REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE YAHIYA FARES DE MEDEA



FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Thème

Conception et Réalisation d'un Réseau d'antennes Patch Rectangulaire 2.4 Ghz à Base Du Logiciel HFSS

Etudié et Présenté par :

- BELHADJ Nadjib
- KADIK Ismail

Encadré par :

- Mr. MIMENE Bakhti

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

En préambule à ce mémoire

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage, durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons à remercier sincèrement M. MIMENE BAKHTI, en tant qu'Encadreur, qui a été toujours être à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous accordé, en acceptant de juger notre travail.

Enfin, notre gratitude va à tous ceux qui de près ou de loin nous ont apporté leurs précieux soutiens pour l'élaboration du présent travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents qui ont sacrifié leur vie

Pour mon succès et leurs encouragements

Durant tout mon parcours scolaire,

À mes Sœur

À toute la famille **BELHADJ**,

Sans oublier mes enseignants qu'ont contribué à ma formation

Depuis le primaire à ce jour

À mes amis

Également à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser cette mémoire

À l'ensemble des étudiants de ma promotion

Particulièrement ceux de la branche télécommunication

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Nadjib

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents qui ont sacrifié leur vie

Pour mon succès et leurs encouragements

Durant tout mon parcours scolaire,

À mes frères Hamza et Badr Eddine,

À toute la famille KADIK,

Sans oublier mes enseignants qu'ont contribué à ma formation

Depuis le primaire à ce jour à mes amis

Également à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce m'mémoire

À l'ensemble des étudiants de ma promotion

Particulièrement ceux de la branche télécommunication

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Ismail

ملخص :

أثار تصغير الهوائيات اهتمامًا كبيرًا في السنوات الأخيرة بين الباحثين في عالم الاتصالات. إن الدافع وراء هذا التصغير هو متطلبات دمج الهوائيات في بنية الأنظمة المتنقلة، من أجل تقليل حجمها قدر الإمكان. هذه البنية مناسبة بشكل خاص للتطبيقات المتقدمة، مثل الاتصالات الخلوية المتنقلة أو استقبال إشارات البث عبر الأقمار الصناعية. أحد التطبيقات الحالية التي تتطلب أيضًا استخدام هوائيات صغيرة هو الاتصالات اللاسلكية البينية.

في هذا العمل قمنا بدراسة ومحاكاة أداء الهوائيات المطبوعة ومصفوفات الهوائيات المطبوعة المستطيلة 2.4 جيجا هرتز، مثل الكسب والاتجاهية ومخطط الإشعاع بدلالة المعلمات الهيكلية للهوائي.

وأخيرًا، قمنا بإنجاز وبدراسة عملية لمصفوفة هوائيان مستطيلان 2.4 جيجا هرتز، حيث تم إجراء مقارنة النتائج العملية مع نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بواسطة برنامج "HFSS"

الكلمات المفتاحية :

هوائي مطبوع ، مجموعة الهوائيات المطبوعة ، نمط الإشعاع ، الاتجاهية ، الكسب ، HFSS، الإنجاز ، الدائرة المطبوعة، الأداء، المعايير.

Résumé :

La miniaturisation des antennes a suscité ces dernières années un très grand intérêt auprès des chercheurs dans le monde des télécommunications. La course à cette miniaturisation est motivée par des exigences d'intégration des antennes dans l'architecture des systèmes mobiles, pour réduire au maximum leur encombrement. Cette structure convient particulièrement bien aux applications de pointes, comme les communications mobiles cellulaires ou la réception de signaux de télédiffusion satellite. L'une des applications actuelles qui nécessite aussi l'utilisation d'antennes de petites dimensions est celle des interconnections sans fils.

Dans ce travail nous avons étudié les performances des antennes microbandes et des réseaux d'antennes microbandes rectangulaires 2.4 GHz tels que le gain, la directivité et le diagramme de rayonnement, en fonction des paramètres de l'antenne. Finalement, nous avons réalisé un réseau à deux antennes microbandes rectangulaires 2.4 GHz, où une étude pratique a été faite. Et les résultats pratiques obtenus sont comparés aux résultats de simulation par le logiciel HFSS.

Mots clés :

Antenne microbande, réseau d'antennes imprimée, diagramme de rayonnement, directivité, gain, HFSS, réalisation, circuit imprimé, performances, paramètres.

Abstract

The miniaturization of antennas has aroused great interest in recent years among researchers in the world of telecommunications. The race for this miniaturization is motivated by the requirements of integrating antennas into the architecture of mobile sytems, in order to reduce their footprint as much as possible. This structure is particularly suitable for advanced applications, such as cellular mobile communications or the reception of satellite broadcast signals. One of the current applications which also requires the use of small antennas is that of wireless interconnections.

In this work, we studied the performance of 2.4 GHz rectangular microstrip antennas and microstrip antenna arrays such as gain, directivity and radiation pattern, as a function of antenna parameters. Finally, we realized an array with two rectangular 2.4 GHz microstrip antennas, where a practical study was made. In addition, the practical results obtained are compared with the simulation results obtained by the HFSS software.

Keywords :

Microstrip antenna, printed antenna array, radiation pattern, directivity, gain, HFSS, realization, printed circuit, performances, parameters.

TABLE DES MATIERES

Introduction Général 1

I. CHAPITRE 01 ..... *3*

I.1 Introduction **3**

I.2 Réseau d'antennes **3**

I.3 Réseau d'antennes imprimées **4**

I.4 Types de réseaux d'antennes **4**

I.5 Présentation générale d'une antenne patch **5**

I.5.1 Description d'une antenne imprimée ou patch 5

I.5.2 Les caractéristiques des antenne patch 7

I.6 Alimentation des antennes patch **8**

I.6.1 Alimentation par ligne micro-ruban 9

I.6.2 Alimentation coaxiale 10

I.6.3 Alimentation couplée par proximité 11

I.6.4 Alimentation couplée par ouverture 12

I.7 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch **14**

I.7.1 Alimentation parallèle 15

I.7.2 Alimentation série 16

I.7.3 Réseaux bidimensionnels 16

I.8 Les caractéristiques électriques des antennes **17**

I.8.1 Coefficient de réflexion 17

I.8.2 Bande passante 17

I.8.3 Le facteur de qualité 18

I.9 Caractéristique de rayonnement des antennes **18**

I.9.1 Gain 19

I.9.2 La directivité 19

I.9.3 Rendement de l'antenne : 19

I.9.4 Diagramme de rayonnement : 19

I.9.5 Ouverture de l'antenne : 21

I.9.6 Polarisation : 21

I.10 Méthodes d'analyse d'une antenne Patchs **21**

I.10.1 Méthode analytique 21

I.10.2 Méthodes numériques 22

I.11 Les substrats **22**
I.11.1 Les matériaux diélectriques utilisés 22
I.11.2 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat : 23
I.11.3 Critères de choix du substrat : 24
I.12 Applications **24**
I.13 Conclusion **25**
II. Chapitre 02 ..... ***26***
II.1 Introduction **27**
II.2 Présentation du Logiciel HFSS **27**
II.2.1 Description du logiciel HFSS : 27
II.2.2 Les outillés d'Ansoft 29
II.3 Cahier de charge **30**
II.4 Simulation d'antenne patch **30**
II.4.1 Simulation des antennes simples de formes pour la fréquence f=2.4GHz 30
II.4.1.1 Étapes de simulation de première antenne 30
II.4.1.2 Résultats de simulation 34
II.4.2 Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes : 38
II.4.2.1 Étapes de simulation de deuxième antenne (réseaux patch) : 38
II.4.2.2 Résultats de simulation 41
II.4.3 Discussion et interprétation des résultats : 44
II.5 Conclusion : **45**
III. Chapitre 03 ..... ***46***
III.1 Introduction **46**
III.2 la réalisation d'antenne réseau patch **46**
III.2.1 le matériel utiliser : 46
III.2.2 Les étapes de création circuit imprime d'un patch : 50
III.3 Montage et résultat de projet **51**
III.3.1 Montage : 51
III.3.2 Résultat obtenu : 53
III.4 Discussion des résultats **57**
III.5 Etude comparative avec la partie de simulation **57**
III.6 /conclusion **59**
Conclusion Général **60**

LISTE DE FIGURE

Figure 1 : Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antenne 3
Figure 2 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes 4
Figure 3 **:** Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels. 5
Figure 4**:** structure d'une antenne imprimée..... 6
Figure 5 : différentes formes d'élément rayonnant..... 6
Figure 6 : distribution de charge et de densité de courant 8
Figure 7 : distribution du champ électrique vertical..... 8
Figure 8 : alimentation par ligne micro-ruban. 9
Figure 9 : alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée..... 10
Figure 10**:** alimentation coaxiale..... 10
Figure 11 : le circuit équivaut d'une antenne patch. 11
Figure 12**:** alimentation couplée par proximité 12
Figure 13**:** circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité. 12
Figure 14 : alimentation couplée par ouverture..... 13
Figure 15 : circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture. 13
Figure 16: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire..... 15
Figure 17: Alimentation série d'un réseau linéaire..... 16
Figure 18 : Alimentation parallèle d'un réseau plan..... 16
Figure 19 : Alimentation série d'un réseau plan 17
Figure 20: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement 18
Figure 21**:** Rayonnement d'une antenne Patch 20
Figure 22: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne 20
Figure 23: Types de polarisation. 21
Figure 24 : Fenêtre de logiciel HFSS pour model 3D..... 29
Figure 25 Fenêtre des paramètres de plan de masse..... 30
Figure 26**:** Fenêtre des paramètres de substrat. 31
Figure 27**:** Fenêtre des paramètres de patch..... 31
Figure 28: Fenêtre l'entrer de ligne d'alimentation..... 32
Figure 29: Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande. 32
Figure 30**:** Fenêtre des paramètres de point d'excitation. 33
Figure 31 **:** Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement..... 33
Figure 32 **:** une antenne microbande rectangulaire 34
Figure 33 Coefficient de réflexion $S11$ en fonction de la fréquence. 34
Figure 34**:** Diagramme de rayonnement 3D Gain 35
Figure 35**:** Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique..... 35
Figure 36**:** Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90°..... 36
Figure 37**:** La directivité totale. 36

Figure 38**:** Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence. 37
Figure 39**:** Fenêtre des paramètres de plan de masse. 38
Figure 40**:** Fenêtre des paramètres de substrat. 38
Figure 41 **:** Fenêtre des paramètres de deux patchs. 39
Figure 42**:** Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande. 39
Figure 43**:** Fenêtre des paramètres de point d'excitation. 40
Figure 44**:** Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement 40
Figure 45**:** Conception des réseaux 2 patch. 41
Figure 46 : Coefficient de réflexion $S11$en fonction de la fréquence. 41
Figure 47**:** Diagramme de rayonnement 3D Gain 42
Figure 48: Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique. 42
Figure 49: Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90° 43
Figure 50: La directivité totale. 43
Figure 51: Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence. 44
Figure 52 : Typon 46
Figure 53 : La plaque fr4 double surface 47
Figure 54 : Crystal UV 47
Figure 55 : Machine de gravure PCB chimique 48
Figure 56 :Photoploteur 48
Figure 57 : Massicot 48
Figure 58 : machine de nettoyage (Brossage) 49
Figure 59 : Connecteur SMA codé 49
Figure 60 : Soudeur 49
Figure 61 : antenne réseau patch 51
Figure 62 : première manipulation θ=0° 52
Figure 63 : deuxième manipulation θ=90° 52
Figure 64 : Diagramme de rayonnement d=40cm et θ=0° 53
Figure 65 Diagramme de rayonnement d=40cm et θ=90° 53
Figure 66 : Diagramme de rayonnement d=50cm et θ=0 54
Figure 67 Diagramme de rayonnement d=50cm et θ=90° 54
Figure 68 : Diagramme de rayonnement d=70cm et θ=0° 55
Figure 69 Diagramme de rayonnement d=70cm et θ=90° 55
Figure 70: Diagramme de rayonnement d=100cm et θ=0° 56
Figure 71: Diagramme de rayonnement d=100cm et θ=90° 56
Figure 72 :la figure comparative entre la simulation et réalisation d'angle θ=0° et θ=90° 58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques de différentes techniques d'alimentation. 13
Tableau2: avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. 14
Tableau 3 : Résultats de simulation 37
Tableau 4 : Résultats de simulation 44
Tableau 5 : Tableau comparatif entre les simples et des réseaux des antennes 45
Tableau 6 : les résultats de la réalisation a différent distances 57

LISTE DES ACRONYMES

EM : champ électromagnétique

εr : permittivité relative

RF : radio fréquence

RLC : résistance, une bobine (inductance) e , un condensateur (capacité).

Zc : l'impédance de normalisation,

MMIC: monolithic Microwave ntegrated Circuit

T.M.M : thermo-set Microwave Material

FEM : Fédération européenne de la métallurgie

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

HFSS : High Frequency Structure Simulation.

2D et 3D : Deux Dimensions et Trois Dimensions.

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio.

UV : ultraviolet

PCB : printed circuit board

SMA : SubMiniature version A

θ : c'est un angle de

φ : c'est un angle de

Introduction Général

Dans un système de radiocommunication, l'antenne est un composant indispensable en transmission et réception des ondes électromagnétique. En cherchant à optimiser les performances radioélectriques d'une antenne, on doit l'adapter aux applications les plus récentes (communications : spatiales, mobiles, sans fil ou encore antennes pour automobiles) et répondre aux exigences d'intégration dans l'architecture des terminaux. L'antenne doit améliorer les performances radio globales d'un système de transmission. Il est donc nécessaire de concevoir des antennes bien adaptées, avec un bon gain, une bonne polarisation, linéaire ou circulaire sur des bandes des fréquences souvent très larges pour les antennes planaires, omnidirectionnelles ou au contraire très directives, variable en fréquence ou en polarisation etc…. Mais on doit chercher aussi des antennes à faible coût et les plus petites dimensions possibles. Les chercheurs ont commencé à orienter leurs travaux vers la conception d'antennes pouvant satisfaire les nécessités et contraintes précédemment cités, ces antennes sont communément appelées antennes « patch » ou « antennes imprimées ».

L'antenne patch est conçue pour satisfaire ces besoins, c'est un conducteur métallique de forme particulière placé sur un substrat terminé par un plan de masse, son caractère en miniature offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission réception.

L'objectif de notre travail est de faire une étude de conception par simulation et réalisation d'un réseau à deux antennes patchs (imprimée). Où la partie conception et simulation sera faite en utilisant le logiciel HFSS. Et la partie réalisation sera, effectuée suivant les étapes de réalisation des circuits imprimés.

De ce fait, notre mémoire est réparti comme suit : en trois chapitres :

- **Au début,** on commence par introduction générale,
- **Le premier chapitre** est consacré à une étude générale des antennes imprimées, ainsi que leurs caractéristiques physiques, électriques et de rayonnement. Nous avons présenté ensuite les différentes techniques d'alimentation et le mécanisme de rayonnement d'un élément rectangulaire.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la modélisation et la simulation des antennes patchs rectangulaires simple et le réseau à deux antennes patchs rectangulaires 2.4GHz. En étudiant les résultats obtenus par le Logiciel de simulation HFSS.

- **Le troisième chapitre** est dédié à la réalisation de deux réseaux à deux antennes patchs rectangulaires 2.4GHz, pour les utiliser en émission et réception, où une étude pratique sera effectuée et des résultats seront discutés.
- **Finalement** nous terminerons par une conclusion générale.

I. CHAPITRE I

Généralités sur les antennes imprimées

I.1 Introduction

Dans les systèmes de communication par ondes hertziennes, les antennes d'émission et de réception sont des dispositifs indispensables pour assurer la liaison entre deux communicantes sans fils ; Pour ce type de liaison, les antennes patchs permettent d'avoir un gain considérable et une large bande passante pour des liaisons très hauts débits. De plus, ce type d'antennes est applicable dans de nombreux dispositifs électroniques de communications modernes destinés au grand public avec un faible coût [1]. Actuellement, avec le progrès des télécommunications, les réseaux d'antennes imprimées ont été proposés pour le but d'améliorer la largeur de la bande passante et d'avoir une bonne directivité pour assurer un haut débit.

Dans ce chapitre nous présentons la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, les inconvénients des antennes patchs, ainsi que les différents types d'alimentation.

I.2 Réseau d'antennes

Un réseau d'antennes est un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patchs …) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière. Le rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande. Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunication récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [2].

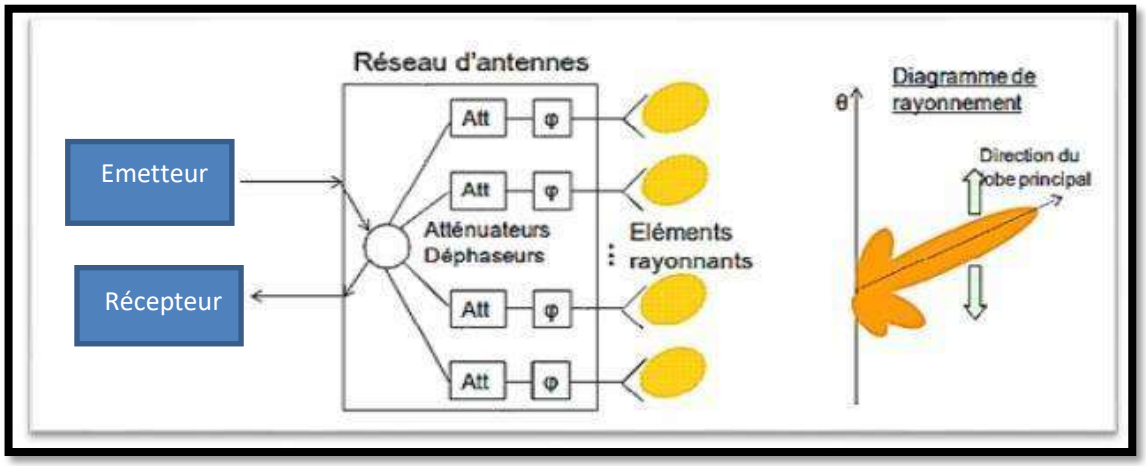


Figure 1 : Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antenne [2]

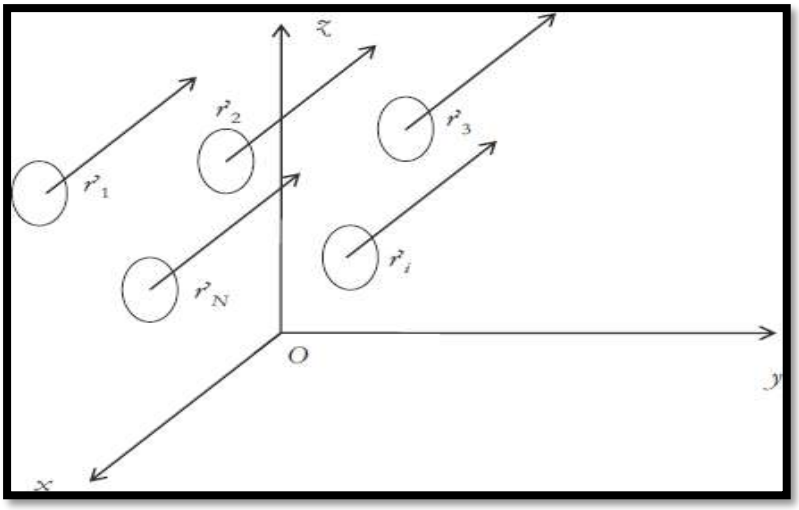


Figure 2 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes [2]

I.3 Réseau d'antennes imprimées

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et commandes à distance, a fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. L'emploi des fréquences de plus en plus élevées dans les systèmes micro-ondes à structure micro-ruban a été à l'origine du développement des antennes imprimées. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières, telles que : le pointage et le balayage électronique, la réjection de brouilleurs, la détection adaptative, l'auto-adaptativité, la génération de diagrammes de rayonnement variés ou désirés, le contrôle du diagramme de directivité, le contrôle de la polarisation, etc.… [3].

I.4 Types de réseaux d'antennes

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau linéaire, réseau circulaire, réseau planaire (forme rectangulaire ou circulaire) et réseau volumique (Figure 3)

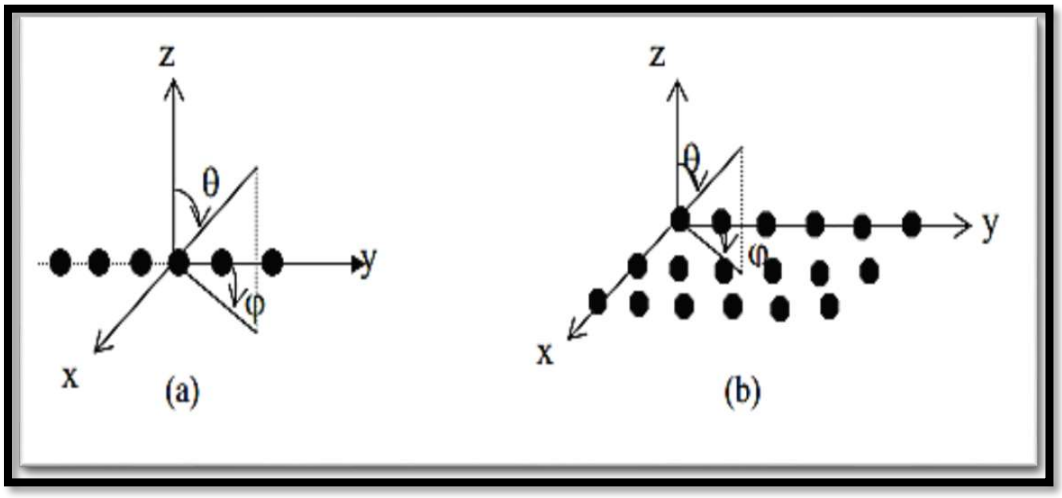


Figure 3 **:** Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels.

I.5 Présentation générale d'une antenne patch

I.5.1 Description d'une antenne imprimée ou patch

Une antenne à éléments rayonnants imprimés (figure 4), communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (microstrip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique. Elle se compose de :

- **Le plan de masse (ground plane)** est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.

- **Un substrat diélectrique (dielectric substrat)** composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative (2,2< εr <12). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de joule et amélioré la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.

