

**Université Kasdi Merbah Ouargla**  
**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information**  
**et de la Communication**  
**Département d'Electronique et Des Télécommunications**



**Mémoire MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Science et Technologie Filière : Electronique  
Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par : **BENISLAMANE Khawla**

**BETTAYEB Hanane**

**Thème**

**Modélisation d'une antenne multifréquences par ligne  
de transmission**

Devant le jury composé de:

Mr. BELHADRI Abdelkrim	M.A (A)	Président/ Examineur	UKM Ouargla
M <sup>elle</sup> . GAMOUH Samia	M.A (B)	Encadreur	UKM Ouargla
Mr .CHENINA Hachemi	M.A (A)	Examineur	UKM Ouargla

**Année universitaire : 2017-2018**

# Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur **M<sup>lle</sup> Dr. S.GAMOUEH** d'avoir proposé et dirigé le thème de ce mémoire et pour tous ses conseils précieux du début à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury : **Mr A. BELHADRI** (Président du jury) et **Mr. H. CHENINA** (Examineur) pour l'honneur qu'ils nous ont fait pour la lecture et l'évaluation de ce mémoire.*

*Nos remerciements les plus respectueux et notre profond respect s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi que le personnel administratif du département d'électronique.*

*Enfin merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*



# Dédicace

*À mes très chers parents, en témoignage et en gratitude  
De leur dévouement et leur soutien permanent durant  
Toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur  
Réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour  
Mon éducation et mon instruction pour me voir réussir un  
jour.*

*Que Dieu les garde.*

*À mes chers frères : Mehmmnd Alsharkaa et Asoumi.*

*À mes chères sœurs : Nesrine Besma et Aridj.*

*À mon Mon grand-père et ma grand-mère  
, mes cousines et cousins et tante toute ma famille.*

*Chers amis : Safi, Mina et Hanuman et Safi et doudja*



*Benislamane Khawla*

# DÉDICACES

À MES CHERS PARENTS ET MA TANTE

*POUR TOUT L'AMOUR ET L'ÉDUCATION QU'ILS M'ONT DONNÉE*

À MES FRÈRES.

À MES SŒURS.

À MES AMIS.



**BETTAYEB HANANE**

## Résumé

Dans ce travail, on va montrer que les antennes multi bandes sont largement pratiques que les antennes larges bandes puisque on peut avoir des antennes à des bandes très séparées, et il n'existe pas des problèmes pour l'adaptation, ensuite on va proposer une structure doubles bandes en utilisant la technique des fentes,et on va conclure notre travail avec la simulation de cete structure sur HFSS et discuter les résultats obtenus.

**Mots clé :** Antenne , patch , Multi bande ,double bande, FEM, HFSS

---

## Abstract

In this work, we will show that multiband antennas are widely practical as broadband antennas since one can have antennas to very separate bands, and there are no problems for adaptation,then we will propose a new structure for dual band patch antennas with two band, using the slot method,and we will conclude our work with simulating these structure on HFSS and discussing the results obtained.

**Keywords:** Antenna, patch, multi band, dual band, FEM, HFSS.

---

## الملخص

في هذا العمل، سوف نتطرق لموضوع الهوائيات متعددة المجالات لكونها عملية إذا مقارنتها مع هوائيات واسعة النطاق حيث ان اعداد الهوائيات متعددة المجالات لا تخلق مشاكل فيما يتعلق بتكليف الاخيرة مع خطوط التغذية، فيما يلي سوف نقدم هوائي نائي المجال مخصص للشبكات اللاسلكية و ذلك عن طريق المحاكاة والتي تمت بواسطة برنامج المحاكاة

**الكلمات المفتاحية:** هوائي مسطحة, متعددة المجالات,ثنائي المجالات.....

## Table des matières

Remerciements .....	I
Dédicaces .....	II
Dédicaces .....	III
Résumés .....	IV
Tables des matieres .....	V
Liste des Figures.....	VII
Liste des tableaux .....	IX
Liste des acronymes & symboles .....	X

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

### Chapitre I : Généralités sur les antennes et Les techniques multi bande

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur les antennes .....	3
I.2.1 Définition d'une antenne .....	3
I.2.2 Le rôle d'une antenne .....	4
I.2.3 Critères de choix d'une antenne .....	4
I.3 L'antenne imprimée .....	10
I.3.1 Structure du patch .....	10
I.3.1.1 Élément rayonnant .....	11
I.3.1.2 Substrat .....	11
I.3.2 Techniques d'alimentation .....	11
I.3.3 Avantages et inconvénients des antennes patch .....	12
I.4 L'antenne multi bande.....	12
I.4.1 Les techniques multi bandes .....	13
I.4.2 Applications .....	16
I.5 Conclusion.....	18

### Chapitre II: Méthode d'analyse des antennes

II.1 Introduction.....	19
II.2 Les méthodes de modélisation .....	19
II.2.1 Modèle analytique .....	19
II.2.2 Méthodes numériques .....	24
II.3 Le logiciel HFSS.....	28

II.3.1 Etapes de simulation par HFSS .....	28
II.4 Conclusion .....	29

### Chapitre III :Conception et simulation19

III.1 Introduction .....	30
III.2 Conception de l'antenne .....	30
III.2.1 Antenne patch de référence.....	30
III.2.2 Antenne Multi bande à fente de forme U .....	33
III.3 Performance de l'antenne optimisée.....	39
III.3.1 Le coefficient de réflexion .....	39
III.4. Conclusion .....	42
Conclusion Générale & Perspectives .....	43

## Liste des figures

Figure I.1 : Rayonnement d'une antenne.....	4
Figure I.2 : Quadripôle d'antenne [4].....	4
Figure I.3: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires.....	6
Figure I.4: Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.....	6
Figure I.5 : Antenne Yagi (à gauche) et son diagramme de rayonnement (à droite).....	6
Figure I.6: Types de polarisation [5].....	8
Figure I.7: Bande passante et coefficient de réflexion.....	10
Figure I. 1 : Géométrie d'une antenne patch [7].....	11
Figure I. 2 : Géométrie de base de l'antenne patch [].....	11
Figure I.10 : Principe de fonctionnement d'une antenne multi-bande.....	13
Figure I.11: Réseaux d'antennes pour un fonctionnement multi-bande.....	13
Figure I.12 : Antenne patch sans fente (a) et avec une fente (b) avec circuit équivalent.....	14
Figure I.13 : Antennes à fente pour un fonctionnement multi-bande.....	15
Figure I.14 : Différents types d'antennes fractales.....	15
Figure I.15 : Géométrie de l'antenne PIFA à quatre bandes de fréquences.....	17
Figure I.16: Les segments du système.....	18
Figure II.1 : (a) : Calcul des paramètres de l'élément rayonnant ; (b) : lignes de champ [20].....	20
Figure II.2 : Extension de la longueur physique L [1].....	21
Figure II.3: le circuit équivalent d'une antenne patch.....	22
Figure II.4 : Circuit équivalent du :(a) patch, (b) fente, (c) Fente de forme U, (d) antenne proposée.....	24
Figure II.5: Quelques types d'éléments.....	26
Figure II.6: Maillage bidimensionnel d'une structure comportant des sphères.....	26



Figure II.7 : Modélisation par éléments finis de structures.....	27
Figure II.8 : Etapes principales d'une simulation complète sous HFSS [26].....	29
Figure III.1: Géométrie de l'antenne patch :(a) par devant, (b) de derrière.....	31
Figure III.2: Coefficient de réflexion S11 (numériquement).....	32
Figure III.3: Coefficient de réflexion S11(Théoriquement).....	32
Figure III.4 : Diagramme de rayonnement (a) 3D (b) 2D (c) directivité.....	33
Figure III.5: Figure III.5 : Géométrie et dimension du patch inférieur (a) : Vue de dessus, (b) : 3D par HFSS .....	33
Figure III.6: Amplitude du coefficient de réflexion S11 (Substrat Roger RT 5880 $\epsilon_r = 2.2$ ).....	35
Figure III.7: Amplitude du coefficient de réflexion S11 (Substrat RT 6002 $\epsilon_r = 2.94$ ).....	35
Figure III. 8: Amplitude du coefficient de réflexion S11 (Substrat RO3003 $\epsilon_r = 3$ ).....	36
Figure III.9: Amplitude du coefficient de réflexion S11 (FR4_expoy $\epsilon_r = 4.4$ ).....	36
Figure III.10: Variation du coefficient de réflexion S <sub>11</sub> en fonction de h.....	37
Figure III.11 : Variation du coefficient de réflexion S11 en fonction de la position du point d'alimentation.....	37
Figure III.12: Variation du coefficient de réflexion S11 en fonction de la Longueur de la fente latérale de L <sub>s1</sub> .....	38
Figure III.13: Variation du coefficient de réflexion S11 en fonction de la largeur de la fente de S.....	38
Figure III.14: Coefficient de réflexion S11 (numériquement) d'une antenne multi bande de fenteU.....	39
Figure III.15: Coefficient de réflexion S11 (analytique) d'une antenne multi bande de fente U.....	39
Figure III.16 : Diagramme de rayonnement pour F=1,57Ghz : a) en 2D et b) en3D.....	40
Figure III.17: Diagramme de rayonnement pour F=2.49Ghz : a) en 2D et b) en3D.....	41

## Listes des tables

Tableau I.1: Comparaison de deux techniques de plusieurs éléments rayements et fractale.....	16
Tableau III.1: dimensions du patch de référence.....	31
Tableau III.2: dimensions de la structure proposée d'une antenne à fente de forme U.....	33

## LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES

### ACRONYMES

- DCS** : Digital Combat Simulator.
- FEM** : Méthodes des Eléments Finis.
- GLONASS** : Global Orbiting Navigation Satellite System.
- GNSS** : Global Navigation Satellite System.
- GPS** : Global Positioning System.
- GSM** : Global System for Mobile.
- HFSS** : High Fréquency Structure Simulator.
- IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- LU** : Lower Upper (Methode de décomposition de matrice).
- MATLAB** : Matrix Laboratoiry délivrée par Mathwork Inc.
- PCS** : Public and Commercial Services.
- PIFA** : Planar Inverfed Folded Antenna.
- RF** : Radiofréquence
- ROS** : Rapport d'Ondes Stationnaires.
- TEM** : Transverse Electric and Magnetic
- UMTS** : Universel Mobile Télécommunications System.
- VSWR** : Voltage Standing Wave Ratio.
- WIMAX** : Worldwide Interoperability for Microwave Access.
- WLAN** : Wireless Local Area Network.

## SYMBOLES

$S_{11}$ : Le coefficient correspond à la réflexion.

$S_{12}$ : Le coefficient représente la transmission.

$S_{21}$ : Le coefficient le gain du quadripôle.

$S_{22}$ : Le coefficient de la réflexion.

$P(\theta, \varphi)$ : La puissance rayonnerait dans une direction .

$P_{\max}(\theta_0, \varphi_0)$ : La densité de puissance maximale.

$P_A$ : Puissance électrique.

$P_R$ : puissance rayonnée.

$Z_e$ : Impédance d'entrée de l'antenne.

$Z_c$ : Impédance caractéristique de la ligne.

$\Delta L$ : Extension de la longueur physique L.

$\epsilon_r$ : Permittivité diélectrique du substrat.

$\epsilon_{\text{eff}}$ : Constant diélectrique effective du substrat.

$f_r$ : Fréquence de resonance.

$C$ : Vitesse de la lumière.

$I_f$ : Point d'alimentation.

$\epsilon_0$ : Permittivité du vide.

$\Psi$ : Angle d'inclination de la fente .

$k$ : Vecteur d'onde dans l'espace.

$\vec{E}$ : Vecteurs champs électrique.

$\vec{H}$ : Vecteurs champs magnétique.

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Les récents progrès dans le domaine des communications sans fils ont conduit à la création et l'innovation d'une nouvelle génération de technologies radiofréquences spécifiques tels que le WIFI, le WIMAX, le GPS, les appareils mobiles et le Bluetooth. Afin de satisfaire aux divers besoins des consommateurs, les ingénieurs sont amenés à concevoir des dispositifs miniaturisés avec un taux de transfert des données très rapides, qui exige alternativement des composants à large bande et à multi bandes. Le challenge actuel consiste à gérer cette conception avec des solutions peu coûteuses et les composants proposés doivent fournir des performances très élevés.

L'antenne restant encore la partie la plus encombrante de tels systèmes, devra avoir un fonctionnement multifréquences ou large bande, tout en présentant un rendement optimal et des caractéristiques constantes (bonne adaptation, rayonnement contrôlé et omnidirectionnel, large bande passante), avec un cout limité. A cela s'ajoute le besoin de concevoir une structure compacte, d'encombrement minimal, et n'ayant pas de problèmes de compatibilité électromagnétique avec les circuits électroniques environnants.

L'objectif de notre travail consistera à analyser et concevoir une antenne imprimée multifréquence, qui doit présenter un aspect multi-bande, être simple de construction, et répondre aux exigences d'intégration.

La suite du présent mémoire traite trois principaux chapitres dont les contenus sont les suivants :

Le premier chapitre donne en première partie, un bref rappel des notions de bases sur les antennes et les différents paramètres , tels que le diagramme de rayonnement, la présentation en quadripôle des antennes, la directivité...etc. On abordera ensuite, en seconde partie du chapitre, un état de l'art sur les antennes multi-bandes, où nous exposerons les techniques principales d'obtention de ces antennes, leurs avantages et inconvénients ainsi que les domaines d'application.

Le second chapitre sera dédié à la présentation des méthodes d'analyses de l'antenne patch, tout en mettant l'accent sur la méthode numérique ( des éléments finis)et la méthode analytique (le circuit équivalent d'une antenne ) qui sont intégrés dans les logiciels de simulation HFSS et MATLAB respectivement . Le logiciel HFSS [1] sera l'objet d'une étude à la fin du même chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur la conception de l'antenne multi-bande proposée, ainsi que sur l'analyse et l'étude paramétrique de ce type d'antennes. Cela permettra de choisir les meilleurs paramètres afin de réduire le temps d'optimisation et de favoriser l'approche vers un meilleur résultat.

Le mémoire sera clos par une conclusion générale qui résumera l'ensemble du travail effectué tout en donnant les perspectives susceptibles de compléter le présent travail .

**Chapitre I**

**Généralités sur les antennes**

**&**

**Les techniques multi bande**



## I.1 Introduction

Les premières expériences de liaison utilisant des antennes ont été réalisées par Hertz à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Par ces expériences, Hertz apportait une validation expérimentale des équations de Maxwell, alors connues depuis une dizaine d'années.

Les antennes constituent une catégorie de composants un peu particulière : elles assurent la transmission entre deux milieux bien différents, un circuit électronique d'un côté et un milieu de propagation de l'autre. L'antenne permet de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement).

L'évolution des outils de communication multiservices et multifonctions implique une haute intégration de circuits électroniques. L'antenne restant encore la partie la plus encombrante de tels systèmes, devra avoir un fonctionnement multifréquences ou large bande, tout en présentant un rendement optimal et des caractéristiques constantes (bonne adaptation, rayonnement contrôlé et omnidirectionnel, large bande passante), avec un coût limité. A cela s'ajoute le besoin de concevoir une structure compacte, d'encombrement minimal, et n'ayant pas de problèmes de compatibilité électromagnétique avec les circuits électroniques environnants.

Le but de ce chapitre est de faire un bref rappel de ces propriétés caractéristiques et de donner un aperçu sur le type d'antenne et les différentes techniques multi bande..

## I.2 Généralités sur les antennes

### I.2.1 Définition d'une antenne

La définition la plus juste d'une antenne est donnée dans la norme IEEE [1]. D'après cette norme, une antenne est un moyen de rayonnement ou de réception des ondes radio. Plus concrètement, c'est un dispositif qui reçoit des signaux d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les diffuse dans l'espace libre en mode d'émission, alors qu'en mode de réception, elle capte tout simplement les ondes électromagnétiques incidentes et les reconvertit en signaux. La Figure I.1 en est une illustration très simple [2].

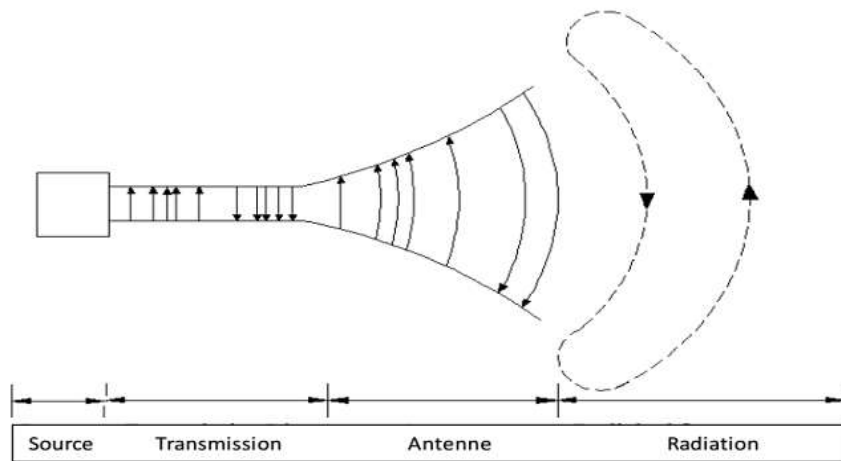


Figure I.1 : Rayonnement d'une antenne.

