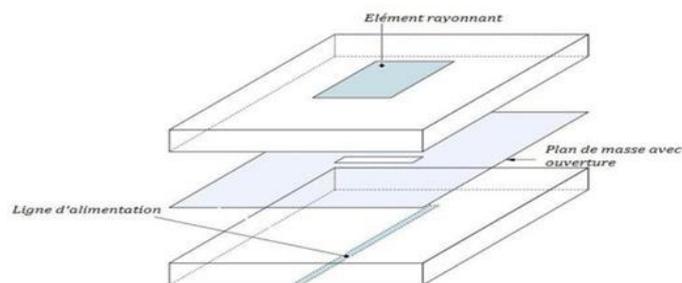
L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même façade inférieure du substrat (Figure I.13).



**Figure I.13 :** Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire.

### I.6.2.3 Couplage par fente

Une ligne est disposée au-dessus du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne (Figure I.14) [16]



**Figure I.14.** Alimentation du patch par le couplage par fente.

## **I.7 Différents domaines d'utilisation des antennes**

### **I.7.1 Les systèmes de communications**

Les communications représentent un domaine très vaste dans lequel les systèmes utilisent des antennes de formes variées. Au début des télécommunications, il paraissait extraordinaire de transmettre la voix. On est ensuite passé à la transmission de données. Ensuite, grâce au développement, des technologies sans fil ont permis la transmission d'internet. Pour cela les types d'antennes ont beaucoup évolué dans chaque domaine d'applications. Par exemple celui des antennes de terminaux mobiles qui sont passées en très peu de temps d'antennes filaires rectilignes aux antennes patch, en satisfaisant des contraintes comme une diminution de taille et à une esthétique imposée par le marché grand public.

Les antennes n'utilisent qu'une partie du spectre électromagnétique qui est appelé spectre Radiofréquence (spectre des fréquences radioélectrique) qui s'étend approximativement de 1KHZ à 300GHZ. Ce spectre est très étendu, il est utilisé dans de nombreuses applications qui sont différentes en fonction de la fréquence et sont généralement relatives à un domaine de fréquences particulier.

### **I.7.2. Télévision et radiodiffusion FM**

Les bandes de fréquences utilisées pour la télévision et la radiodiffusion FM occupent une grande partie du spectre VHF et UHF.

Il existe de nombreuses antennes utilisées aussi bien pour la transmission que la réception.

Cependant, le respect de certaines caractéristiques et notamment l'adaptation de l'antenne à l'amplificateur est obligatoire pour la conception des antennes utilisées en transmission.

### **I.7.3. Les radars**

Le radar est une technique de détection et de mesure de position d'objets réfléchissant les ondes électromagnétiques. Les caractéristiques d'antennes radar sont étroitement liées aux capacités de couvertures, c'est-à-dire la capacité à discerner deux cibles proches.

### **I.7.4. La télédétection**

La télédétection est par définition le domaine qui consiste à détecter à distance. Les applications dans ce domaine sont actuellement très nombreuses. Les différents types

d'antennes dont on a parlé sont choisis en fonction de leurs caractéristiques selon les applications visées.

## **I.6.5. La radioastronomie**

La radioastronomie est le domaine d'observation des corps célestes dans les bandes de fréquences micro-onde et millimétriques.

Les antennes sont souvent composées de deux réflecteurs. Le récepteur se trouve juste derrière le réflecteur primaire qui est percé de façon à laisser passer le rayonnement qui vient, se focaliser. Ces antennes peuvent être associées en réseau.

Les qualités d'une antenne pour la radioastronomie sont :

- La sensibilité.
- Son pouvoir de résolution. [17]

## **I.7 Les antennes miniatures**

### **I.7.1 La définition de la miniaturisation**

D'une façon générale, la miniaturisation consiste à réduire les dimensions des objets. En pratique, la miniaturisation des composants électroniques tente à réduire de façon idéale un composant tout en gardant la fonction ou la forme originale. La miniaturisation d'antenne procède une démarche de réduction l'encombrement de l'antenne afin de satisfaire des critères surfaciques ou volumiques.

### **I.7.2 Définition des antennes miniatures**

Une antenne miniature généralement définie comme ayant des propriétés "d'étroitesse" en termes de dimensions et de longueur d'onde. Typiquement, on considère qu'une antenne est miniature si elle présente des dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde. Selon l'application visée, Elle consiste à trouver le meilleur compromis, entre : la taille, la bande passante et l'efficacité.[18]

### **I.7.4 Les techniques de miniaturisation**

De nombreuses techniques, largement détaillées dans des ouvrages de référence et de nombreux documents internationaux, ont été utilisées pour réduire la taille des antennes pour une fréquence donnée. Plusieurs catégories des méthodes de miniaturisation s'intéressent à l'élément rayonnant. Il s'agit d'une part, de changer localement la structure rayonnante en

utilisant des éléments localisés ou des courts-circuits et d'autre part de modifier ponctuellement sa géométrie. Parmi les techniques de miniaturisation des antennes, nous citons [ ] :

- **Modification de la géométrie**
  - Le repliement de l'élément rayonnants
  - La réduction de la taille d'antenne patch jusqu'à 50%.
- **Modification de la forme de l'élément rayonnant**
  - En forme triangulaire.
  - En forme de nœud-papillon.
  - Méandres verticaux ou repliement de la structure.
  - Méandres latéraux ou verticaux très étroits.
- **Utilisation d'un substrat à haute constante diélectrique.**
- **Utilisation de métamatériaux**
- **Insertion de fentes dans l'élément rayonnant**
  - Fente demi-onde (non-débouchant).
  - Fente quart d'onde (débouchant).
  - L'allongement des longueurs électriques.
  - La création de nouveaux résonateurs.
- **Insertion d'une charge capacitive insérée**
  - En bout d'élément.
  - Dans l'élément.
- **Utilisation des structures fractales.**

### **I.8 Les antennes multi-bandes :**

Une antenne multi-bande est une antenne qui résonne sur au moins deux fréquences avec les mêmes exigences (adaptation, valeur du coefficient de réflexion, gain ...). La fréquence de résonance d'une antenne définit sa fréquence de fonctionnement. la fréquence pour laquelle la partie imaginaire de son impédance d'entrée est nulle. Cela autorise, dans la majorité des cas, un coefficient de réflexion minimum. Le fonctionnement d'une antenne sur une bande de fréquence se traduit généralement par une adaptation « raisonnable » de l'antenne pour toutes les fréquences de la bande.

## **I.9 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différentes antennes destinés aux réseaux de télécommunications. Nous avons présenté, en premier lieu, quelques définition et caractéristiques des antennes. Nous avons donné ensuite leurs rôles, leurs techniques d'alimentation ainsi que leurs domaines d'utilisation ainsi que quelques techniques de miniaturisations. Nous avons terminé par donner un aperçu sur les antennes multi-bandes

Notre objectif est de d'étudier des topologie d'antennes miniatures avec un fonctionnement bi-bandes pour cela nous nous sommes orienté vers l'utilisation de la géométrie fractale.



- [1]: Article in IEEE Transactions on Antennas and Propagation · May 2007 DOI: 10.1109/TAP.2007.893392 · Source: IEEE Xplore.
- [2] : ZIANE CHERIF Abderrahman et Benhaddoudi abderrahim, ‘‘Conception, modélisation et réalisation d'une antenne micro ruban triangulaire miniature ULB’’, Mémoire master de Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d’Ain-Temouchent, 2016/2017.
- [3] : ABRI.M, MOULAY Mohammed,’’ Exploitation du modèle de la ligne de transmission pour la conception des antennes imprimées multi-bandes dédiées aux applications sans fil ‘’, Thèse présentée à l’Université de Tlemcen faculté de Technologie pour l’obtention du diplôme de Doctorat, le 03 mars 2016.
- [4] : Mr N.BOUKLI-HACENE, Melle BELHADEF Yamina,’’ Conception d’antenne PIFAS large bande de télécommunication mobiles’’ ; Thèse de Doctorat Présentée A L’Université de Tlemcen, 2012.
- [5] : « les antennes » 13<sup>e</sup>édition Dunood : RAYMOUD Branlt, ROERTPiat.
- [6] : V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, and C. Hafner."Negative Refractive Index Materials".ASP
- [7] : B .Zaoui , "Modélisation d'une antenne microruban compacte", Master academique , Université EchahidHamma Lakhdar El oued,06/2015.
- [8] : L. I. Basilio, M. A. Khayat, J. Williams, S. A. Long, "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line fed patch antennas ", IEEE trans. AntennasPropagat. , vol. 49, pp. 45-47, 01/ 2001.
- [9] : D. Aissaoui, " Analyse a l’aide de modèles équivalents d’antennes imprimées alimentées par ligne adaptées ", Mémoire de Magister, Université de Abou Baker BelkaidTlemcen , 03/2007
- [10] : Odile Picon et Coll : «< Les Antennes Théorie, conception et application >> , Paris,2009
- [11] : A. Diallo « Systems Multi-Antennes Pour Diversités Et Mimo » Thèse De Doctorat De L’université De Nice-Sophia Antipolis.NOV 2007.
- [12] Mr N.BOUKLI-HACENE, Melle BELHADEF Yamina,’’ Conception d’antenne PIFAS large bande de télécommunication mobiles’’ ; Thèse de Doctorat Présentée A L’Université de Tlemcen, 2012.SSSSSS

[13] S. Hebib, «Nouvelle topologie d'antennes multi-bandes pour applications spatiales,»  
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.

## Chapitre II : Les antennes fractales

## II.1 Introduction

Les fractales sont apparues au 19<sup>ème</sup> siècle, elles étaient difficilement étudiées et peu comprises, c'est le mathématicien Benoît MANDELBROT qui a été le premier à les expliquer dans la première édition de son livre « les Objets fractales : forme hasard et dimension », paru en 1975.

Une antenne fractale présente une spécificité géométrique qui leur confère la possibilité de résonner sur plusieurs fréquences, en gardant éventuellement les mêmes caractéristiques électromagnétiques.

Ce chapitre est consacré aux généralités et caractéristiques des antennes fractales ainsi que leurs présentations et leurs applications.

## II.2 Définition des fractales

Le terme fractale vient de l'adjectif latin 'fractus', qui signifie irrégulier ou brisé. Elle est classée comme un nouveau domaine, afin de classer les structures géométriques .

Les courbes fractales sont générées d'une manière itérative, afin d'obtenir des structures autosimilaires. Si les paramètres de la fractale sont maintenus constants à chaque itération, la fractale résultante est appelée déterministe sinon si l'un de ces paramètres se modifie d'une façon aléatoire le long de l'opération de génération, on parle d'une fractale aléatoire [1].

Les géométries fractales sont exploitées dont l'objectif de concevoir des antennes multi-bandes et de taille miniature. Elles peuvent être aussi utilisées pour concevoir des antennes large-bandes et des antennes avec des diagrammes de rayonnement directifs.

## II.3 Descripteurs fractales

### II.3.1 Dimension fractale [2]

La dimension fractale  $D$  ou dimension de similarité, est le nombre qui quantifie le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique ou d'un objet naturel. La dimension fractale est aussi une mesure de la façon dont la forme fractale occupe l'espace.

On connaît déjà la dimension de quelques figures simples qui sont des entiers naturels :

- Un segment a pour dimension  $D = 1$ .
- Un carré a pour dimension  $D = 2$ .
- Un cube a pour dimension  $D = 3$ .

### II.3.2 L'autosimilarité

L'existence du concept d'autosimilarité existe depuis longtemps. On dit qu'une figure qui préserve une certaine symétrie interne, en dépit des variations d'échelles est autosimilaires [3].