- **L'élément rayonnant (patch)** est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire …etc.). Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission (micro-ruban) qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées. Il est constitué d'une partie conductrice

qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. [4]

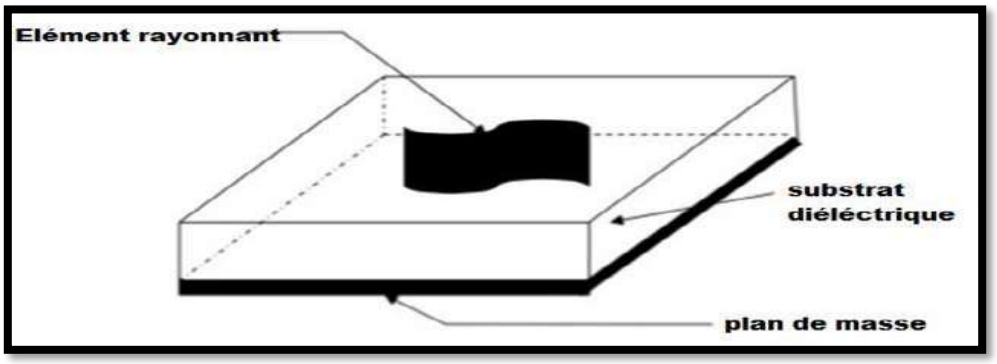


Figure 4**:** structure d'une antenne imprimée

L'élément rayonnant de l'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée circulaire ou simplement un dipôle de dimension d'ordre de demi longueur d'onde (λ/2). Les formes suivantes (Figure 5) sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

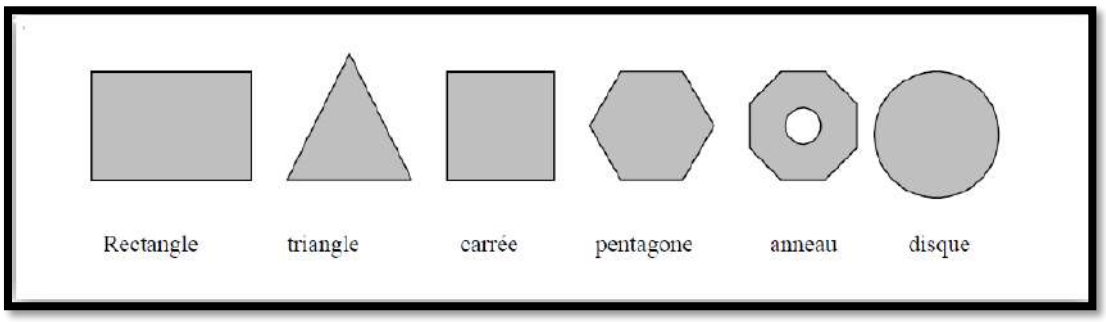


Figure 5 : différentes formes d'élément rayonnant

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes patch.

Les antennes imprimées possèdent comme on a déjà souligné une facilité d'intégration et elles sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquences (100 MHz à 100 GHz), elles ont beaucoup d'avantages parmi eux :

- Faible poids, masse, épaisseur, et volume.
- Possibilité d'être intégrées dans des appareils électroniques transportable.
- Faible cout et facilité de fabrication.

- Capables d'émettre à deux ou trois fréquences.
- Simples, robustes, et moins encombrantes et adaptables aux surfaces planes et nonplanes. [5] [6]

Néanmoins ces antennes présentent des limitations à savoir :

- Faible rendement, puissance d'émission (<100W) et un faible gain (6 dB).
- Facteur de qualité Q trop élevé (50 jusqu'à 75) et bande passante étroite (de 1 à 5 %).
- Faible pureté de polarisation.
- Pertes de rayonnement par onde de surfaces dans le substrat diélectrique.

Donc la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performance et de complexité de réalisation. [7]

Les antennes patch ont un facteur de qualité (Q) très élevé. Q représente les pertes liées à l'antenne et un grand facteur de qualité mène à une largeur de bande étroite et un faible rendement. Le facteur de qualité peut être réduit en augmentant l'épaisseur du substrat diélectrique. [8]

I.5.2 Les caractéristiques d'une antenne patch

- **Mécanisme de rayonnement d'un patch**

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch s'effectue à partir de sa forme géométrique. Lorsqu'on excite la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge « figure 6 » va se s'établir à l'interface substrat /plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant, et crée un champ électrique vertical « figure 7 » entre le patch et le plan de masse ce qui va provoquer :

- Une inversion des phases des composantes verticales du champ électrique sur la longueur de l'antenne.
- Contrairement à précédemment, des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne et dus aux composantes horizontales des lignes de champ qui entoure l'élément imprimé.

- Une modélisation de l'antenne patch par une cavité à 4 murs magnétiques **(**bords de la cavité) et 2 murs électriques (formés par les métallisations).

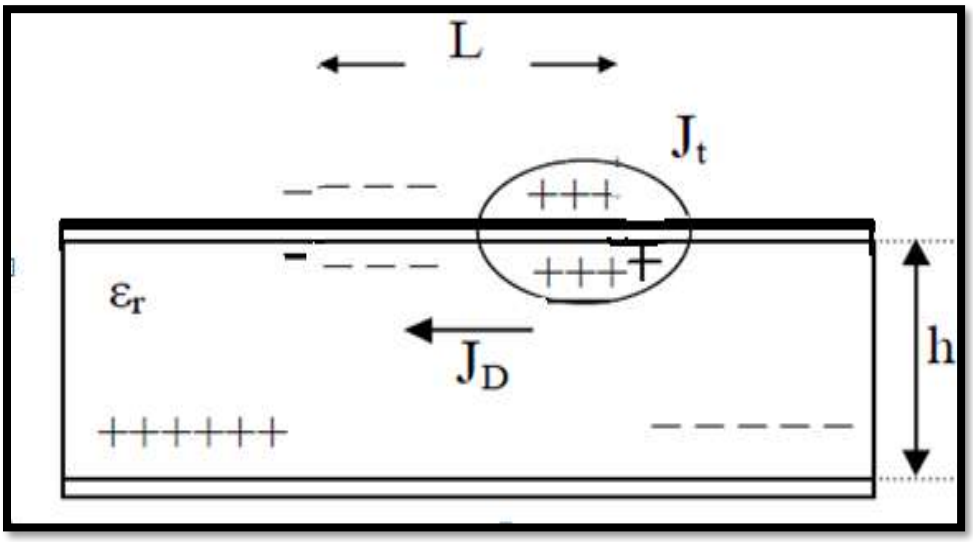


Figure 6 : distribution de charge et de densité de courant

avec, J_D : courant de déplacement J t : Courant de surface.

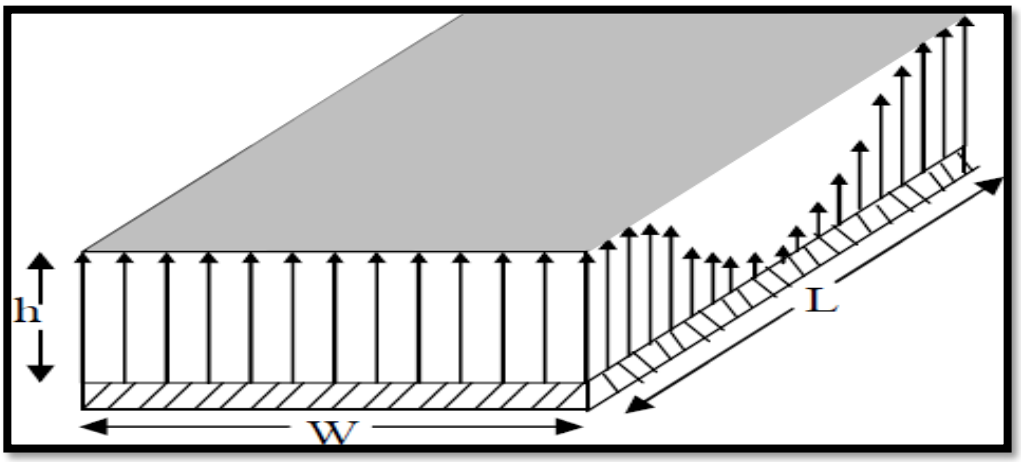


Figure 7 : distribution du champ électrique vertical.

I.6 Alimentation d'une antenne patch

Un problème récurrent dans la conception des antennes patch concerne le choix de la technique d'excitation. L'énergie est fournie à l'élément rayonnant de manière à influe directement sur son rayonnement et modifier ces performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories :

- Alimentation par contacte (par sonde ou ligne micro-ruban).
- Alimentation par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou parfente).

I.6.1 Alimentation par ligne micro-ruban

L'alimentation peut se faire par connexion directe avec une ligne micro-ruban (figure 8), (généralement de 50Ω), [9] c'est-à dire en reliant cette ligne au patch rayonnant tel que la largeur de la ligne est petite par rapport à celle du patch rayonnant. Ce genre d'alimentation a l'avantage qu'elle peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure planaire ; Il existe cependant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite. Cette technique est facile à réaliser, simple à modéliser et facilite l'adaptation d'impédance.

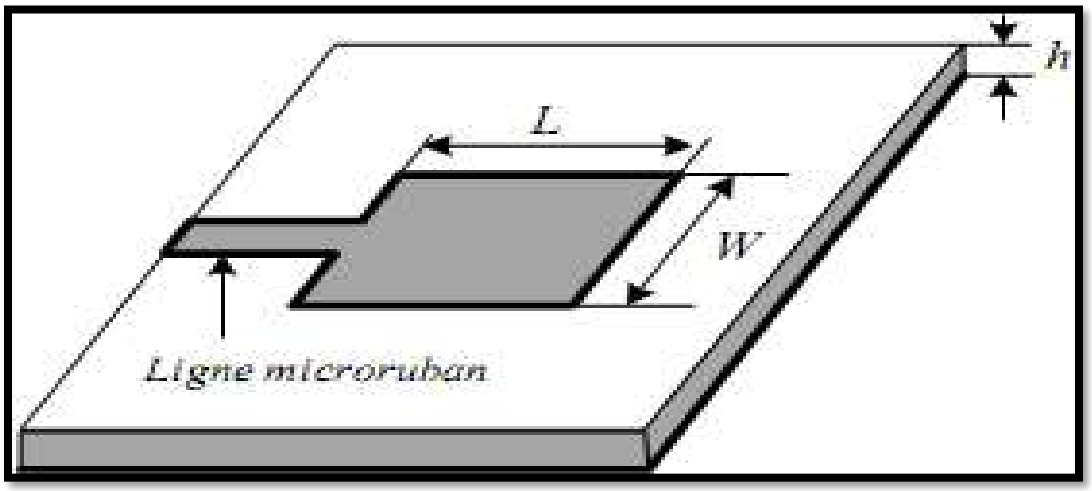


Figure 8 : alimentation par ligne micro-ruban.

On trouve trois cas illustrés sur la figure (9) :

- Le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément (a).
- Le point de jonction est décalé par rapport à cet axe et cela permet unemeilleure adaptation d'impédance (b).
- Alimentation axiale avec une encoche (c).

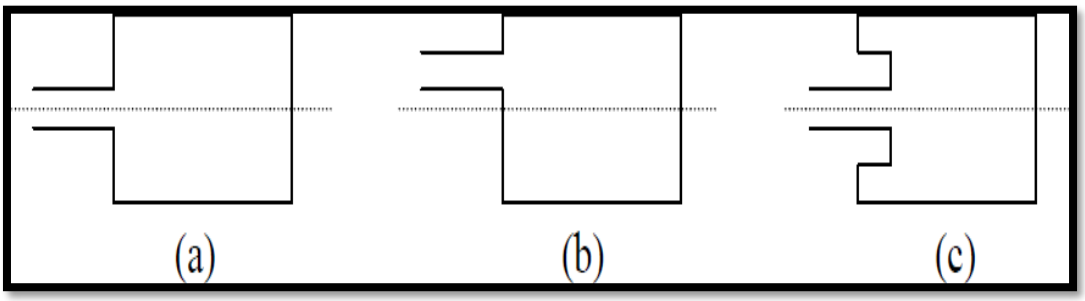


Figure 9 : alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée

(c) axiale à encoche.

Les types (a) et (b) permettent une meilleure adaptation d'impédance, mais l'alimentation axiale avec encoche donne de très bons résultats concernant l'adaptation, car elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées.

I.6.2 Alimentation coaxiale

Dans ce cas l'élément rayonnant est connecté au conducteur intérieur du connecteur coaxial traversant le diélectrique, tandis que le conducteur externe est soudé directement au plan de masse (Figure 10).

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit désiré du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance, cependant cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme du rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme du rayonnement, de plus des pertes apparaissent avec les perçages du plan de masse ainsi que de l'élément plaqué. [10]

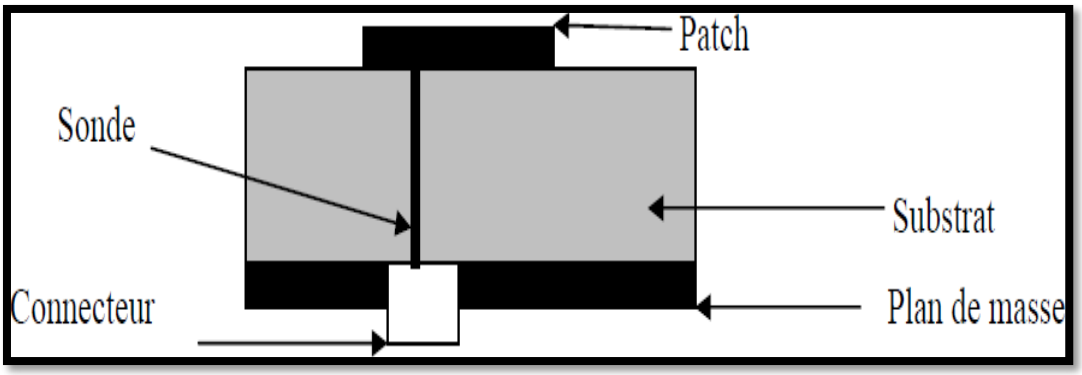


Figure 10**:** alimentation coaxiale.

Le circuit équivalent, des deux types d'alimentation, est formé d'un réseau parallèle RLC qui représente la pièce métallique (patch) rayonnante résonnante et un inducteur série représentant l'inductance de la sonde coaxiale d'alimentation ou de la ligne d'alimentation micro-ruban (Figure 11). [11]

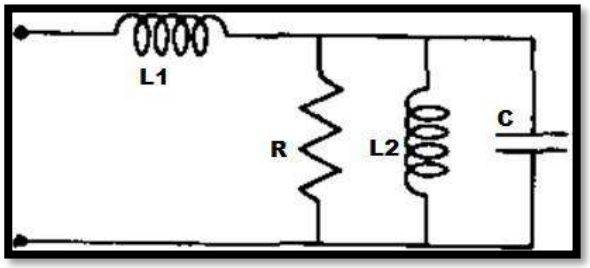


Figure 11 : le circuit équivaut d'une antenne patch.

De telles méthodes d'alimentation entrant en contact direct, ont l'avantage de la simplicité, mais elles ont également plusieurs inconvénients. L'augmentation, par exemple, de l'épaisseur du substrat dans le but d'augmenter la largeur de la bande passante, mène à une augmentation des faux rayonnements d'alimentation et une augmentation de la puissance d'onde surfacique [12]. Pour ces raisons et d'autres, de telles antennes sont ainsi limitées dans la largeur de bande. Ces deux méthodes d'alimentation offrent essentiellement un degré de liberté dans la conception par le choix de positionnement du point d'alimentation afin d'ajuster le niveau d'impédance d'entrée.

Ces dernières années, une variété d'alimentations sans contact direct ont été développées pour les antennes micro-rubans, d'où la nécessité de détailler deux de ces types :

I.6.3 Alimentation couplée par proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur la (figure 12), deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du rayonnement parasite et l'obtention d'une bande passante plus large et cela par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne, la distance entre la ligne d'alimentation et le patch peut être utilisé pour adapter l'impédance de l'antenne. Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs. L'adaptation est réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation.

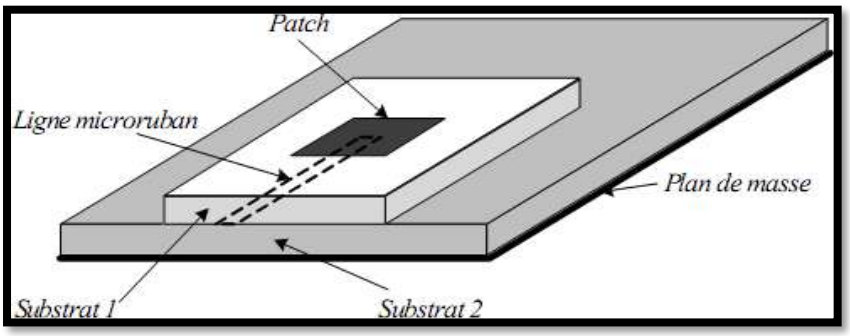


Figure 12**:** alimentation couplée par proximité

La nature capacitive de cette méthode d'accouplement est reflétée dans le fait que le circuit équivalent, montré dans (la figure 13) à un condensateur en série avec le résonateur parallèle RLC qui représente le patch. [11 ; 13]

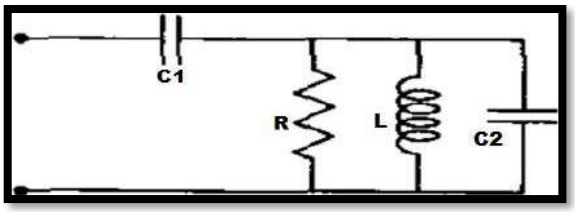


Figure 13**:** circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité.

I.6.4 Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation illustré dans (figure 14) la pièce rayonnante et la ligne d'alimentation sont séparées par le plan de masse, L'élément rayonnant est gravé sur le sommet du substrat d'antenne (substrat 1), et la ligne d'alimentation est gravée sur le fond (bas) du substrat d'alimentation (substrat 2). Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est donc assuré par une fente (ouverture) dans le plan de masse, centrée sous le patch.

Généralement, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est employé pour le substrat inférieur, alors qu'un matériau épais ayant une constante diélectrique faible est employé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch [14].

L'avantage principal de cette technique est la réduction des rayonnements indésirables qui est due à la séparation entre le patch et la ligne d'alimentation par le plan de masse.

Cependant son l'inconvénient majeur est qu'elle présente des difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples et fournit aussi une largeur de bande étroite

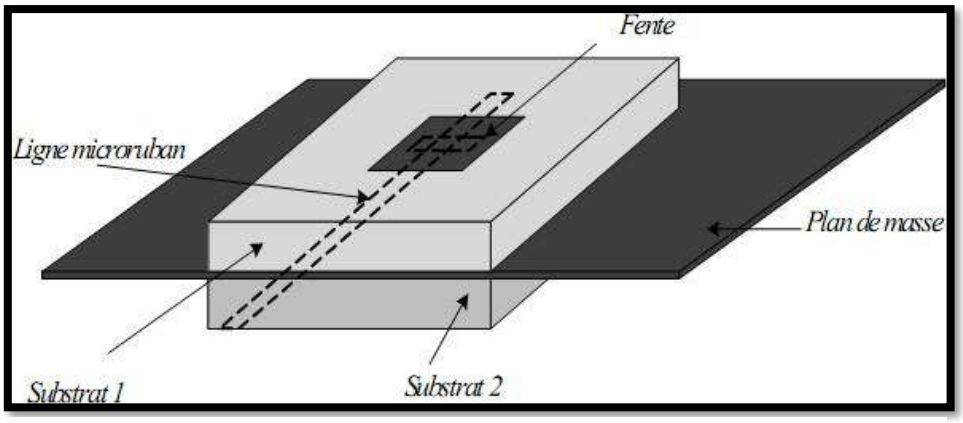


Figure 14 : alimentation couplée par ouverture.

Le circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture est représenté par la (figure 15) suivante [11]

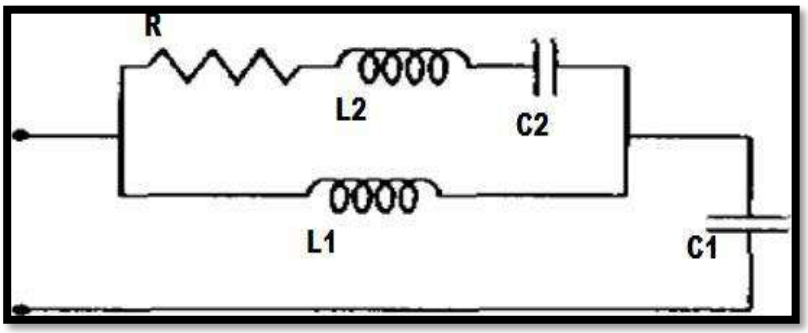


Figure 15 : circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture.

Le tableau (1) suivant récapitule les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentation par line micro ruban	Alimentation par câble coaxial	Alimentation par couplage de proximité
Rayonnement parasite d'alimentation	Plus	Plus	Minimum
Fiabilité	Meilleure	Bonne	Fiable à cause de la soudure
Facilité de fabrication	Facile	Nécessite une soudure et un perçage	Nécessité d'alignement
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5 %	2-5 %	13%

Tableau 1 : caractéristiques de différentes techniques d'alimentation. [10]

Une comparaison entre l'alimentation avec contacte (ligne micro-ruban et câble coaxial) et l'alimentation sans contacte (couplage par proximité ou par ouverture) se résume dans le tableau (2) suivant :

Méthode		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec Contact	Câble coaxial	Pas de pertes de rayonnement de ligne. Sélection possible d'un mode privilégié. Obtention d'une impédanced'entrée adéquate parpositionnement de la sonde. Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats defaible hauteur. Technique de perçage simple jusqu'à 10GHz.	Dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte de la bande passante. Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. La difficulté d'excitations de chaque élément d'un réseau seul.
	Ligne Micro-ruban	Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. Adaptation de l'aérien possiblepar contact pénétrant.	Rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérienne. Rayonnement parasitepossible du circuit dedistribution en millimétriques. Structure figée après gravure.
Alimentations sans Contact	Par couplage	Dessin du circuit modifiable paraux aériens. Bande passante plus large paraugmentation de la hauteur.	Deux couches du substrat requises. Difficulté pour l'intégrationdes dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.