## I.2.2 Le rôle d'une antenne

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

- ✓ Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- ✓ Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- ✓ Transmettre le plus fidèlement possible une information [3].

## I.2.3 Critères de choix d'une antenne

Pour choisir un modèle d'antenne pour une application donnée, il faut veiller aux principaux paramètres, à savoir : la fréquence de travail, la directivité, le gain, l'impédance et la puissance rayonnée. Une antenne peut être caractérisée par :

### I.2.3.1 Représentation en quadripôles [4]

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (cf. Figure I.2), défini par les paramètres S.

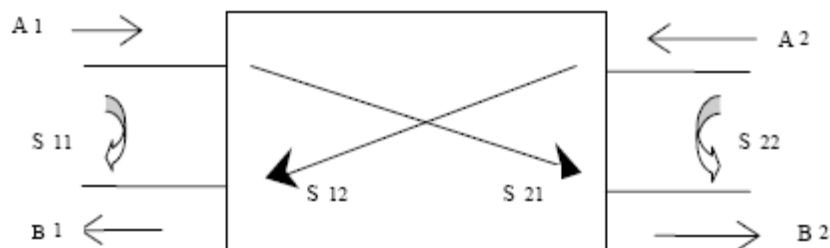


Figure I.2 : Quadripôle d'antenne [4]

$A_1, A_2, B_1$  et  $B_2$ , sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$B_1 = S_{11} \cdot A_1 + S_{12} \cdot A_2$$

$$B_2 = S_{21} \cdot A_1 + S_{22} \cdot A_2$$

Le coefficient  $S_{11}$  correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque  $A_2 = 0$ .

Le coefficient  $S_{12}$  représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque  $A_1 = 0$ .

Le coefficient  $S_{21}$  est le gain du quadripôle lorsque  $A_2 = 0$ .

Le coefficient  $S_{22}$  est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque  $A_1 = 0$ .

### I.2.3.2 Diagramme de rayonnement

#### I.2.3.2.1 Définition

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue est caractérisée par le diagramme de rayonnement de l'antenne. Le diagramme de rayonnement peut être exprimé soit :

- Par la représentation de la répartition de la puissance par unité d'angle solide dans la direction d'angle solide :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{\max}} \quad (\text{I.1})$$

- En fonction du champ rayonné  $E(\theta, \varphi)$   $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$

$$P(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\vec{E}|^2}{120} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \quad (\text{I.2})$$

#### I.2.3.2.2 Représentation graphique

La connaissance de ces diagrammes est de grande importance. Il est plus facile de faire des coupes, l'une par un plan vertical et l'autre par un plan horizontal. Il y a plusieurs représentations graphiques possibles. Le diagramme de rayonnement peut être représenté en :

- En coordonnées polaires :

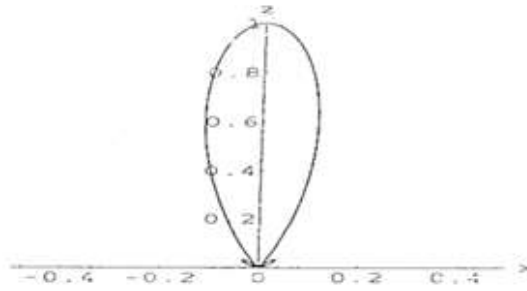


Figure I.3: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires

- En coordonnées cartésiennes :

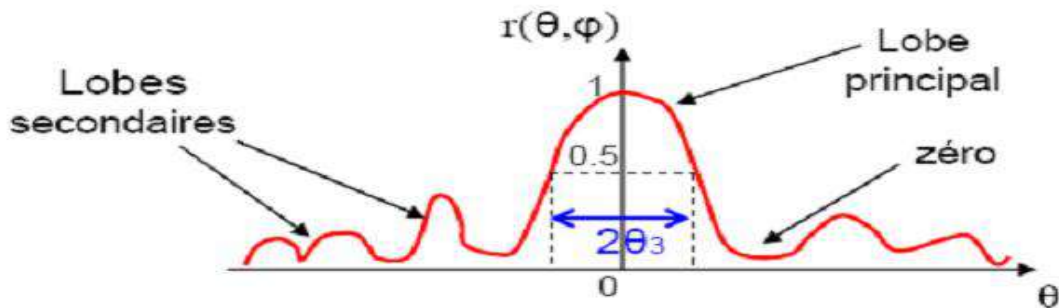


Figure I.4: Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes

Noté  $2\theta_3$ , est l'angle entre les deux directions qui entourent le lobe principal pour lesquelles la puissance est divisée par deux.

- ✓ Exemples de diagrammes de rayonnement :

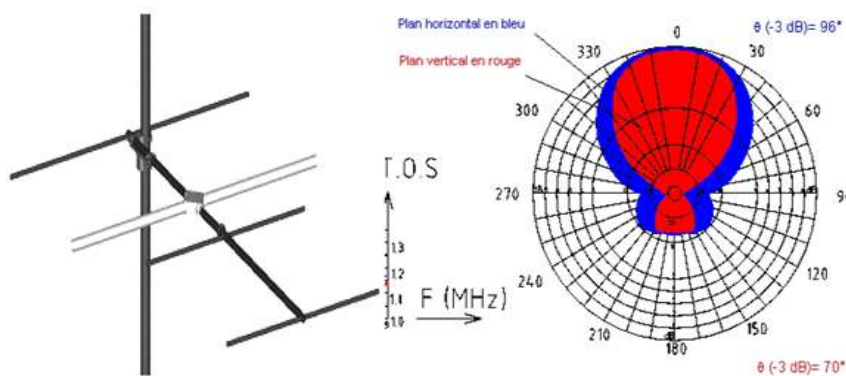


Figure I.5 : Antenne Yagi (à gauche) et son diagramme de rayonnement (à droite)

### I.2.3.3 Gain

Le gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $p(\theta, \varphi)$  sur la puissance que

rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain  $G$  correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal  $(\theta_0, \varphi_0)$

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (\text{I.3})$$

Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction. Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0dB. Le gain maximum de l'antenne exprimée en dB est donné par :

$$G_{max} = 10 \log_{10}(G) \quad (\text{I.4})$$

### I.2.3.4 Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \varphi)$  à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [5].

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{\eta P_A} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (\text{I.5})$$

### I.2.3.5 Angle d'ouverture d'une antenne

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

### I.2.3.6 Rendement

Le rendement  $\eta$  d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée  $P_A$  sous forme de puissance rayonnée  $P_R$ . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie [5].

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (\text{I.6})$$

### I.2.3.7 Polarisation

La polarisation d'une antenne est la polarisation de l'onde plane générée par cette antenne dans une direction bien déterminée.

Par convention, la polarisation d'une onde plane correspond à la variation du champ électrique  $E$  au cours du temps par rapport à un point d'observation fixe.

Il existe trois types de polarisations : rectiligne, circulaire et elliptique (Figure I.6).

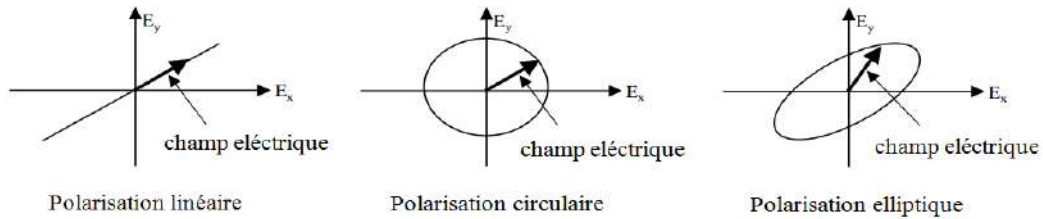


Figure 1.6: Types de polarisation [5].

### a) Polarisation rectiligne

Une onde est polarisée rectilignement, si son champ électrique garde la même direction au cours du temps par rapport à un observateur fixe.

Il y a deux types de polarisation rectiligne : la polarisation horizontale et verticale, cette appellation est définie par rapport au sol (surface de propagation). La première est recommandée pour des communications terrestres longues distances en raison des réflexions du sol, par contre la deuxième, s'avère intéressante pour les communications en ville ou dans les bâtiments, car elle augmente les réflexions multiples sur les parois.

### b) Polarisation circulaire

Une onde est polarisée circulairement, si son champ électrique décrit un cercle au cours du temps par rapport à un observateur fixe.

Par conséquent, deux cas particuliers sont à souligner : gauche et droite, la première lorsque le champ électrique tourne dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur fixe placé sur l'antenne, la deuxième, dans le cas contraire (convention IEEE).

La polarisation circulaire trouve son utilisation dans les communications avec des objets en mouvement (train, avion, ...).

### c) Polarisation elliptique

Une onde est dite en polarisation elliptique, si son champ électrique décrit une ellipse au cours du temps par rapport à un observateur fixe.

C'est le cas général, lorsque les composantes du champ électrique varient sans relations particulière entre eux. De même que pour la polarisation circulaire, deux types de polarisation sont déterminés : gauche et droite.

### I.2.3.8 Coefficient de réflexion $S_{11}$ ou $\Gamma$

On dit qu'une antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée ( $Z_e$ ) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation ( $Z_c$ ), sinon on démontre qu'il apparaît un coefficient de réflexion  $S_{11}$  ou  $\Gamma$

$$\Gamma = S_{11} = \frac{z_e - z_c}{z_e + z_c} = \frac{\text{ondereflechie}}{\text{ondeincidente}} \quad (\text{I.7}) [5].$$

Couramment exprimé en dB

$$S_{11} = 20 \log_{10} (S_{11}) \quad (\text{I.8})$$

$Z_e$ : Impédance d'entrée de l'antenne ( $Z_e = R + jX$ )

$Z_c$ : Impédance caractéristique de la ligne.

On dit que l'antenne est adaptée si  $S_{11} = 0$  : donc  $z_e = z_c$

Parfois, l'adaptation de l'antenne est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), exprimé comme suit :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{I.9})$$

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.[2]

Une antenne résonne si la partie imaginaire de son impédance d'entrée est nulle (Pratiquement on prend le minimum de la partie imaginaire), Pour  $\Gamma \rightarrow 0 \Rightarrow R_{e\{Z_e\}} \approx Z_c$

Et dans laquelle la directivité de l'antenne est maximal, et le gain est plus élevé, c'est à dire le rayonnement est plus directif, et c'est la définition pour déterminer la fréquence de résonance.

### I.2.3.9 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_e = Z_c \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (\text{I.10})$$

### I .2.3.10 Bande passante

La bande passante d'une antenne est déterminé par le domaine de fréquence dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques sollicitées. Elle correspond au transfert maximal de puissance : du générateur vers l'antenne dans le cas d'émission

(puissance d'alimentation), et de l'antenne vers le récepteur dans le cas de réception (puissance collectée).

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. Généralement, elle est prise où le coefficient de réflexion en dB est inférieur à -10 dB, c'est-à-dire là où 90% de la puissance fournie à l'antenne est transformée et le reste est réfléchi [6].

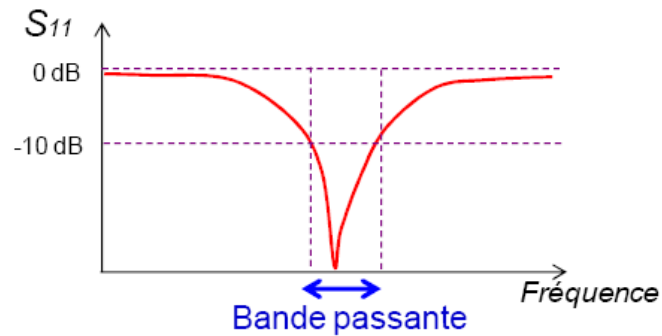


Figure I.7: Bande passante et coefficient de réflexion

On exprime souvent la bande passante, LB en un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale  $f_0$

$$LB = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (I.11)$$

### I.3 L'antenne imprimée

Dans la terminologie anglo-saxonne, on désigne par le terme « patch » (en l'occurrence : pastille ou pavé en français) toute antenne imprimée ou encore « antenne micro ruban ». On les nomme ainsi car les premières antennes imprimées rectangulaires étaient constituées par une partie de ligne micro ruban rayonnant [7]. D'une manière générale, les antennes patches présentent les avantages d'une ligne micro ruban (faible masse, faible encombrement, structure plane, faible coût) et il est facile de créer un réseau de quelques dizaines d'éléments. Cependant, leur bande passante reste faible (quelques pourcents), leur gain reste moyen (~ 30 dB pour les réseaux) et elles ne sont pas capables de transmettre une puissance de plus de quelques dizaines de watts. [8]

#### I.3.1 Structure du patch

Une antenne patch est une antenne dont l'élément rayonnant est une métallisation imprimée. Elle est constituée d'un plan de masse, d'un substrat diélectrique, et d'une métallisation dont les formes peuvent être variables. [8]



## I.3.1.1 Elément rayonnant

Les éléments rayonnants peuvent être de toutes natures géométriques. Les plus simples sont des rectangles, des cercles, des triangles. La forme la plus répandue est le rectangle excité en un point de l'un de ses axes de symétries.[9]

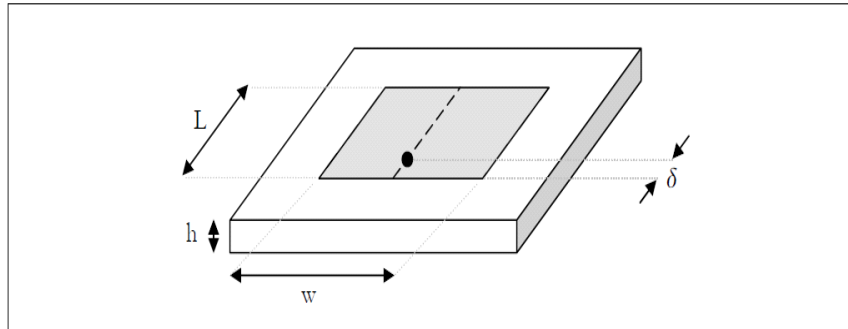


Figure I. 3 : Géométrie d'une antenne patch.[7]

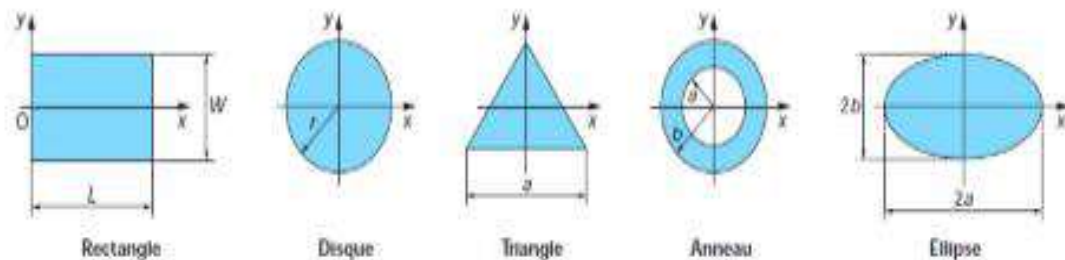


Figure I. 4 : Géométrie de base de l'antenne patch.[7]

## I.3.1.2 Substrat

Le substrat est caractérisé par sa permittivité (généralement  $1 \leq \epsilon_r \leq 12$ ), sa hauteur h par rapport au plan de masse ( $h \ll \lambda$ ,  $0.003\lambda \leq h \leq 0.05\lambda$ ) et sa tangente de pertes diélectrique  $\tan \delta$  (de l'ordre de  $10^{-3}$ ). [10] Pour la conception des antennes imprimées, on trouve par exemple : des composites à bases de fibres de verre téflon ( $2 < \epsilon_r < 3$ ,  $\tan \delta = 10^{-3}$ ), du polypropylène ( $\epsilon_r = 2.2$ ,  $\tan \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ ) mais également des mousses synthétiques ( $\epsilon_r = 1.03$ ,  $\tan \delta = 10^{-3}$ ). [11]

## I.3.2 Techniques d'alimentation

L'alimentation joue un rôle très important dans la conception des antennes, elle peut influencer éventuellement le rayonnement et modifier ses caractéristiques. Traditionnellement, il existe quatre modes d'alimentation pour un patch :[1]

- L'antenne patch peut être excitée directement :
  - ✓ soit par une sonde coaxiale,
  - ✓ soit par une ligne micro ruban.
- Elle peut également être excitée indirectement en utilisant

- ✓ un couplage électromagnétique
- ✓ ou un couplage d'ouverture et une alimentation coplanaire d'un guide d'onde, auquel cas il n'y a pas un contact direct métallique entre la ligne d'alimentation et le patch.