L'autosimilarité est une propriété très importante dans les objets fractals. Elle est présente sous divers formes complexes trouvées dans la nature possédant une propriété d'invariance par dilatation. Les côtes maritimes, les réseaux fluviaux, les reliefs montagneux, les nuages, le réseau capillaire sanguin, les alvéoles pulmonaires, les circonvolutions du cerveau, les arbres et autres végétaux et aussi l'univers lui-même sont divisés en blocs de construction hiérarchisés.

Leurs détails structuraux observés à différents niveaux de grossissements, peuvent être vus comme une réplique à échelle réduite du tout.

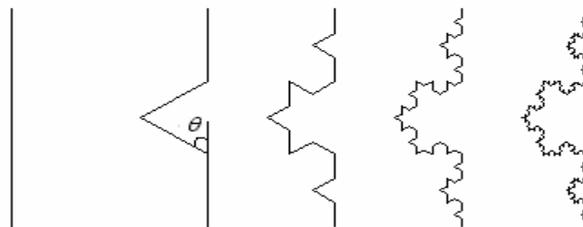
Le mécanisme de construction, des structures fractales mathématiques, est l'itération d'une même opération à différentes échelles de nombre infini de fois. Ce mécanisme conduit à des structures où l'on retrouve le motif de base réduit d'un certain facteur à tous les niveaux d'observation. La propriété de symétrie par dilatation est appelée autosimilarité ou invariance par changement d'échelle.

## II.4 Présentation des fractales par leurs dimensions

### II.4.1 Les courbes fractales

#### II.4.1.1 Fractal de Von Koch

La fractale de Koch est aussi l'une des premières courbes fractales à avoir été décrite en 1906 par le mathématicien Suède Helge Von Koch [4].



**Figure II.1 :** Construction des cinq premières itérations de fractale de Van Koch .

La construction géométrique de la courbe standard de Koch est assez simple. On commence par une ligne droite, appelée l'initiateur.

Ce dernier sera divisé en trois parts égales et le segment du milieu sera remplacé lui aussi par deux autres de la même longueur. C'est la première translation réitérée de la géométrie appelée génératrice ou fractale de Koch d'ordre 1.

On refait le même processus pour chacun de ces quatre nouveaux segments et ainsi de suite, comme le montre la figure ci-dessus.

Ce type de courbe présente une particularité bien curieuse. La première réflexion conduit à penser que le périmètre de cette figure tend vers une valeur limite finie, puisqu'on ajoute des détails de plus en plus petits au fur et à mesure des itérations successives. Mais en réalité, à la première itération la longueur  $l$  de la ligne droite est remplacée par 4 segments de longueur  $l/3$  ; à la deuxième elle devient  $16l/9$ .

À chaque itération la longueur est donc multipliée par  $4/3$ , ce qui signifie que la longueur d'une courbe de Koch tend vers l'infini pour un nombre d'itérations  $n$  infini [5]:

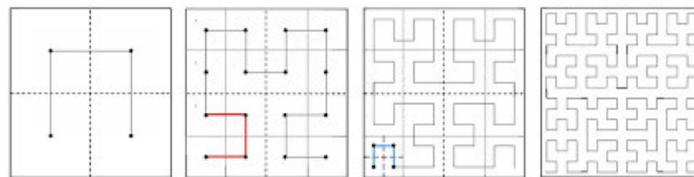
$$l_n = l_0 \left(\frac{4}{3}\right)^n \tag{II.3}$$

$l_0$  est la hauteur effective de l'initiateur de Koch.

**II.4.1.2 Fractal de Hilbert et Peano**

**a) La fractales de Hilbert**

La construction géométrique de la courbe de Hilbert est définie par l'algorithme suivant : on partage le carré initial en 4 petits carrés égaux en premier lieu ; chacun de ces carrés est numéroté de sorte que deux carrés successifs se touchent par un côté. Nous commençons par le carré en bas à gauche, et s'achevant par le carré en bas à droite. Puis, on partage chacun de ces nouveaux carrés en 4 micros carrés égaux jusqu'à l'infini [6].



**Figure II.2 :** fractale d'Hilbert.

**b) Fractals de Peano**

Découverte par le mathématicien Italien Giuseppe Peano en 1890, c'est une courbe capable de remplir tout un carré, sans jamais se couper. Cette courbe a également été réalisée grâce à un système itératif. Pour cela, il faut prendre un carré dans lequel est dessinée la figure suivante :

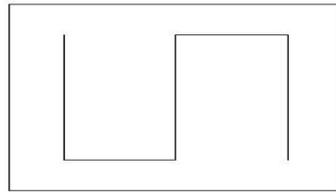


Figure II.3 : Première itération de la géométrie.

On imagine alors que ce carré et son motif font partie d'un plus grand carré de côté 3 fois plus long. Chacun des 9 petits carrés est ensuite tourné de façon à ce qu'une courbe continue se forme à l'intérieur du grand carré. On obtient la figure II.4

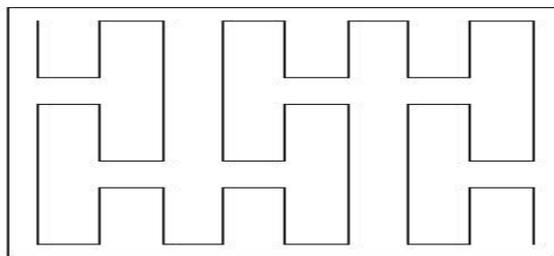


Figure II.4 : Forme géométrique après plusieurs itérations.

**II.4.1.3 Fractale de Minkowski**

Comme le montre la figure, le modèle de démarrage pour la génération de cette fractale est un carré (modèle initial) considéré comme l'itération 0. Une première itération consiste à remplacer chaque segment du carré par un générateur qui se constitue de 5 segments, et ainsi de suite.

Notant que les segments des extrémités ainsi que le segment du milieu ont la même longueur, les deux segments qui restent ont une importance capitale. Ils sont considérés comme paramètres de réglage et permettant d'adapter la longueur du périmètre de la fractale.

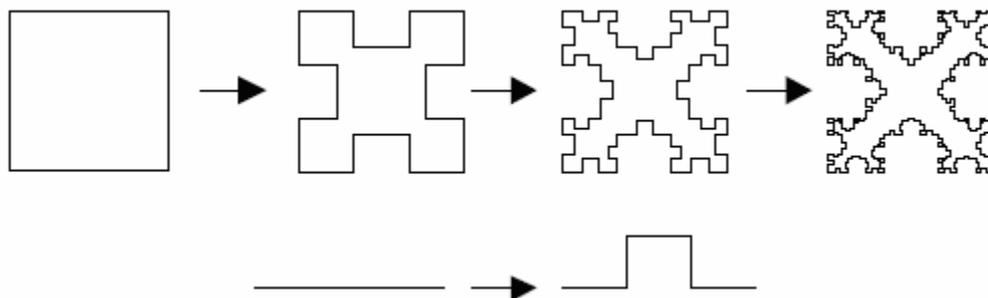


Figure II.5 : Génération de la fractale de Minkowski [7].

## II.4.2 Les surfaces fractales

Il existe diverses géométries parmi lesquelles :

### II.4.2.1 Le triangle de SIERPINSKI

Il y a deux approches pour la construction de ce modèle de triangle : l'approche copie multiple, ou l'approche de décomposition.

La première approche consiste à commencer par un petit triangle et deux copies supplémentaires de ce triangle produites de la même taille et collées au triangle original. Ce processus peut être répété  $n$  fois, n'étant l'ordre de l'itération fractale [8].

Dans l'approche de décomposition en appliquant récursivement les étapes suivantes :

- 1- On considère un triangle équilatéral comme une base.
- 2- On trace les trois segments joignant les milieux respectifs des côtés du triangle et on enlève le petit triangle central. Il reste trois petits triangles qui se touchent par leurs sommets, dont les longueurs des côtés sont la moitié de celles du triangle de départ.
- 3- On répète la deuxième étape avec chacun des petits triangles obtenus [9].



**Figure II.6** : Génération des quatre premières itérations du triangle de Sierpinski

### II.1.2.2 Le tapis de SIERPINSKI [9] :

La construction du tapis de SIERPINSKI est conçue à partir d'un carré plein et en appliquant récursivement les étapes suivantes :

- 1- On découpe le carré en neuf carrés égaux avec une grille de trois par trois,
- 2- On supprime la pièce centrale,
- 3- On applique cette procédure indéfiniment aux huit carrés restants.



**Figure II.7** : Quatre itérations du tapis de Sierpinski

### II.4.3 Les volumes fractales

#### a) Le tétraèdre de Sierpinski

Le « tétraèdre de Sierpinski » est une version 3D du tapis de Sierpinski.

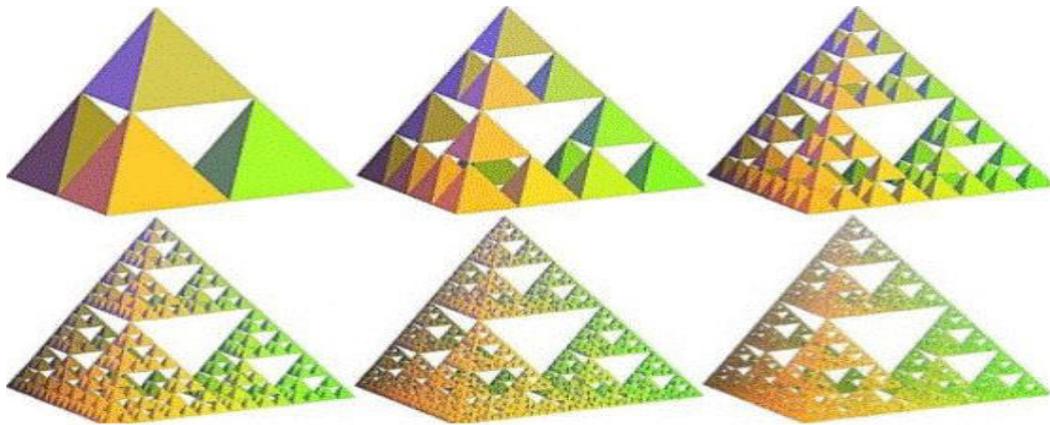


Figure II.8 : Tétraèdre de Sierpinski.

#### b) L'éponge de Sierpinski Menger

La fractale de Sierpinski la plus célèbre, en troisième dimension est l'éponge de Sierpinski Menger. représentée dans la figure suivante.

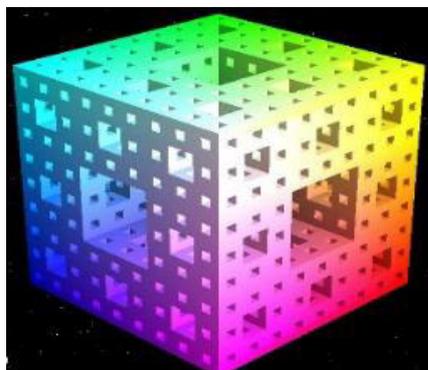


Figure II.9 : Eponge de Sierpinski-Menger-ordre 3.

### II.5 les domaines des fractale :

Dans la nature et l'univers

- En biologie (ramifications des branche, inflorescence, autosimilarité des motifs, morphologie animale...)
- En anatomie (vaisseaux sanguins, poumons...)
- En géologie (côtés des payes, minéragloie dendrites ...)
- En météorologie (éclaire, cyclones)
- En astronomie et en cosmologie

a) Dans la technologie

Dans les matériaux (murs anti bruit, antennes, béton)

b) En électricité

c) Dans l'art

## II .6 Les antennes fractales

Les antennes fractales ont innové la première fois en 1988 par Dr. Nathan Cohen [10]. Chaque partie de la forme d'antenne fractale est une version semblable de la forme originale . Elles sont façonnées à l'aide de la nature de la géométrie fractale.