Tableau2: avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. [10]

I.7 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération. La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes microbandes. Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par utilisation des lignes microbandes et des transformateurs d'impédances quartes d'ondes. Les déphaseurs dans le circuit d'alimentation peuvent être formés d'éléments supraconducteurs. Toutes les structures d'alimentations sont supposées uniformes de point de vue distribution de

puissance (les patchs doivent être alimentés avec la même puissance). Il faut mettre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps.

Le circuit d'excitation peut prendre plusieurs architectures ; on distingue deux types :

- Alimentation en série
- Alimentation en parallèle

Le choix du type d'alimentation se fait en fonction de différents paramètres qui sont :

- La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase ;
- La bande passante souhaitée ;
- Un réseau série aura une bande passante plus faible dans la mesure où la loi de pondération sera plus sensible à la fréquence que dans le cas d'une alimentation parallèle [15].

I.7.1 Alimentation parallèle

Un réseau parallèle (Figure I. 13), sera plus encombrant qu'un réseau série (Figure 16). De plus, il est à noter qu'un réseau parallèle présente des longueurs de lignes supérieures et un plus grand nombre de coudes ce qui engendre d'avantage de pertes, en particulier dans le domaine millimétrique. Un autre choix important dans la conception d'une antenne imprimée est celui du substrat diélectrique. Si la structure du réseau à 2n éléments rayonnants qui peuvent être alimentés en parallèle par n étages de $(2m-1)$ diviseurs de puissance à chaque étage m. Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson [15]

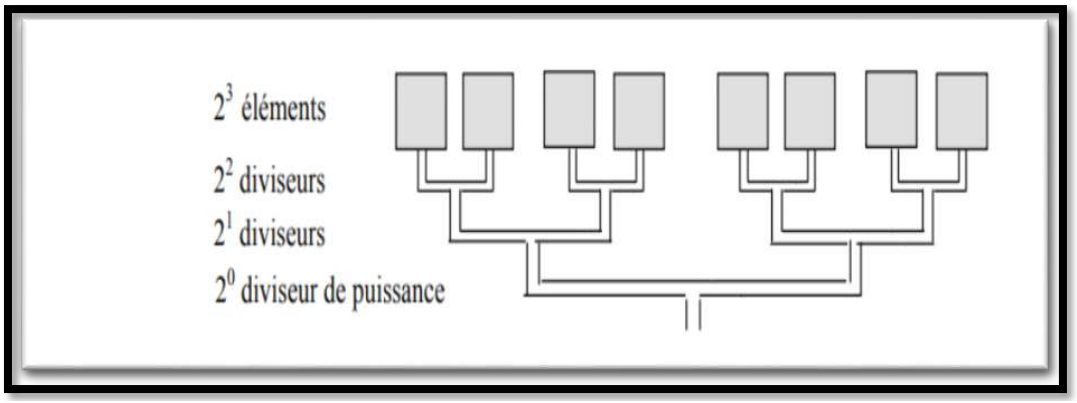


Figure 16: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson [15]

I.7.2 Alimentation série

Dans la figure (17) nous avons une ligne de transmission excite en série les éléments rayonnants. Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur, qui lui-même est lié de façon orthogonale à un guide commun d'alimentation. La distance des branchements des lignes sur la ligne principale doit être uniforme, et les signaux doivent arriver en phase jusqu'aux déphaseurs pour ne pas s'induire dans des erreurs de phase [15].

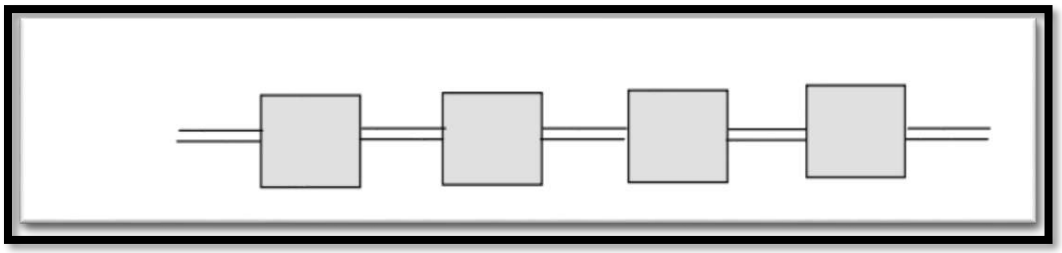


Figure 17: Alimentation série d'un réseau linéaire

I.7.3 Réseaux bidimensionnels

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan passant par les sources du réseau. Afin d'obtenir un effet de réseau dans tout l'espace et, en particulier dans les plan E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels (Figures 18- 19). Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [15].

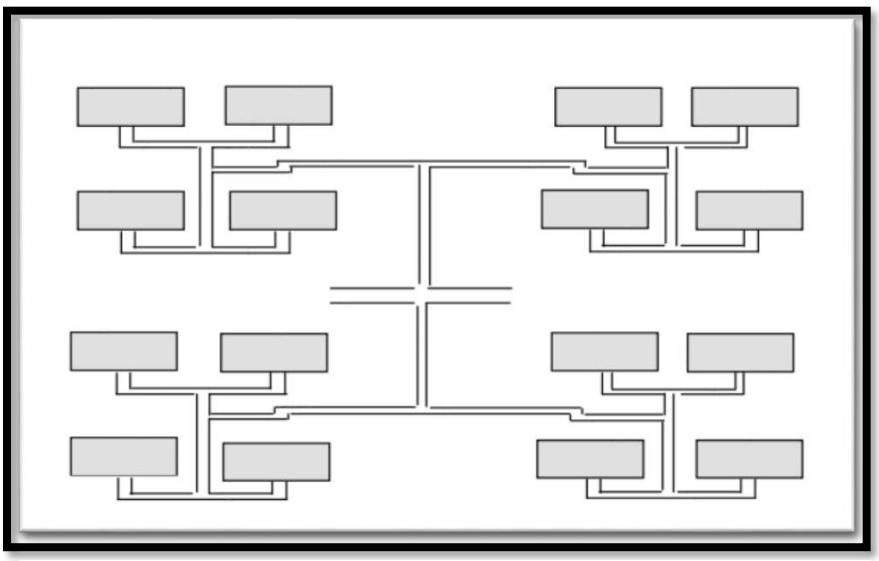


Figure 18 : Alimentation parallèle d'un réseau plan

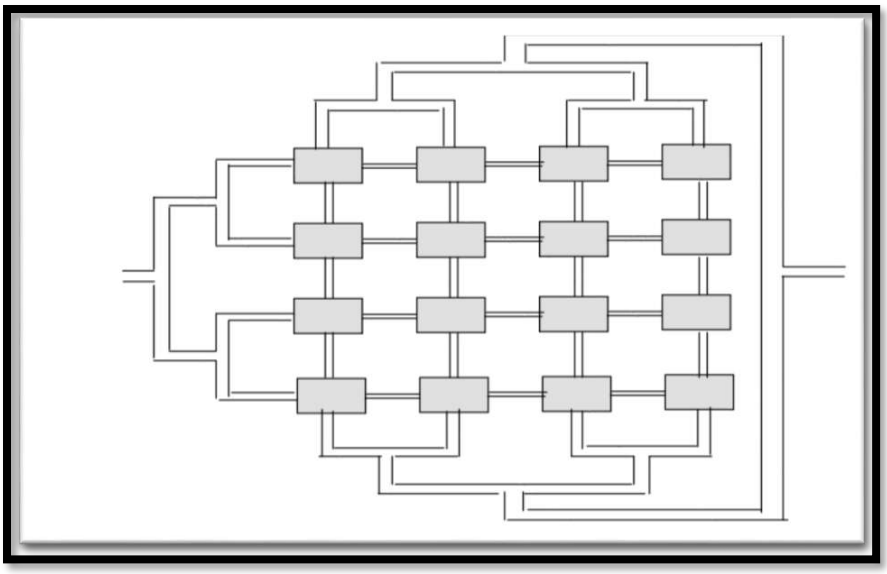


Figure 19 : Alimentation série d'un réseau plan

I.8 Les caractéristiques électriques des antennes

I.8.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivante :

$$S11 = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_C} \quad \text{..... (1)}$$

Où :

Zc : est l'impédance de normalisation, en générale égale à 50Ω.

Le module du coefficient de réflexion est habituellement présenté en décibel (dB) et est noté |S11| et se définit comme suit :

$$S11(dB) = 20 \log S11 \quad \text{..... (2)}$$

I.8.2 Bande passante

Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal (largeur de bande de fonctionnement) [16] :

$$|BP| = f2 - f1 \quad \text{..... (3)}$$

Généralement, ce paramètre est évalué aussi en pourcentage du rapport de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale :

$$BP\% = \frac{BP}{F_0} \quad \text{..... ..... (4)}$$

La figure (20) présente la courbe coefficient de réflexion S11 d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la largeur de bande de fonctionnement (bande passante à – 10 dB).

I.8.3 Le facteur de qualité

Pour obtenir l'expression du facteur de qualité Q d'une antenne à résonateur diélectrique

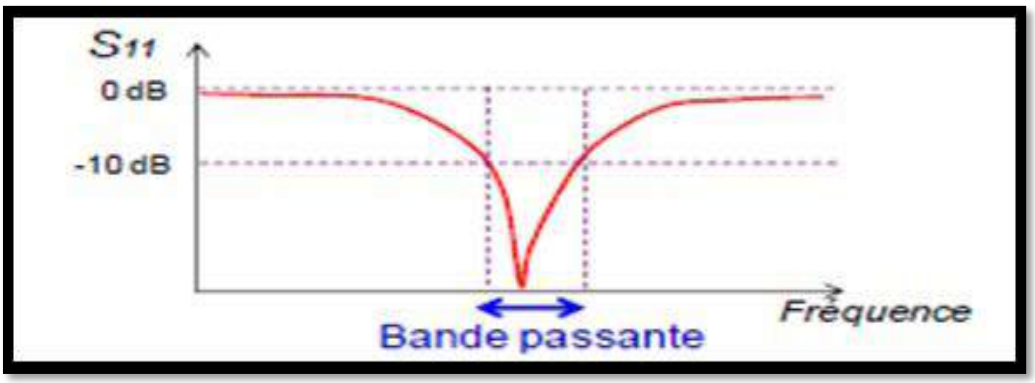


Figure 20: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement

rectangulaire, il suffit de calculer l'énergie totale W stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée P_{rad} [17].

Une bonne estimation du facteur de qualité est donnée par le rapport entre la fréquence de résonance fr de l'antenne et sa bande passante Δf :

$$Q = \frac{t_r}{\Delta f} \quad \text{..... (5)}$$

I.9 Caractéristique de rayonnement des antennes

Les caractéristiques de rayonnement visées sont utiles pour le dimensionnement des systèmes antennaires. Le rôle d'une antenne dans un système de communication sans fils est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance. Plusieurs caractéristiques permets de grouper les antennes tels que le gain, le diagramme de rayonnement, la largeur de fonctionnement, la polarisation, etc. [18]

I.9.1 Gain

Le gain est considéré comme un des principaux paramètres des antennes directives. Pour ces derniers, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres. Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre la puissance émise dans la direction du lobe principal et la puissance qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, les deux antennes étant alimenté [16-19].

$$(\theta,\varphi)=\frac{p(\theta,\varphi)}{p_0}=\frac{p(\theta,\varphi)}{\frac{pt}{4\pi R2}}=\frac{4\pi R2p(\theta,\varphi)}{\iint \mathrm{p}(\theta,\varphi)} \quad \text{.....(6)}$$

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m2).

P_0 : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m2).

P_t : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

I.9.2 La directivité

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [20].

$$\mathrm{D}(\theta,\varphi)=\frac{P(\theta,\varphi)}{P\frac{r}{4\pi}}=4\pi\frac{P(\theta,\varphi)}{\mathrm{Pr}} \quad \text{.....(7)}$$

I.9.3 Rendement de l'antenne :

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta=\frac{Pr}{\mathrm{Pf}} \quad \text{.....(8)}$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [21].

I.9.4 Diagramme de rayonnement :

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ0, φ0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement r (θ, φ), qui varie entre

0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure I.18). En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux (θ = 90°) et verticaux (φ = constante), ou bien dans les plans E et H [22].

$$(\theta,\varphi)=\frac{P(\theta,\varphi)}{PO(\theta O,\varphi 0)} \quad \text{.....(9)}$$

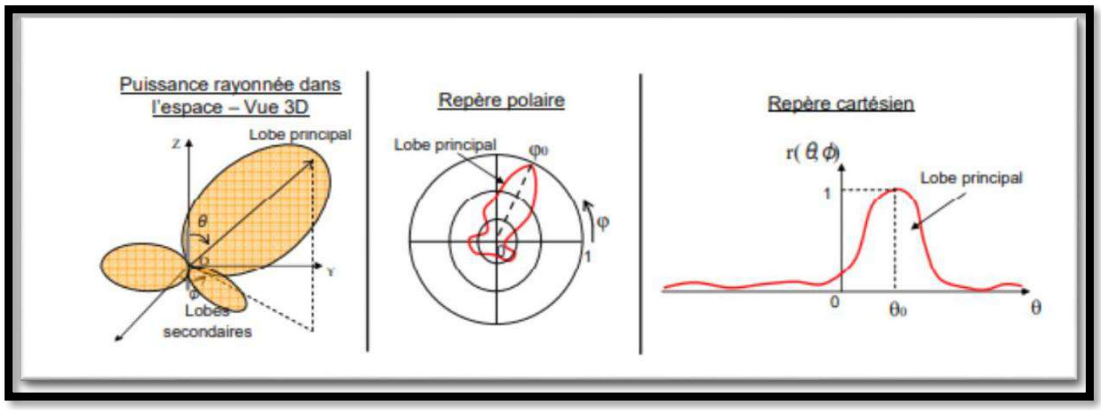


Figure 22: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [22]

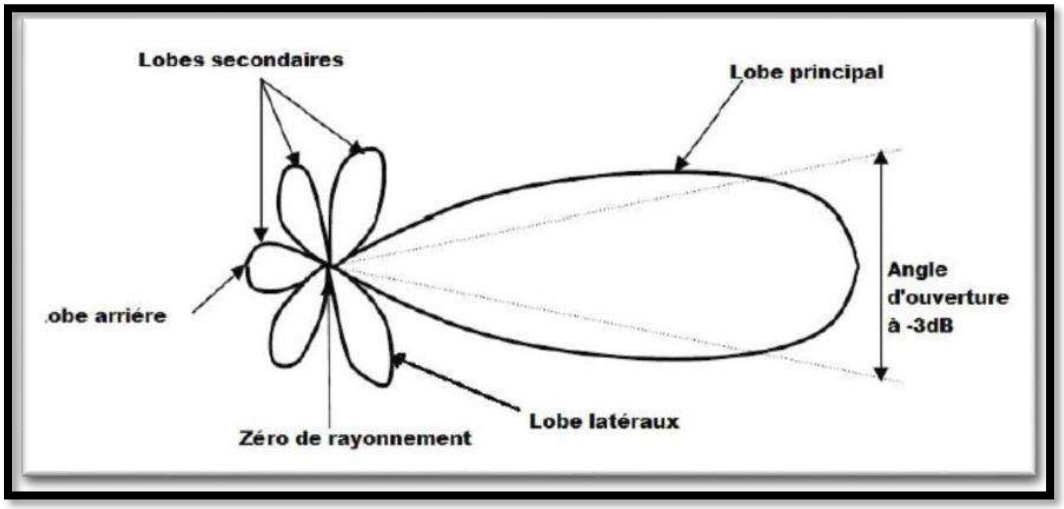


Figure 21**:** Rayonnement d'une antenne Patch [23].

I.9.5 Ouverture de l'antenne :

L'ouverture angulaire à mi-hauteur ou ouverture à 3 dB est définie par l'écart angulaire existant entre les deux directions situées de chaque côté de l'axe, pour lesquelles la puissance est divisée par deux [24].

I.9.6 Polarisation :

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique [25]

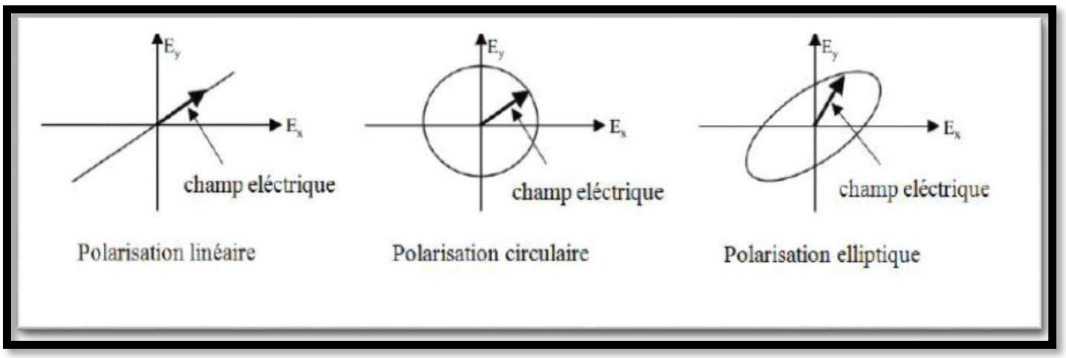


Figure 23: Types de polarisation.

I.10 Méthodes d'analyse d'une antenne Patch

Les antennes Patchs, généralement constituées d'un élément rayonnant à deux dimensions imprimées sur un substrat de faible permittivité, sont principalement analysées par les méthodes dédiées aux circuits planaires. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories: les méthodes analytiques simples, tels que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité et les méthodes numériques rigoureuses telles que la méthode des moments, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Depuis les années quatre-vingt-dix de nouvelles méthodes dites d'optimisation basées sur les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques ont été introduites avec succès [26].

I.10.1 Méthode analytique

Ces méthodes sont basées sur la distribution du courant magnétique autour du patch, les principales méthodes de cette catégorie sont [26] :

- Le modèle de la ligne de transmission

- Le modèle de la cavité.

I.10.2 Méthodes numériques

Les méthodes numériques les plus utilisées en électromagnétisme sont [27] :

- Méthode variationnelle : les éléments finis.
- Méthode différentielle : différences finies et TLM.
- La méthode intégrale.

I.11 Les substrats

Il existe une multitude de matériaux diélectriques pour les substrats. Les paramètres importants sont : le diélectrique ($2 < \varepsilon r < 16$) dans la bande RF ou micro-ondes. La classe des valeurs de la constante diélectrique du substrat s'étale de 2.2 à 12 pour opérer aux fréquences allant de 1 à 100GHz. Les pertes dans le diélectrique qui sont représentés par une tangente ($0.0001 < \delta < 0.06$) ou la partie imaginaire de la constante diélectrique. A cause de leur faible cout, leur facilité de fabrication et leurs bonnes surfaces d'adhésion, les plastics sont couramment utilisés dans la bande RF. Une autre considération à prendre en compte dans le choix du substrat est l'effet de la constante diélectrique sur les caractéristiques de radiation. Une grande constante diélectrique entraine, généralement, une faible radiation des patchs [28].

I.11.1 Les matériaux diélectriques utilisés

Le substrat joue un rôle double dans la technologie microbande. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h << \lambda 0$).

Le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan \delta < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\varepsilon r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée. Les matériaux utilisés sont : Les matériaux céramiques, Les matériaux semi-conducteurs, Les matériaux ferromagnétiques, Les matériaux synthétiques, etc. [28].

I.11.2 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat :

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories :

- **Les matériaux céramiques** : Couramment employés pour les circuits micro rubans.
- **Les matériaux semi-conducteurs :** De type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits M.M.I.C.
- **Les matériaux ferrimagnétiques :** Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques.
- **Les matériaux photoniques** : Depuis le début des années nonante, un nouveau type de matériaux, les cristaux photoniques (matériaux à permittivité périodique) font l'objet d'une grande effervescence dans le monde scientifique. Or, la grande majorité des recherches portant sur ces matériaux ont été effectuées par des physiciens dans le cadre d'études de dispositifs optiques. Actuellement les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des microondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface.
- **Les matériaux chiraux** : Les propriétés de chiralité ou de bi-isotropie que possèdent certains matériaux, notamment dans le domaine des microondes et de l'optique.
- **Les matériaux T.M.M (Thermo-set Microwave Material)** : Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques, génèrent une gamme de substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10 de faibles pertes (tan < 0,0018) pour des permittivités respectivement égales à 3,25 ; 4,5 ; 6,5 ; 9,8.
- **Les matériaux RO3000 :** Ces matériaux sont de permittivité relative stable en température et en fréquence. Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence (> 30 GHz).
- **Les matériaux composites :** Ce type de matériaux s'obtient en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d’un substrat.
- **Anisotropie du substrat** : L'anisotropie est définie comme étant la dépendance de la constante diélectrique du substrat sur l'orientation du champ électrique appliqué, pour obtenir les propriétés électriques et mécaniques nécessaires [29].

I.11.3 Critères de choix du substrat :

La conception des antennes micro rubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat :

- Possibilité d'excitation par onde de surface
- Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion
- Importance des pertes par diélectrique et par conducteur ;
- Anisotropie dans le substrat ;
- Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité ;
- Conditions mécaniques : Physiquement, le matériau doit résister aux contraintes mécaniques, conserver sa forme originelle. Son facteur d'expansion doit être voisin de celui de la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures.
- Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible.
- Coût de fabrication.

I.12 Applications

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de rependre à ces exigences. Pour cette raison les antennes imprimées remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications parmi ces application on cite :

- La commande et contrôle.
- La télémesure par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- Les récepteurs satellite de navigation.

L'antenne patch est de plus en plus utilisée en télécommunication, tout particulièrement dans le secteur de la téléphonie mobile.

I.13 Conclusion

La technologie microbande en générale, et les antennes patch en particulier connaissent un succès croissant aux prés des industriels et des professionnels de télécommunication, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation, et de s'assurer qu'elle se conformera aux exigences des systèmes.

Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes imprimées dont aurait besoin tout ingénieur ou chercheur s'intéressant à ce type d'antenne.

On a cité quelques applications de ce type d'antennes, l'étude du fonctionnement d'une antenne imprimée, on s'est intéressé par la suite aux plus importantes techniques utilisées pour son alimentation, mécanisme de rayonnement ainsi qu'aux différentes caractéristiques de son rayonnement.