La technique d'alimentation influence l'impédance d'entrée et les caractéristiques de l'antenne et constitue un paramètre de conception important [1]

### I.3.3 Avantages et inconvénients des antennes patch

Les antennes Microstrip présentent de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et leurs applications couvrent le large domaine de fréquence (100 MHz à 100 GHz).[6] Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles.
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.[9]
- Toutefois, les antennes micro ruban ont également des limitations que ne présentent pas les antennes traditionnelles :
- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérance (géométriques et physiques) ; Généralement faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances (100 mW).
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces.[8]

### I.4 L'antenne multi bande

Une antenne multi-bande, par définition, est une antenne fonctionnant dans deux ou plusieurs bandes de fréquence avec des performances assez similaires dans ces bandes.

Le fonctionnement d'une antenne multi bande une de fréquence de résonance se traduit généralement par une adaptation « raisonnable » de l'antenne pour toutes les fréquences de la bande[2]

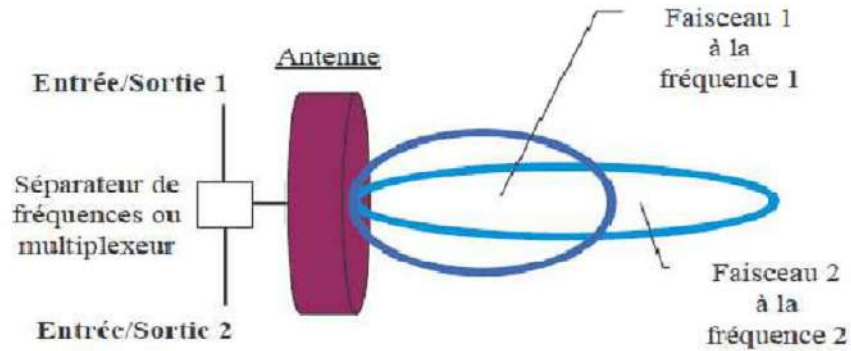


Figure I.10 : Principe de fonctionnement d'une antenne multi-bande.

## I.4.1 Les techniques multi bandes

Les techniques utilisées pour faire résonner une antenne à plusieurs fréquences sont très variées et basées sur plusieurs concepts. Dans la suite, nous allons décrire les techniques les plus employées pour l'obtention d'antennes multi-bandes ainsi que les avantages et inconvénients sur les performances radioélectriques qu'elles peuvent apporter[12].

### I.4.1.1 Combinaison de plusieurs éléments rayonnants

La combinaison de deux ou plusieurs éléments rayonnants (résonateurs) mono-bande de même type ou différents les uns des autres est une technique classique pour obtenir des antennes multi bande, l'alimentation des éléments constituant ces antennes multi bande peuvent être assuré par deux manières différente : l'alimentation directe par port d'excitation et l'alimentation par couplage électromagnétique [1].

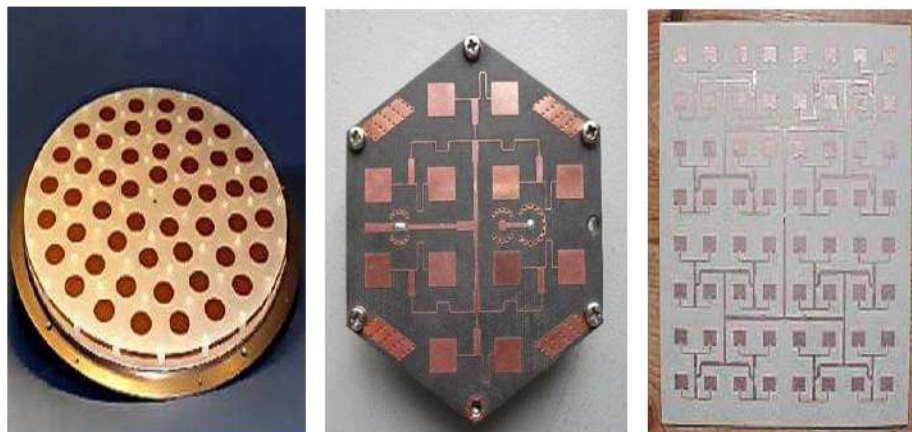


Figure I.11: Réseaux d'antennes pour un fonctionnement multi-bande.

Dans le cas des antennes imprimées l'association de plusieurs éléments rayonnants peut se faire de deux façons différentes : soit ces éléments sont juxtaposés dans le même plan, soit ils sont empilés les uns sur les autres. Le cas où les deux méthodes sont combinée existe également mais au détriment d'une augmentation importante du volume global de l'antenne [1,13].

### I.4.1.2 La technique de fente

Nous définissons une "fente" comme une ouverture découpée dans une surface conductrice métallique obligeant les courants de surface à allonger leur trajet pour la contourner. L'insertion de fente dans l'élément rayonnant constitue une solution intéressante pour la réduction de taille des antennes. Une antenne patch ordinaire peut être modélisée par un simple circuit résonant LC (figure I.12(a)). Les courants circulent de la position d'alimentation vers les bords. Les valeurs de L et C sont déterminées par la longueur des lignes de courants. L'insertion de fentes modifie très sensiblement le résonateur, notamment en introduisant une seconde résonance comme le montre la figure I.12(b). Dans la partie centrale, le courant circule comme dans un patch ordinaire ; le circuit LC qui modélise cette zone résonne à la fréquence initiale. Cependant, aux bords du patch, le courant doit contourner les fentes, ce qui augmente la longueur des lignes de courant. Cet effet peut être modélisé par une self supplémentaire  $\Delta L_s$  en série, correspondant à une résonance plus basse. L'antenne est donc équivalente à deux résonateurs.

Le choix de la forme et de la longueur de ces fentes détermineront les fréquences de fonctionnement de l'antenne et les impédances d'entrée.[14,15]

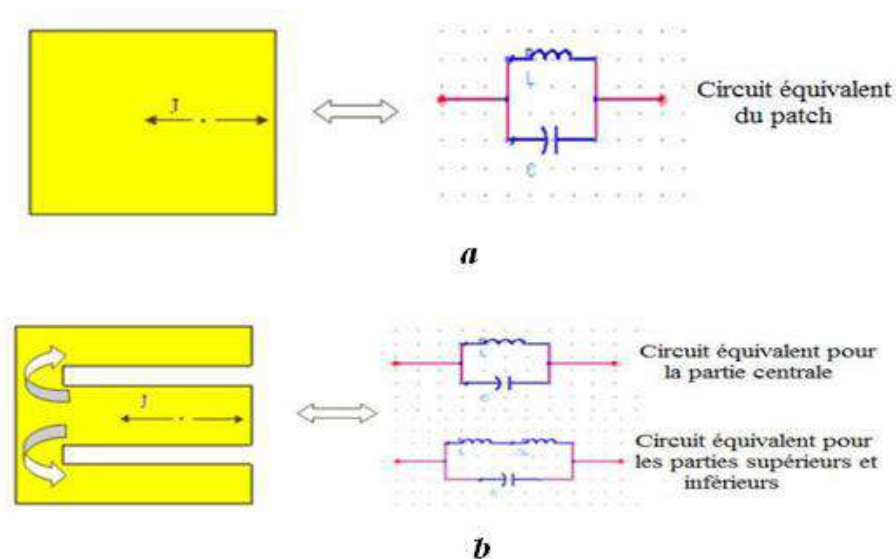


Figure I.12 : Antenne patch sans fente (a) et avec une fente (b) avec circuit équivalent

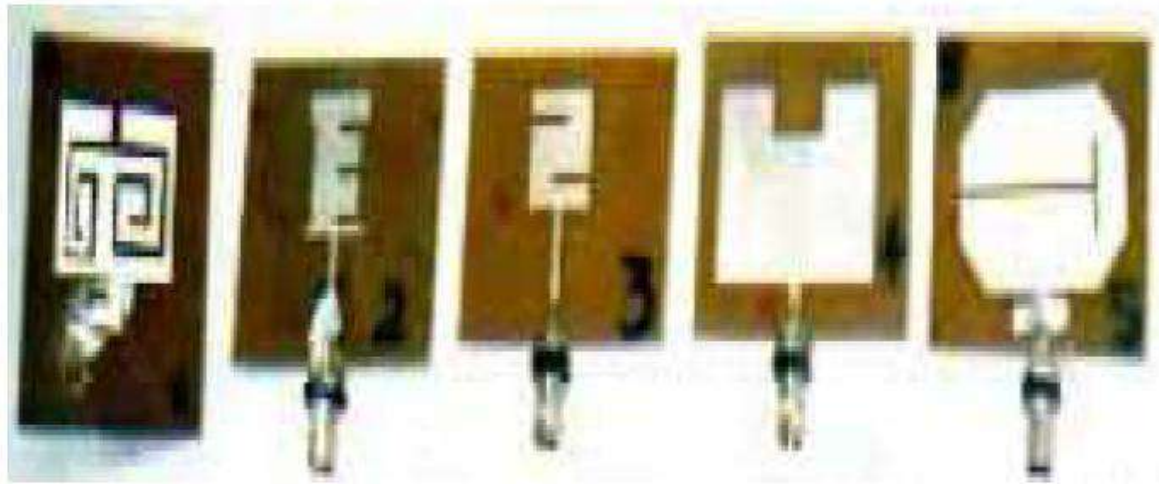


Figure I.13 : Antennes à fente pour un fonctionnement multi-bande.

### I.4.1.3 La technique fractale

Il est bien connu que le périmètre d'une antenne est un facteur décisif dans la détermination de la fréquence de résonance, parmi les solutions pour augmenter le périmètre d'une surface est l'utilisation des fractales, donc une antenne avec une forme fractale permet d'aboutir à un fonctionnement large bande. Parmi les formes fractales les plus utilisées, il y a celles de Von Kock, de Hilbert et de Sierpinski[16].

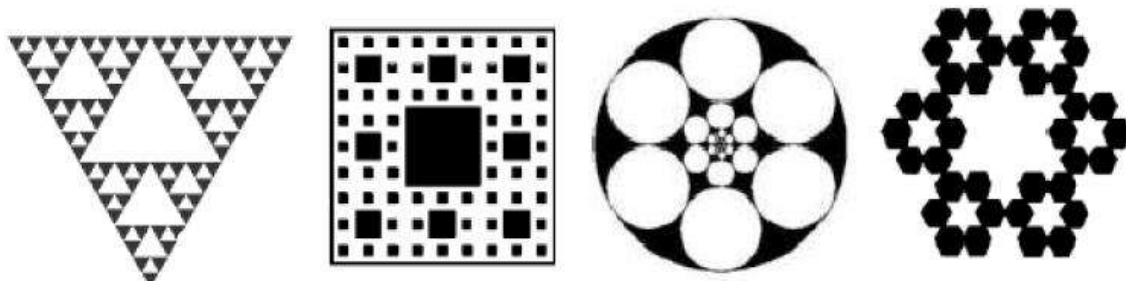


Figure I.14 : Différents types d'antennes fractales.

Le tableau suivant récapitule les avantages et les inconvénients des techniques cités dans le paragraphe précédent.

## Chapitre I : Généralités sur les antennes et les techniques multi bande

*Tableau I. 2: Comparaison de deux techniques de plusieurs éléments rayonnants et fractale*

Techniques	Avantages	Inconvénients
<p><b>Combinaison de plusieurs éléments rayonnants</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Facilité du premier dimensionnement des éléments constitutifs.</li> <li>➤ Rayonnement relativement identique sur toute la large bande couverte</li> <li>➤ Bonne efficacité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Structures généralement encombrantes</li> <li>➤ Couplage entre éléments pas toujours maîtrisé</li> <li>➤ Bon positionnement des différents éléments rayonnants délicat</li> <li>➤ Diagrammes de rayonnement généralement perturbés par les autres éléments rayonnants.</li> <li>➤ Nombre de ports d'excitation dans le cas d'excitations séparées.</li> </ul>
<p><b>Technique fractale</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Surface occupée très réduite : la compacité résulte du caractère irrégulier des formes fractales.</li> <li>➤ Résonances multiples : le caractère multi bande vient du caractère d'autosimilarité.</li> <li>➤ Gain très important dans certains cas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gain faible dans d'autres cas.</li> <li>➤ Réalisation très difficile liée à la complexité des formes.</li> <li>➤ Plus faible bande passante que les antennes spirales.</li> <li>➤ Difficulté de contrôler la polarisation.</li> </ul>

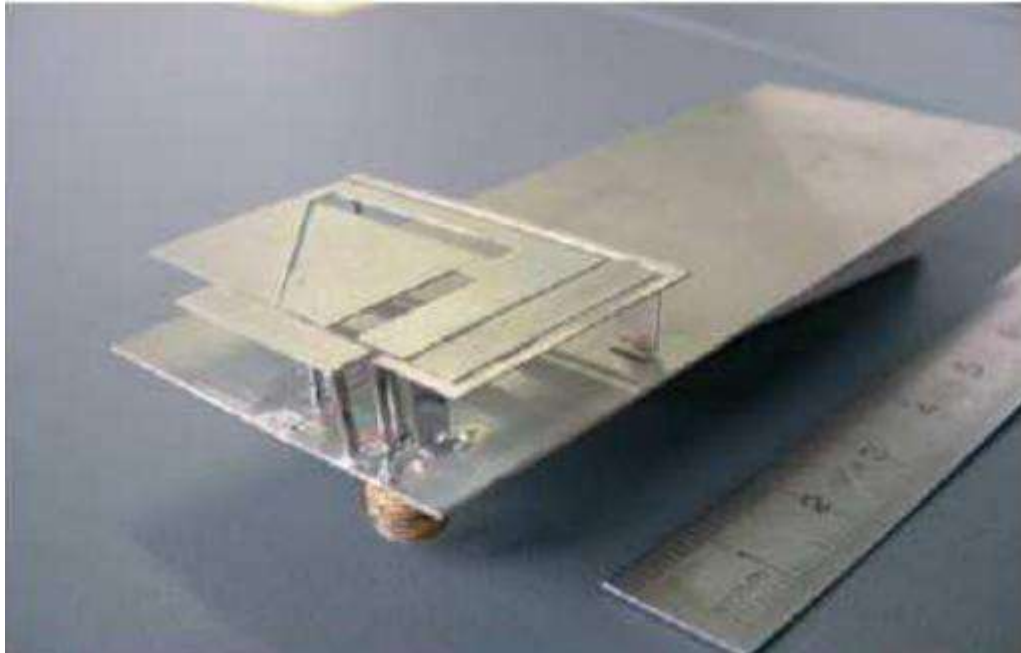
### I.4.2 Applications

#### I.4.2.1 Téléphonie mobile

Les avantages d'une antenne multi bande est d'offrir plusieurs fonctionnalités (Bluetooth, Wifi, GPS, WIMAX) et de couvrir plusieurs standards de communications dans la même appareil. (la figure I.15) [17] par exemple une antenne PIFA multi-bande capable de couvrir les standards : GSM (880-960 MHz), DCS (1710-1880 MHz), PCS (1850-1990 MHz), UMTS (1920-2170 MHz).

L'antenne présentée combine plusieurs techniques permettant de couvrir les 4 bandes de fréquences. Tout d'abord, l'utilisation d'une fente permet la descente en fréquence et

le contrôle des modes supérieurs. Ensuite, l'utilisation d'éléments parasites juxtaposés à résonateur alimenté ont permis la création de nouvelles résonances, les charges capacitatives ont le but de positionner correctement ces nouvelles résonances.



*Figure I.15 : Géométrie de l'antenne PIFA à quatre bandes de fréquences*

### I.4.2.2 GNSS

Le GNSS est l'ensemble des systèmes permettant la géolocalisation par satellites [2]. Il existe actuellement dans le monde plusieurs systèmes GNSS opérationnels ou en cours de développement dans le monde : le GPS pour les États-Unis, le GLONASS pour les Russes, Galiléo pour l'Europe .

Le GNSS se compose de trois éléments distincts (figure I.16), appelés segments ou secteurs. Le premier segment est composé de satellites, appelé « segment spatial ». Le deuxième segment qui comprend des stations de contrôle s'appelle « segment de contrôle ». Le dernier correspond aux récepteurs GNSS est dit « segment utilisateur ». [18]

Pour les récepteurs grand public une seule bande est dédiée, elle permet un positionnement moins précis que les autres types de bandes. Plus possède une antenne de réception (antenne multi-bandes ou large bande avec un dispositif de filtrage) de GNSS qui couvre au moins deux bandes a deux avantages :

- L'utilisation du récepteur pour plusieurs constellations indépendante des autres
- Constellations.