Cette technique de géométrie fractale permet des réductions de taille de 20 à 40% par rapport à la taille originale, notons aussi que ce type de géométrie est idéale pour la conception de circuits dédiés pour les applications multi-bandes. Elle est aussi exploitée dans la conception des antennes afin d'assurer une miniaturisation de taille tout en combinant l'aspect multi-bandes, ou large-bande et un encombrement réduit .

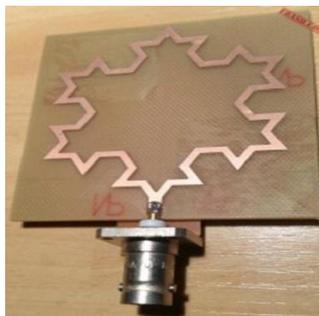
## II.7 Les type d'antennes fractales

### II.7.1 L'antenne de Koch

Les articles [11] et [12] ont aussi posés les particularités et les performances de cette géométrie mais sous formes de dipôles.

Gianvittorio a présenté des boucles de Koch nommées les flocons de Koch (island Koch) dans le but de la miniaturisation où il a montré les avantages offerts par ces boucles en ce qui concerne l'adaptation d'impédance et la réduction de la taille de la boucle.

Cette antenne a été aussi étudiée et comparée avec d'autres formes (**rectangular meander line-normal mode helix A**) par Steven Best [13] et enfin elle a été aussi développée même sous la forme d'une antenne fractale patch .



**Figure II.10** : Antenne étoile de koch

### II.7.2 L'antenne de Sierpinski

Le triangle de Sierpinski est une structure auto-similaire et cette propriété géométrique à toute échelle laisse supposer un fonctionnement identique à de multiples fréquences. Dans l'articles [14], les auteurs ont étudié ce type d'antenne sous formes de monopôles et dans [15] et [16], il a été étudié sous la forme d'un monopôle mais avec une variation de l'angle de rotation.

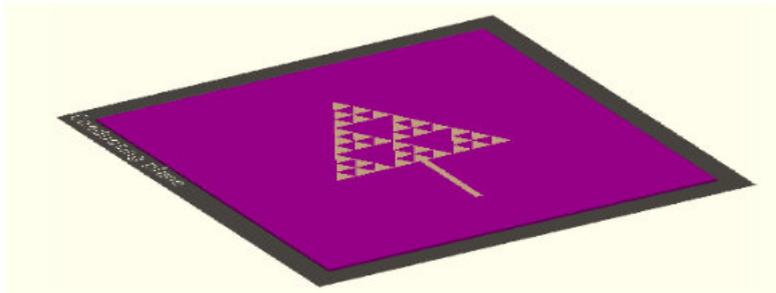


Figure II.11 :Antenne de sierpinski

### II.7.3 L'antenne de Minkowski :

L'antenne de Minkowski est l'une des antennes dont la géométrie fractale a la forme d'une boucle. Ces formes ont la particularité d'avoir un périmètre très important comparé à celui des antennes classiques, et qui tend vers l'infini lorsqu'on augmente le nombre d'itération tout en restant confiné dans un espace réduit. D'où leur intérêt pour la conception des antennes cadres résonnantes car le fait d'accroître le périmètre avec les fractales permet d'élever l'impédance d'entrée de l'antenne, ce qui est très avantageux du point de vue de l'adaptation d'impédance entre les lignes de transmission et les antennes cadres réduites [17].

Ce type d'antenne a été étudié par N. Cohen comme dipôle et courbe, aussi il a été utilisé pour la conception des réseaux d'antennes par Gianvittorio .

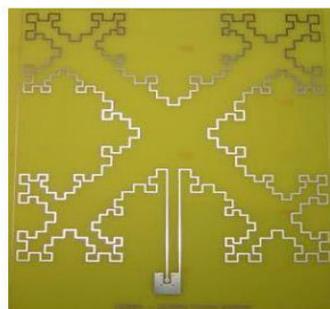


Figure II .12 :antenne de Minkowski

**II.7.4 L'antenne de l'arbre fractal :**

Les arbres fractals, sont des géométries inspirées de la nature, où dans [17], les auteurs ont montré que ces formes peuvent réaliser des antennes à large bande et à dimensions réduites.

**II.7.5 L'antenne de Hilbert :**

Ces antennes sont des antennes fractales dont la géométrie est basée sur la fractale de Hilbert. Dans les articles [19] et [20], on trouve des études basées sur ce type d'antenne sous la forme d'un monopôle. Une autre étude a été élaborée dans le but de connaître la différence entre les fractales aléatoire et déterministe par Steven Best [21].

**II.8 Les avantages**

- La surface occupée est très réduite : la compacité résulte du caractère irrégulier des formes fractales.
- Résonances multiples : le caractère multi-bande vient du caractère d'autosimilarité.
- Gain très important dans certain cas.

**II.9 les inconvénients**

- Gain faible dans d'autres cas.
- Réalisation très difficile liée à la complexité des formes.
- Plus faible bande passante que les antennes spirales.
- Difficulté de contrôler la polarisation.

**Conclusion**

La notion fractale qui est largement utilisée dans plusieurs domaines (traitement d'images, calcul des frontières etc.) constitue une nouvelle vision pour la conception des antennes multi-bandes.

En effet, les caractéristiques géométriques des antennes fractales permettent d'avoir la résonance de plus d'une fréquence pour une même antenne avec les mêmes caractéristiques électromagnétiques.

- [1] : Brahimi Ali, “ Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales”, Mémoire de Magister Université des Sciences et de la Technologie d’Oran MOHAMED BOUDIAF en 2009
- [2] : BOUZINA Souheyr, Caractérisation des lésions dermatologiques par l’approche multifractale, MEMOIRE MASTER en GENIE BIOMEDICAL, Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen ; le 23 septembre 2017
- [3] : Pavel S., Boileau M. Vocabulaire combinatoire de l’imagerie fractale, gouvernement du Canada [en ligne] [http://www.translationbureau.gc.ca/pwgsc\\_internet/fr/publications/documents/fractal.pdf](http://www.translationbureau.gc.ca/pwgsc_internet/fr/publications/documents/fractal.pdf) (Consulté en décembre 2005).
- [4] : H. Koch, “*Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire*”, pp 681-704,1904.
- [5] : John Gianvittorio, “*Fractal antennas Design, characterisation, and applications*”, A thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree master of science in electrical engineering, university of California, Los Angeles, 2000.
- [6]: Khadidja Krim, Mehadji Abri, Hadjira Badaoui, Samira Fersiti, Fatima Zahra Mahieddine, ‘New Design of a Microstrip-Fed Printed Slot UWB Antenna with Hilbert Fractal Defected Ground Structure, Third International Conference on Computing and Wireless Communication Systems, ICCWCS 2019, April 24-25, 2019, Faculty of Sciences, Ibn Tofaïl University - Kénitra- Morocco, <http://dx.doi.org/10.4108/eai.24-4-2019.2284219>
- [8]: Journal of Engineering Technology (ISSN: 0747-9964) Volume 6, Issue 2, July, 2017, PP.317-351, A Journey of Antenna from Dipole to Fractal: A Review, Narinder Sharma and Vipul Sharma
- [9]: A. REHA, Le Comportement Des Antennes Fractales De Types «Courbe De Sierpinski», Méditerranéen Télécommunications Journal, Vol. 6, N° 2, June 2016
- [10] <https://www.fractenna.com/nca-cohen-bio.html>
- [11] P. Tang, “Scaling property of the Koch fractal dipole”, IEEE international symposium on antennas and propagation digest volume 3, Boston, Massachusetts, July 2000, pp 150- 153.
- [12] N. Cohen, “ Are fractals naturally frequency invariant/independent?”, 15 th annual review of progress in applied computational electromagnetic, volume i, naval postgraduate school, Monterey, CA, March 1999, pp 101-106.

- [13] Steven R. Best, "On the performance of the Koch fractal and other wire monopole antennas", IEEE antennas and wireless propagation digest, vol. 4, Texas, June 2002, pp 534-537.
- [14] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, X. Garcia, and Benitez, F, "Fractal multiband antennas based on the Sierpinski gasket", electron. Lett, 1996, pp 1-2.
- [15] C. Puente, M. Navarro, J. Romeu, and R. Pous, "Variations on the fractal Sierpinski Antenna flare angle", IEEE-APS international digests, volume 4, Atlanta, Georgia, June 1998 pp 2340-2343.
- [16] C. P. Baliarda, C. B. Borau, M. N. Rodero, and J. R. Robert, "An iterative model for fractal antennas: application to the Sierpinski gasket antenna", IEEE trans. Antennas propagation, vol. 48, May 2000, pp 713–719.
- [17] John Gianvittorio, "Fractal antennas Design, characterisation, and applications", A thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree master of science in electrical engineering, university of California, Los Angeles, 2000. -126- Références bibliographiques
- [18] Puente, Claret, J, Sagues, F, Romeu. J, Lopez-Salvans, M.Q, and Pous, R: "Multiband properties of a fractal Tree antenna generated by electrochemical deposition", electron. Lett, 1996, pp 2298-2299.
- [19] J. Anguera, C. Puente and J. Soler, "Miniature monopole antenna based on the fractal Hilbert curve", IEEE antennas and prop. Inter. Symp. Digest, vol. 4, Texas, June 2002. pp 546-549.
- [20] K.J. Vinoy, K.A. Jose, V.K. Varadan, and V.V. Varadan, "Hilbert curve fractal antennas with reconfigurable characteristics" in: IEEE- MTT international symposium, Phoenix May 20-25, 2001, Digest, vol, 1, pp 381-384, 2001.
- [21] S. R. Best, "The fractal loop antenna: a comparison of fractal and non-fractal geometries", IEEE international symposium on antennas and propagation digest, volume 3, Boston, Massachusetts, July 2001, pp 146-149.

## Chapitre III : Conception et simulation

## I. Introduction

Plusieurs logiciels commerciaux sont utilisés pour simuler le comportement des structures planaires et étudier leurs performances. Parmi ces logiciels on peut citer le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Dans ce qui suit, nous présenterons tout d'abord une antenne possédant des fentes sur le plan de masse (qui utilise une approche géométrique fractale). Cette antenne fonctionne dans deux bandes à 2,6 GHz et 3.8 GHz pour les applications WLAN et WiMAX, respectivement.

La deuxième, une autre antenne fractale en forme de fleur alimentée par un guide d'ondes coplanaire (CPW), qui fonctionnera aux 3.6GHz (WiMAX) et 5.8 GHz (WLAN).

## II. Présentation du logiciel et méthodologie de conception

### II.1 ANSOFT HFSS 13.0

Le simulateur des structures hautes fréquence ( HFSS) est basé sur la méthode des éléments finis. Ce dernier permet la conception et la simulation de tous les types de structure micro-onde en 2D ou 3D et permet de résoudre la majorité des problèmes électromagnétiques liés aux basses et aux hautes fréquences ainsi que les problèmes optiques, thermiques et mécaniques.