II. Chapitre 02

Simulation d’une antenne et d’un réseau à deux antennes patch rectangulaire 2.4 GHz

II.1 Introduction

La simulation est une phase indispensable et nécessaire qui nous donne une approximation des résultats comme elle est réelle, pour choisir des bons et meilleurs paramètres avant la réalisation. Donc pour réaliser un objet (une antenne imprimée, circuit, composant, carte imprimée…) nous devons certainement passer par trois étapes nécessaires, elles sont comme suit :

- La modélisation : par des programmes ou des formulations.
- La simulation par des logiciels convenables.
- La réalisation (caractérisation par analyseur de réseau vectoriel…)

On se propose de réaliser une conception d'une antenne micro ruban à l'aide d'un logiciel adapté qui est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et nous permet de rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique HFSS qui étudie et simule des structures complexes en trois dimensions (3D). Il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électromagnétiques et la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D.

Nous présentons dans ce chapitre la phase de conception des antennes à un seul et deux éléments rayonnants et d'un réseau d'antennes de forme rectangulaire sur un substrat de faible constante diélectrique ainsi que les résultats de simulation utilisant ligne micro ruban.

II.2 Présentation du Logiciel HFSS

II.2.1 Description du logiciel HFSS :

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un des outils d'analyse électromagnétique 3D basé sur la méthode des éléments finis (FEM) parmi les plus aboutis. C'est un logiciel développé par la société américaine Ansoft. Il présente une interface graphique avancée et de nombreuses fonctionnalités, il a bénéficié de nombreuses optimisations pour

accélérer les calculs. Il se révèle relativement bien adapté pour décrire les cartes électroniques de manière précise mais nécessite des temps de calculs importants [31].

HFSS est un logiciel qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure, pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis [32]. Le principe de la méthode utilisée consiste à diviser l'espace d'étude en un grand nombre des petites régions (tétraèdres), puis à calculer localement le champ électromagnétique dans chaque élément.

En d'autres termes, les étapes de la FEM sont :

- Discrétisation en éléments finie de la région de résolution
- Discrétisation des équations pour chaque élément
- Assemblage de tous les éléments dans la région de résolution
- Résolution du système d'équation

HFSS utilise une méthode d'interpolation combinée avec un processus itératif dans lequel un maillage est créé et automatiquement redéfini dans les régions critiques. Le simulateur généré une solution basée sur le maillage initial prédéfini. Ensuite, il affine le maillage dans les régions ou il existe une haute densité d'erreurs, et généré une nouvelle solution [33].

Le calcul des paramètres (S_{11} par exemple) de la structure hyperfréquence suit les étapes suivantes [33] :

- Division de la structure en un nombre fini d'éléments.
- Excitation de chaque port de la structure avec une onde se propagent le long d'une structure guide d'onde uniforme ou d'une ligne de transmission qui possède la même section que le port.
- Calcul de la configuration total du champ électromagnétique à l'intérieur de la structure

On peut ajouter aussi un balayage de fréquences (frequency sweep), de cette façon HFSS résout La structure pour plusieurs fréquences mais toujours à partir du même maillage, le

maillage de la fréquence principale. Afin d'obtenir des bons résultats pour chaque fréquence il faut que la fréquence principale soit la plus élevée**.** [34]

Un projet HFSS est un dossier qui contient un (ou plusieurs) modèle(s) appelé(s) design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post-traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement HFSS [32].

II.2.2 Les outils d'Ansoft

La fenêtre d'Ansoft HFSS a plusieurs panneaux facultatifs [35] :

1. Un chef de projet qui contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
2. Un gestionnaire de messages qui nous permet de regarder toutes les erreurs ou les avertissements qui se produisent avant que nous commencions une simulation.
3. Une fenêtre de propriété qui nous montre et permet de changer les paramètres ou les attributs modèles.
4. Une fenêtre de progrès qui montre le progrès de solution.
5. Une fenêtre du modeleur 3D qui contient le modèle et l'arbre de modèle pour la conception active.

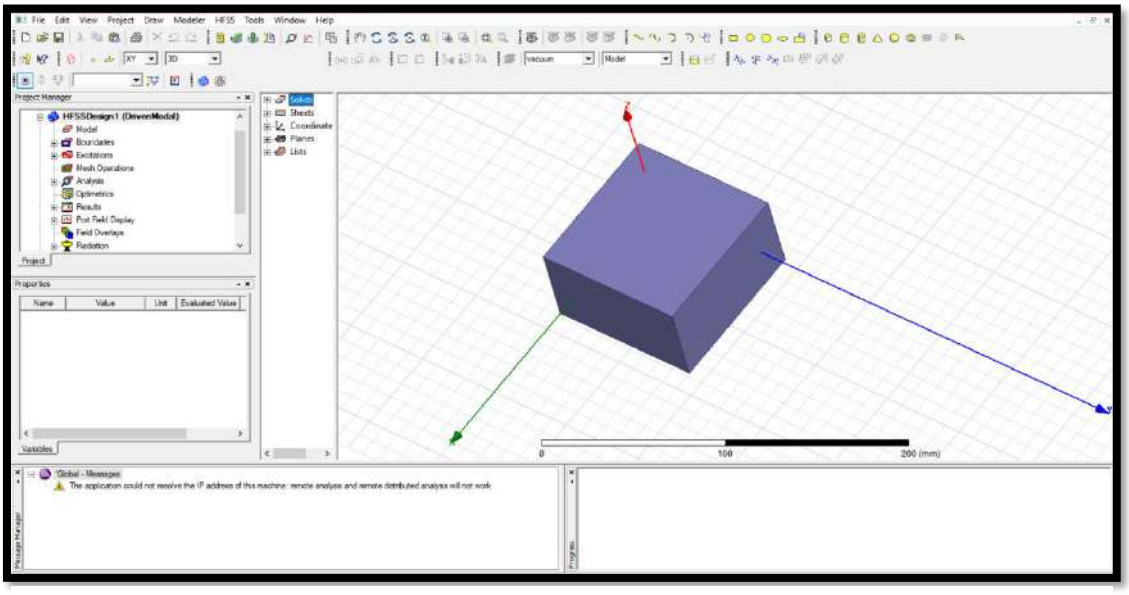


Figure 24 : Fenêtre de logiciel HFSS pour model 3D

II.3 Cahier de charge

Notre Projet est divisé en deux parties, la première partie consiste à trouver une antenne microbande rectangulaire, la deuxième partie consiste a créer un réseau d'antennes microbande rectangulaire en utilisant le patch trouvé dans la première partie

- Pour la fréquence on a choisi 2.4Ghz (on a trouvé la fréquence 2.4Ghz d'après les calculs de bon dimension réalisable)
- Pour les matériaux diélectriques on va utiliser FR4_EPOXY avec εr=4.4 Les substrats doivent être de permittivité relative faible de façon à permettre un bon rayonnement des champs EM.
- L'alimentation sera faite à l'intermédiaire d'une ligne microbande de largeur $w0$.
- Pour la longueur L et la largeur W, il change par rapport aux autres paramètres.
- Pour l'épaisseur de substrat on a choisi h = 1.5mm.
- L'impédance caractéristique est de l'ordre de $Z0$=50 Ω.
- Matériau de plan de masse et patch est à base de cuivre.
- La surface est de l'ordre A=(60×60) $mm2$.

II.4 Simulation d'une antenne patch

II.4.1 Simulation des antennes simples rectangulaires pour la fréquence f=2.4GHz

II.4.1.1 Étapes de simulation de première antenne

- On commence par le plan de masse avec A=(60×60) $mm2$

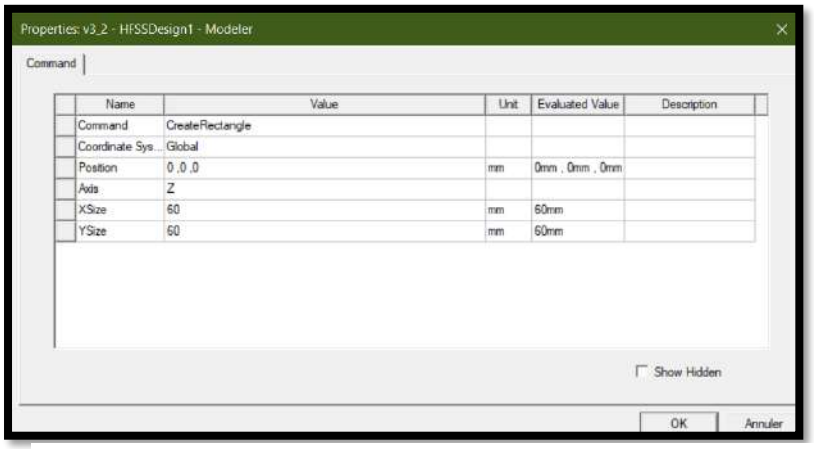


Figure 25 Fenêtre des paramètres de plan de masse.

- Deuxièmement on ajoute le substrat avec une épaisseur de h=1.5 mm

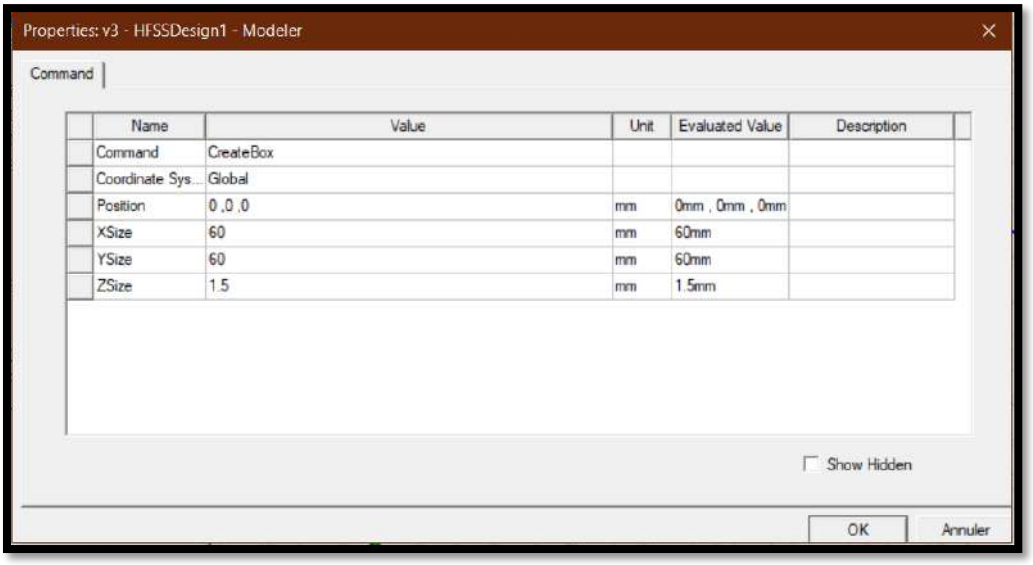


Figure 26**:** Fenêtre des paramètres de substrat.

- On trace le patch au-dessus de substrat avec les dimensions L et W déjà calculé

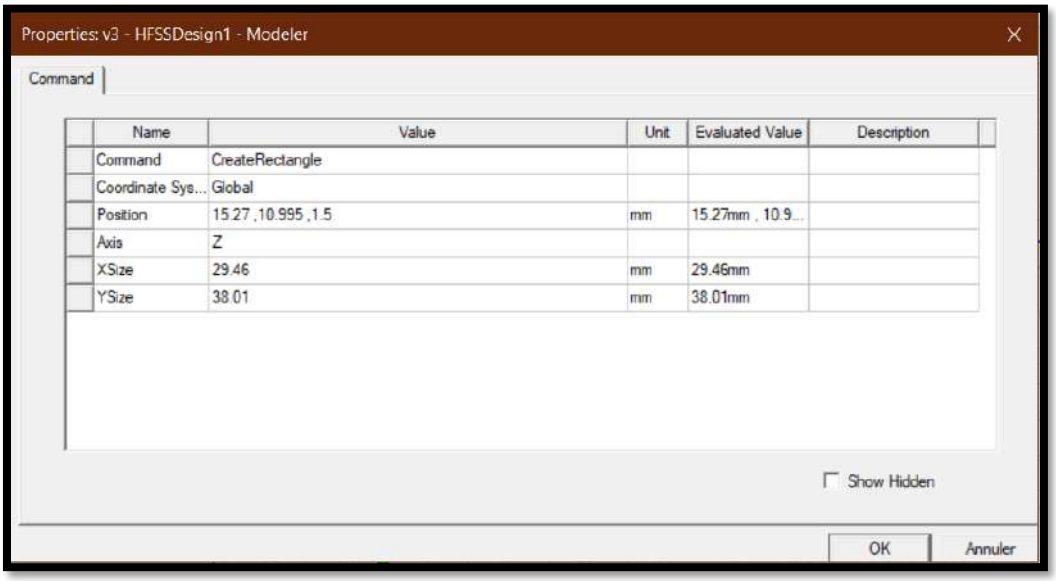


Figure 27**:** Fenêtre des paramètres de patch.

- On trace l'entrée de ligne d'alimentation

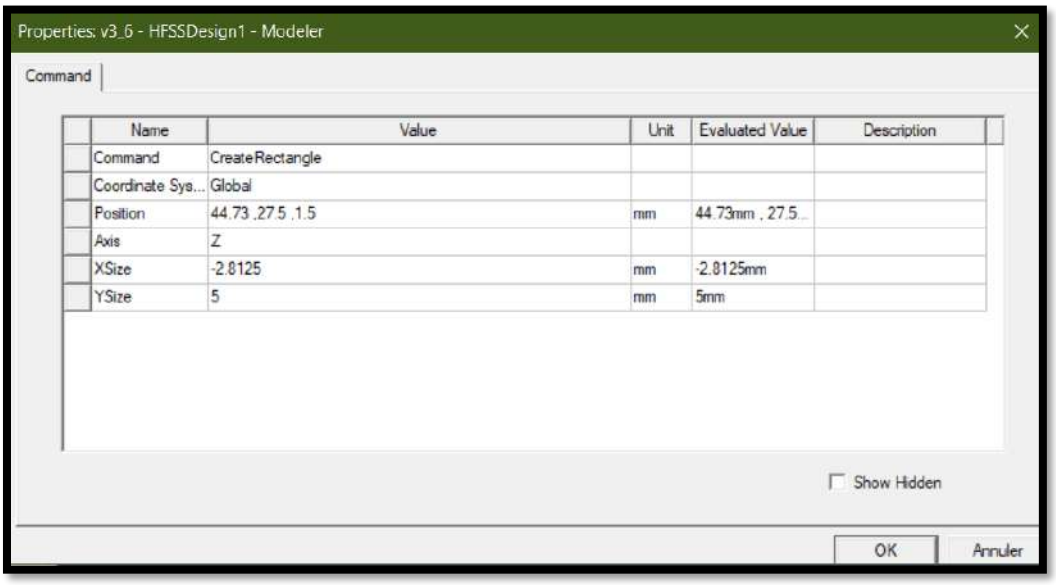


Figure 28: Fenêtre l'entrer de ligne d'alimentation

- On trace aussi la ligne d'alimentation avec la Largueur *w*0 déjà calculé

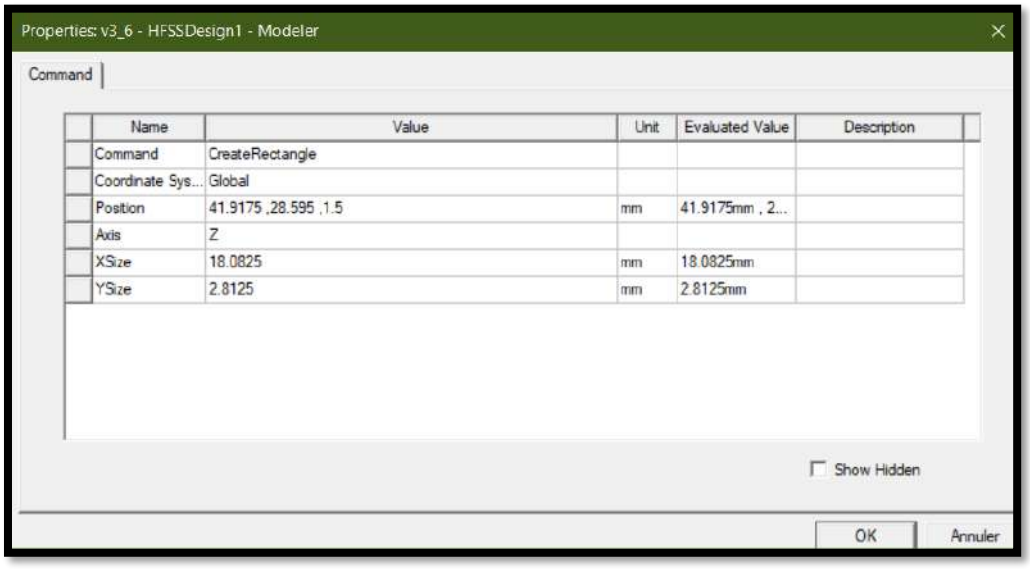


Figure 29: Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande.

- Après, on ajoute le point d'excitation sur l'une des extrémités avec la même Largeur

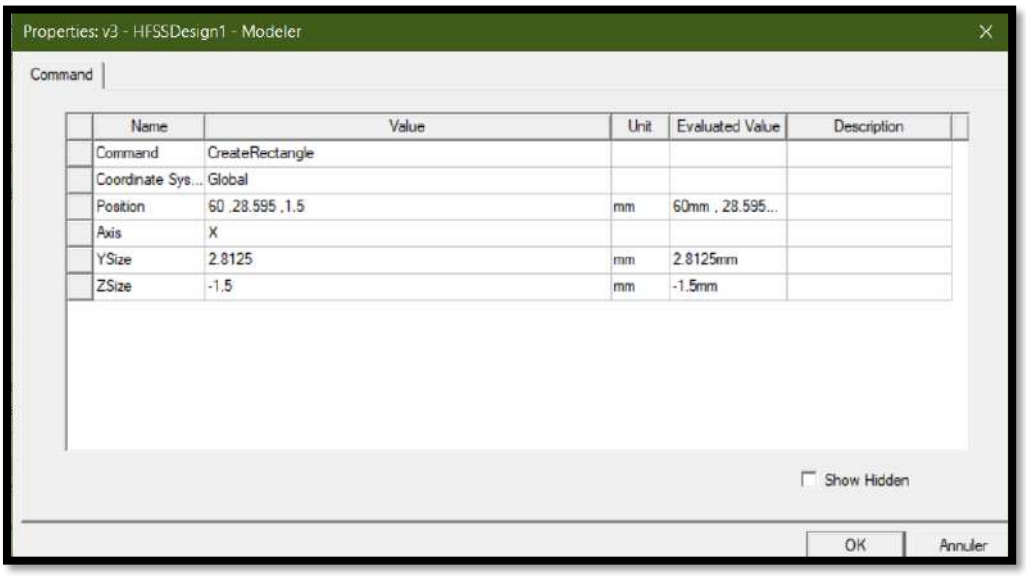


Figure 30**:** Fenêtre des paramètres de point d'excitation.

- Il reste d'ajouter une boîte de rayonnement pour cette antenne

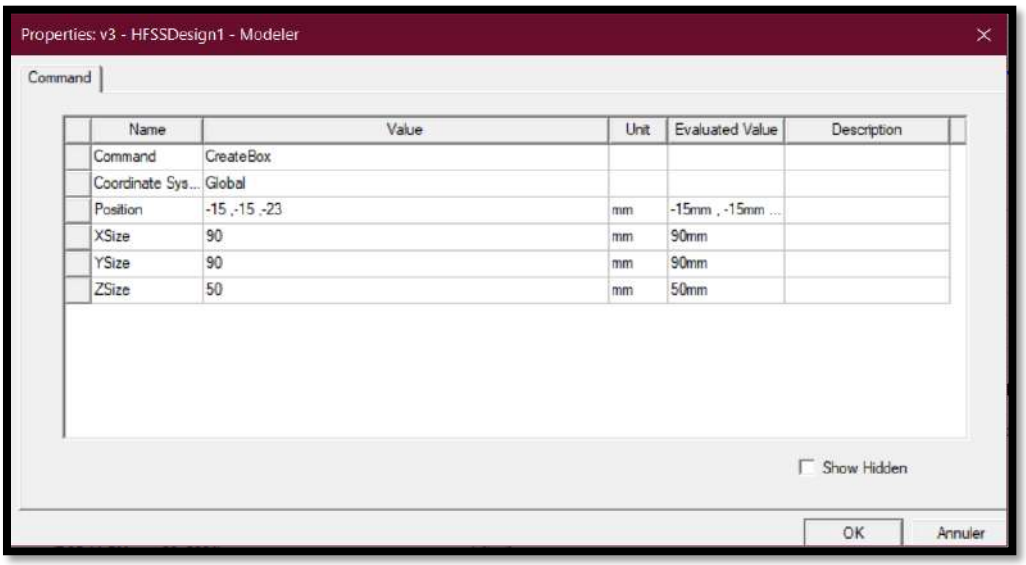


Figure 31 **:** Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement.