- L'augmentation de la précision de localisation par la combinaison de signaux provenant.

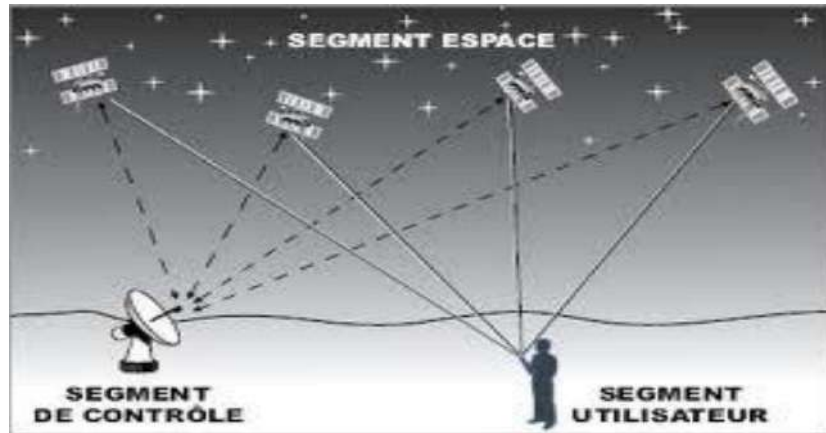


Figure I.16: Les segments du système

### I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, en premier lieu, nous avons brièvement exposé les principales paramètres des antennes, comme le diagramme de rayonnement, la présentation de l'antenne par un quadripôle, l'introduction aux paramètres S...etc.

En second lieu, on a présenté un état de l'art de différents types d'antennes multi bande communément utilisées, ainsi que leurs caractéristiques générales et domaines d'application.



**Chapitre II**

**Méthodes D'analyse**

**Des Antennes**

### II.1 Introduction

Pour mieux analyser et comprendre le fonctionnement d'une antenne, il est primordial de bien étudier le comportement de cette dernière, dans le but de développer des relations théoriques permettant d'explicitier le problème de caractérisation, pour extraire les paramètres recherchés.

La simulation de ces antennes nécessite l'utilisation de méthodes bien souvent en limite ou au delà de leur domaine de validité et par conséquent peu d'outils de simulation électromagnétique donnent des résultats probants comparés aux mesures expérimentales. Grâce aux progrès des calculateurs, des techniques sophistiquées peuvent maintenant être envisagées.

Plusieurs méthodes, ont été proposées, certaines sont relativement simples, qui partent d'un certain nombre d'approximations simplificatrices, d'autres sont plus élaborées, et permettent d'étudier les antennes de formes les plus variées, en utilisant des formules mathématiques complexes, qui sont résolues numériquement.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes méthodes de modélisation, utilisées dans ce travail, soient les méthodes numériques (la méthode des éléments finis) ou les méthodes analytiques (ligne de transmission et Circuit électrique équivalent) intégrées respectivement dans les logiciels de simulation HFSS et MATLAB.

### II.2 Les méthodes de modélisation

Toutes les caractéristiques des antennes découlent des équations de Maxwell ,Le développement de ces dernières nécessite l'utilisation des méthodes analytiques et numériques.

#### II.2.1 Modèle analytique

Afin de prédire la réponse électromagnétique des antennes, un certain nombre de modèles analytiques a été développé. A travers ces modèles, les chercheurs ont essayé d'expliquer les phénomènes physiques derrière les caractéristiques de ces structures. De manière générale, les modèles théoriques permettent d'apporter une explication physique à des résultats de mesures ou de simulations à partir des modèles mathématiques simples.

Le modèle mathématique peut être formulé à partir de certaines considérations et hypothèses physiques visant à réduire l'espace de la solution afin de faciliter la résolution .Il existe plusieurs méthodes analytiques, parmi lesquelles on peut citer :

### II.2.1.1 Méthode de la ligne de transmission

Le modèle de la ligne de transmission est le plus simple car il fournit de bonnes interprétations physiques [19,2].

L'antenne est considérée comme une ligne de transmission dont les deux extrémités sont des ouvertures (fentes) rayonnantes (Figure II.1), ce modèle est complété en tenant compte des pertes dans le diélectrique, dans les conducteurs et du couplage entre les deux ouvertures.

Ce modèle représente l'antenne patch par deux fentes de largeur  $W$  et de hauteur  $h$ , séparée par une ligne de transmission de longueur  $L$ .

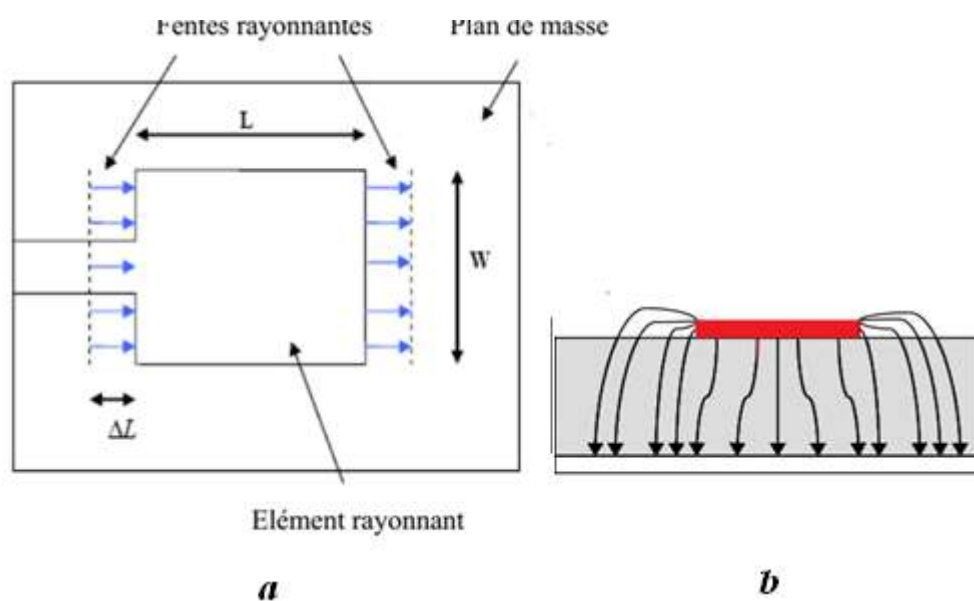


Figure II.1 : (a) : Calcul des paramètres de l'élément rayonnant ; (b) : lignes de champ [20]

La détermination des paramètres géométriques de l'élément rayonnant est basée sur le :

- ↳ Calcul de la permittivité effective en fonction de la largeur du patch  $W$ .
- ↳ Et le calcul de la longueur  $L$  du patch en fonction de la permittivité effective.

Sachant que la propagation des ondes dans une ligne micro-ruban s'effectue à la fois dans le milieu diélectrique et dans l'air. Du point de vue modélisation, les deux milieux sont remplacés par un unique milieu effectif caractérisé par un constant diélectrique exprimé par [21]:

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} (1 + 12h/W)^{-1/2} \quad (\text{II.1})$$

Le patch rectangulaire représente une longueur effective, car le rayonnement se base sur la longueur réelle ainsi que les deux fentes. Pour le patch rectangulaire la longueur  $L$  est étendue de deux  $\Delta L$  (Figure II.2).

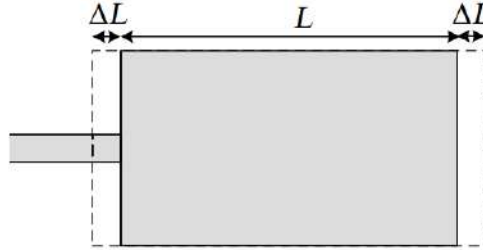


Figure II.2 : Extension de la longueur physique  $L$  [11].

Cette extension en  $L$  est donnée par la formule de Hammerstad [20]:

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

La longueur effective  $L_{eff}$  du patch devient alors ;

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.4})$$

Pour une fréquence donnée  $f_r$  la longueur effective est donnée par :

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

Cependant, la largeur du patch  $W$  est calculée à partir de la formule[21]:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (\text{II.6})$$

### II.2.1.2 Modèle électrique en circuit résonnant

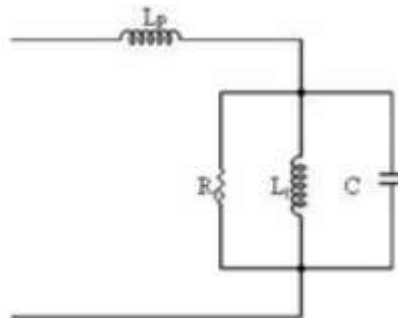
Le mécanisme de fonctionnement et les caractéristiques uniques des structures peuvent être analysés par des modèles de circuits, notamment celui des circuits à constantes localisées R LC et le modèle de la ligne de transmission.

Dans cette approche, les schémas électriques équivalents modélisés sont des schémas électriques rigoureux qui permettent une meilleure appréhension des phénomènes électriques et magnétiques mis en jeu. Les modèles développés dépendent de la géométrie de et des dimensions des antennes.

### II.2.1.2.1 Antenne patch

Lorsqu'un signal variable excite une antenne, des charges sont mis en mouvement le long de l'antenne donnant naissance à un rayonnement. La résonance correspond à une situation où ces charges sont en oscillation permanente. En basse fréquence, pour représenter ce comportement résonant qui varie avec la fréquence, une antenne patch ordinaire peut être modélisée par un simple circuit résonant RLC parallèle (cf. Figure II.3).

La connaissance de ce modèle est cruciale pour déterminer comment l'antenne va convertir la puissance électrique incidente en puissance rayonnée.



*Figure II.3: le circuit équivalent d'une antenne patch*

Les valeurs de R, C et L sont déterminées par la longueur des lignes de courants et sont donné par les formules [22,23].

$$C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_{eff} L \frac{W}{2h} \left[ \cos \left( \pi \frac{l_f}{L} \right) \right]^{-2} \quad (\text{II.6})$$

$$L_p = \frac{1}{\omega^2 C_p} \quad (\text{II.7})$$

Et

$$R_p = \frac{c \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{4fh\omega C_p} \left( \cos \left( \pi \frac{l_f}{L_p} \right) \right)^2 \quad (\text{II.8})$$

On définit le facteur de qualité par :

$$Q = \frac{c \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{4fh C_p} \quad (\text{II.9})$$

Donc

$$R_p = \frac{Q}{\omega C_p} \quad (\text{II.10})$$

Avec

$$\omega = 2\pi f$$

D'après le schéma équivalent, l'impédance d'entrée est donnée par :

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p}} = \frac{j\omega L_p R_p}{R_1 - \omega^2 L_p C_p R_p + j\omega L_p} \quad (\text{II.11})$$

Le coefficient de transmission est exprimé par la relation suivante

$$(\Gamma) = \left| \frac{Z_0 - Z_p}{Z_0 + Z_p} \right| \quad (\text{II.12})$$

Ou  $Z_0$  est l'impédance caractéristique de la sonde coaxiale (50 ohm). Et Le return loss est donné par :

$$\text{Returnloss} = 20 \log(\Gamma) \quad (\text{II.13})$$

### II.2.1.2.2 Antenne à fente de forme U

Les fentes rayonnantes sont des ouvertures percées dans un plan métallique. L'insertion des fentes dans l'élément rayonnant, vont créer non seulement un effet capacitif, mais une modification des trajets de courant et entraîner ainsi une diminution fréquentielle de tous les modes de fonctionnement du résonateur et en introduisant une seconde résonance.

Vu les dimensions étroites de la fente, et en utilisant la théorie de dualité entre le dipôle et la fente, cette dernière peut être considérer comme un dipôle ayant une impédance complexe composée d'une résistance  $R_s$  et d'une réactance  $X_s$  (cf. Figure II.4(b)). donc l'impédance peut être écrit sous la forme :

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (\text{II.14})$$

Ou

$$R_s = 60 \left[ c + \ln(kL_s) - C_i(kL_s) + \frac{1}{2} \sin(kL_s) (S_i(2kL_s) - 2S_i(kL_s)) + \frac{1}{2} \cos(kL_s) \left( c + \ln kL_s + 2C_i(2kL_s) - 2C_i(kL_s) \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

Et

$$X_s = \left[ 2S_i(kL_s) + \cos(kL_s) (2S_i(kL_s) - S_i(2kL_s)) - \sin(kL_s) \left( 2C_i(kL_s) - C_i(2kL_s) - \ln kL_s + 2C_i(2kL_s) - 2C_i(kL_s) \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

Ou

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin x}{x} dx \quad (\text{II.17})$$

Et

$$C_i(x) = -\int_0^{\infty} \frac{\cos x}{x} dx \quad (\text{II.18})$$

La fente en forme de U est si mince qu'on peut la considérer comme la combinaison de trois fentes étroites. Deux fentes sont verticales et parallèles aux deux bords rayonnants du patch alors que la troisième est horizontale et perpendiculaire à ces bords.

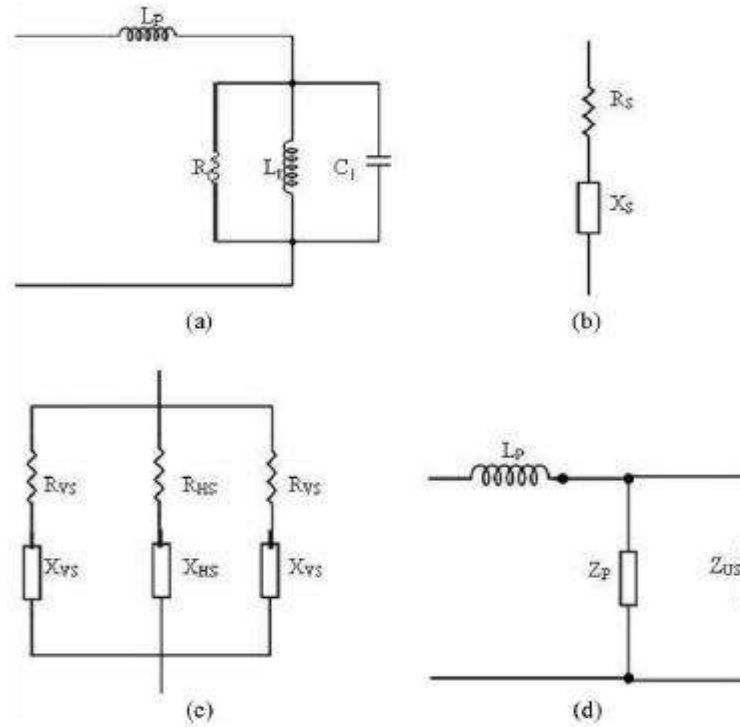


Figure II.4 : Circuit équivalent du : (a) patch, (b) fente, (c) Fente de forme U, (d) antenne proposée.

D'après les schémas équivalents présentés sur la figure II.4(c) et II.4(d), l'impédance d'une fente en forme de U est donnée par :

$$Z_U = \frac{Z_{UV} + 2Z_{UH}}{Z_{UV} Z_{UH}} \quad (\text{II.19})$$

Et l'impédance d'entrée de l'antenne proposé par :

$$Z_{in} = j\omega L_f + \frac{Z_p + Z_U}{Z_p Z_U}. \quad (\text{II.20})$$

Connaissant Z, on peut calculer le coefficient de transmission.

### II.2.2 Méthodes numériques

En réalité il n'y a pas de méthode analytique suffisamment précise pour prédire au mieux le comportement d'une structure. Souvent, pour des structures complexes (autre que des cercles s ou des cubes), elles montrent vite leurs limites. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode numérique, appropriée pour résoudre les problèmes électromagnétiques dans toute

sa complexité. Elles sont devenues une troisième voie de recherche entre la théorie et l'expérience.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyses numériques, les plus courantes étant les méthodes basées sur des équations différentielles. Parmi celles-ci, les plus utilisées sont la méthode des différences finies temporelles, la méthode des éléments finis (FEM) basé du fonctionnement du logiciel utilisé (Ansoft HFSS).

### II.2.2.1 Méthodes des éléments finis FEM

La méthode des éléments finis FEM est une méthode numérique qui s'applique aux dispositifs micro ondes de formes quelconques.

Cette méthode est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles, et notamment les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes dont la structure est assez complexe. Son principe consiste à :

- ✓ Faire une approximation finie d'un milieu infini en discrétisant la géométrie de la structure en plusieurs sous domaines élémentaires dont l'ensemble est appelé maillage (figure II.5). des triangles ou des rectangles pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels. (figure II.6).

Plus le maillage est fin, plus l'approximation de la solution sera bonne. en revanche la demande en ressources informatiques sera plus importante, donc le temps de calcul allongé. Un « bon » maillage est donc un maillage que :

- Permet d'avoir des résultats proches de la réalité.
- Permet au calcul de tourner avec les moyens disponibles (capacités du système informatique), et en un temps compatible avec la durée du projet.