L'interface après l'insertion d'un projet HFSS est illustrée dans la figure suivante :

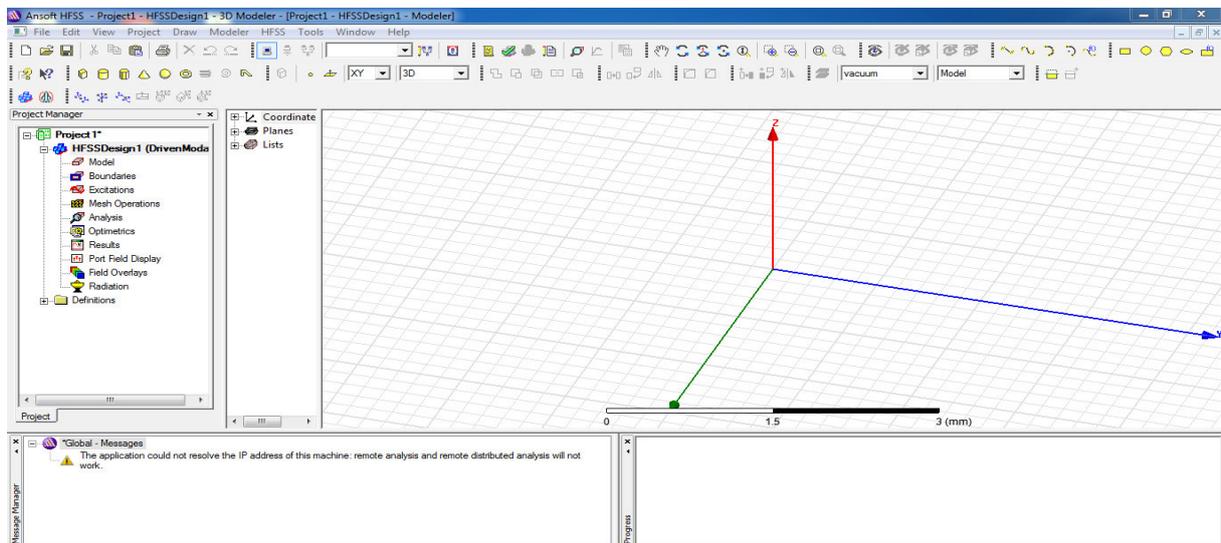


Figure III.1 : Interface du projet HFSS

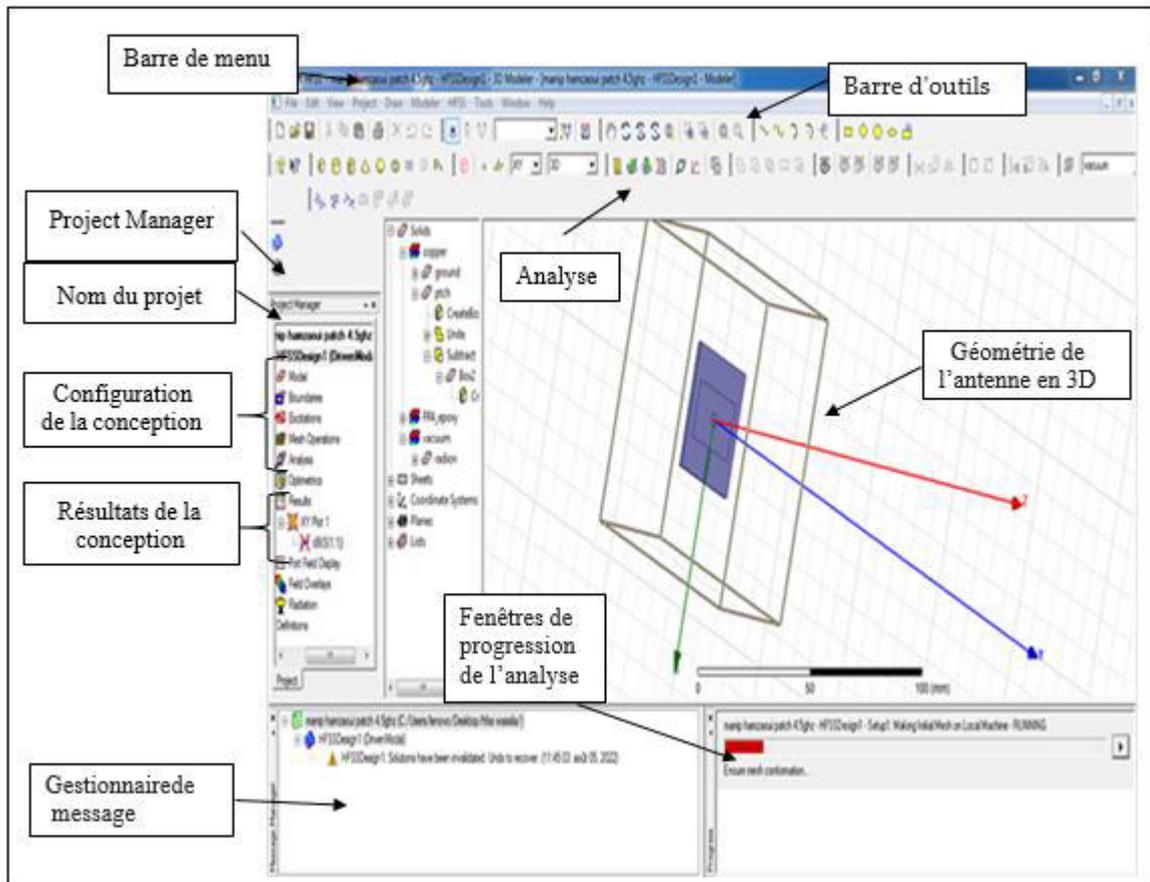


Figure III.2 : Description générale des fenêtres utiles de HFSS

### III. Familiarisation avec le simulateur

Afin de se familiariser avec le simulateur, deux antennes patch qui fonctionnent aux fréquences 3.56GHz et 4.5GHz sont proposées. Comme mentionné déjà dans le chapitre I, les paramètres physiques et géométriques sont :

- Le substrat, d'épaisseur  $h$ , qui est dans notre cas le FR4-epoxy avec une permittivité  $\epsilon_r = 4.4$
- Le patch de forme rectangulaire dont les dimensions sont  $W$  et  $L$
- L'antenne est alimentée par une ligne miro-ruban de dimensions  $L_{\text{feed}}$  et  $W_{\text{feed}}$ .
- Un plan de masse de mêmes dimensions que le substrat

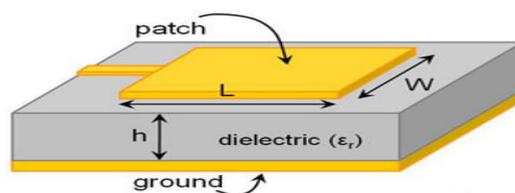


Figure III.3 : Structure d'une antenne patch.

## a) Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire 4.6GHz

$$W_{patch} = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} = 19.8mm \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_{patch}}\right)^{-\frac{1}{2}} = 3.9 \quad (3)$$

$$l_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = 16.5 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W_{patch}}{h}+0.246\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W_{patch}}{h}+0.8\right)} = 0.728 \text{ mm} \quad (5)$$

$$L_{patch} = l_{eff} - 2\Delta L = 15.44mm \quad (6)$$

$$L = L_{patch} + 6h > 25.04mm \quad (7)$$

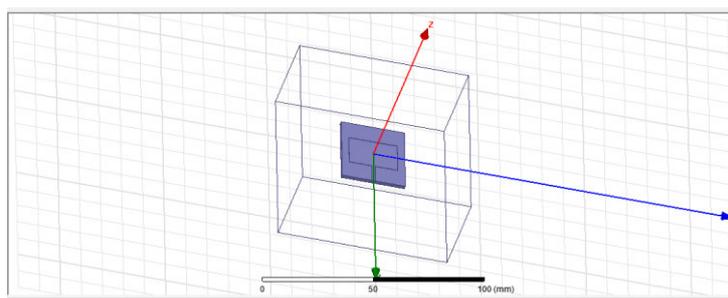
$$W = W_{patch} + 6h > 29.4mm \quad (8)$$

$L$  et  $W$  sont la longueur et la largeur du plan de masse respectivement.

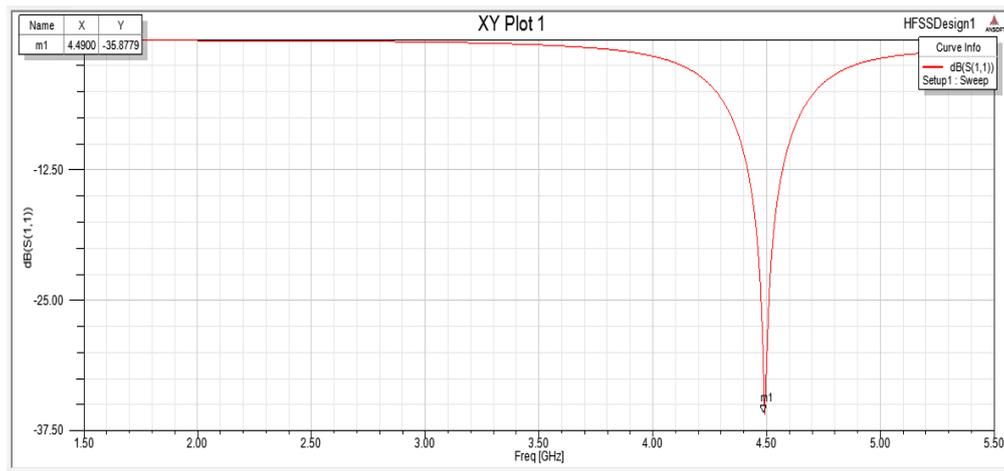
Les dimensions de la ligne d'alimentation ainsi que ceux du patch sont calculées en utilisant un simulateur de calcul en ligne.

Paramètre	L	W	Lpatch	Wpatch	L_feed	W_feed	h
Valeurs optimale (mm)	32.57	29.88	15.44	19.8	9.285	1.5	1.6

**Tableau III.1** : Dimensions des paramètres de l'antenne



**Figure III.4**: Antenne patch micro-ruban



**Figure III.5 :** Coefficient S11 de l’antenne patch

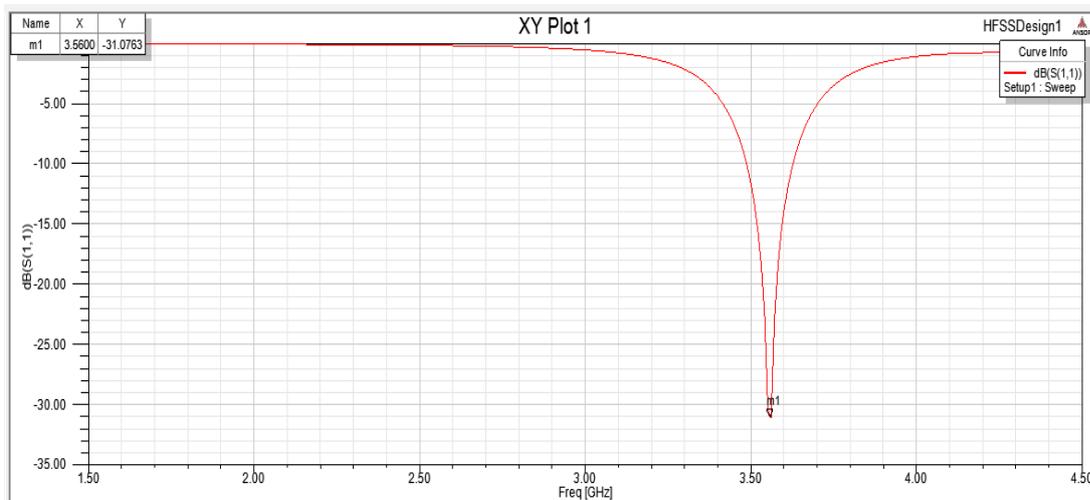
Selon le tracé du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, nous voyons bien que l’antenne est bien adaptée (-36.87dB) et fonctionne à la fréquence de résonance 4.49 GHz avec un pic de coefficient de réflexion de -36.87 dB.