- **Conception d'antenne pour f = 2.4GHz, h = 1.5 mm et εr=4.4.**

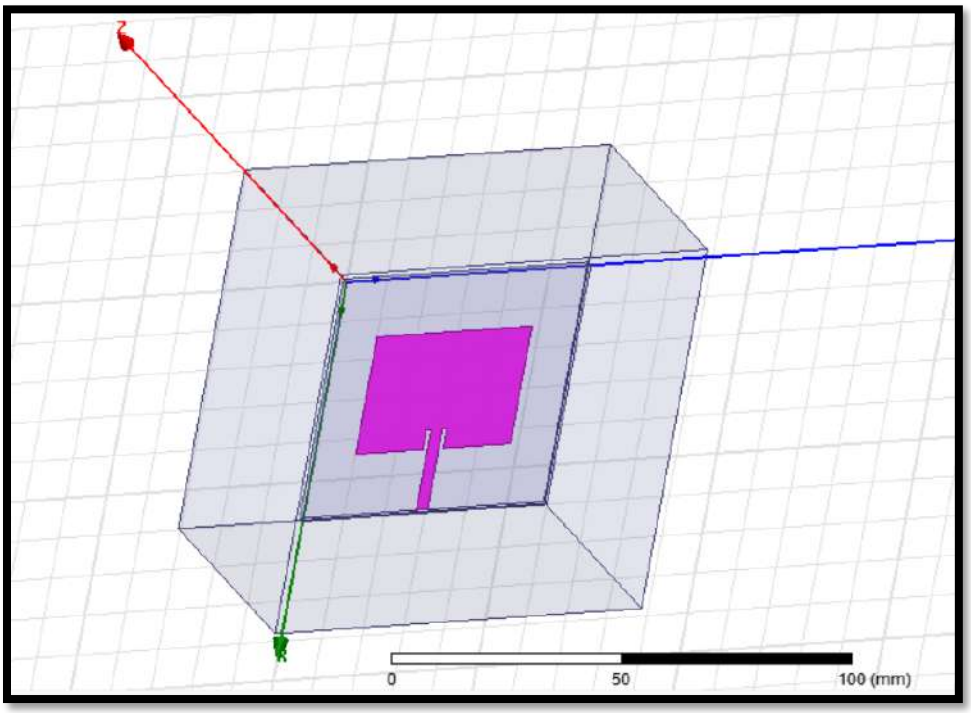


Figure 32 **:** une antenne microbande rectangulaire

II.4.1.2 Résultats de simulation

- La figure 33, présente l'évolution du paramètre S en fonction de la fréquence :

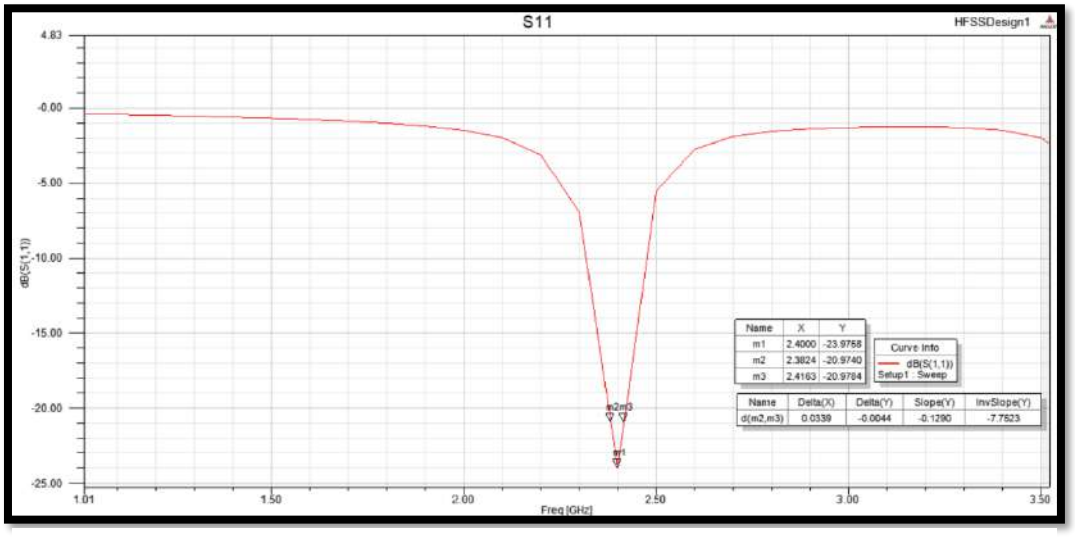


Figure 33 Coefficient de réflexion *S*11 en fonction de la fréquence.

- Diagramme de rayonnement 3D Gain :

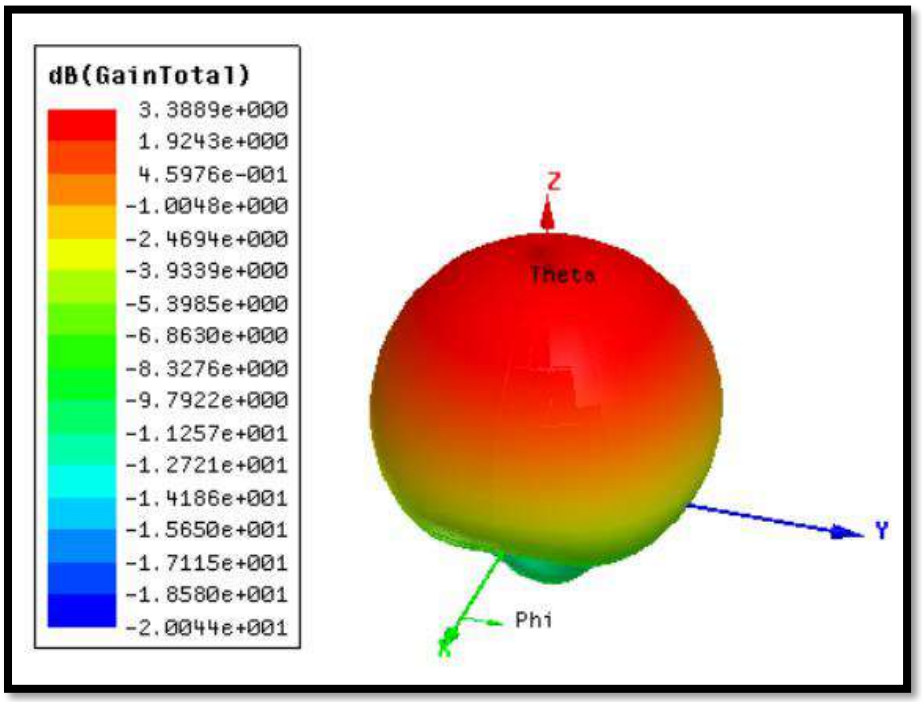


Figure 34**:** Diagramme de rayonnement 3D Gain

- Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique :

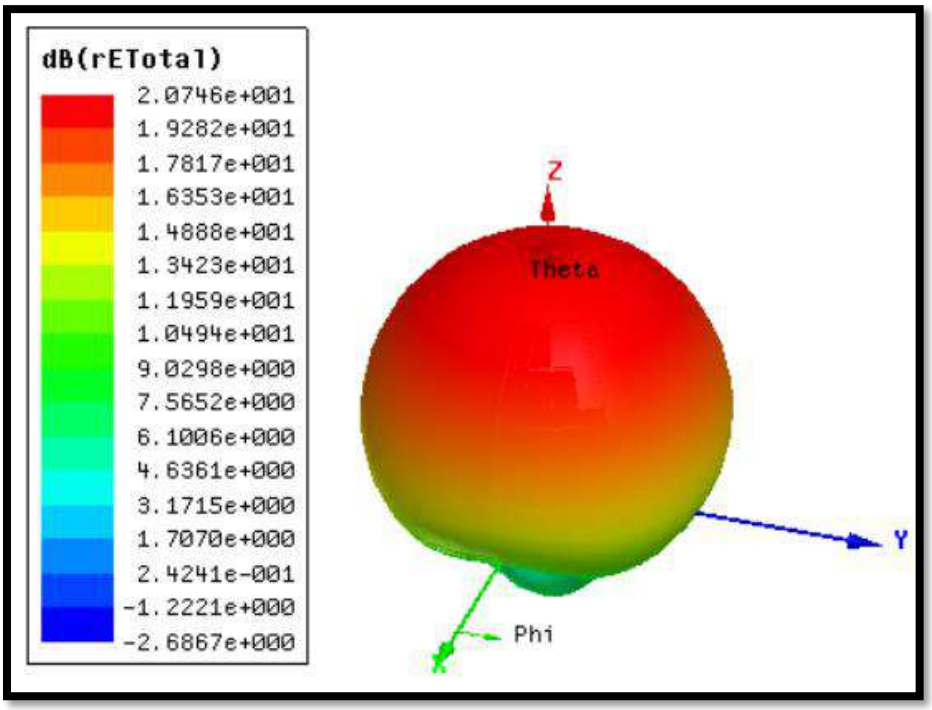


Figure 35**:** Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.

- Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90° :

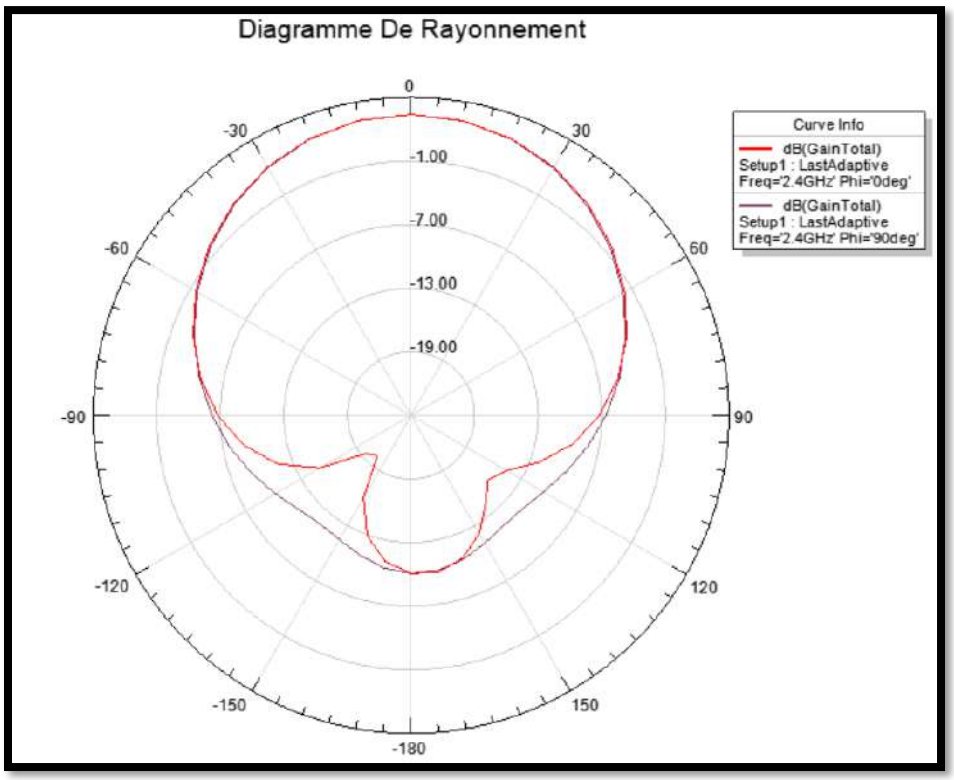


Figure 36**:** Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90°.

- La directivité :

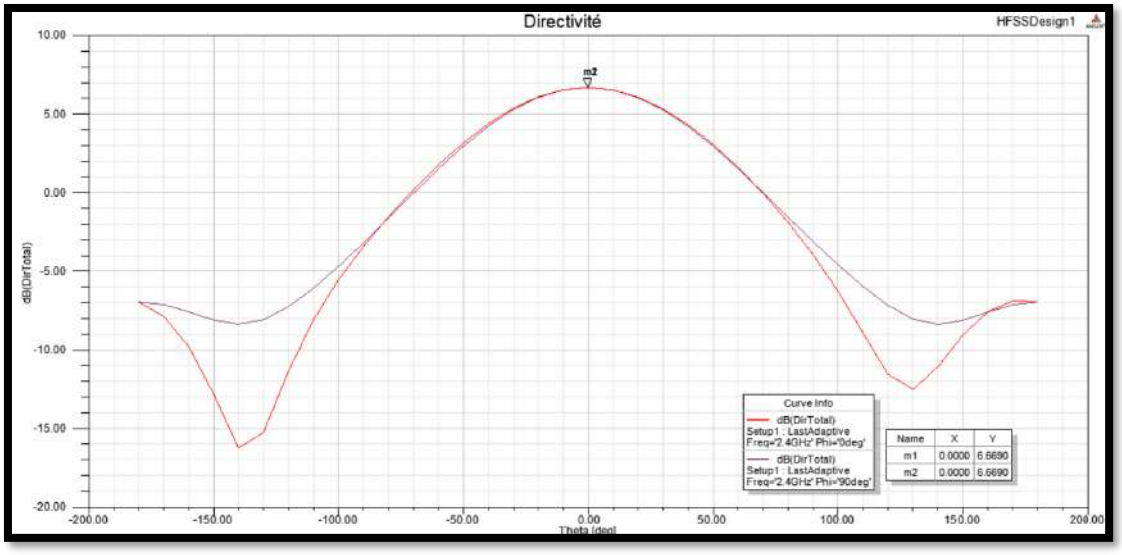


Figure 37**:** La directivité totale.

- VSWR

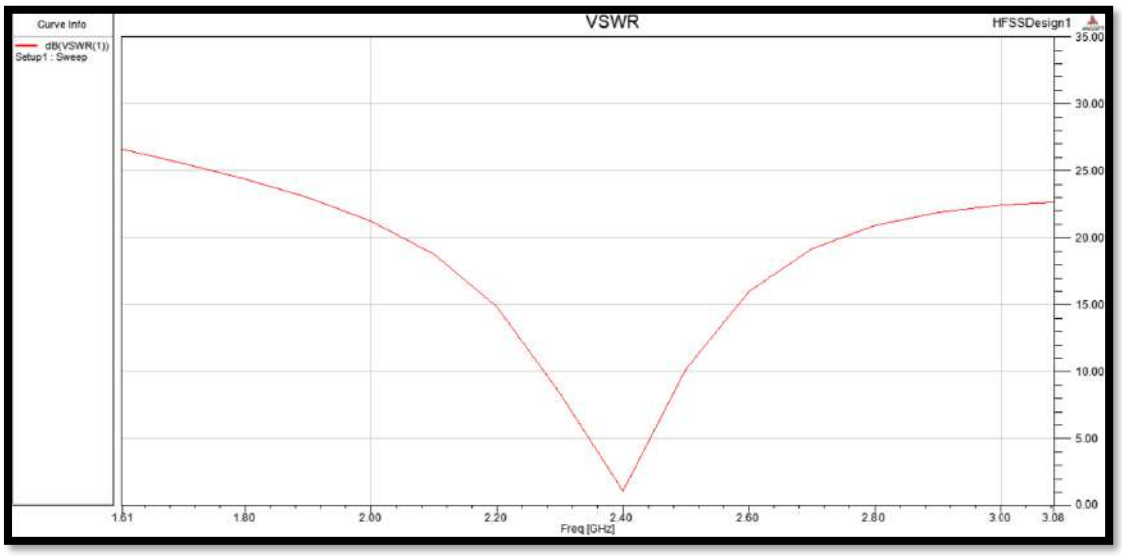


Figure 38**:** Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

Tableau 3 : Résultats obtenus

Fréquence (GHz)	*S*11 (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Directivité (dB)	Champ E (dB)	BP(-3dB) (MHz)	Rendement (%)
2.4	-23.9758	1.1021	3.3889	6.6690	20.746	33.9	50.81

Tableau 3 : Résultats de simulation

D'après les diagrammes de rayonnement et le tableau (III.2), on constate que cette antenne rectangulaire a :

- Une bonne directivité suivante l'axe Z.
- Une bande passante étroite de l'ordre de 33.9MHz,
- Une bonne adaptation pour un coefficient de réflexion de -23.9758 dB
- Un rendement faible de 50.81%.

II.4.2 Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes :

II.4.2.1 Étapes de simulation de deuxième antenne (réseaux patch) :

- On commence par le plan de masse avec A=(120×120) $mm2$

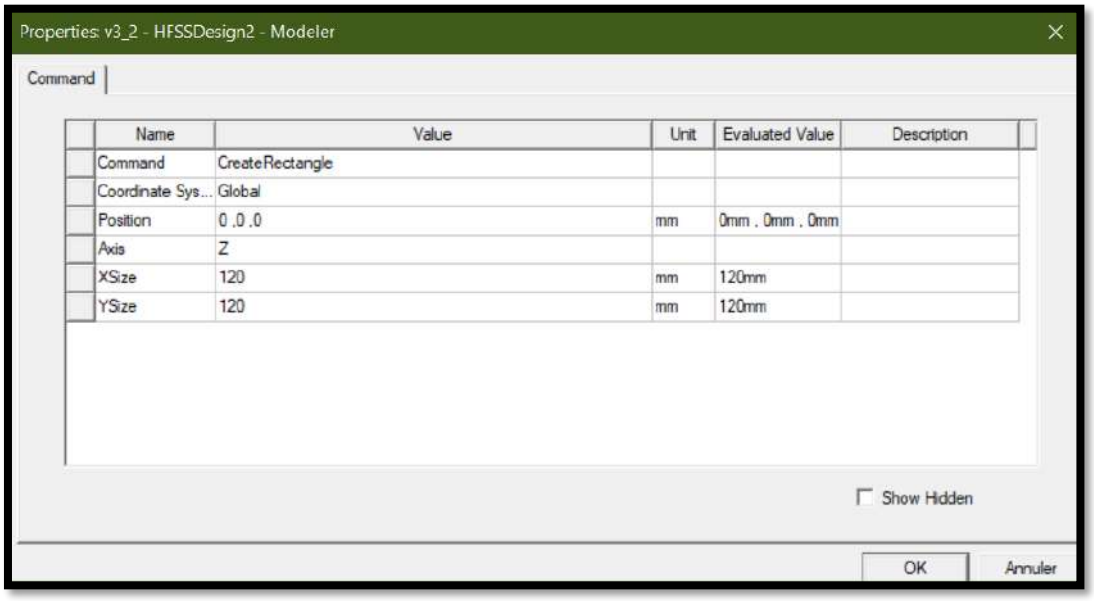


Figure 39**:** Fenêtre des paramètres de plan de masse.

- Deuxièmement on ajoute le substrat avec une épaisseur de h=1.5 mm

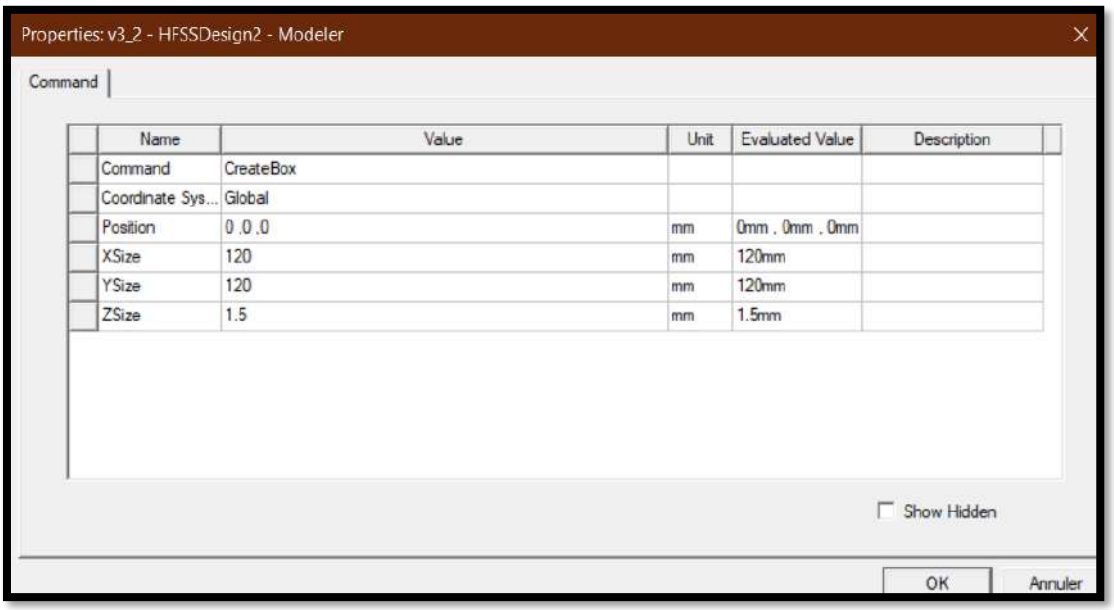


Figure 40**:** Fenêtre des paramètres de substrat.

- On trace les deux patchs au-dessus de substrat avec les dimensions *L* et *W* déjà calculé

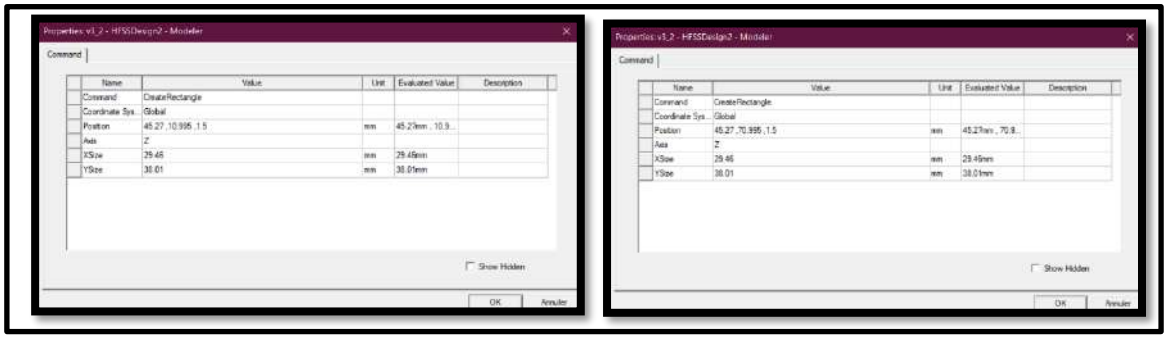


Figure 41 **:** Fenêtre des paramètres de deux patchs.

- On tracer l'entrer de ligne d'alimentation pour les deux patchs par plusieurs étapes



Figure 42**:** Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande.

- Après, on ajoute le point d'excitation sur l'une des extrémités avec la même Largeur

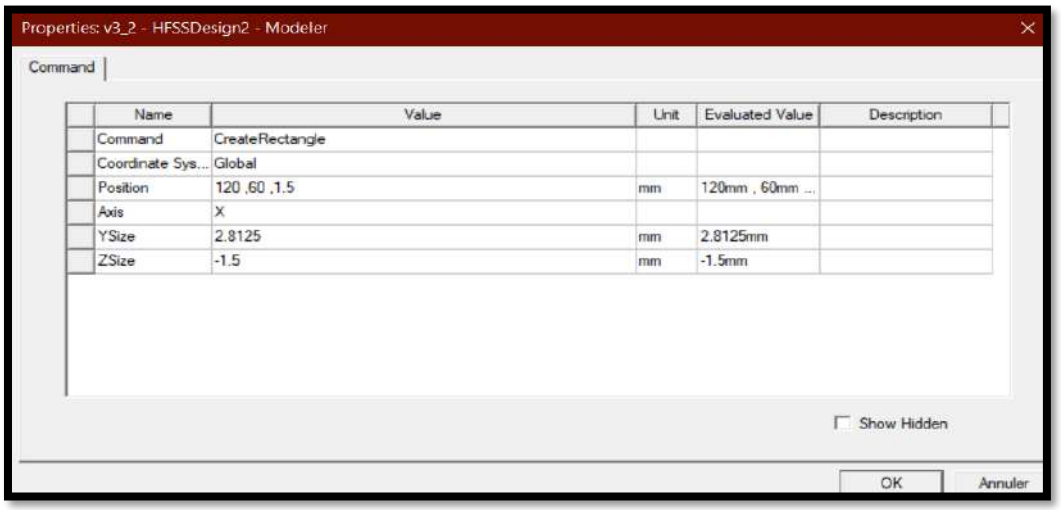


Figure 43**:** Fenêtre des paramètres de point d'excitation.