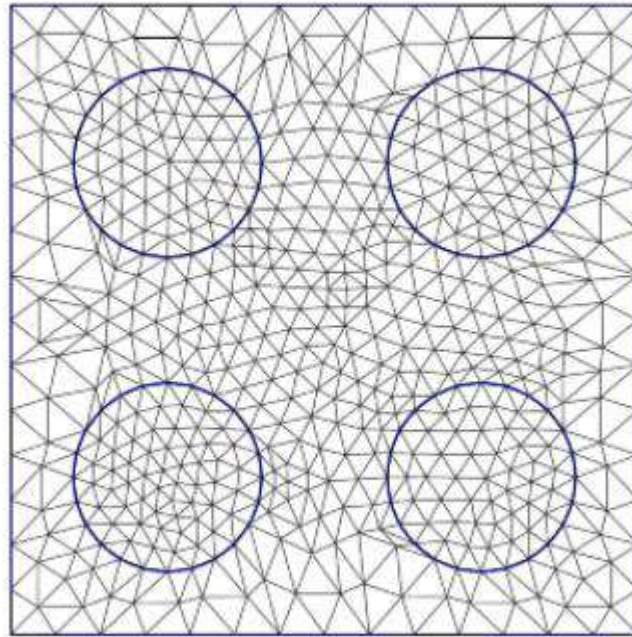


Figure II 5: Maillage bidimensionnel d'une structure comportant des sphères.

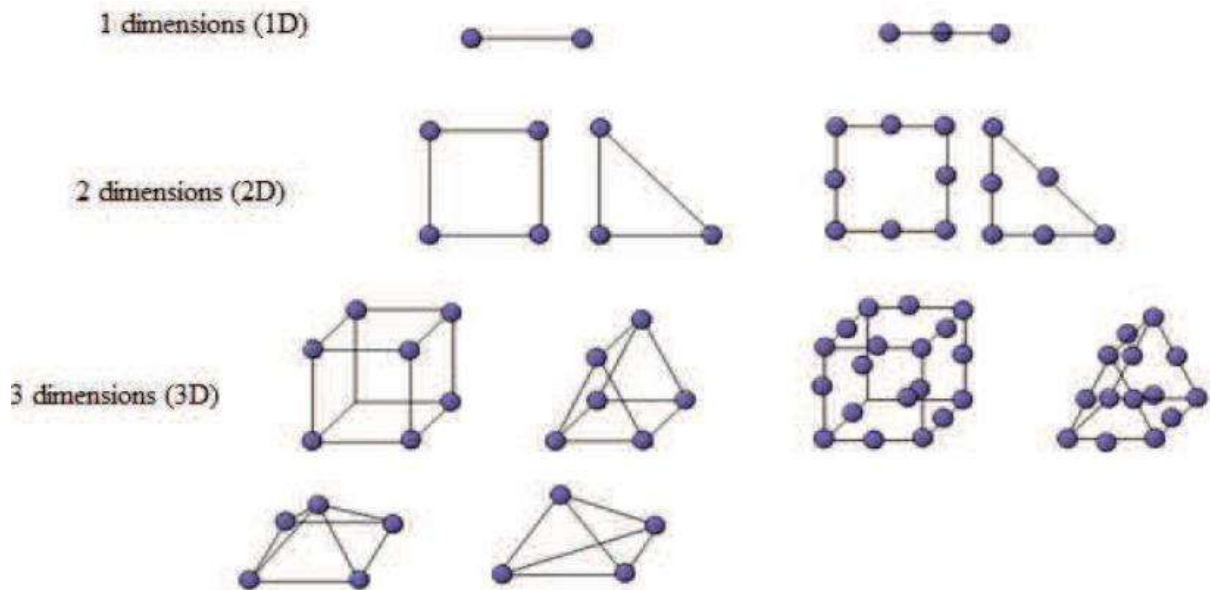


Figure II.6: Quelques types d'éléments

- ✓ Les champs locaux  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont déterminés dans chaque sous domaine à partir des équations différentielles suivantes:

$$\circ \quad \vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - K_0^2 \epsilon_r \vec{E}(\vec{r}) = \vec{0} \quad (\text{II.16})$$

$$\quad \blacksquare \quad \vec{H}(\vec{r}) = -\frac{1}{j\omega\mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) \quad (\text{II.17})$$

## Chapitre II : Les méthodes d'analyse des antennes

A chacun de ces éléments géométriques est associé un certain nombre de nœuds aux quelles sont attribuées les grandeurs des champs continus  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont une approximation continue de la solution du problème.

- ✓ Le résultat de cette étape sera donc un ensemble d'équations linéaires (matricielles) correspondant aux vecteurs champs électrique  $\vec{E}_i$  et magnétique  $\vec{H}_i$  .
- ✓ Les équations linéaires (matricielle) doivent être résolues. Ainsi, différentes méthodes de résolution des systèmes linaires peuvent être appliquées, les critères de choix sont souvent [24]:
  - Le temps de calcul nécessaire,
  - Le degré de précision des résultats obtenus,
  - La convergence et la stabilité du calcul numérique.

Les méthodes de résolution sont diverses mais les plus répandues sont :

- Les méthodes itératives : *Gauss-Seidel*, *Jacobi*, algorithme du gradient conjugué...etc.
- La méthode directe de décomposition LU.

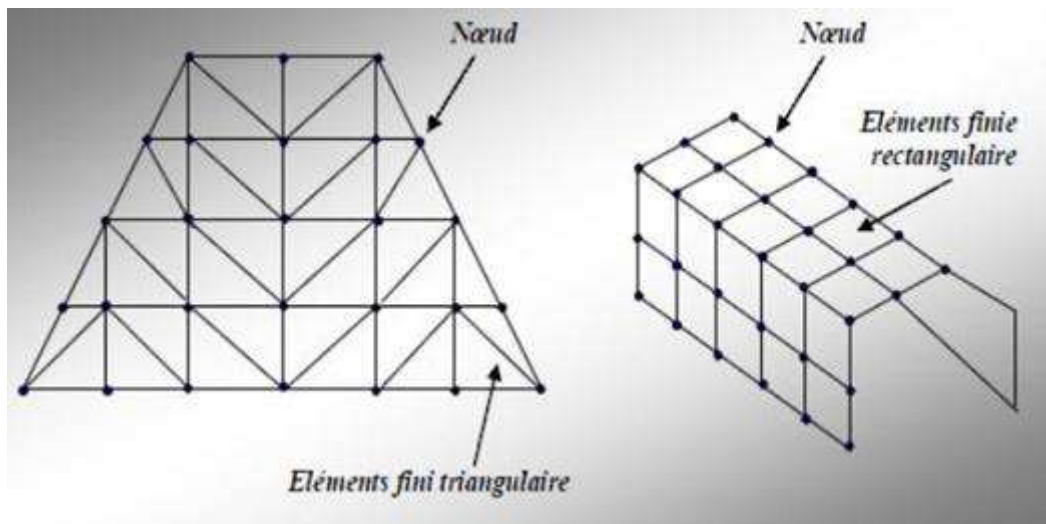


Figure II.7 : Modélisation par éléments finis de structures

### II.3 Le logiciel HFSS

Pour prédire les performances électromagnétiques de la structure avec précision, le recours à la simulation électromagnétique est la solution indispensable. Ainsi, il s'avère incontournable de bien choisir un logiciel adéquat, permettant la prise en compte de tous les phénomènes physiques importants, dans le but de réduire les erreurs de modélisation.

Actuellement Avec l'évolution rapide des moyens informatiques, on peut trouver sur le marché plusieurs logiciels de calcul scientifique : (ANSYS, KeySight, AWR, CST, EMworks, etc.)

L'Ansoft HFSS est un logiciel commercial, tridimensionnel et d'éléments finis. Il bénéficie d'interface graphique conviviale et puissante, qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure tout en permettant une simulation 2D et 3D. Il permet d'obtenir :

- ✚ les paramètres de réflexion / transmission (paramètres S),
- ✚ le champ proche, et le diagramme de rayonnement,
- ✚ l'impédance et les constantes de propagation des différents modes.

#### II.3.1 Etapes de simulation par HFSS

Son fonctionnement peut se résumer en :

1. La sélection de l'environnement dans lequel la structure sera créée. il est question de sélectionner les unités, le type de solution .....
2. Schématiser la structure en représentant les géométries des différents objets, à partir de formes de bases (cubes, sphères, cônes, etc.), de quelques outils de transformations géométriques (translation, rotation, duplication, intersection, etc.) et avec les dimensions appropriés.
3. Spécification propriétés physiques pour chaque objet : choix du matériau, permittivité, pertes diélectriques, conductivité .
4. Spécification des conditions aux limites : La résolution des équations d'ondes dans une structure quelconque exige la spécification des conditions aux frontières. Il existe un grand nombre de conditions aux limites. dans le cas des antennes planaires imprimées, des frontières absorbantes sont utilisées qui permettent une propagation infiniment lointaine dans l'espace (radiation),. de telle sorte que toutes les faces accèdent à l'espace libre, excepté celle où sera défini le plan de masse, la face opposée au patch.

5. Manière d'exciter la structure, consiste à injecter la puissance sous forme d'onde électromagnétique à travers la porte d'alimentation déjà définie.
6. Configuration des paramètres de simulation : Fréquence(s) de maillage, paramètres de convergence.
7. Analyse des solutions à 1 ou plusieurs fréquences : Après avoir vérifié la conformité de la structure aux exigences du HFSS, les conditions aux frontières et l'excitation, la simulation sera prête à être lancée. La durée de cette simulation dépend essentiellement de :
  - La vitesse du calculateur (ordinateur) utilisé.
  - La complexité de la structure (volume, dimensions etc).
  - La bande de fréquence de l'analyse.
8. Visualisation des résultats : Le diagramme de rayonnement dans les plans E et H. paramètres S (+ paramètres z, y etc).
9. Discussion et exploitation des résultats par l'utilisateur :

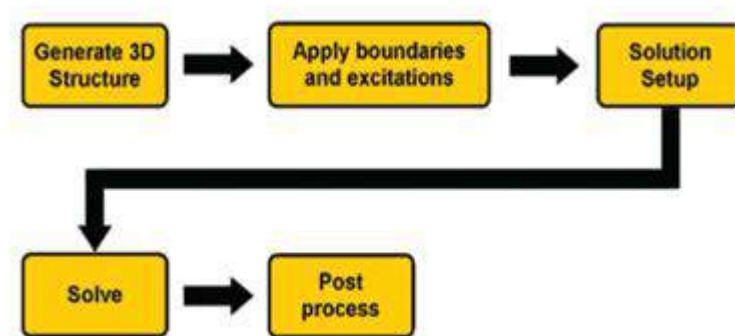


Figure II.8 : Etapes principales d'une simulation complète sous HFSS [25].

### II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes d'analyse et de modélisation des antennes planaires, soient les méthodes analytiques ou les méthodes numériques. Les modèles analytiques sont intuitives, simples, basés sur certaines hypothèses physiques, alors que les méthodes numériques sont rigoureuses, précises et permettent la modélisation de n'importe quels types d'antennes patches.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté la méthode des éléments finis ainsi que l'outil de simulation que nous avons utilisé : le logiciel HFSS®.

**Chapitre III**  
**Conception**  
**&**  
**Simulation**

### III.1 Introduction

Après la présentation des différentes méthodes d'analyses de l'antenne patch, qui ont fait objet du chapitre précédent, on s'est consacré dans ce troisième chapitre à la conception et à l'étude d'une antenne imprimée multi-bandes inspirée des techniques de fente.

Un premier travail sur une antenne planaire avec fente sera alors proposé. cette dernière est développée à partir d'une antenne patch résonant à une fréquence de 2,45 Ghz, par la modification de la géométrie de l'élément rayonnant en insérant une fente en forme de U.

Nous essayons ensuite de mener une étude paramétrique pour comprendre les effets des divers paramètres afin de les optimiser et d'aboutir à une structure finale efficace. Ceci est fait à l'aide de l'outil de simulation électromagnétique "HFSS". Une étude analytique basée sur les lignes de transmission a été aussi proposé.

### III.2 Conception de l'antenne

Généralement la conception d'une antenne passe par des simulations qui permettent de tester plusieurs solutions et les optimiser facilement. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous permettre de rapprocher des la réalisation réelle d'une antenne. Lorsque l'antenne répond au cahier des charges, une phase expérimentale est alors nécessaire pour valider les résultats des simulations. Pour cela, Il est donc nécessaire d'utiliser un logiciel approprié pour résoudre les problèmes électromagnétiques dans toute sa complexité.

Durant la conception, nous avons suivi une démarche qui consiste en premier lieu à concevoir une antenne patch résonant à une fréquence de 2,45 Ghz et à étudier ses différentes caractéristiques (coefficient de réflexion, gain ...).

#### III.2.1 Antenne patch de référence

##### III.2.1.1 Géométrie de l'antenne

L'antenne de référence représentée sur la Figure III.1, est une antenne patch rectangulaire, fonctionnant à 2.45Ghz, utilisant un substrat de type FR4 d'épaisseur 1.2 mm (h), et de permittivité relative  $\epsilon_r = 4.4$ . Elle est alimentée par une sonde coaxiale d'impédance caractéristique  $50 \Omega$ . La distance du point d'alimentation par rapport au bord de l'antenne est de  $(W_f, L_f)$ .

## Chapitre III : Conception et simulation

Un modèle de premier ordre pour dimensionner l'antenne consiste à utiliser la théorie des lignes de transmission, en intégrant les équations dans le paragraphe (II.2.1.1) sous l'environnement MATLAB (voir annexe A). Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau III.1

Tableau III.1: dimensions du patch de référence.

$W_S$	$L_S$	$W_P$	$L_P$	$h$	$(w_f, l_f)$
40mm	50mm	29.4mm	39.4mm	1.2mm	(-5.27,0) mm

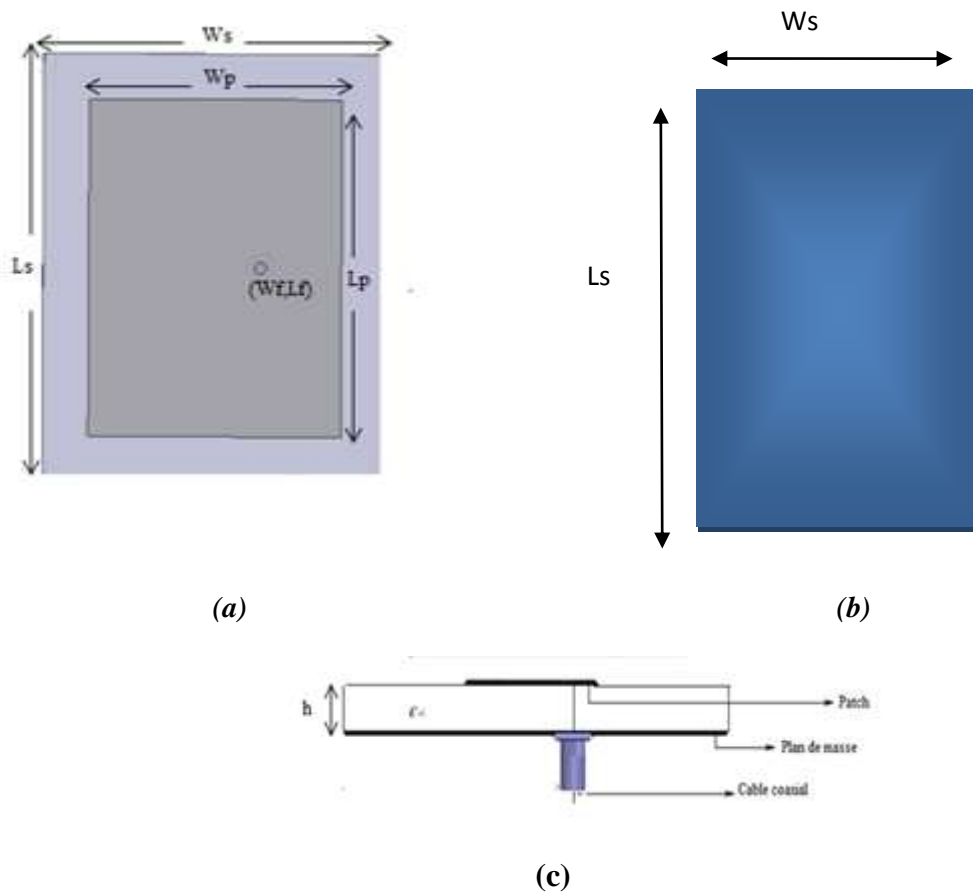


Figure III.1: Géométrie de l'antenne patch : (a) Vue de dessus par devant, (b) Vue de dessous, (c) vue profil latéral.