**b) Conception et simulation de l’antenne patch rectangulaire 3.56 GHz**

En utilisant les mêmes étapes que précédemment, nous aboutissons aux résultats suivants:

Paramètre	L	W	L_Patch	W_Patch	L_feed	W_feed	h
Valeurs optimale (mm)	31.68	35.68	19.98	26.08	11.74	3.05	1.6

**Tableau III.2 :** Dimensions des paramètres de l’antenne



**Figure III.6 :** Coefficient S11 de l’antenne patch

La figure ci-haut nous donne un aperçu sur le coefficient  $S_{11}$  qui est de l'ordre de -31.07 dB pour une fréquence de résonance de 3.56 GHz.

#### IV. Conception et simulation d'antenne fractale Bi-bande pour les applications WLAN et WIMAX

##### IV.1 Définition de WIMAX et WLAN :

Le **WiMAX** est une abréviation pour (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Il s'agit d'un standard de réseau sans fil métropolitain créé par les sociétés Intel et Alvarion en 2002 et ratifié par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) sous le nom IEEE-802.16.

Les révisions du standard IEEE 802.16 se déclinent en deux catégories :

- **WIMAX fixe**, également appelé IEEE 802.16-2004, est prévu pour un usage fixe avec une antenne montée sur un toit, à la manière d'une antenne TV. Le WIMAX fixe opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre de fréquence de résonance de 5.8 GHz.
- **WIMAX mobile** (en anglais WiMAX portable), également baptisé IEEE 802.16e, prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau internet. Le WiMAX mobile ouvre ainsi la voie à la téléphonie mobile sur IP ou plus largement à des services mobiles haut débit.

Le **WLAN** ou Wireless Local Area Network, désigne un type de réseau local qui a la particularité d'être sans fil. Il s'agit d'un réseau capable d'établir une connexion entre plusieurs appareils informatiques distants d'environ une centaine de mètres. Ce type de réseau repose en grande partie sur une transmission des données par ondes radio.

Aujourd'hui, le **WLAN** le plus connu dans le monde est celui défini par la norme IEEE 802.11, à savoir le Wi-Fi.

##### IV.2 Evolution de la géométrie de l'antenne proposée 1

L'antenne proposée est représentée sur la figure III.7. La configuration simple de cette antenne est constituée d'un plan de masse possédant des fentes, en utilisant un substrat Rogers RO3006 avec une permittivité  $\epsilon_r = 6.15$ . Cette antenne est alimentée par une ligne microstrip située au-dessous de substrat.[1]

IV.2.1 Conception

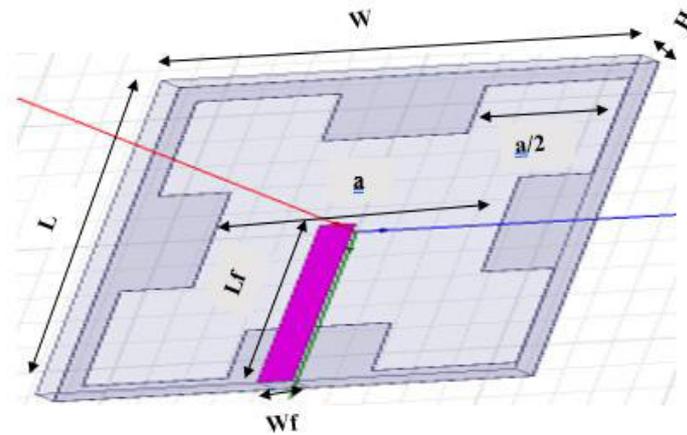


Figure III.7 : Configuration de l'antenne proposé

L'antenne proposée avec cinq fentes de forme carrée est obtenue en appliquant un processus itératif qui est illustré dans la figure III.8. Ces fentes ont été fabriquées sur le plan de masse.

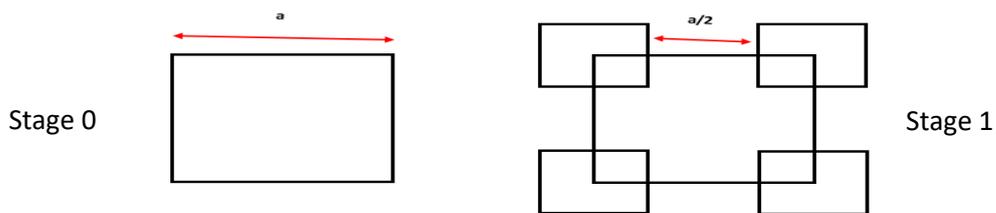


Figure III.8 : Les itérations de l'antenne fractale proposées

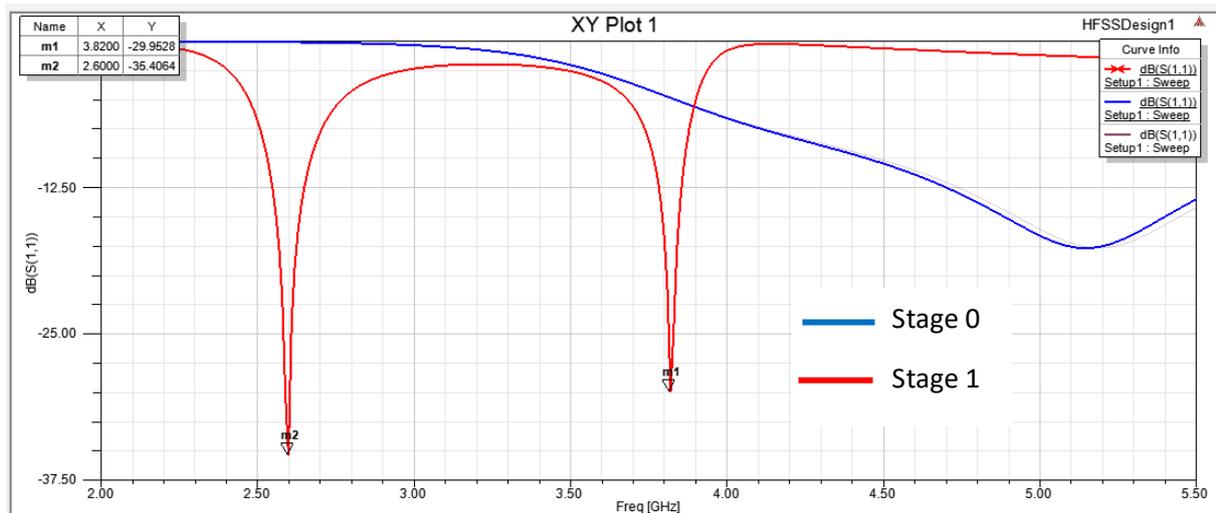
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type	Description	Read-only	Hidden
xs	25	mm	25mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ys	25	mm	25mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h	1.27	mm	1.27mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hs	0.05	mm	0.05mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
xf	11.4	mm	11.4mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
yf	2.2	mm	2.2mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
xf1	a		14.97mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
yf1	a		14.97mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
xf2	a/2		7.485mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
yf2	a/2		7.485mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
xr	80	mm	80mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
yr	80	mm	80mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hr	40	mm	40mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
a	14.97	mm	14.97mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure III.9 : Paramètre de l'antenne à une seule fente.

Les éléments rayonnants peuvent être alimentés par diverses techniques. Dans ce travail nous avons choisi d'alimenter les éléments rayonnants par ligne micro-ruban. Ce genre d'alimentation a l'avantage d'être gravé sur le même substrat pour former une structure plane, elle est donc pratique puisqu'elle fournit une facilité de fabrication et une simplicité de modélisation.

#### IV.2.2 Coefficient de réflexion des différentes itérations

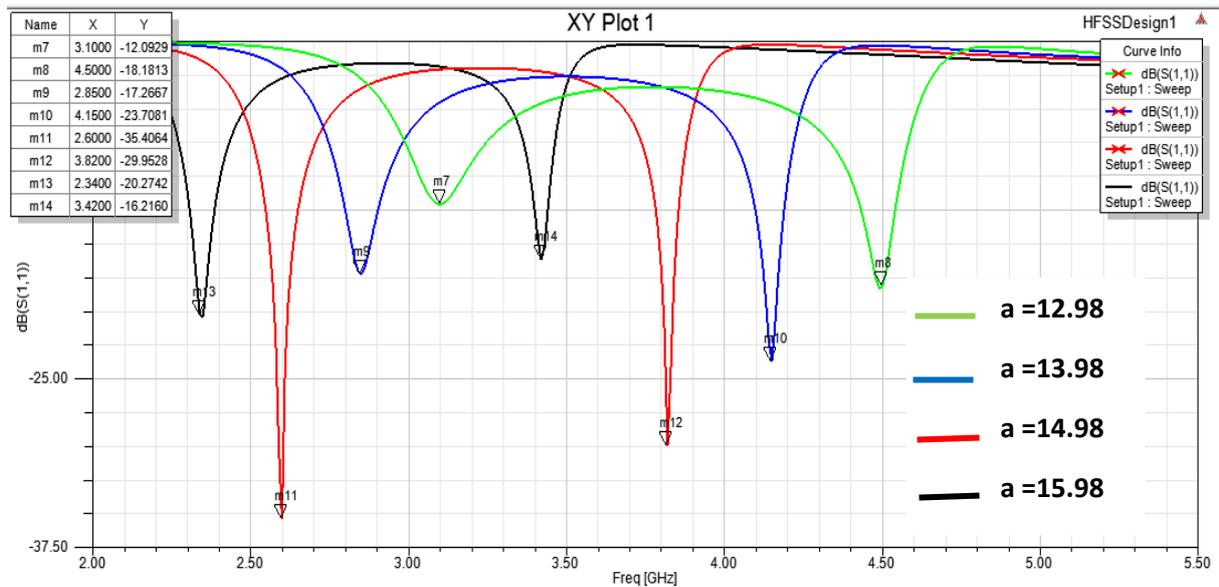
D'après les simulations effectuées, la figure III.10 montre la comparaison entre le coefficient de réflexion de l'antenne carrée classique et l'antenne fractale proposée. Dans le stage 0, l'antenne génère une seule fréquence à 5.2 GHz tandis que dans le stage 1, l'antenne proposée fournit deux fréquences de résonances avec ( $S_{11} < -10$ ) à 2.6 GHz et 3.82 GHz. Qui couvrent respectivement les bandes WLAN et WIMAX. On obtient donc une antenne fractale bi-bande.



**Figure III.10** : coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différente configuration

#### IV.2.3 Etude paramétrique

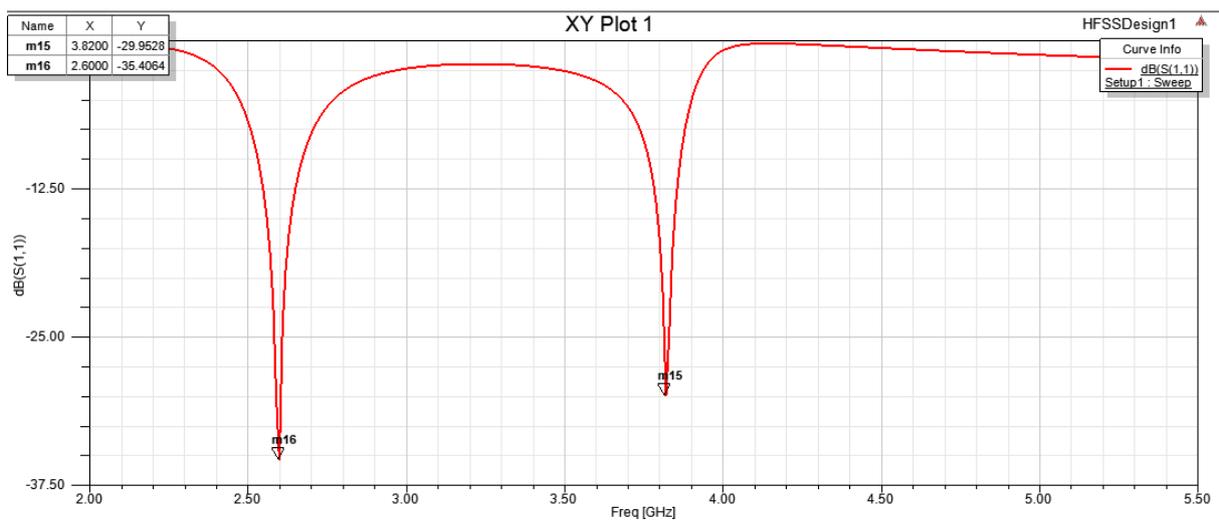
Dans cette partie une étude paramétrique est effectuée pour montrer l'effet de la longueur de la fente 'a' sur l'adaptation de l'impédance et la fréquence de résonance l'antenne en modifiant bien sûr la valeur du paramètre a.