- Il reste d'ajouter une boîte de rayonnement pour cette antenne

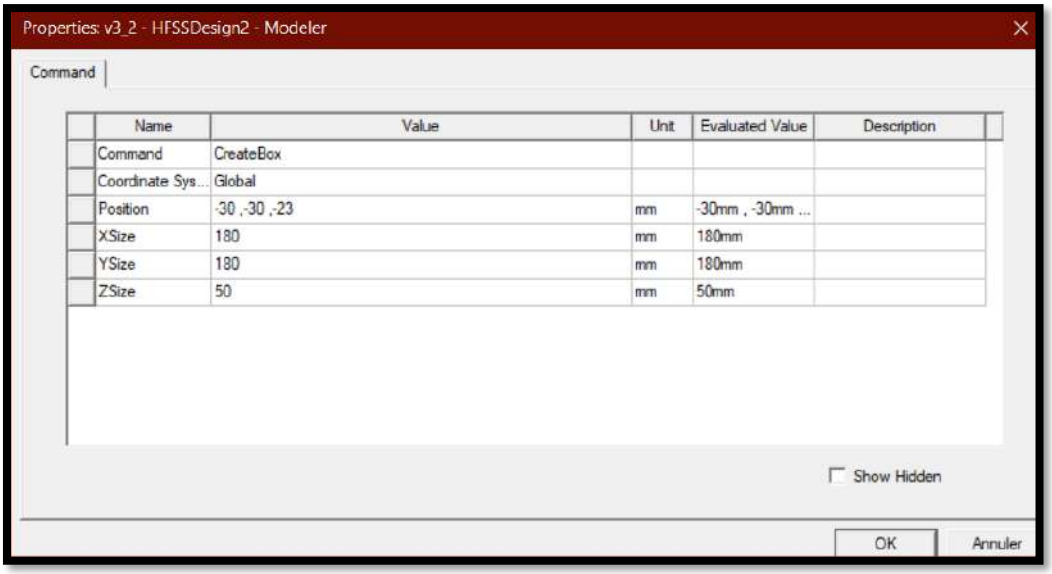


Figure 44**:** Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement.

- **Conception d'antenne réseau patch pour f = 2.4GHz, h = 1.5 mm et εr=4.4.**

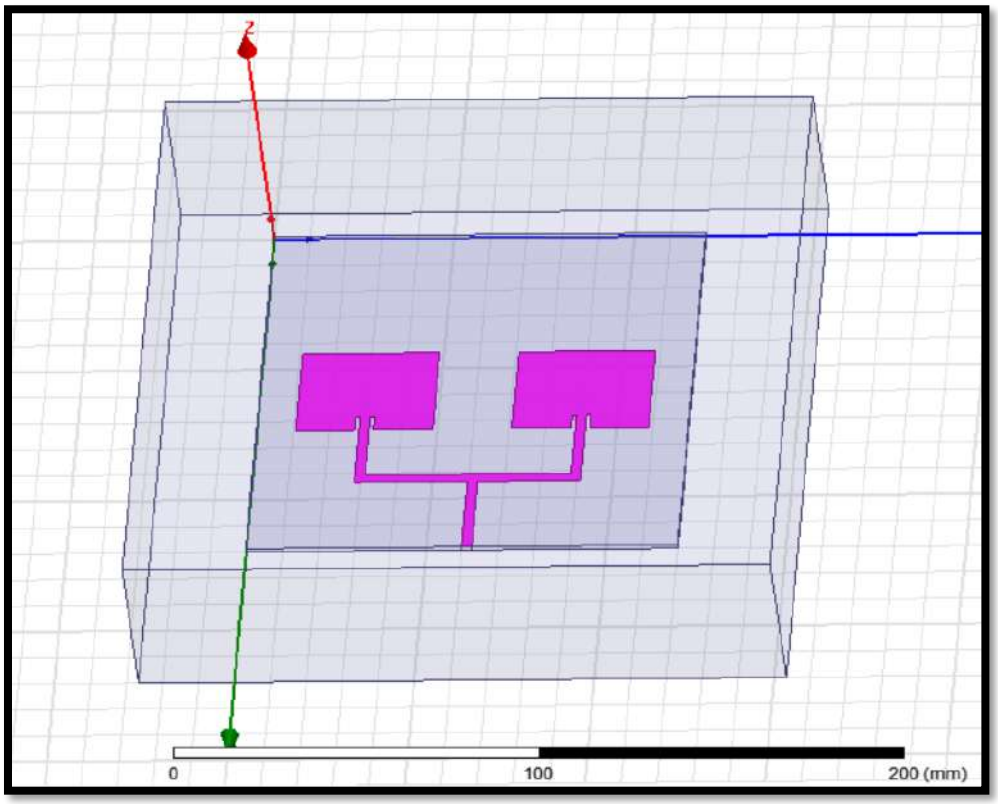


Figure 45**:** Conception des réseaux 2 patch.

II.4.2.2 Résultats de simulation

- La figure des paramètre S

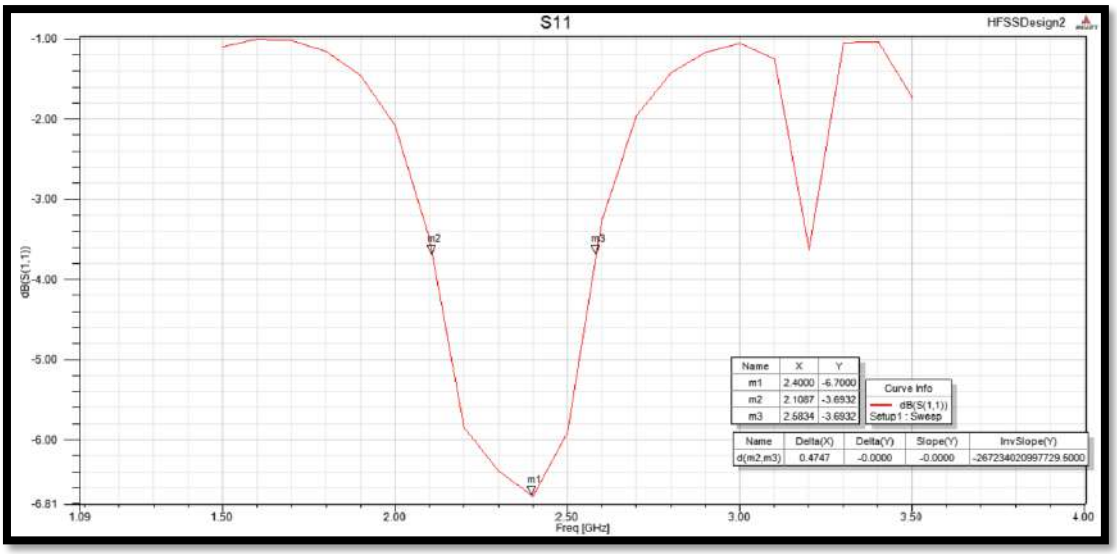


Figure 46 : Coefficient de réflexion *S*11en fonction de la fréquence.

- Diagramme de rayonnement 3D Gain

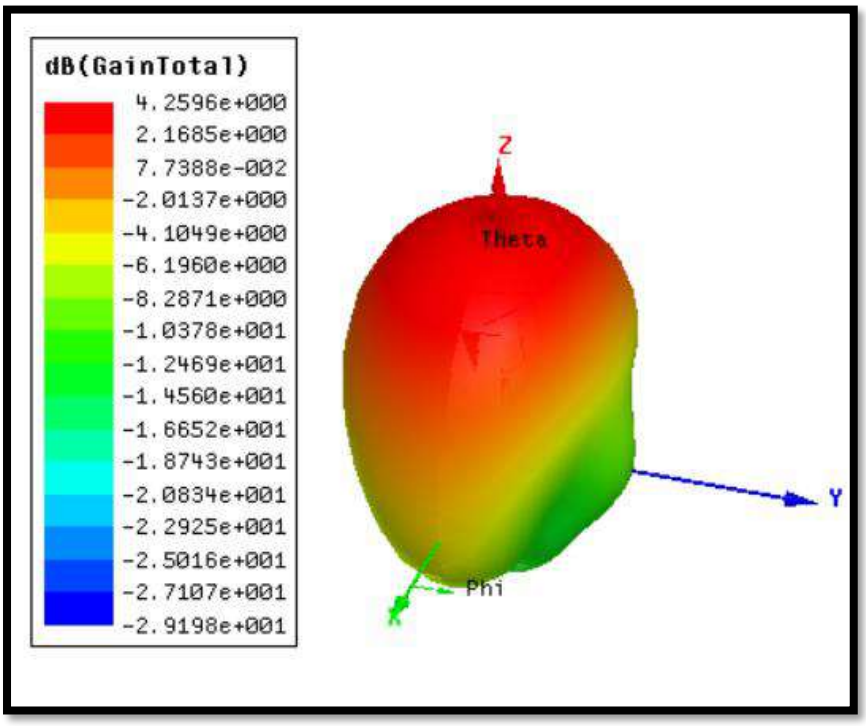


Figure 47**:** Diagramme de rayonnement 3D Gain

- Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.

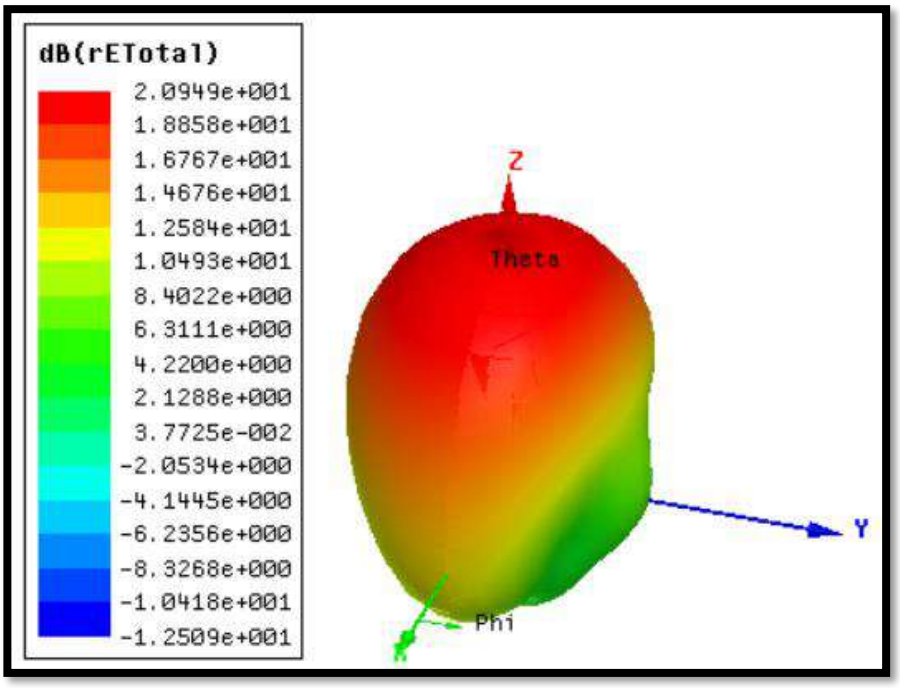


Figure 48: Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.

- Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90°.

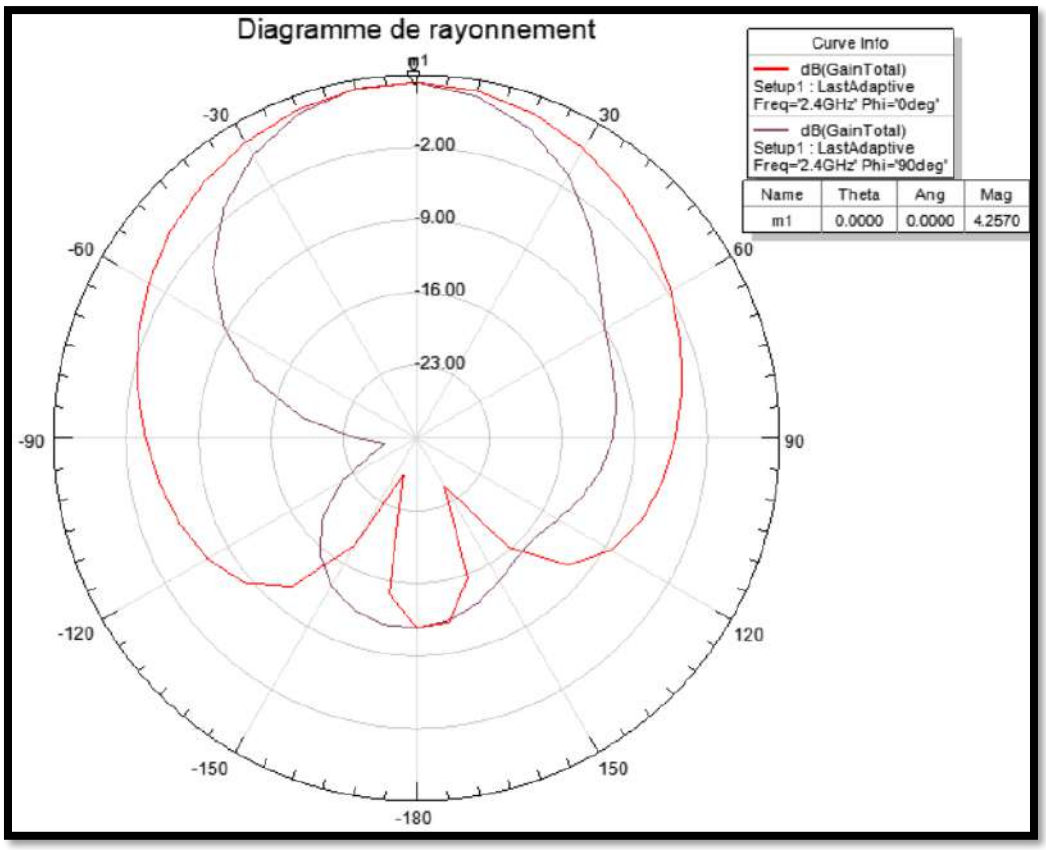


Figure 49: Diagramme de rayonnement suivant l'angle φ = 0°, 90°.

- Directivité

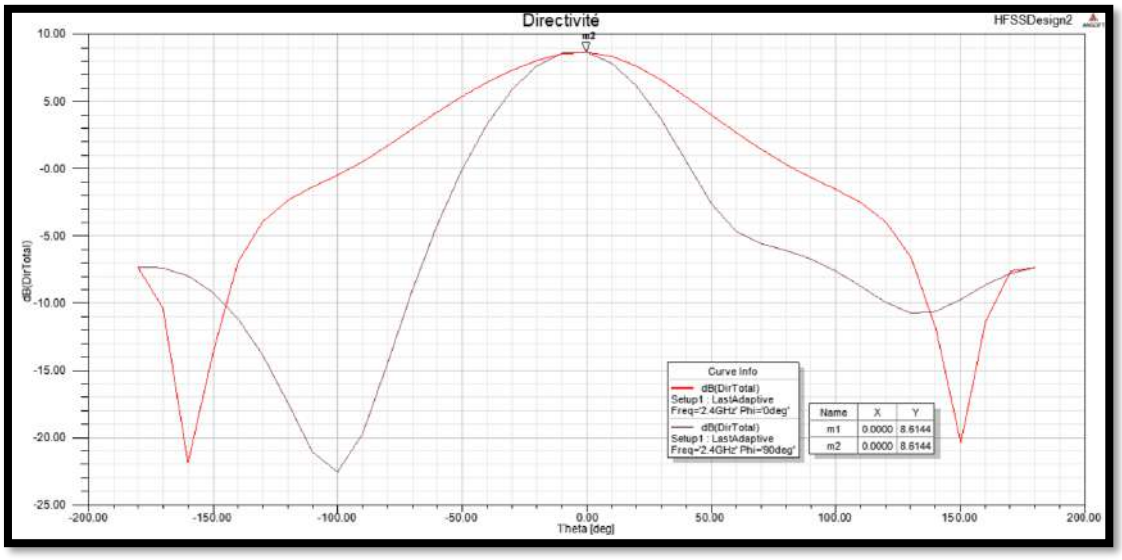


Figure 50: La directivité totale.

- VSWR

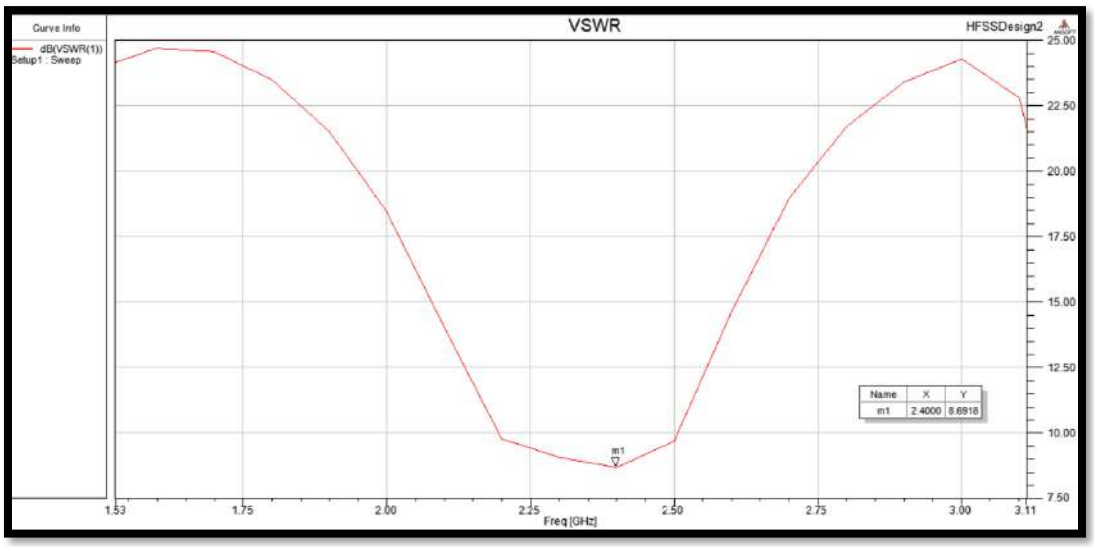


Figure 51: Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

Le Tableau 4, présente les différents paramètres de simulation à la fréquence 2.4 GHz.

Fréquence (GHz)	*S*11 (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Directivité (dB)	Champ E (dB)	BP(-3dB) (MHz)	Rendement (%)
2.4	-6.7000	8.6918	4.2596	8.6144	20.949	474.7	49.44

Tableau 4 : Résultats de simulation

D'après les résultats de simulation, on constate que le réseau à deux antennes microbandes a :

- Une bonne directivité suivante l'axe **Z,** avec un gain de 8.6144dB.
- Une bande passante faible 474.7 MHz.
- Une bonne adaptation pour un coefficient de réflexion de -6.7000 dB.
- Un rendement faible de 49.44%.

II.4.3 Discussion et interprétation des résultats :

Les antennes micro-rubans sont des antennes de taille très petites, elles peuvent être très utiles mais elles ont un gain et une bande passante un peu faible par rapport à d'autres types

d'antennes, l'une des solutions trouvées consiste à utiliser des réseaux de ces antennes. On a commencé avec un réseau à 2 Patchs, et on peut voir une augmentation dans le gain (3.3889dB à 4.2596dB), la bande passante (33.9 MHz à 474.7 MHz) et la directivité (6.6690 dB à 8.6144dB).

Tableau 5 : Tableau comparatif

Caractéristique	Patch simple	Réseau d'antenne à 2 patches.
S11 (dB)	-23.9758	-6.7000
VSWR (dB)	1.1021	8.6918
Gain (dB)	3.3889	4.2596
Champ électrique (dB)	20.746	20.949
Directivité (dB)	6.6690	8.6144
Rendement (%)	50.81	49.44
BP(MHz) à -3dB	33.9	474.7

Tableau 5 : Tableau comparatif entre les simples et des réseaux des antennes

II.5 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la conception et la simulation des antennes microbandes simples rectangulaires 2.4 GHz, ainsi que les réseaux d'antennes patchs en utilisant le logiciel de la simulation HFSS.

D'après les résultats obtenus pour chaque type d'antenne, on conclue que la fréquence de résonance est bien liée au dimensionnement de l'antenne microbande étudiée telles que (L et W, h, a). D'autre part, les paramètres (l'épaisseur h du substrat, la position des patches et les lignes d'alimentation) influent considérablement sur les performances de l'antenne (gain, la bande passante, coefficient de réflexion S11 et le diagramme de rayonnement).

D'après l'étude comparative des résultats obtenus, nous concluons que les résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes présente de meilleures performances de point de vue (gain, directivité, bande passante et coefficient de réflexion) par rapport aux résultats de simulation des antennes microbandes simples.

III. Chapitre 03

Réalisation d’un réseau à deux antennes microbandes Rectangulaire

2.4 GHz

III.1 Introduction

Après la simulation dans logiciel HFSS on passe maintenant à la réalisation, dans cette partie nous avons réalisé un modèle d'antennes imprimées (réseau patch) à élément rectangulaire. La réalisation est faite au niveau du laboratoire de Télécommunications en basant sur la technologie des circuits imprimés. La caractérisation de modèle réalisé est effectuée au niveau du laboratoire cité précédemment où on a utilisé le banc d'essai d'antenne qui est géré par logiciel Data Acquisition

Le but de cette réalisation est la comparaison entre les résultats pratiques obtenus dans le banc d'essai et les résultats de simulation du réseau d'antennes patch et d'antenne patch simple obtenu par le logiciel de simulation HFSS.