### III.2.1.2 Simulation & Resultats

Les Figures III.2 et III.3 donnent les résultats obtenus par simulation numérique et analytique respectivement du coefficient de réflexion  $S_{11}$ .

Théoriquement, l'antenne présente une adaptation de -88 dB à 2.5 GHz, une bande passante de l'ordre de 1.3GHz autour de cette fréquence, alors que numériquement, elle est de -18.14dB à 2.33 GHz et une bande passante de 0.03GHz.

Nous constatons qu'il ya un décalage entre les fréquences de résonnances, les amplitudes et la bande passante des résultats numérique et analytique.

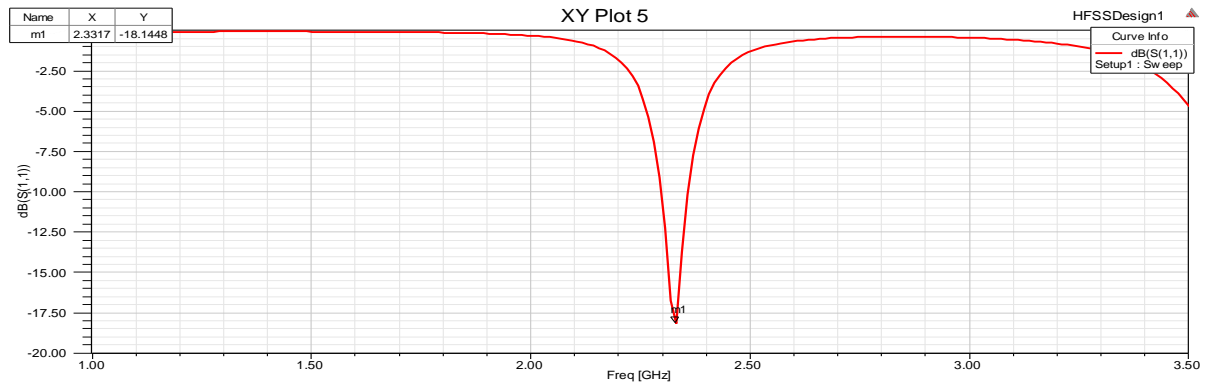


Figure III.2: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  (numériquement).

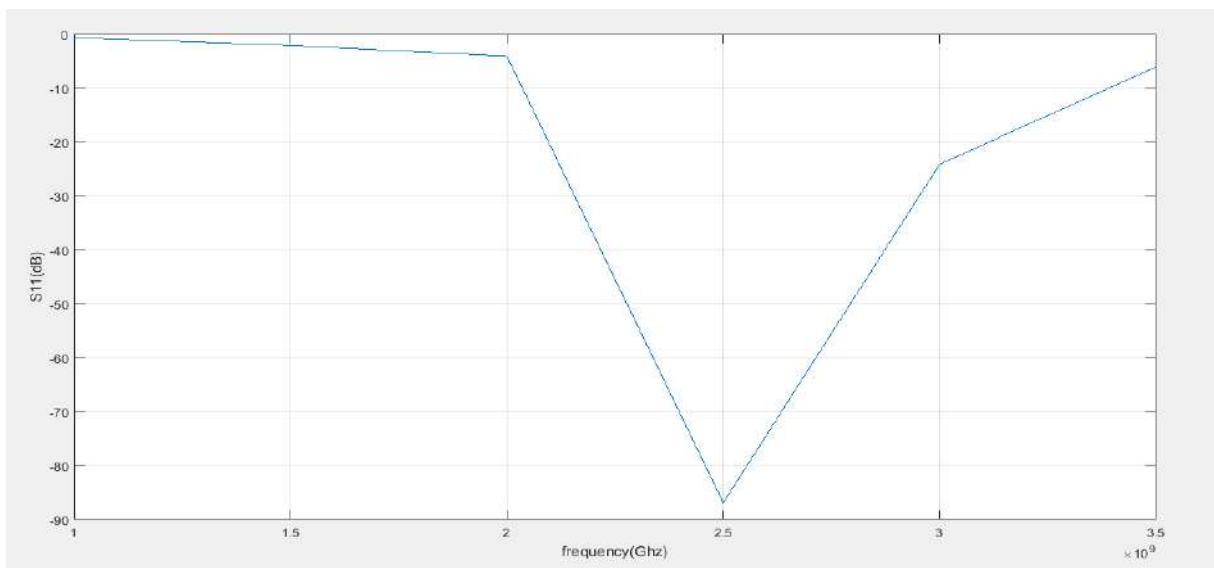


Figure III.3: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  (Théoriquement).



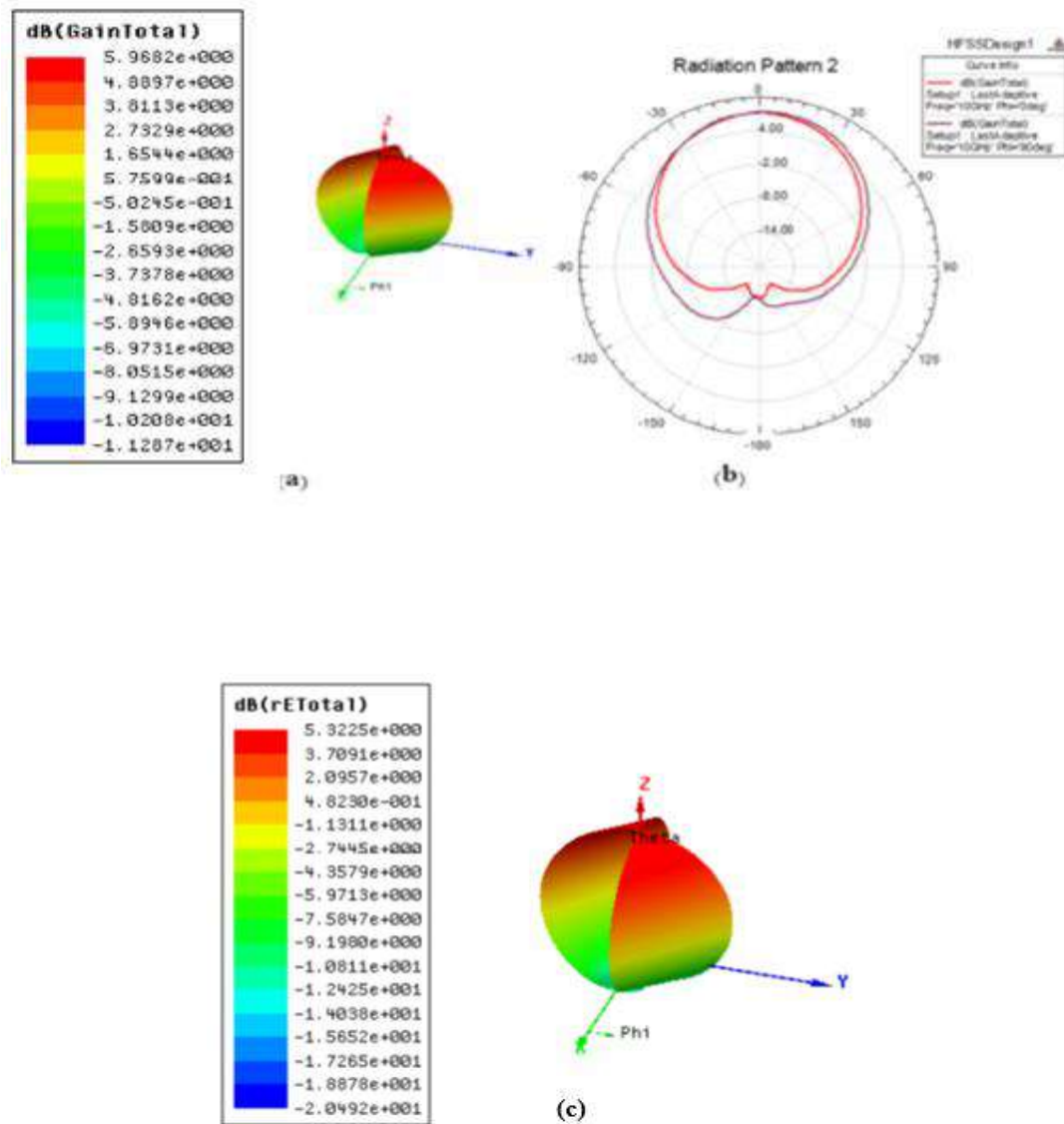


Figure III.4 : Diagramme de rayonnement (a) 3D (b) 2D (c) directivité

### III.2.2 Antenne Multi bande à fente de forme U

L'antenne patch proposée est développée à partir du patch de référence étudié précédemment, ou on a inséré une fente de forme U.

Les dimensions de la structure proposée sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.2: dimensions de la structure proposée d'une antenne à fente de forme U.

$L_p$	$W_p$	Ls1	Ws1	Wn	S
39.4 mm	29.4 mm	15 mm	18 mm	4 mm	1.2 mm

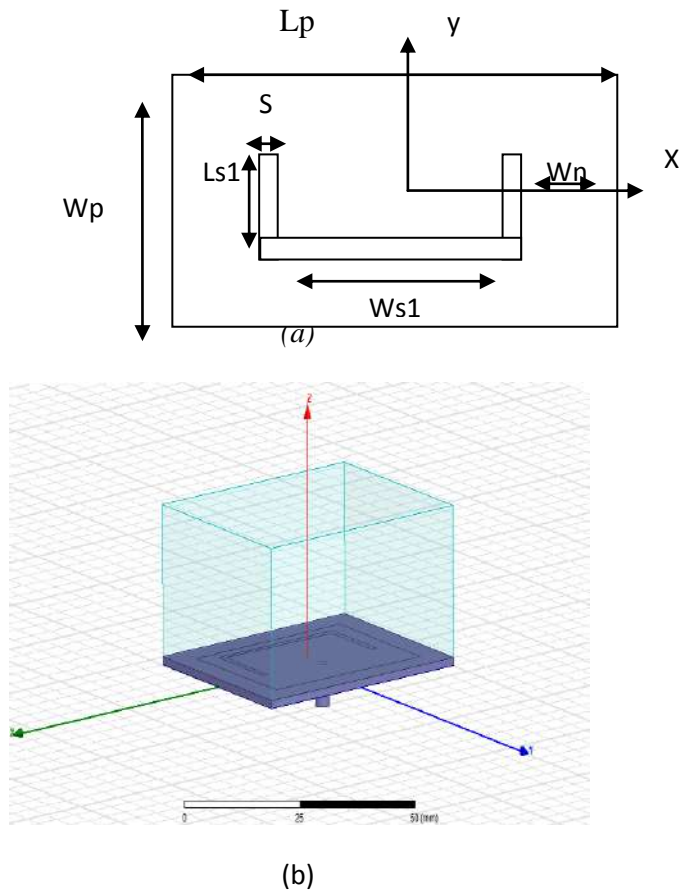


Figure III.5 : Géométrie et dimension du patch inférieur (a) : Vue de dessus, (b) : 3D par HFSS

### III.2.2.1 Résultats de Simulations

Dans cette section nous allons présenter les différents résultats des caractéristiques de l'antenne proposée en passant par une phase d'optimisation des performances de l'antenne.

#### III.2.2.1.1 Étude paramétrique

Généralement, les antennes sont caractérisées en considérant d'une part les propriétés liées au circuit électrique qui leur est associé (impédance, coefficient de réflexion) et d'autre part celles liées au rayonnement électromagnétique (diagramme de rayonnement, directivité, gain).

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 une antenne performante et facile à réaliser.

### ➤ Influence du Matériau du substrat

Le but du matériau du substrat d'antenne est principalement à fournir un support mécanique pour les éléments rayonnants et de maintenir l'espacement de précision requis entre le patch et son plan de masse. Le choix du matériau approprié pour une antenne multi bande devrait être basé sur la taille du patch souhaité, la bande passante, la perte d'insertion, la stabilité thermique, le coût, etc. Pour les applications commerciales, le coût est l'un des critères les plus importants dans la détermination du type de substrat.

Pour caractériser l'influence du substrat sur la fréquence de résonance et la bande passante de l'antenne, nous avons tracé les variations du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence pour différents type de matériaux.

#### ❖ 1<sup>er</sup> cas : Rogers RT 5880

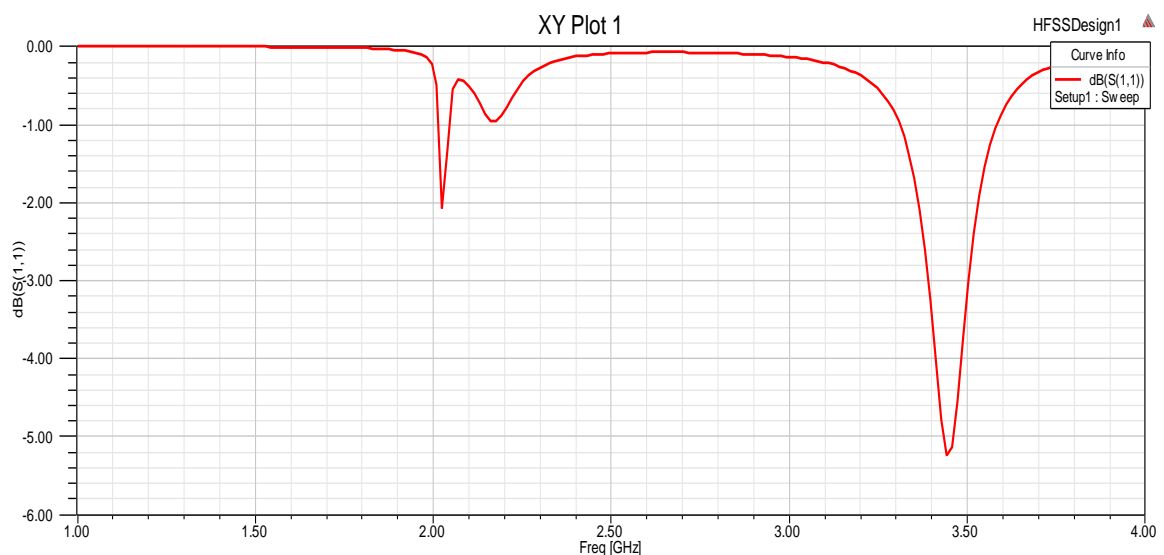


Figure III.6: Amplitude du coefficient de réflexion S11 (Substrat Roger RT 5880  $\epsilon_r = 2.2$ ).

#### ❖ 2<sup>eme</sup> cas : Rogers RT 6002

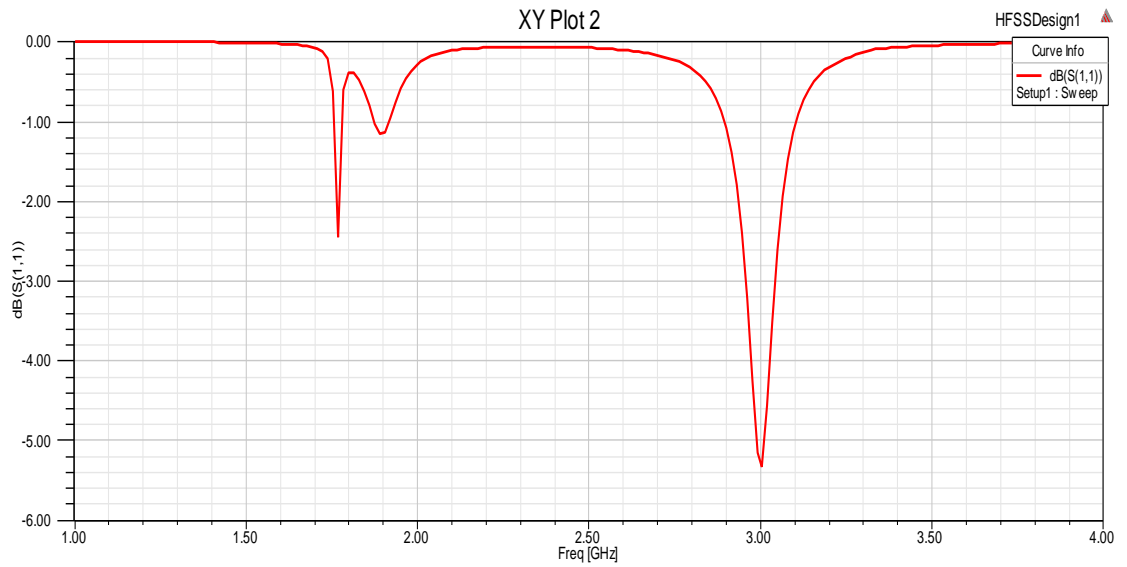


Figure III. 7: Amplitude du coefficient de réflexion  $S_{11}$  (Substrat RT 6002  $\epsilon_r = 2.94$ ).