**Figure III.11 :** Variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence tenant compte de l’effet de la longueur de la fente a.

La figure III.11 présente l’effet de la variation de la longueur de la fente a, nous avons choisi de mettre les plus importantes, à savoir a=12.98 ; 13.98 ; 14.98 et 15.98. On remarque que lorsque ‘a’ augmente, la fréquence de résonance effectue un décalage vers la gauche.

En effectuant une étude paramétrique pour tous les paramètres et en choisissant les valeurs optimales, une simulation est faite pour avoir le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Ceci est représenté sur la figure III.13.



**Figure III.13:** Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l’antenne proposée

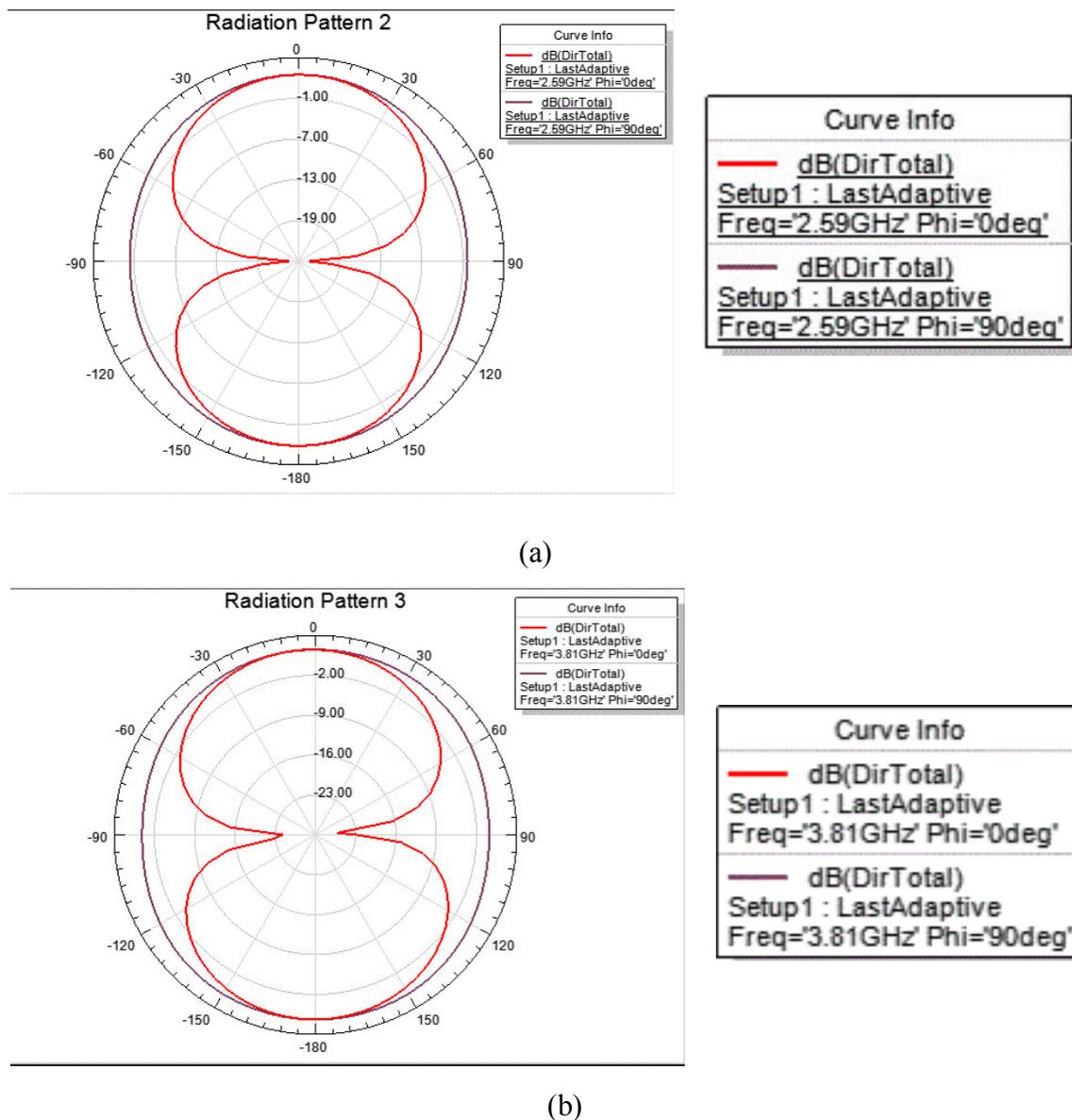
La réponse en fréquence à -10 dB peut couvrir deux bandes étroites à 5 % et 2.82%..

$$Bp\_WLAN(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c} = 100 \frac{2.66 - 2.53}{2.6} = 5\%$$

$$Bp\_WIMAX(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c} = 100 \frac{3.84 - 3.75}{3.82} = 2.3\%$$

#### IV.2.4 Les diagrammes de rayonnement

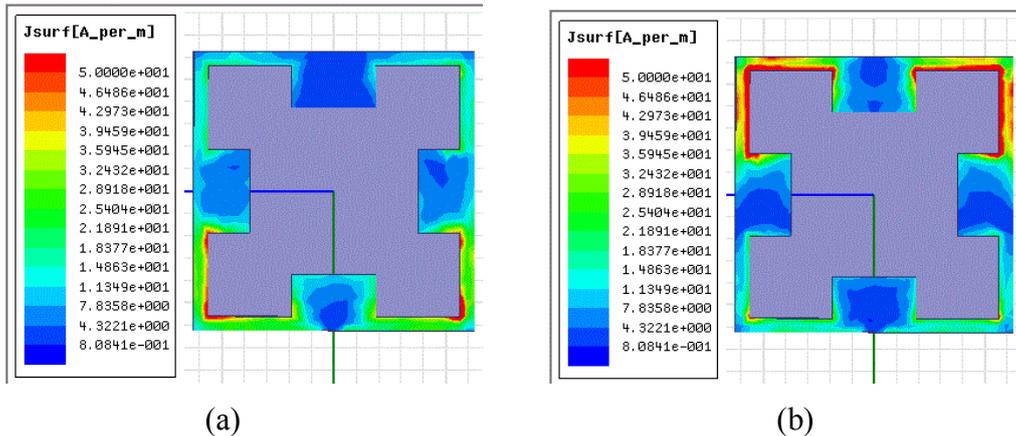
Les Figures III. 14 et III. 15 présentent les diagrammes de rayonnement, simulés de l'antenne proposée dans les deux principaux plans (plan *E* et plan *H*) à 2.59 et 3.81 GHz respectivement. Des diagrammes de rayonnement sont omnidirectionnels dans le plan H et bidirectionnel dans le plan E.



**Figure III. 14** : Diagrammes de rayonnement à 2.59 GHz (a) et 3.81 GHz (b)

**IV.2.5 Distribution de courant**

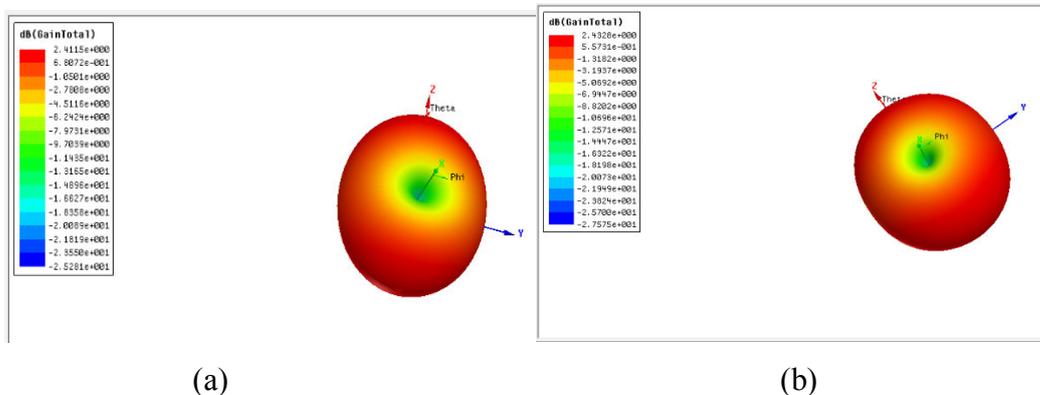
La figure III.16 (a) montre la distribution de courant de l'antenne proposée à la fréquence 2,59 GHz, celle-ci se situe principalement sur les bords inférieurs de la fente du plan de masse tandis que (b) montre que le courant principalement est situé sur les bords supérieurs de la fente à la fréquence de résonance de 3,82GHz.



**Figure III. 16 :** La distribution du courant surfacique:(a) 2.59GHz ; (b)3.82GHz.

**IV.2.6 Le gain**

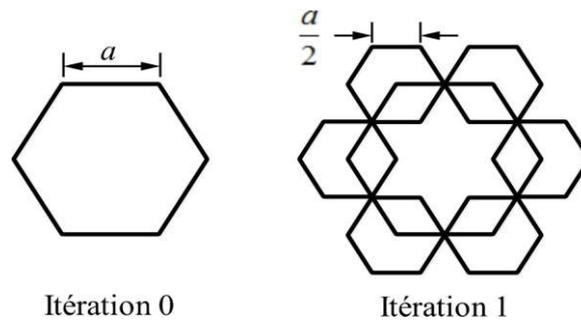
La Figure III.17 montre le gain simulé de l'antenne proposée sur les deux bandes de fréquences 2.6GHz avec un gain 2.41dB et un gain de 2.43dB à la fréquence de 3.82 GHz



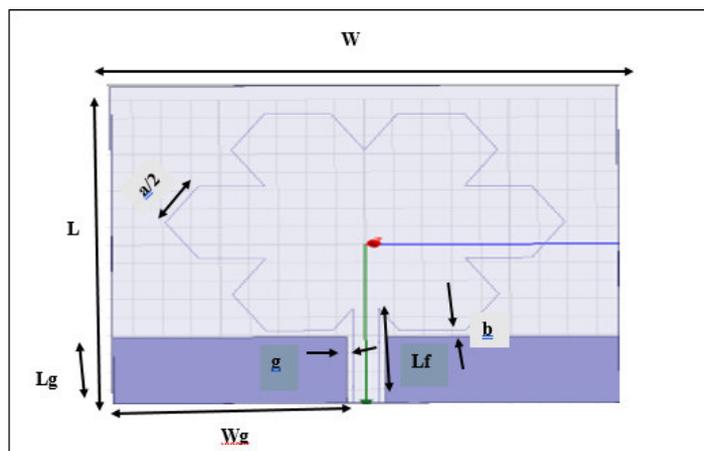
**Figure III.17.** Le gain simulé de l'antenne proposée (a) pour 2.6 GHz et (b) pour 3.82 GHz.