III.2 Réalisation d'un réseau des antennes patch rectangulaires 2.4 GHz

III.2.1 Matériel utilisé :

Pour réaliser notre réseau à deux antennes patchs, on utilise le matériel suivant :

- Typon (papier film)

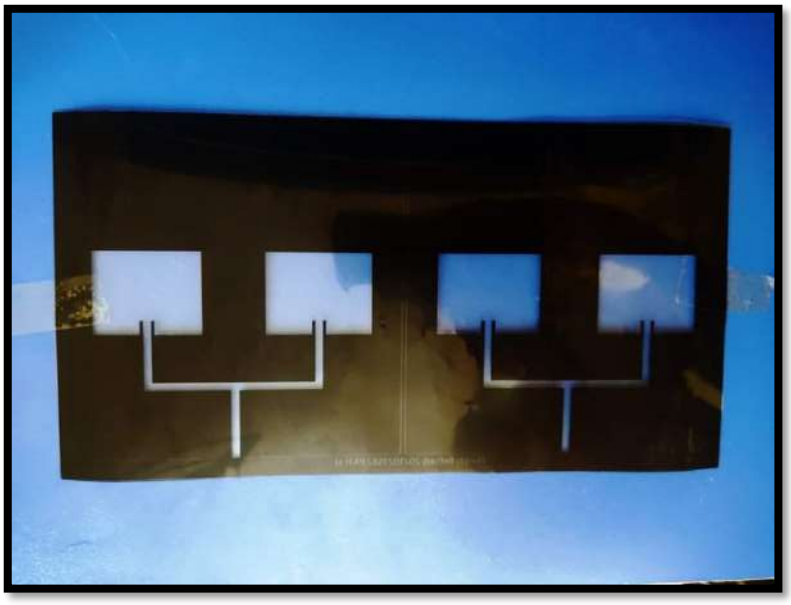


Figure 52 : Typon

- La plaque fr4 double surface.

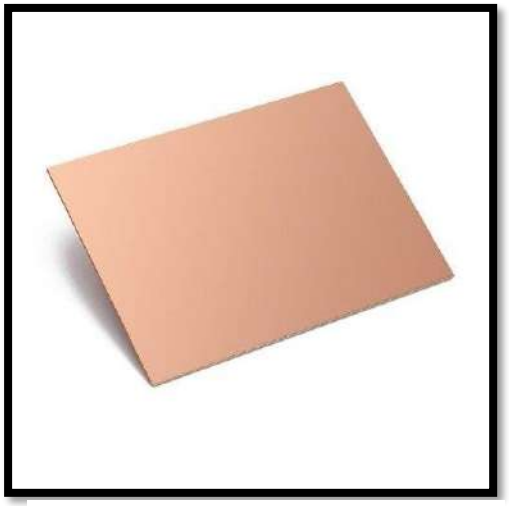


Figure 53 : La plaque fr4 double surface

- Crystal UV



Figure 54 : Crystal UV

- 02 produits chimiques (révélateur et graveur)

- Machine de gravure PCB chimique



Figure 55 : Machine de gravure PCB

- Photoploteur (la machine de l'impression de typon)



Figure 56 :Photoploteur

- Massicot (la machine découpe de la plaque)

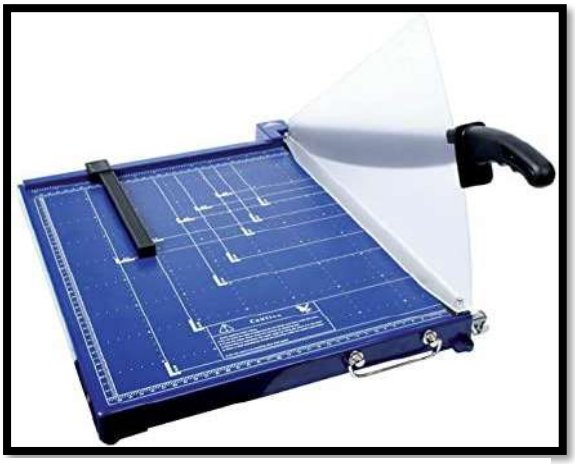


Figure 57 : Massicot

- Brossage (machine de nettoyage)



Figure 58 : machine de nettoyage (Brossage)

- Connecteur SMA codé



Figure 59 : Connecteur SMA codé

- Soudeur



Figure 60 : Soudeur

III.2.2 Les étapes de création du circuit imprimé d'un patch :

Pour fabriquer l'antenne réseau patch, il faut suivre les prochaines étapes :

- Antenne réseau patch est optimisée dans une EM software
- Le dessin de patch est peint en noir en utilisant n'importe quel logiciel de dessin
- L'empreinte noire de l'antenne est imprimée sur un film transparent (typon) et les dimensions sont contrôlées.
- Les marques sont dessinées sur le matériau revêtu de cuivre double face (dans ce cas une double face fr-4), puis le fr-4 est coupé aux dimensions marquées.
- Lorsque le substrat fr-4 est coupé, nous retirons l'autocollant d'une couche et puis attachons soigneusement le film sur le fr-4 (la partie noire du film agira comme un masque de protection pendant le processus d'exposition photo).
- Le fr-4 est inséré dans l'exposition à la lumière UV (la surface appropriée doit faire face à la lumière, l'exposition aux UV devrait durer environ 2 min).
- Nous utiliserons deux produits chimiques un (révélateur) pour le développement et un (graveur) pour la gravure du cuivre, le processus chimique commence par l'insertion des planches dans le révélateur (la carte reste dans le réservoir du développeur pendant 1 min) et après la carte est insérée dans le graveur où le cuivre sera gravé par toutes les zones exposées aux UV il doit rester dans le graveur pendant assez de temps pour graver le cuivre (au moins 9min dans notre cas).
- Le cuivre a été gravé selon la conception.
- La résine photosensible est retirée du cuivre.
- Enfin, nettoyage de l'antenne
- On va souder le connecteur SMA à la ligne d'alimentation

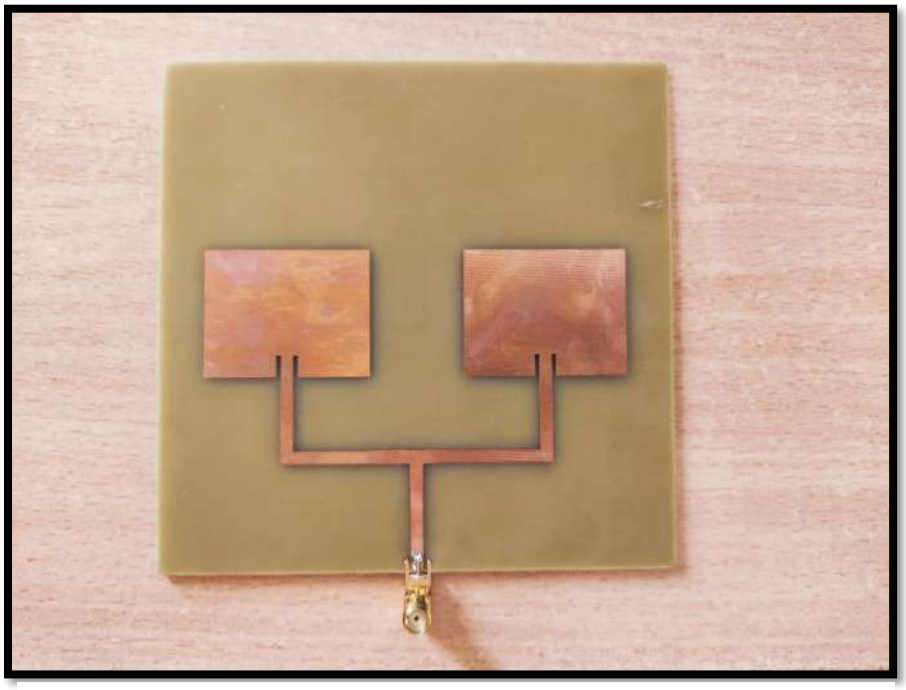


Figure 61 : antenne réseau patch

III.3 Manipulations et résultats pratiques

III.3.1 Manipulations :

Dans cette parie nous avons utilisé un poste de travail du laboratoire au niveau de notre université (antenna training system), qui est constitué d'un système d'émission et un système de réception qui fonctionne à la fréquence 2GHz ou 10GHz, à faible puissance d'émission, ce système est lié à un PC munie d'un logiciel (data acquisition) associé qui nous permet de tracer le diagramme de rayonnement et faire l'extraction des différents paramètres. Ce système nous permet seulement de faire des mesures à petites distances.

Dans le système émetteur on installe une de nos réseaux patchs, qui sera fixée. Et dans le système de réception on installe l'autre réseau patch, qui sera rotatif pour faire le balayage sur 360° pour chaque position de distance entre l'émetteur e le récepteur.

Dans la première manipulation (figure 63), on fixe l'antenne patch dans l'émetteur suivant l'angle θ=0° pour assurer l'émission de la puissance maximale d'une part. Et d'autre, part on place l'autre réseau patch dans le récepteur suivant l'angle θ =0°, et qui sera pivoté d'une manière rotationnelle-horizontale pour différentes phases φ = 0° à 360°, à chaque distance fixée entre l'émetteur et le récepteur, afin de déterminer le diagramme de rayonnement pour chaque cas.

Dans la deuxième manipulation (figure 64), on fixe l'antenne patch dans l'émetteur suivant l'angle θ=0° pour assurer l'émission de la puissance maximale d'une part. Et d'autre, part on place l'autre réseau patch dans le récepteur suivant l'angle θ =90°, et qui sera pivoté d'une manière rotationnelle-horizontale pour différentes phases φ = 0° à 360°, à chaque distance fixée entre l'émetteur et le récepteur, afin de déterminer le diagramme de rayonnement pour chaque cas.