### ❖ 3<sup>eme</sup> cas : Rogers RO 3003(tm)

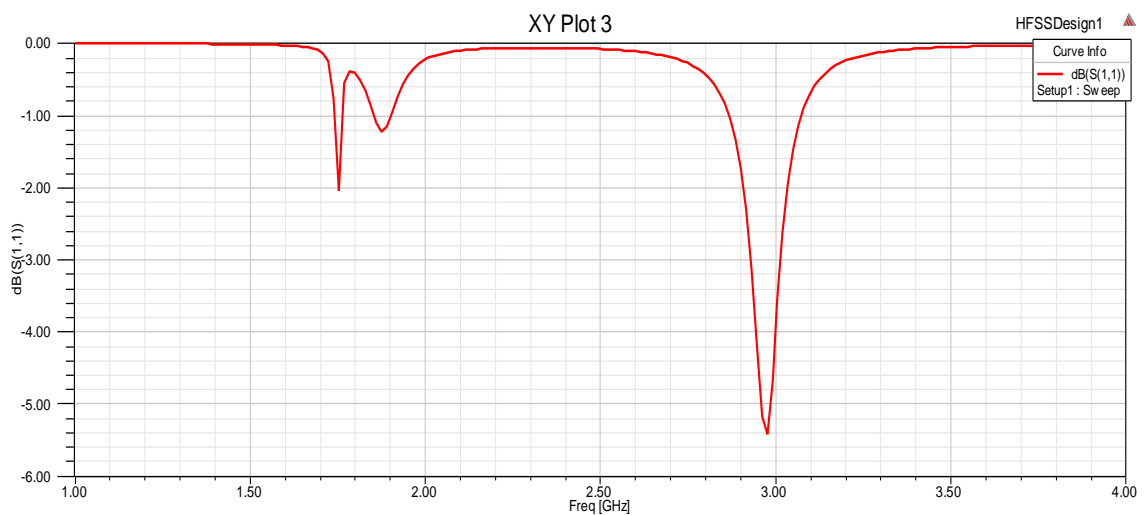


Figure III. 8: Amplitude du coefficient de réflexion  $S_{11}$  (Substrat RO3003  $\epsilon_r = 3$ ).

### ❖ 4<sup>eme</sup> cas : le substrat FR4\_expoy

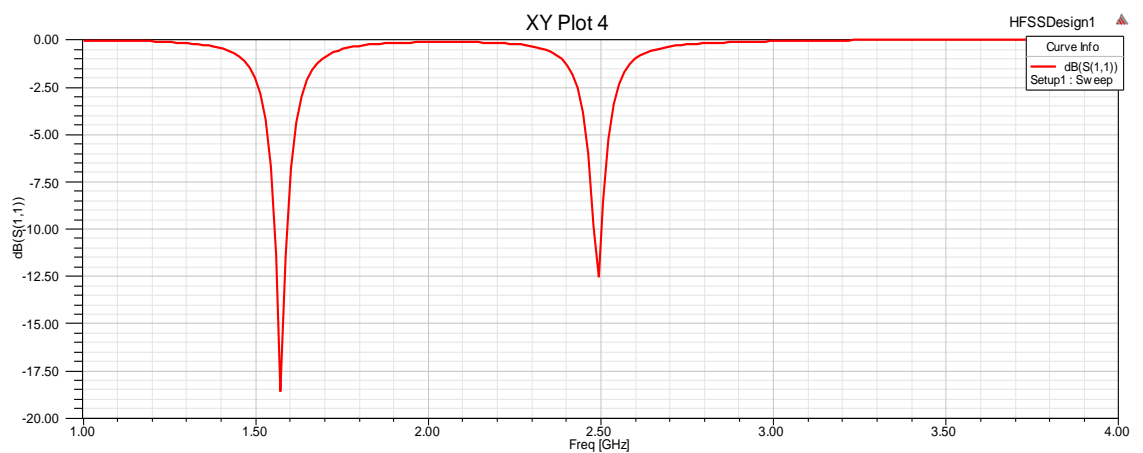


Figure III.9: Amplitude du coefficient de réflexion  $S_{11}$  ( $FR4\_expoy\epsilon_r = 4.4$ ).

L'antenne est bien adaptée, pour des valeurs maximale de  $S_{11} < -10$  dB.

D'après les figures ci dessus , on remarque que l'antenne n'est bien adaptée pour les deux fréquences, que dans le cas du substrat type epoxy FR-4(voir annexe B). L'antenne est bien adaptée, pour des valeurs maximale de  $S_{11} < -10$  dB.

le substrat type epoxy FR-4 présente un bon rapport prix/qualité, de ce fait, notre choix va se porter sur ce dernier dans la suite de notre étude.

### ➤ Influence de la hauteur des substrats

Afin d'étudier l'influence de la hauteur des substrats sur les caractéristiques de l'antenne, nous allons tracer les coefficients de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de  $h$ .

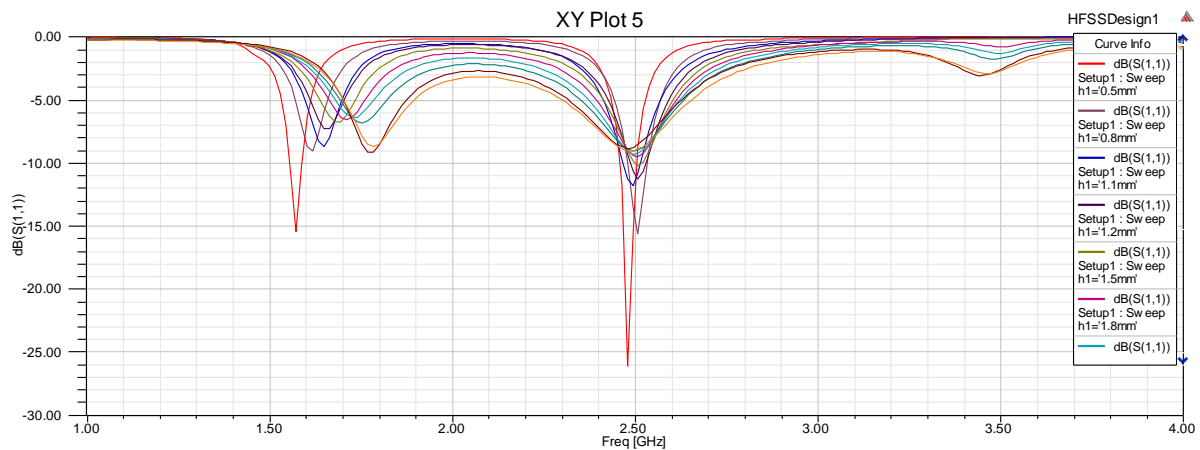


Figure III.10: Variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de  $h$ .

La Figure III.10 montre les résultats de la simulation du paramètre  $S_{11}$  de l'antenne pour différentes valeurs de  $h$ , on peut constater clairement qu'on a une bonne adaptation pour une hauteur  $h= 0.5$ mm.

## ➤ Influence de la position du point d'alimentation

Le choix de la position du point d'alimentation est un facteur très important pour optimiser l'adaptation de l'antenne. La figure représente la variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs du point d'alimentation.

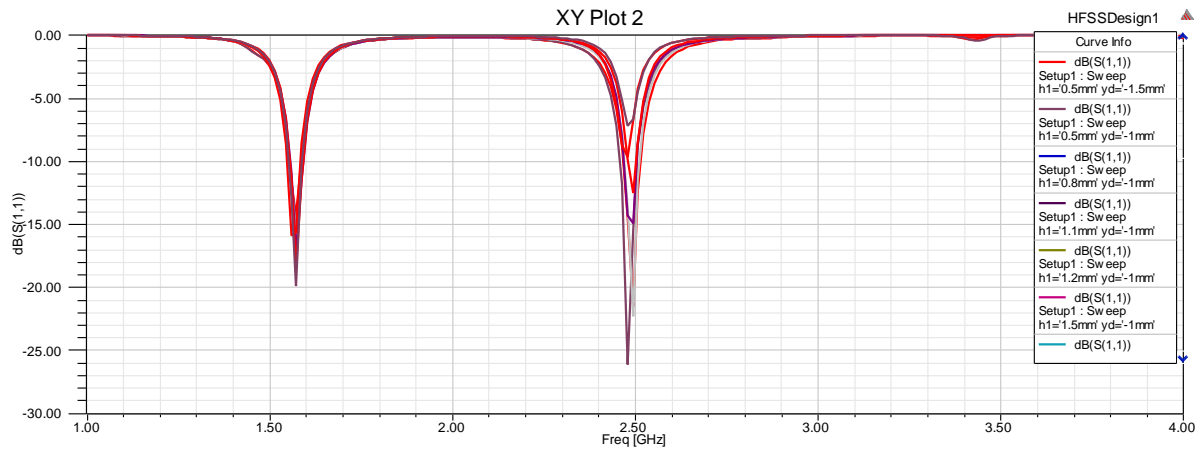


Figure III.11 : Variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la position du point d'alimentation.

En analysant les courbes de la Figure III.11, on remarque que pour des variations de la position d'alimentation selon l'axe  $y$  allant de  $y=1.5$ mm à  $-1.5$ mm, nous obtenons une meilleure adaptation concernant les deux fréquences pour une position  $y=-1$ mm.

## ➤ Influence de la Longueur de la fente latérale $Ls1$

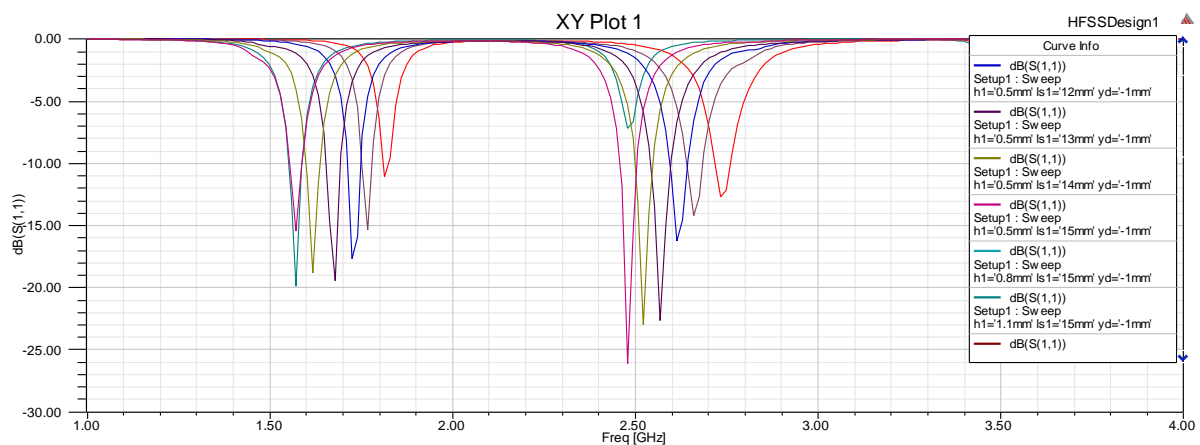


Figure III.12: Variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la Longueur de la fente latérale de  $Ls1$ .

En étudiant l'influence de la Longueur de la fente latérale  $Ls1$ , en faisant varier cette dernière selon l'axe  $y$  allant de  $y=10$ mm à 16mm. Comme montré sur les courbes de la

figure III.12, les résultats obtenus indiquent une meilleure adaptation concernant les deux fréquences avec pour une longueur  $y=15\text{mm}$ .

### ➤ Influence de la largeur de la fente S

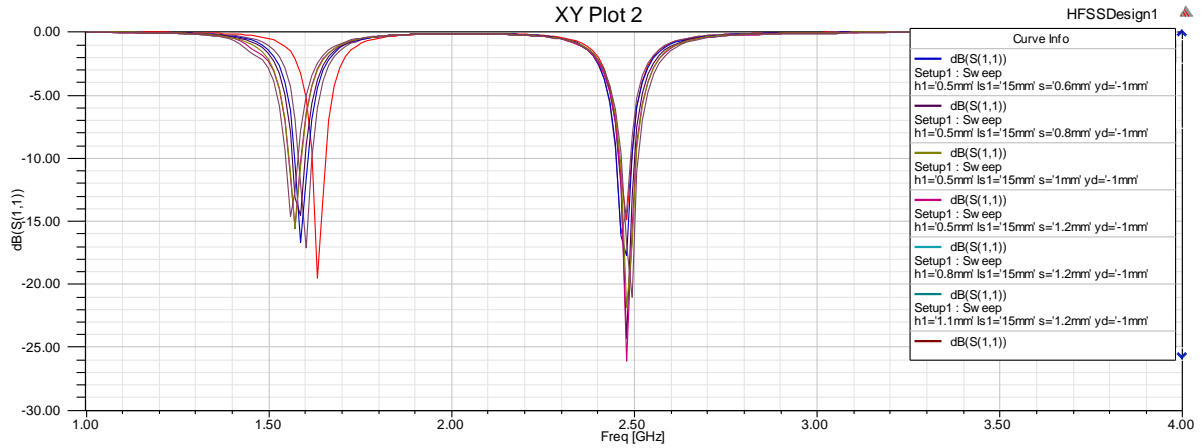


Figure III.13: Variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la largeur de la fente S.

Sur la Figure III.13, On présente les résultats de simulation de l'effet de la largeur de la fente de S. On constate que pour des variations de la largeur de la fente de S allant de 0.2mm à 1.4mm, nous obtenons une meilleure adaptation concernant les deux fréquences pour une largeur de fente  $S=1.2\text{mm}$ .

## III.3 Performance de l'antenne optimisée

Dans cette section, nous présentons les résultats de la simulation de l'antenne optimisée : Le type de matériau du substrat FR4 ( $\epsilon_r = 4.4$ ),  $h=0.5\text{mm}$ ,  $L_f=-1\text{mm}$ ,  $L_{s1}=15\text{mm}$ ,  $S1.2\text{mm}$ .

### III.3.1 Le coefficient de réflexion

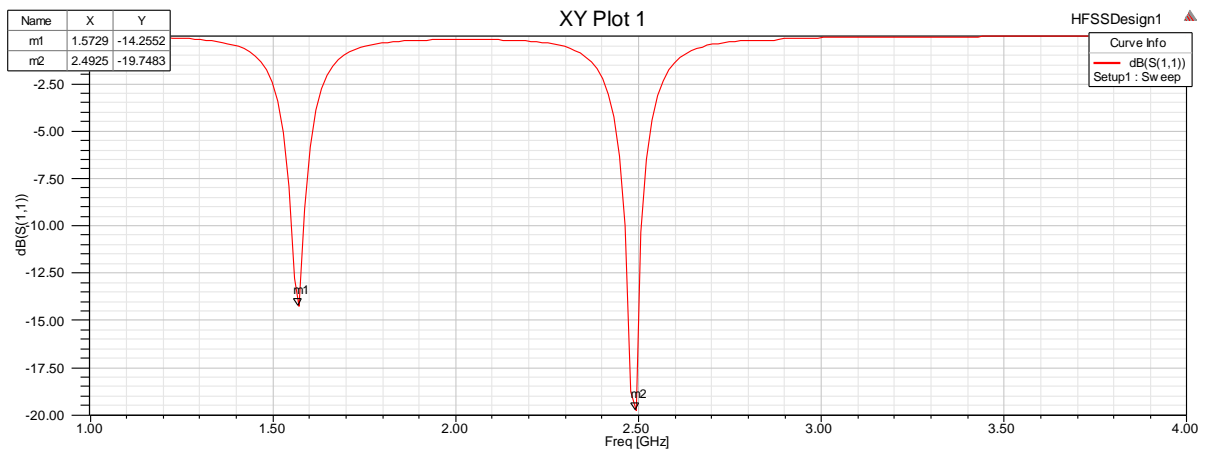


Figure III.14: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  (numériquement) d'une antenne multi bande de fente U.