**IV. 3 Evolution de la géométrie de l'antenne proposée 2**

La figure III.18 montre la configuration de l'antenne proposée en forme de fleur. L'antenne est imprimée sur le substrat diélectrique commercial RO3006 avec une épaisseur de 1,27 mm et une permittivité relative de 6,15. Les dimensions du substrat sont  $W \times L$ , et la ligne d'alimentation a une largeur  $W_f = 1.8$  mm, ce qui correspond à une impédance caractéristique de  $50 \Omega$ , et un espace  $g = 0,25$ mm [14].



**Figure III.17 :** 2. Itérations de l'antenne Fractale proposée.



**Figure III.18 :** Géométrie de la structure proposée

L'antenne proposée avec un plan de masse rectangulaire fendu et six fentes de formes hexagonales sont obtenues en appliquant un processus itératif dont la largeur est de 4,6 mm, on a utilisé une ligne d'alimentation CPW. L'antenne proposée fournit deux fréquences de résonances, qui pourraient convenir à différentes applications sans fil. Toutes les simulations sont faites en utilisant HFSS. Les paramètres géométriques de l'antenne sont énumérés dans le tableau ci-dessous

Paramètre	L	W	Lg	Wg	Lf	Wf	a	b	g
Valeur optimale (mm)	35	35	7.3	16.3	12	1.8	9.2	0.7	0.25

**Tableau III.3 :** Paramètres Optimisés pour l'antenne proposée

#### IV.3.1 Etudes paramétriques

Dans cette partie une étude paramétrique est effectuée pour illustrer l'influence de la longueur et la largeur de plan de masse sur l'adaptation de l'impédance et la fréquence de l'antenne en modifiant la valeur du paramètre b et g.

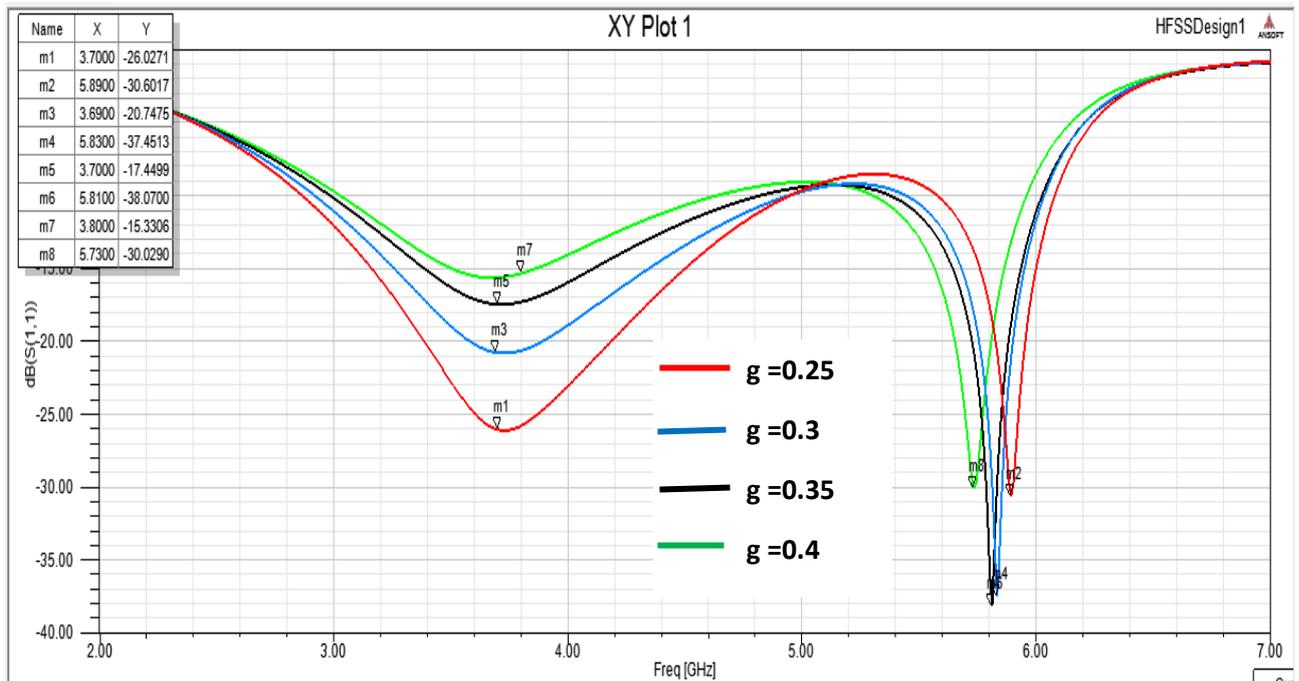


Figure III.19 : Effet du paramètre distance entre la ligne microruban et le plan de masse  $g$  sur les coefficients de réflexion.

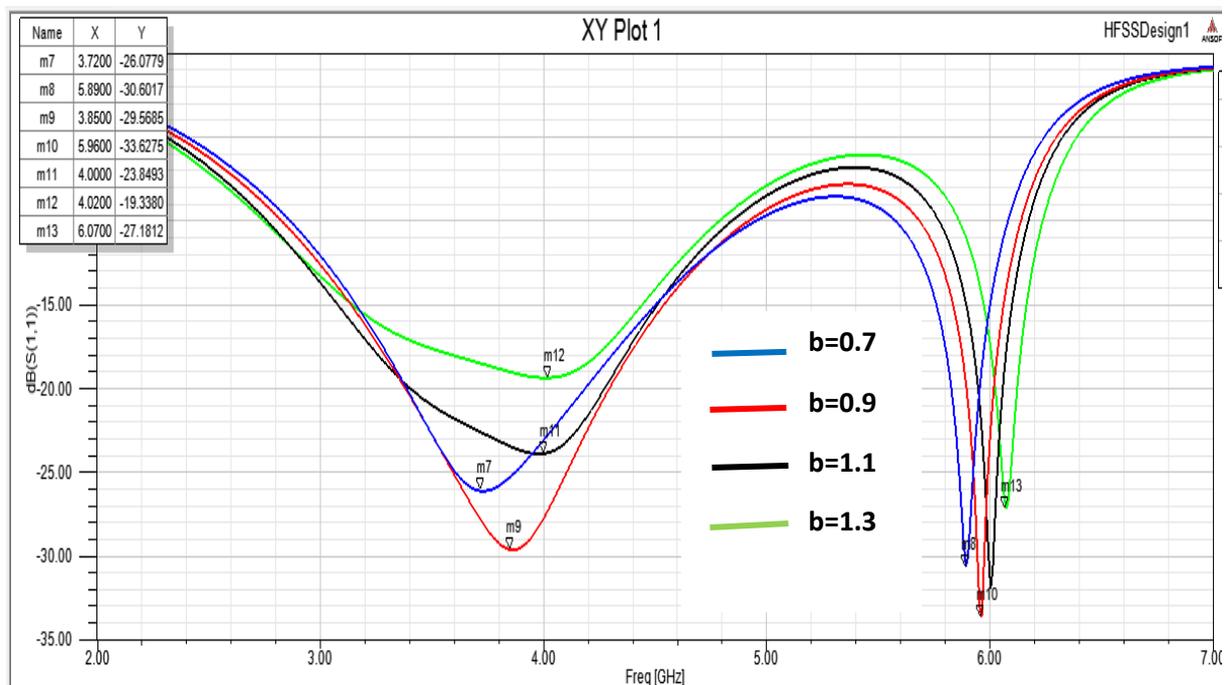
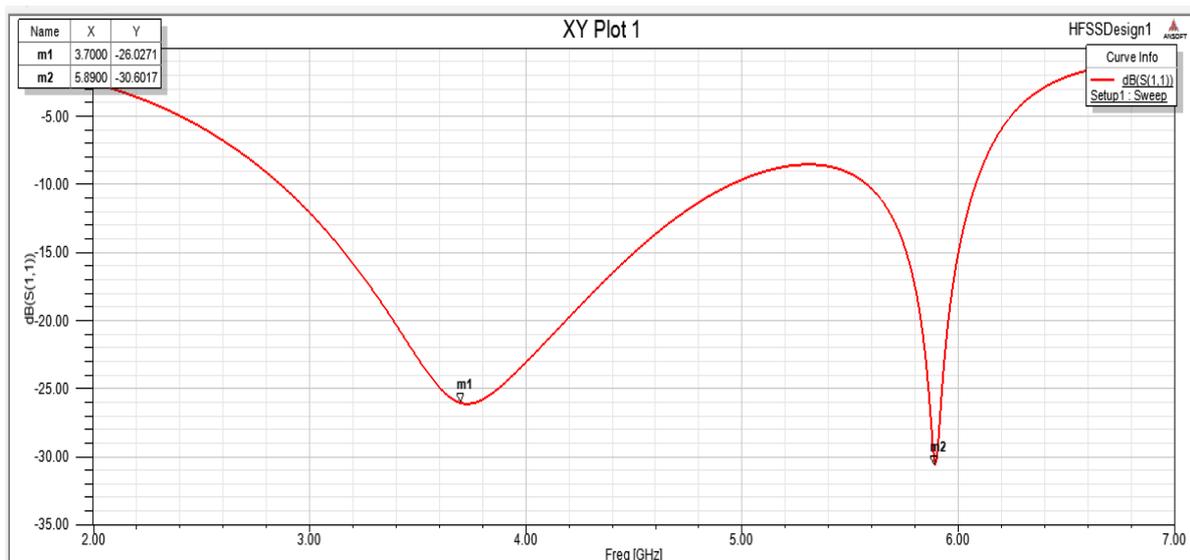


Figure III.20 : Effet du paramètre distance entre le patch et le plan de masse  $b$  sur les coefficients de réflexion.

La Figure III.19 et III.20 montre l'effet de gap (g) existant entre le plan de masse et la ligne micro-ruban et le gap (b) entre patch et plan de masse. quatre valeurs de g sont suggérées,  $g=0.25$  ;  $0.3$  ;  $0.35$  et  $0.4$ , et quatre valeurs de b sont proposées,  $b = 0.7$  ;  $0.9$  ;  $1.1$  et  $1.3$ , On observe que la valeur de g et de b influent sur l'adaptation de l'impédance et sur la fréquence. Donc on peut conclure que Les valeurs optimales de ces paramètres sont  $g = 0.25$  et  $b = 0.7$ .

Ces dernières sont exploitées pour aboutir au résultat représenté sur la figure III.21. Nous obtenons un coefficients de réflexion dont les fréquences de résonances sont 3.7 GHz et 5.89 GHz qui coïncide avec un coefficient de réflexion en dB de  $-26.02$  dB et  $-30.6$  dB respectivement.

En conséquence, les bandes WLAN et WiMAX peuvent être contrôlées simultanément avec le changement de la valeur de g et de la valeur de b.