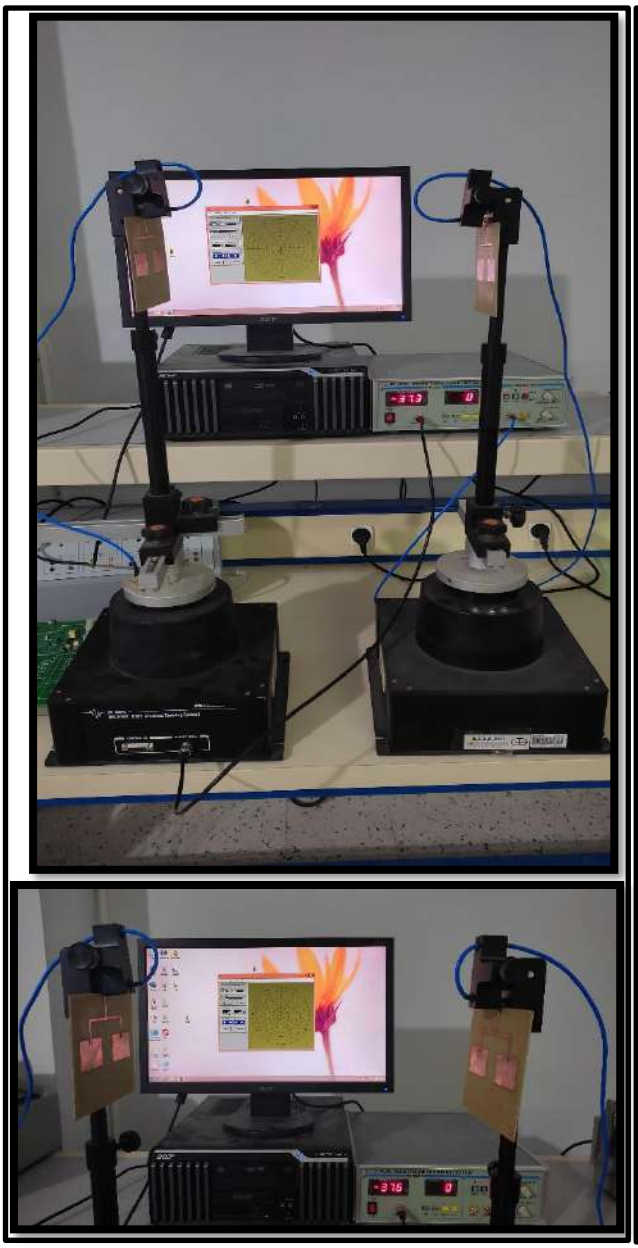


Figure 62 : première manipulation θ=0°

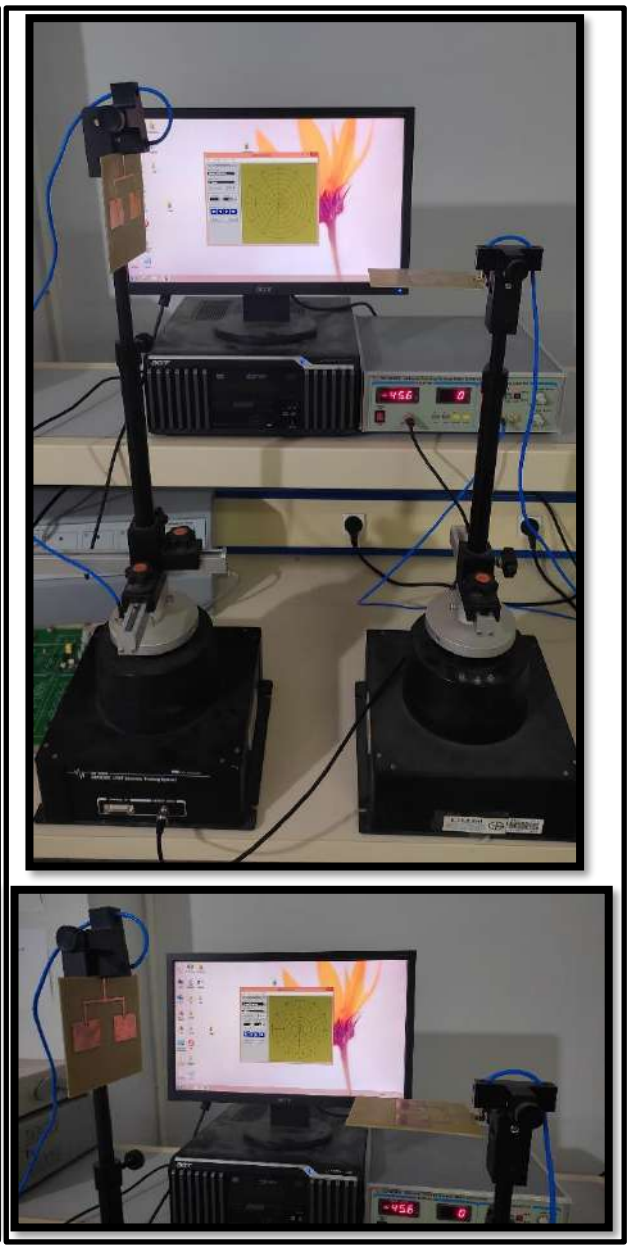


Figure 63 : deuxième manipulation θ=90°

III.3.2 Résultats obtenus

Nous avons travaillé avec plusieurs distances et deux déphasages

- Distance d=40cm et la phase θ=0°

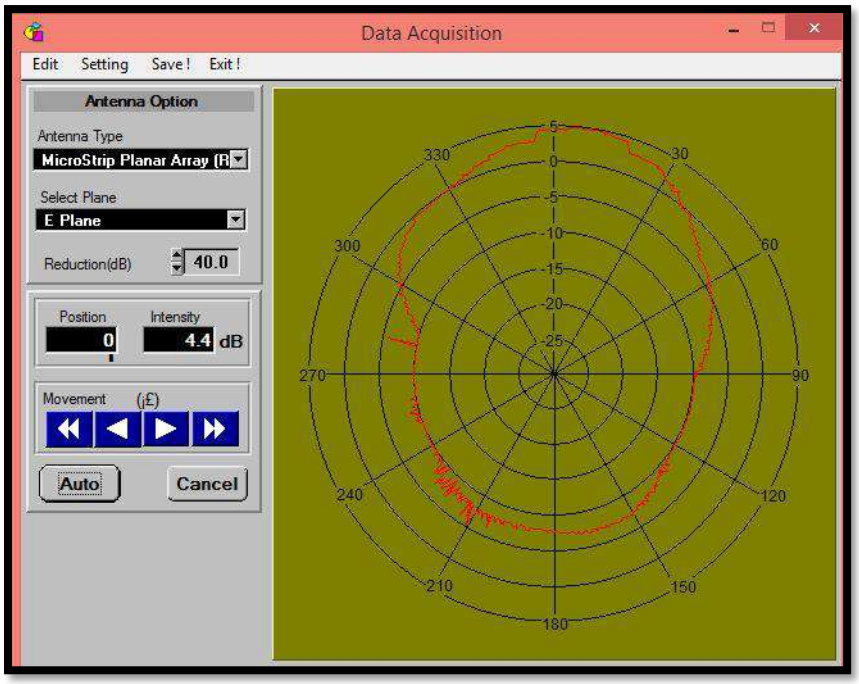


Figure 64 : Diagramme de rayonnement d=40cm et θ=0°

- Distance d=40cm et la phase θ=90°

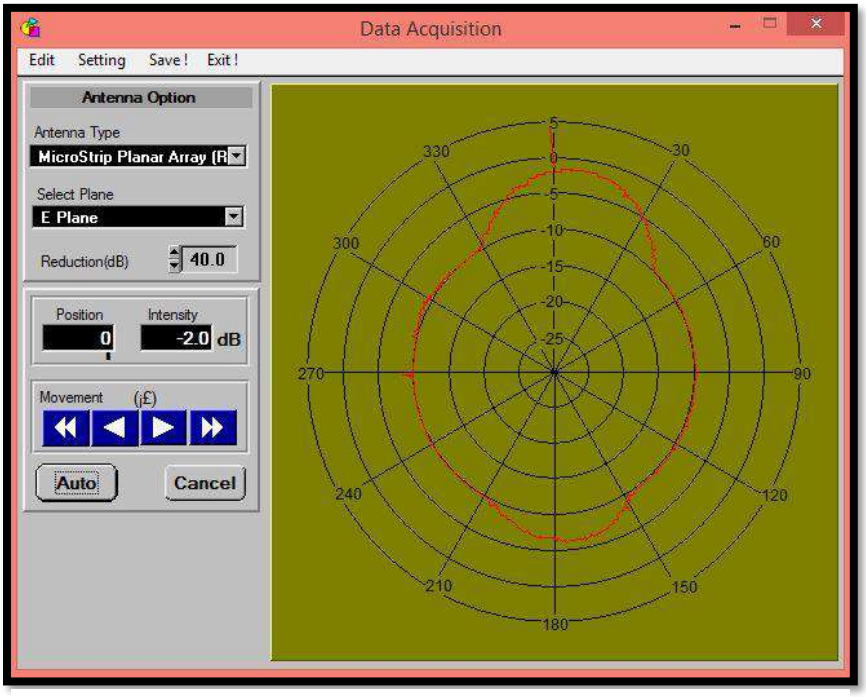


Figure 65 Diagramme de rayonnement d=40cm et θ=90°

- Distance d=50cm et la phase θ=0°

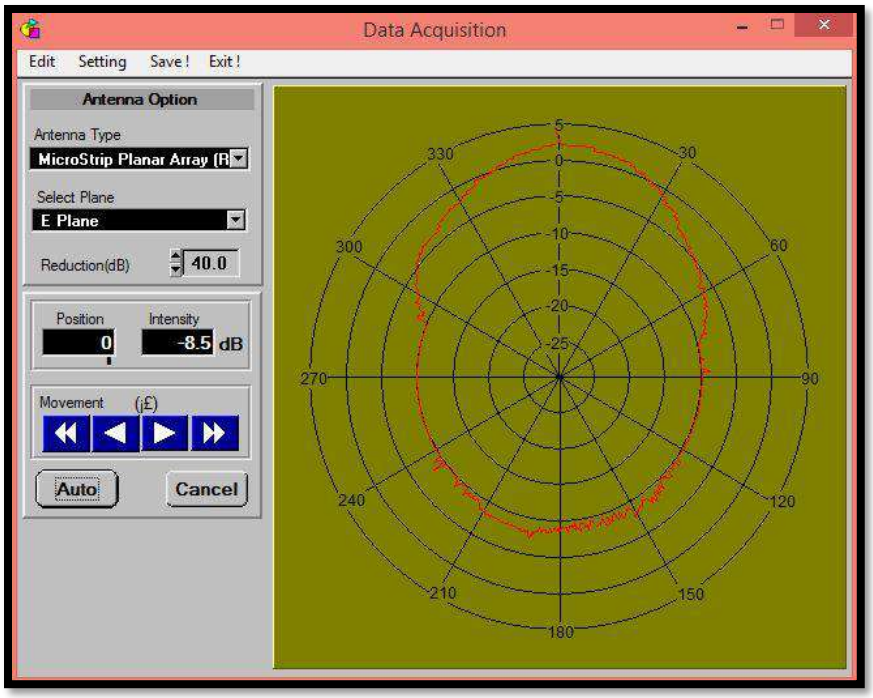


Figure 66 : Diagramme de rayonnement d=50cm et θ=0

- Distance d=50cm et la phase θ=90°

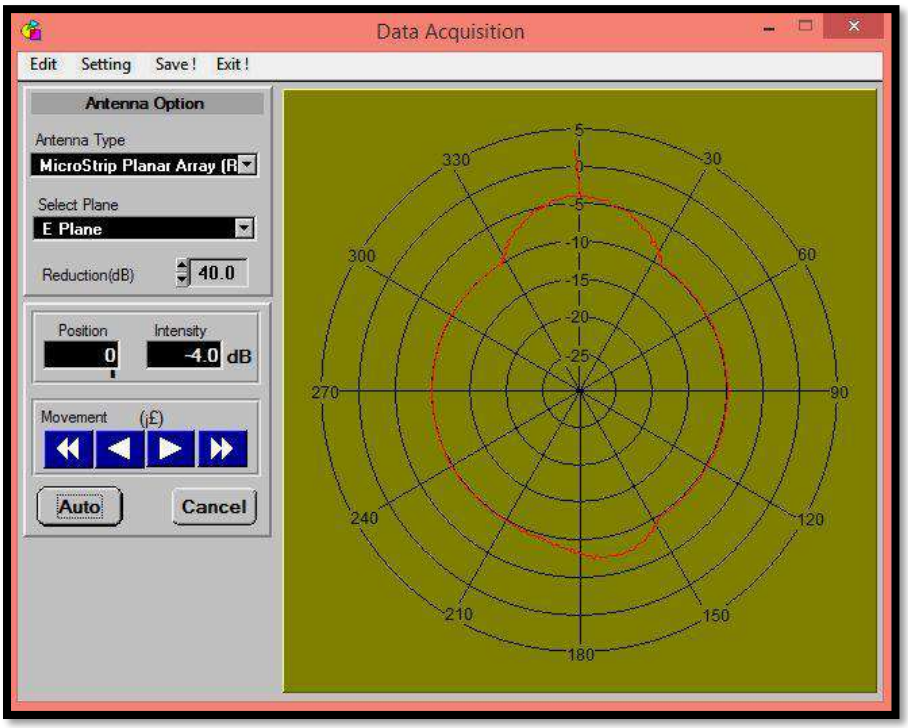


Figure 67 Diagramme de rayonnement d=50cm et θ=90°

- Distance d=70cm et la phase θ=0°

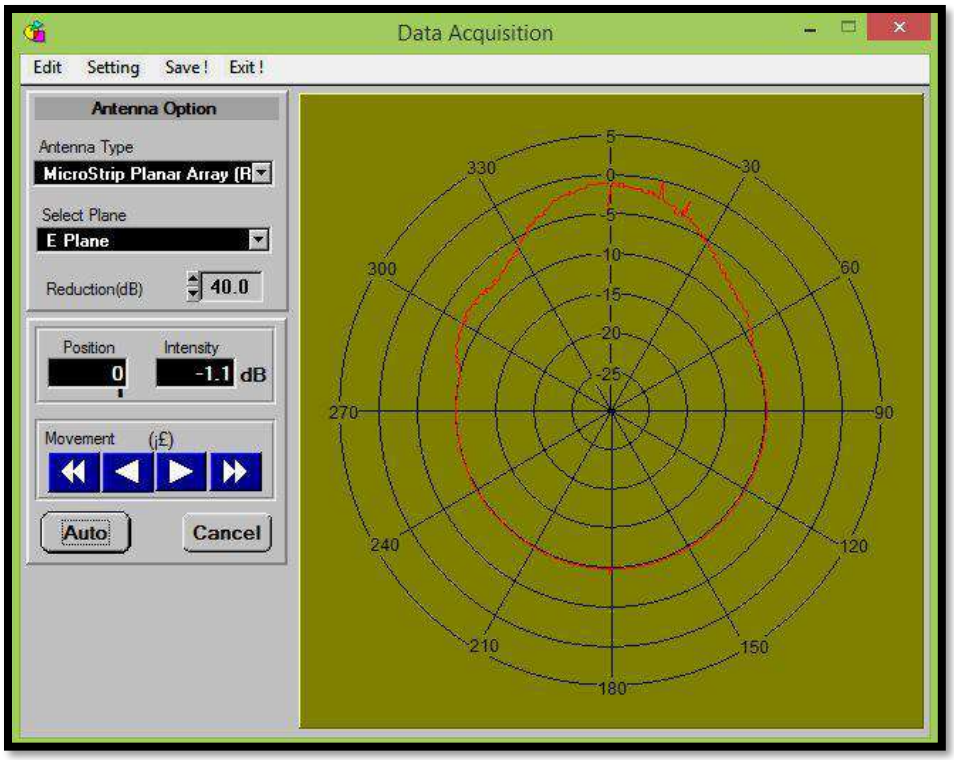


Figure 68 : Diagramme de rayonnement d=70cm et θ=0°

- Distance d=70cm et la phase θ=90°

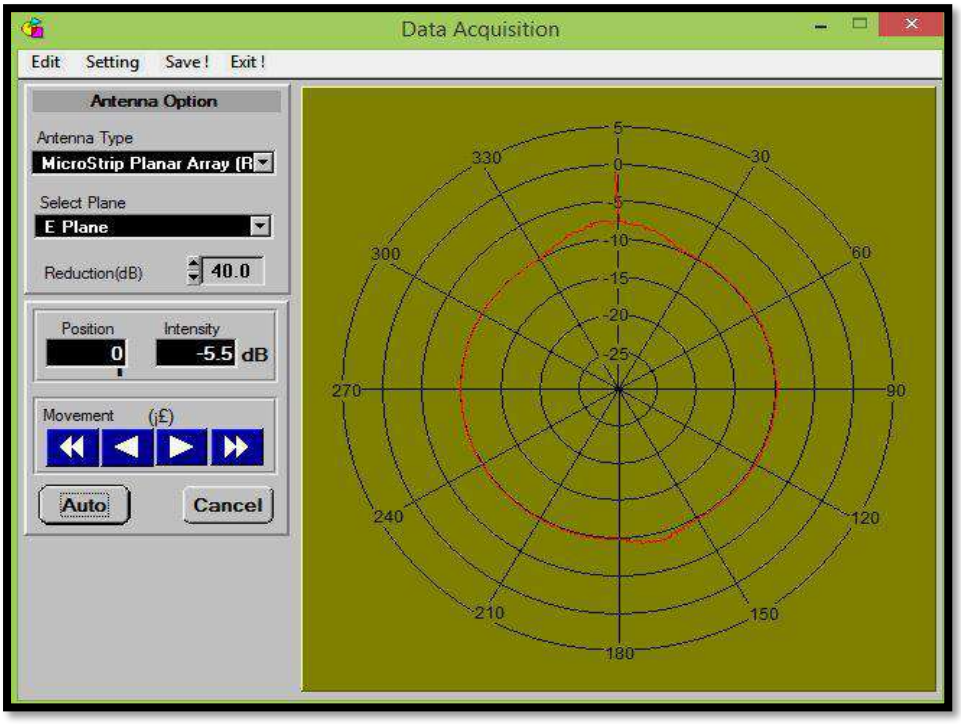


Figure 69 Diagramme de rayonnement d=70cm et θ=90°

- Distance d=100cm et la phase θ=0°

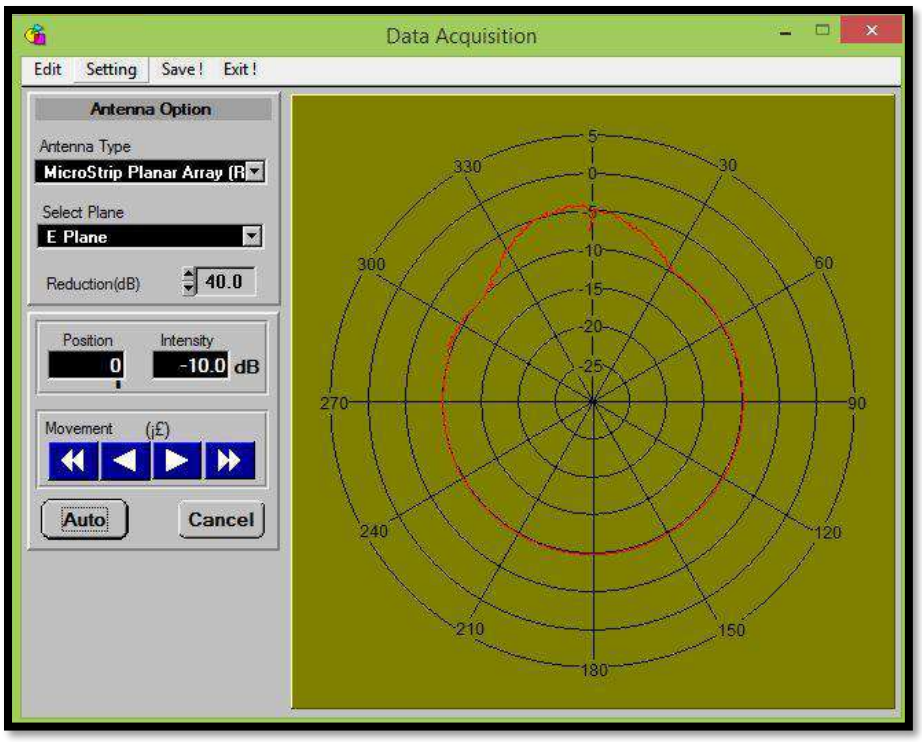


Figure 70: Diagramme de rayonnement d=100cm et θ=0°

- Distance d=100cm et la phase θ=90°

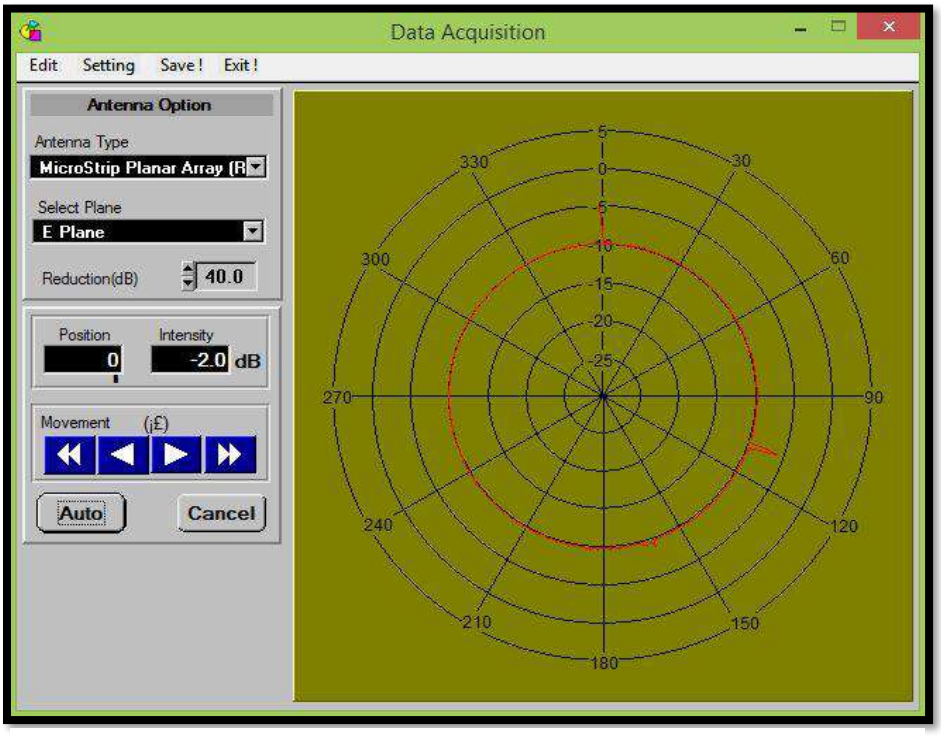


Figure 71: Diagramme de rayonnement d=100cm et θ=90°

- **Tableau comparatif entre les quatre distances**

Distance (cm)	La phase	Gain(dB)	L'angle d'ouverture
40	0°	5	40°
	90°	-3	52°
50	0°	3	55°
	90°	-4	50°
70	0°	-1	50°
	90°	-7	56°
100	0°	-4	45°
	90°	-10	360°

Tableau 6 : les résultats de la réalisation ont différentes distances

III.4 Discussion des résultats

L'équipement utilisé, pour la mise en œuvre du réseau des antennes patchs réalisé, fonctionne à la fréquence 2GHz et possédant une faible puissance d'émission, sachant que notre réseau d'antenne rayonne à la fréquence de résonance 2,4GHz, ce qui permet de produire des affaiblissements, mais malgré ça nous avons obtenus de bons résultats.

D'après les résultats pratiques, nous constatons que le réseau des antennes patchs présente un bon gain suivant l'angle θ= 0° et φ=0°, où la directivité est meilleure dans cette direction. Par contre, le gain suivant l'angle θ = 90° et φ=0° est très faible (-7 dB pour d=70 Cm), où le gain sera diminué en augmentant la distance et la directivité sera presque la même au tour de l'angle de rotation.

On peut dire que notre réseau d'antennes patchs suivant la position θ= 0° sont plus directifs due ceux à la position θ= 90°, ainsi que pour le gain.

III.5 Résultats comparatifs entre la partie pratique et la partie simulation

Dans la partie pratique, on a remarqué que la distance entre émetteur et récepteur joue un rôle très important dans l'étude comparative avec la partie de simulation

Alors pour l'angle θ=0°, la valeur de gain est quasiment la même que dans la simulation a la distance 40cm et 50cm, et pour ces deux cas les valeurs de gain de 70cm et 100cm sont

opposées à la simulation. Et pour un angle de θ=90° les valeurs de gain ne sont pas comme la simulation dans tous les cas

On constate que la directivité est uniforme à toutes distances et déphasages.

- La figure suivante représenté un cas très proche entre la simulation et réalisation

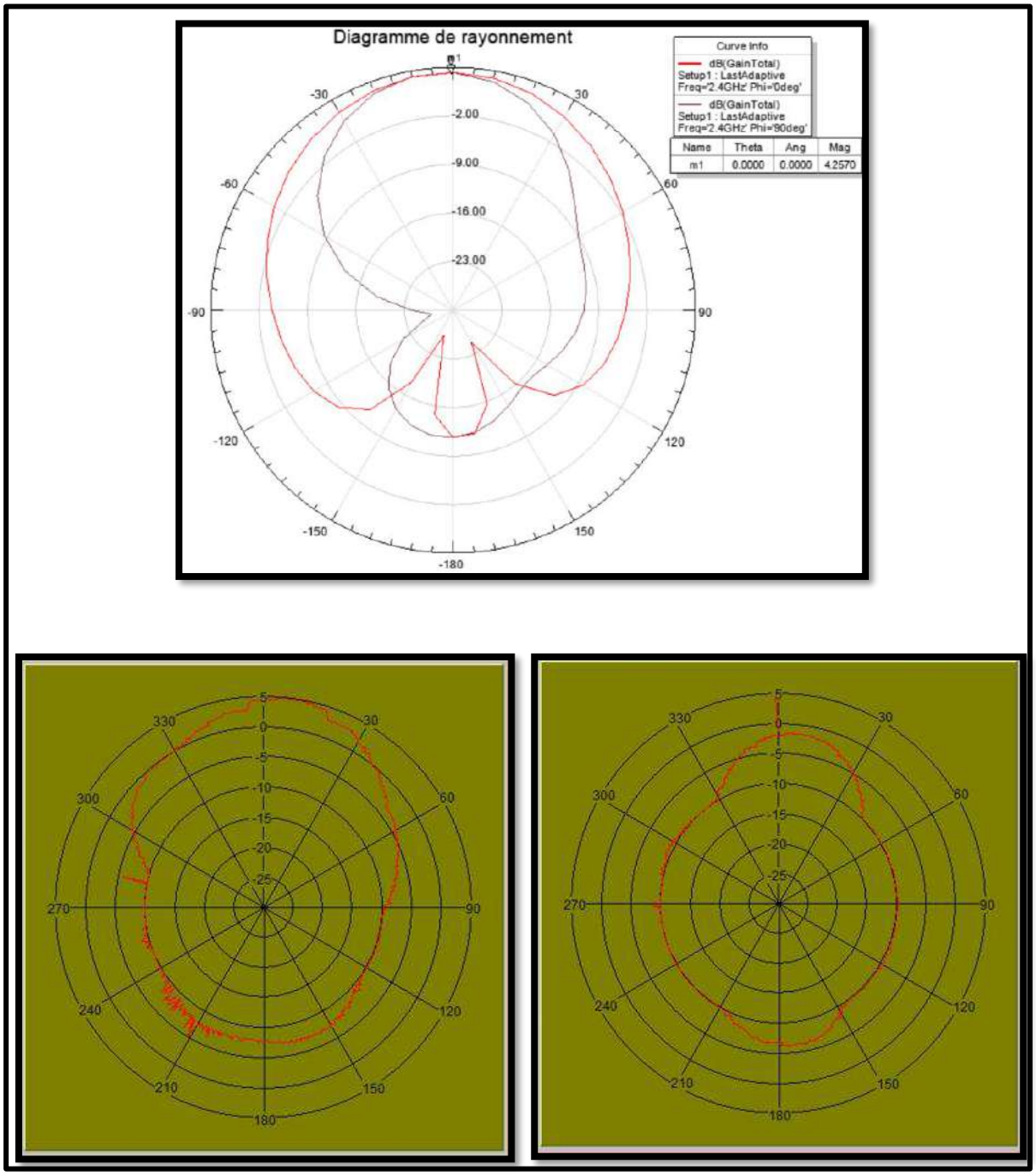


Figure 72 :la figure comparative entre la simulation et réalisation d'angle θ=0° et θ=90°

III.6 /conclusion

A travers cette partie de réalisation, nous avons vu les outils de la technologie des circuits imprimés. Nous pouvons dire que les résultats trouvés par la réalisation d'une antenne patch qui rayonne à 2,4GHz se conforme bien avec les résultats trouvés par simulation. Les petites différences entre les prévisions théoriques et les mesures trouvées sont dues essentiellement à l'incertitude de dimensionnement des antennes imprimées lors de la réalisation.

Conclusion Général

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes. Nous avons dans un premier temps présenté les généralités des antennes imprimées porte sur la description de ces antennes, les différentes techniques d'alimentation et aussi sur les méthodes d'analyse. Cela nous a aidés à constater que les méthodes analytiques sont plus faciles pour le calcul des différents paramètres tel que, la fréquence de résonance, la bande passante, le facteur de qualité... etc. Mais ces méthodes restent imprécises et se limitent à des formes géométriques simples où le substrat devrait être mince. Par contre les méthodes numériques sont plus complexes et peuvent ne pas converger si le choix des fonctions de base est mauvais. Mais elles permettent de traiter des formes géométriques plus complexes.

Pour atteindre notre objectif, les simulations numériques sont effectuées à base du logiciel HFSS. Ce logiciel nous a permis de nous rapprocher du meilleur cas pratique. A travers ses simulations nous avons étudié le comportement physique, électrique et de rayonnement de différentes antennes plaquées (la fréquence de résonance, la largeur de bande, diagramme de rayonnement du gain…) en fonction des paramètres qui intervient dans la conception (propriétés des matériaux, dimensionnement de l'antenne, …)

En fin, nous avons modélisé un réseau d'antennes (réseau à deux éléments) suivi par une étude expérimentale, où les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus par simulation.

D'après les résultats obtenus, nous avons vu que les performances des antennes réseau patch sont meilleures par rapport à ceux des antennes patchs simple.

Comme perspectives, plusieurs propositions peuvent être envisagées. On peut suggérer de développer les points suivants :

- Utilisation hybrides des patchs dans un même réseau d'antennes.
- Etude d'un réseau d'antennes patchs intelligent.
- Etude de l'effet de température sur les réseaux d'antennes patchs.

Bibliographie

[1] Nigarura Dieudonné « Étude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log - périodique multicouches » Mémoire de Master, Université de AbouBekr Belkaid de Tlemcen Juillet 2012.

[2] GUELLIL Nasser « Étude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum » Université Ferhat Abbas –SETIF1, 2014.

[3] L. Merad1, F.T. Bendimerad 1 et S.M. Meriah 1 « Conception de réseaux d'antennes imprimées par les algorithmes génétiques et le recuit simulé », traitement du signal 2004, volume 21, numéro 3.

[4] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institu d'électronique, Université de Constantine, 2009.

[5] I .J . Bahl and P.Bhartia, " Microstript Antenna", Dedham, Artech House, 1980.

[6] D.M. POZAR "Microstipt Antennas ", IEEE, Vol.80 N° 1, pp .79-91, January 1992.

[7] G. Kumar and KP.Ray, "Broad band microstript antennas" Aartech house baston. Londan 2003.

[8] Y. Qian and al, "A microstript patch antenna using novel photonic band gap structures", Microwave J, Vol. 42, pp. 66-67, Jan 1999.

[9] A.K. Bha Hacharyya "Long rectangular patch antenna with a single feeld" IEEE Trams Antennas Propagate, Vol.38, pp. 987-993 July 1990.

[10] M. Diblng "Développement du concept de l'antenne à résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire", Université de Limoges, thèse de Doctorat, 20 mars 2006.

[11] D.M. Pozar and B. Kaufman, "Increasing the Baud with of a microstrip antenna by proximity coupling", Electron, Lett, Vol.23, PP.368-369, 1987.

[12] D. H. Schaubert, D. M. Pozar and A. Adran "Effect of microstrip antenna substrate thickness and Permitivity: comparison of theories and experiment" IEEE Trams. Antennas propagation, Vol.37, PP.677-682, June 1989.

[13] Ansoft HFSS 9.1 user manual. Pdf

[14] C.A Balanis "Antenna theory: Analysis and design" third edition, John Wiley & Sons, NY, 2005.

[15] BARKAT Ouarda, « Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique » Thèse de Doctorat en science Universite Mentouri, Constantine 2009.

[16] Guennach Mohamed **«** Conception d'une antenne ''PIFA'' multi-bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2016.

[17] HEDI Ragad « Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF » Thèse de doctorat, Université de Nantes ; Université de Tunis El Manar, Tunisie, 2013.

[18] AZZAZ RAHMANI Salima « Analyse et conception des antennes imprimées multibandés en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications » Thèse de doctorat, Université de Abou Bakr-Belkaid–Tlemcen, 2013.

[19] ANNA Niang « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster » Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.

[20] ATTALLAOUI Attallah "Etude D'une Antenne Micro-ruban Circulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D A Défauts" Mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf M'sila 2018.

[21] Youssef DAHER**,** "*Antenne – Cours Universitaire*" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche 1.

[22] Alexandre BOYER « Antennes » Support de cours énoncé de travaux diriges institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2011.

[23] CHOUICHA Mohamed HAISSOUNE Lahcen « Etude de l'influence des différents matériaux sur les performances d'une antenne multicouche fort gain » Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma

[24] Picon Odile, « Les Antennes Théorie, conception et applications » Paris : Dunod : L'Usine nouvelle, DL 2009, 2009.

[25] CHOUTI Leila « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage » Mémoire de magister en Electronique UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE 13 Jan 2009.

[26] Yamina TIGHILT « Identification des antennes micorubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones » thèse doctorat en sciences université Ferhat Abbas – SETIF UFAS (Algérie) 2011.

[27] MOULAY Mohammed « Mesure de la Densité de Puissance Rayonnée RF dans le Milieu Ambiant » Mémoire de magister, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2012.

[28] MEDDOUR Meriem BENKEDDA Siham « Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz » Mémoire MASTER ACADEMIQUE Université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication Département d'Electronique et Des Télécommunications 2017.

[29] BENKHERBACHE Ahlam SALEM Asma « Etude D'un Réseau D'antenne Patch Rectangulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La Bande X » M'sila 2019.

[30] BELAZZOUG Fares « Etude d'une antenne micro-ruban triangulaire à bande interdite photonique (BIP) 2D », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila Juin 2016.

[31] Sylvain Demarty « Contribution à l'étude électromagnétique théorique et expérimentale des cartes de circuit imprimé » Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de limoges le 31 août 2006

[32] Hamid Meghdadi, Jean-Charles Poux « Simulation 3D HFSS de filtres » Novembre 2005 – Mai 2006

[33]Hatem Rmili « Étude, réalisation et caractérisation d'une antenne plaquée en polyanilline fonctionnant à 10 GHz » Thèse pour obtenir le garde de docteur de l'université de Bordeaux I, novembre 2004

[34] http://photonics.intec.ugent.be/download/mth_32.pdf