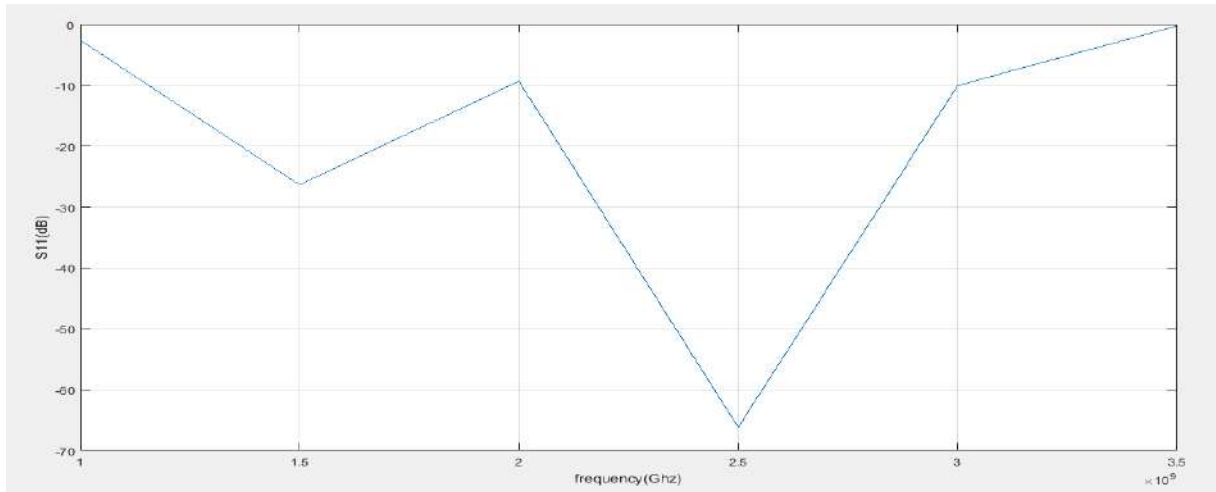
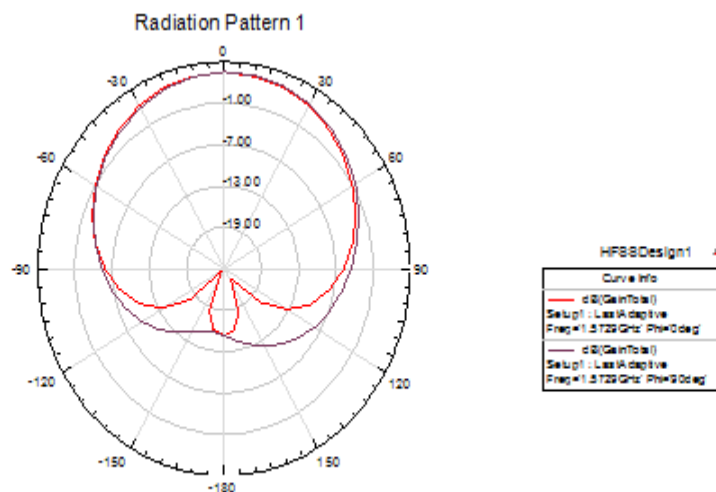


Figure III.15: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  (analytique) d'une antenne multi bande de fente U.

Les résultats numérique et théorique du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence sont représentés sur la figure (III.14) et sur la figure (III.15) respectivement. Nous remarquons la présence de deux fréquences de résonance : la première fréquence (basse) est due à la résonance du patch, alors que la deuxième (haute) correspond à la résonance de la fente en forme de U. On peut constater aussi que l'ajout de cette fente engendre une diminution de la fréquence de résonance du patch référence, elle passe de 2.49 GHz à 1.57 GHz.

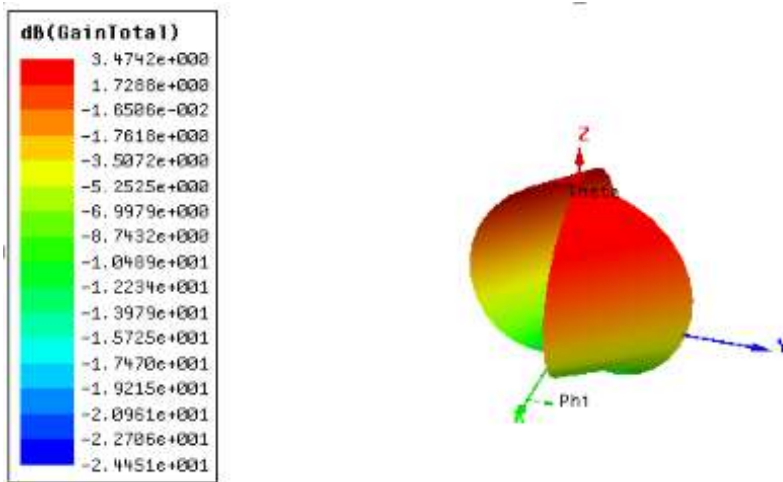
Les figures ci-dessous représentent le diagramme de rayonnement de l'antenne multi bande dans le **plan E** et dans le **plan H** aux fréquences : 2.49GHz, 1.57GHz. De même une représentation du gain en 2D et 3D.

### La fréquence 1.57 GHz



(a)

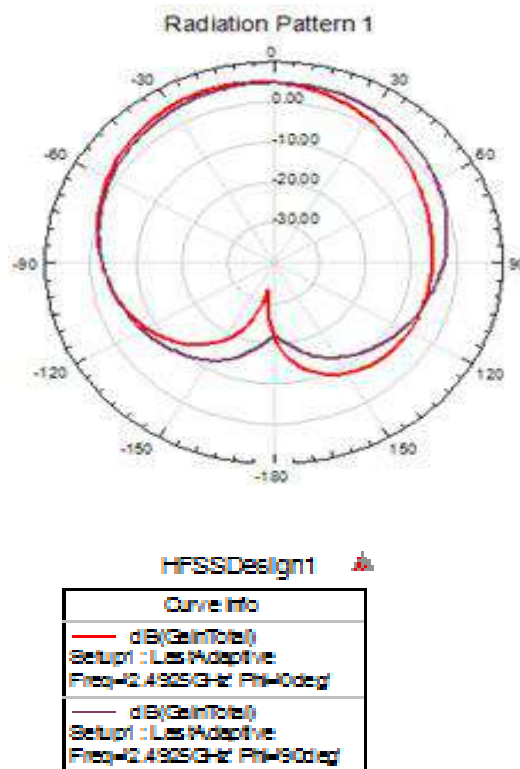




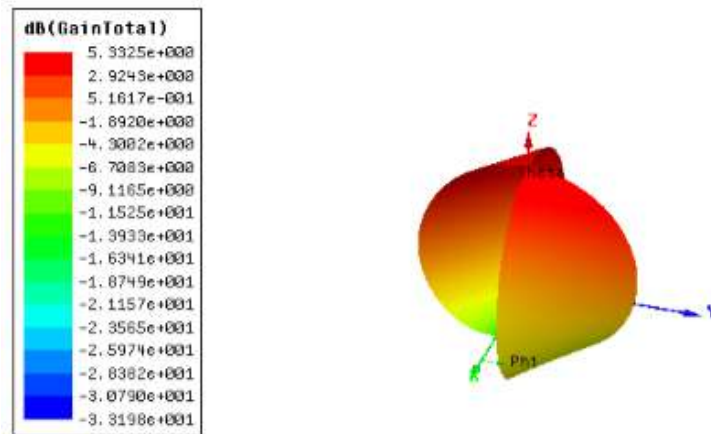
(b)

Figure III.16 : Diagramme de rayonnement pour  $F=1,57\text{GHz}$  : a) en 2D et b) en 3D.

### ✚ La fréquence 2.49GHz



(a)



(b)

Figure III.17: Diagramme de rayonnement pour  $F=2.49\text{Ghz}$  : a) en 2D et b) en 3D.

Pour la fréquence de 1,57GHz et 2.49GHz, nous avons remarqué que l'antenne se comporte de façon directionnelle. Le gain est en général assez modeste mais acceptable.

### III.4. Conclusion

Ce chapitre est une représentation de la conception et la simulation d'une antenne multifréquence, inspirée de la technique de fente. Le logiciel HFSS et le modèle électrique nous ont permis de simuler les performances de l'antenne. Les caractéristiques obtenues pour l'antenne proposée (Bande passante, diagramme de rayonnement) sont satisfaisantes et confirment son aptitude dans des systèmes de communication multi bande. Nous concluons que le type du substrat, son épaisseur, la position de la ligne d'alimentation (le câble coaxial) influent considérablement sur les performances de l'antenne (coefficient de réflexion, bande passante et le rayonnement).



# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale & Perspectives

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du développement et l'amélioration des performances des nouvelles configurations d'antennes multi bandes. Le but de ce travail concerne l'analyse, l'optimisation et la conception de ce type d'antennes. en changeant la forme de l'élément rayonnant, nous avons pu obtenir une structure multifréquence, compacte et donc facilement intégrables dans les dispositifs de communication.

Toutes les antennes sont caractérisées par des propriétés communes. Une exposition de ces paramètres de base, comme le diagramme de rayonnement, la présentation de l'antenne par un quadripôle, l'introduction aux paramètres S...etc ont été présenté en premier lieu, suivi d'un état de l'art de la technologie multi bande avec ses principales caractéristiques et applications.

Après on a présenté les différentes méthodes de modélisation des antennes, soient les méthodes numériques (la méthode des éléments finis) ou les méthodes analytiques (ligne de transmission et Circuit électrique équivalent) intégrées respectivement dans les logiciels de simulation HFSS et MATLAB.

Ensuite on est passé à la conception de la structure proposée par simulation numérique et analytique. Nous avons choisi une démarche qui consiste en premier lieu à concevoir une antenne patch rectangulaire et à étudier ses différentes caractéristiques. En deuxième lieu, une antenne basée sur la modification de la géométrie de l'élément rayonnant par insertion d'une fente en forme de U a été proposé.

La stratégie de simulation a été basée sur le dimensionnement de l'antenne à l'aide de Matlab, puis l'intégration des paramètres structuraux obtenus de l'antenne sous l'environnement "HFSS".L'étude de l'influence de quelques paramètres définissant la géométrie de l'antenne, la position de l'alimentation sur les performances des antennes imprimées multi bandes a été aussi effectuée.

Les caractéristiques obtenues pour l'antenne proposée (Bande passante, diagramme de rayonnement) confirment son aptitude dans des systèmes de communication multi-bande .

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées , tout d'abord, il parait intéressant de continuer les recherches sur les antennes imprimées en optimisant ces structures.Egalement, pour valider les résultats d'antennes simulées, il est serai intéressant de réaliser la structure proposée.

### Références bibliographique

- [1] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, 2005, John Wiley & Sons, INC
- [2] A. Kamil, Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz), grade du Maitre ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 2011..
- [3] A.BENOMAR, Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications, Docteur de l'Universite de Tlemcen et Docteur de l'Universite de limoges, 2015.
- [4] L. CHUSSEAU, «Param`etres S - Antennes,» Montpellier, 2006
- [5] A. Boyer, ANTENNES -SUPPORT DE COURS, in, 2011. Juiillet 2014.
- [6] N. Fortino, Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes Ultra-Large-Bande impulsionnels, in, Université Nice Sophia Antipolis, 2006.
- [7] Z. K. DJALAL, «ETUDE ET CONCEPTION ANTENNE ULTRA LARGE BANDE,» tlemcen, 2011.
- [8] S. Somia, Etude et caractérisation d'antenne imprimées pour système ULB Thème Magister, université Biskra, 2015.
- [9] D. M. P. & D. H., The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays..
- [10] A. K. Bhattacharrya, , ,,,Long rectangular patch antenna with a single feed,IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 38 , N°. 7, pp. 987-993,, July 1990.
- [11] M. K. OMAR, «Conception et modélisation d'une antenne pourr les communications ULB,» oran, 2013.
- [12] Yazid Hmeydi, «Réalisation et mise au point d'un système de brouillage GSM900-1800 », Projet de fin d'études, Institut Supérieur des Etudes Technologique en Communication de Tunis. (2009).
- [13] Y. S. Liu, J. S. Sun, R. H. Lu, Y. J. Lee, "Newmultiband printed meander antenna for wireless applications," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 47, no. 6, Dec. 2005, pp. 539-543.
- [14] Debatosh Guha, Senior Member, IEEE, Sujoy Biswas, Manotosh Biswas, Jawad Y. Siddiqui, Member, IEEE, and Yahia M. M. Antar, Fellow, IEEE," Concentric RingShaped Defected Ground Structures for Microstrip Applications" ,IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 5, 2006. .
- [15] P. Bafrooei, L. Shafai, «Characteristics of single and double layer microstrip square antennas », IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 47, NO. 10, October1999.

## Références bibliographique

---

- [16] Sami hebib, « Nouvelle topologie d'antennes multi-bandes pour applications spatiales », Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III- Paul Sabatier-2008.
- [17] Hafedh Ben IBRAHIM GAHA, « Analyse et Conception des Antennes Fractales Applications aux Télécommunications Large Bande », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (France) et del'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis de l'Université EL-MANAR (Tunisie), Spécialité : Micro-ondes, Electromagnétiques et Optoélectronique/Communication (Juillet 2007).
- [18] P.CIAIS, R. STARAJ, G. KOSSIAVAS, C. LUXEY , « Antenne Miniature Quadri bande GSM / DCS / PCS / UMTS », Article de l'université Nice-Sophia Antipolis / UMR-CNRS 6071 Turin, Italy, September 8-12, 2003.
- [19] Mélusine Pigeon, « Etude et réalisation d'antennes ultra-compactes à base des métamatériaux Application à la réalisation d'une antenne GNSS miniature », thèse doctorat de l'Université de TOULOUSE, 28 novembre 2011.
- [20] M. GUENNACH, Conception d'une antenne''PIFA''multi-bandes pour applications sans fil,2016
- [21] M. Diblanc, Développement du concept de l'antenne à résonateur BIE pour la génération de la polarisation circulaire, in, Limoges, 2006.
- [22] P. Bhartia, I. Bahl, R. Garg, A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook (Artech House Antennas and Propagation Library), (2000).
- [23] J.A. Ansari, P. Singh, S.K. Dubey, R.U. Khan, B.R. Vishvakarma, H-shaped stacked patch antenna for dual band operation, Progress In Electromagnetics Research B, 5 (2008) 291-302.
- [24] "User's guide HFSS", Ansoft Corporation. 2008.
- [25] Ansoft, LLC, 225 West Station Square Drive, Suite 200, Pittsburgh, PA 15219.  
An Introduction to HFSS: An Introduction to HFSS : Fundamental Principles, Concepts, and Use, 2009.

## Annexe A

### Calcul des dimensions théoriques du patch

Pour simplifier et précisé le calcul on va poser les équations précédentes sur un logiciel de calcul(MATLAB),

```
function[] = calcul_Antenne
global k0 W L
f = input(' Donnez le fréquence de Résonance f on Ghz: ');
Er = input ( ' donnez diélectrique constant de substrat Er ');
h = input('donnez la hauteur de substrat h in mm: ');
h=h/1000;
f=f*1e9;
c = 3e8;
k0=2*pi*f/c;
Rin = 50;
W = ( c / ( 2 * f ) ) * ( ( 2 / ( Er + 1 ) ) ^0.5);
E_eff = (Er+1)/2 + (( Er -1 )/2)*(1/(sqrt(1+(12*(h/W)))));
L_eff = c/(2*f*sqrt(E_eff));
a1 = ( E_eff + 0.3 ) * ( ( W / h ) + 0.264 );
a2 = ( E_eff - 0.258 ) * ( ( W / h ) + 0.8 );
delta_L = (0.412 * ( a1 / a2 )) * h;
L = L_eff - 2*delta_L;
t = 0:pi;
g1(t);
I1 = quad(@g1,0,pi);
G1 = I1/(120*pi*pi);
g12(t);
I12 = quad(@g12,0,pi);
G12 = I12/(120*pi*pi);
yo = (L/pi)*(acos(sqrt(2*Rin*(G1+G12))));
lambdaeff=(c/f)*sqrt(E_eff);
LGP = (lambdaeff/4)*2+L;
WGP = (lambdaeff/4)*2+W;
LGP1 = L+6*h;
WGP1 = W+6*h;
str=['width = ', num2str(W*1000), ' mm']
str=['length = ', num2str(L*1000), ' mm']
str=['the inset feed point distance = ', num2str(yo*1000), ' mm']
str=['minimum GP length = ', num2str(LGP*1000), ' mm']
str=['minimum GP width = ', num2str(WGP*1000), ' mm']
str=['minimum GP length = ', num2str(LGP1*1000), ' mm']
str=['minimum GP width = ', num2str(WGP1*1000), ' mm']

end.
```



## Annexe B

### Matériau FR-4

FR-4 est un composite de résine époxy renforcé de fibre de verre. Ses propriétés peuvent varier selon les directions de sa structure (parallèle ou perpendiculaire aux fibres)

Propriétés	Valeurs
Constante diélectrique (Permittivité)	4,70 max, 4,35 à 500 MHz, 4,34 à 1 GHz
Facteur de pertes	0,02 à 1 MHz, 0,01 à 1 GHz
Rigidité diélectrique	20 kV/mm
Résistivité de surface (min)	$2 \times 10^5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$
Résistivité volumique (min)	$8 \times 10^7 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-3}$
Épaisseur typique	1,25 à 2,54 mm
Rigidité (module de Young)	17 GPa
Coefficient de dilatation thermique	11 ppm/K (dans la direction des fibres) 15 ppm/K (dans la direction perpendiculaire aux fibres)
Conductivité thermique	0,3 W/m.K (dans la direction des fibres)
Capacité calorifique	1 400 J/kg.K
Densité	$1,12 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$