**Figure III.21** : Coefficients de réflexion et la fréquence de l'antenne proposée

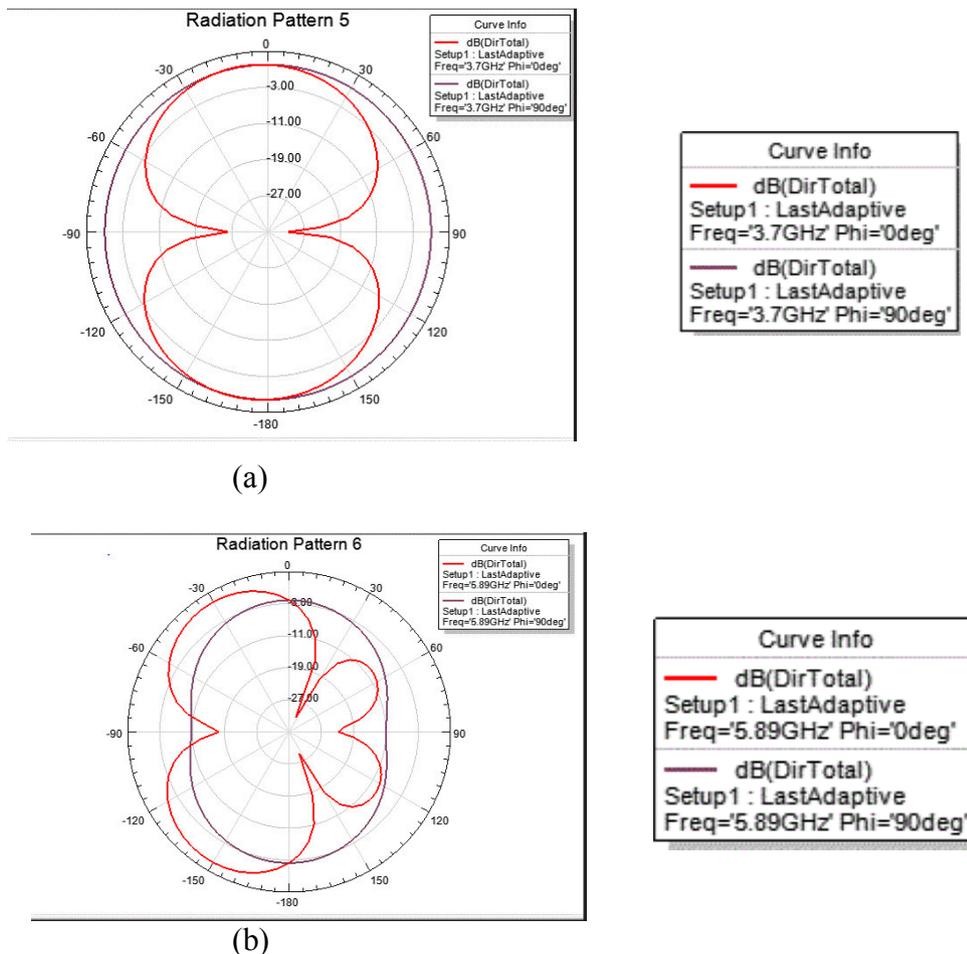
La réponse en fréquence à  $-10$  dB peut couvrir une large bande à  $54.37\%$  et une bande étroite à  $7.92\%$ .

$$Bp_{WIMAX}(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c} = 100 \frac{4.92 - 2.87}{3.7} = 55.4\%$$

$$Bp_{WLAN}(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c} = 100 \frac{6.1 - 5.63}{5.89} = 7.9\%$$

### IV.3.2 Les diagrammes de rayonnements

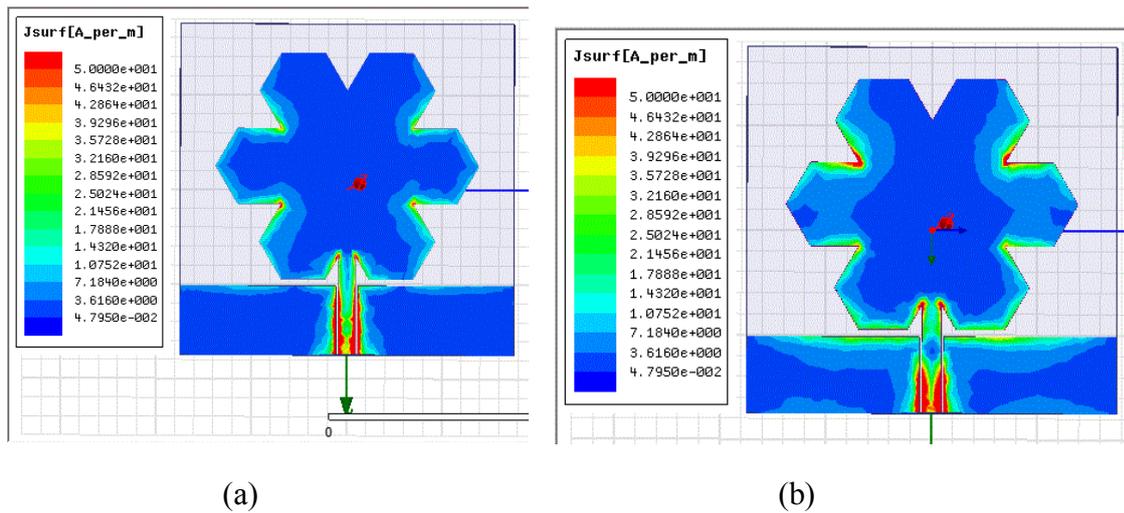
En termes de caractéristique de rayonnement, la figure III.22 illustre le diagramme de rayonnement à la fréquence 3.7 GHz et à la fréquence 5.89 GHz dans les deux plans (plan E courbe rouge et dans le plan H la courbe violette), les diagrammes de rayonnement dans le plan *H* sont omnidirectionnels, bien que le rayonnement du plan *E* soit bidirectionnel.



**Figure III.22 :** Diagrammes de rayonnement simulés de l'antenne proposée dans le plan H et E en (a) 3.7 GHz, (b) 5.89 GHz et (b)

### IV.3.3 La distribution du courant

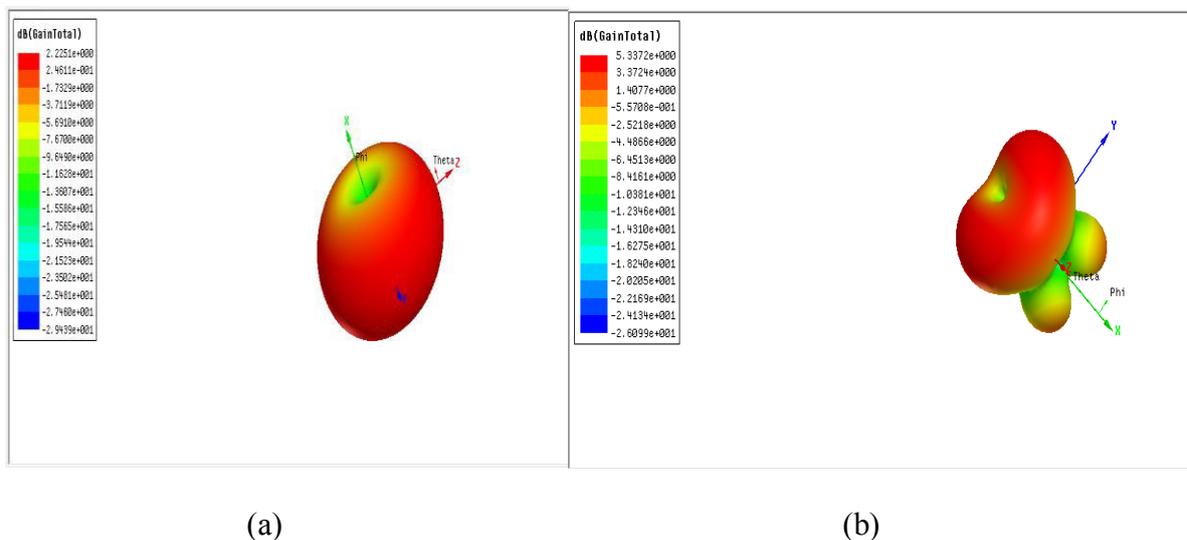
La figure III.23 montre la distribution de courant de l'antenne proposée. D'après la Figure III.23 (a) et III.23 (b), on constate que la distribution à la fréquence 3.72 GHz et 5.89 GHz, se situe principalement sur les bords inférieurs de la ligne micro-ruban.



**Figure III.23** La distribution du courant surfacique de l'antenne proposée à (a) 3.72 GHz, (b)5.8 GHz

### IV.3.4 Le gain

La Figure III.24 montre le gain simulé de l'antenne proposé pour les deux bandes de fréquences 3.7 GHz avec un gain 2.2 dB et 5.89 GHz avec un gain 5.35 dB .



**Figure III.24.** Le gain simulé de l'antenne proposée (a) pour 3.7 GHz et (b) pour 5.89 GHz

### V. Conclusion

Ce chapitre est une représentation de la conception et la simulation d'une antenne fractale inspirée de la technique de fente. Le logiciel nous a permis de simuler les performances de l'antenne. Les caractéristiques obtenues pour l'antenne proposé (bande

passante, diagramme de rayonnement ...) sont satisfaisantes et confirment l'intérêt de l'autosimilarité pour les antenne dans les systèmes de communication multi-bande. Nous concluons que le type de substrat, son épaisseur, la position de la ligne d'alimentation influent considérablement sur les performances de l'antenne (coefficient de réflexion, bande passante et le rayonnement).

[1]:M. Harbadji, T. A. Denidni, and A. Boufrioua, "Miniaturized Dual-Band Fractal Antenna with Omnidirectional Pattern for WLAN/WiMAX Applications," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol.70, p. 31-38, 2017

## Conclusion générale

L'évolution actuels des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes, aujourd'hui, sont très diverses. Elles varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, radars, satellites, etc. La simplicité des circuits et les exigences de moins de congestion et de faible volume, poids et coût sont toujours demandés. La miniaturisation est une façon de répondre à ces exigences

L'objectif principal de ce travail est la simulation et la conception d' antennes fractales bi-bandes pour les application WLAN et WIMAX et bien sûr assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes fractales multibandes.

Les différentes simulations ont été effectuées avec le logiciel HFSS, il utilise la méthode des éléments finis sur des structures planaire à 2D ou à 3D, et qui reste comparable aux autres logiciels tels que : l'ADS, le HFSS, CST etc. Le calcul du coefficient de réflexion  $S_{11}$  a permis de mettre en évidence le comportement multifréquence de ces structures à géométries fractales et en concluant que l'autosimilarité est une propriété qui favorise le fonctionnement multi-bande.

Les résultats obtenus sont très encourageants et montrent l'intérêt de ces types d'antennes dans le domaine des communications sans fils pour des applications multi-bandes et large bandes.

L'élaboration de ce travail nous a permis de découvrir beaucoup d'avantages dans l'utilisation des antennes fractales. Comme suite à notre travail, il serait intéressant d'étudier d'autres formes fractales en particulier de type aléatoire

Nous tenons à signaler que nous avons apporté quelques modifications sur les paramètres trouvés dans la littérature car ceux-ci ne donnaient pas les résultats souhaités.

## **Résumé**

L'objectif de ce mémoire est de concevoir des antennes fractales bi bandes qui fonctionnent dans les deux bande WLAN et WIMAX. Les simulations sont faites avec le logiciel HFSS grâce auquel on a pu avoir les coefficients de réflexion et la distribution du courant ainsi que le diagramme de rayonnement. Deux types d'antennes ont été conçus. (Antenne fractale carrée et antenne fleur).

Les résultats obtenus sont très encourageants et montrent l'intérêt de ces types d'antennes bibandes dans le domaine des communications sans fil.

**Mots clés : WIMAX, WLAN ,fractale , HFSS**

## **Abstract**

The objective of this dissertation is to design dual band fractal antennas that work well in both WLAN and WIMAX bands. The simulations are done with the HFSS software, which has been used to obtain the reflection coefficients and the current distribution as well as the radiation pattern. Two types of antennas have been designed (square fractal antenna and flower antenna).

The results obtained are very encouraging and show the interest of these types of antennas in the field of wireless communications.

**Key words: WIMAX, WLAN, fractal, HFSS**