REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**




**F**aculté de **T**echnologie

**D**épartement du **G**énie **E**lectrique

**Mémoire de fin d'études de Master**

***Filière*** : ***Télécommunication***

***Spécialité*** : ***Systèmes des télécommunications***

---

''***Etude et Simulation des réseaux d'antennes à deux et quatre patchs à la fréquence de résonnance 2.4 GHZ*** ''

---

***Présentés par*** :

***Mlle : BENCHIDI Radhia…***

**Mme :** ***TECHOUKETCH Samia…***

***Proposés et Dirigés par*** :

***MIMENE Bakhti***

**Promotion 2022**

# 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 que promoteur, qui a été toujours disponible pour nous aider à accomplir notre travail et de réussir notre projet de PFE malgré les difficultés que nous avons trouvé.

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

*Dieu soit loué, qui m 'a permis d 'apprécier cette étape de mon parcours académique avec ce mot que je dédie au paradis de mes chers père et mère, qui ont tant sacrifié pour nous faire réussir, et pour ma sœur bien-aimée Manel, qui était crédité du succès de cette réalisation pour son soutien continu et ses encouragements envers moi. Je n 'oublie pas mon frère chams eleden, chawki Anis et tous ceux que j 'ai connus dans ma vie. L'université, et je remercie tout particulièrement mon professeur, qui a été le meilleur professeur pour m 'avoir soutenu.*

*Radhia*

# 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 mon mari,*

*Sans oublier mes enseignants qui ont contribué à ma formation*

*Depuis le primaire à ce jour*

*Je n'oublie pas de remercier mes amies et mes collègues Dalila*

*Radhia*

*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.*

*Samia*

**الملخص**

لقد أحدث تصغير الهوائيات نقلة نوعية في ميدان الاتصالات السلكية واللاسلكية ونخص بذكر الهوائيات المطبوعة مستطيلة وكان هذا التصغير تماشيا ومتطلبات دمج الهوائيات في بنية الأنظمة المتنقلة للتقليل من حجمها قدر ممكن لتصير بنية مناسبة بشكل خاص للتطبيقات المتقدمة التي يشهدها العصر مثل أجهزة النداء الالي. اجهز الإنذارات وكذا الاتصالات الخلوية وغيرها الكثير. وهذا العمل يتناول دراسة الهوائيات ومصفوفات الهوائيات المطبوعة المستطيلة 2.4 جيجا هرتز.

وفي نهاية قمنا بإنجاز ودراسة عمل مصفوفات من هوائيان ومن أربع هوائيات مطبوعة مستطيلة 2.4 جيجا هرتز ثم اجراء مقارنة لنتائج التي تم الحصول عليها بواسطة برنامج".

**الكلمات المفتاحية**

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

***Résumé* :**

La miniaturisation des antennes a entraîné un saut qualitatif dans le domaine des télécommunications, et nous citons les antennes rectangulaires imprimées, et cette miniaturisation était conforme aux exigences d'intégration des antennes dans la structure des systèmes mobiles pour réduire au maximum leur taille. Pour devenir une structure particulièrement adaptée aux applications avancées de l'époque telles que les téléavertisseurs automatiques. Alarmes, communications cellulaires et bien d'autres. Ce travail porte sur l'étude d'antennes et de réseaux d'antennes rectangulaires imprimées à 2,4 GHz. Au final, nous avons réalisé et étudié le travail de réseaux de deux antennes et quatre antennes rectangulaires imprimées de 2,4 GHz, puis comparé les résultats obtenus par un programme HFSS.

***Les mots clés* :**

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

***Abstract*:**

The miniaturization of antennas has led to a qualitative leap in the field of telecommunications, and we cite the printed rectangular antennas, and this miniaturization was in accordance with the requirements for the integration of antennas in the structure of mobile systems to reduce their size as much as possible. to become a structure particularly suitable for advanced applications of the time such as automatic pagers. Alarms, cellular communications and many more. This work focuses on the study of antennas and rectangular antenna arrays printed at 2.4 GHz.In the end, we carried out and studied the work of networks of two antennas and four rectangular printed antennas of 2.4 GHz, then compared the results obtained by a program HFSS.

***Keywords*:**

Printed antenna, printed antenna array, radiation pattern, directivity, gain, HFSS, performance, circuit board, performance, parameters.

# Table des Matières

**Table des matières**

**Introduction général : 1**

**I.1.Introduction : 2**

**I.2.Définition d'antennes : 3**

**I.3.Présentation générale d'une antenne patch : 3**

**I.3.1. Description d'une antenne imprimée ou patch : 3**

**I.3.2 Les caractéristiques d'une antenne patch : 5**

**I.4.Alimentation d'une antenne patch : 6**

**I.4.1Alimentation par ligne micro-ruban : 6**

**I.4.2Alimentation coaxiale : 7**

**I.4.3Alimentation couplée par proximité : 9**

**I.4.4Alimentation couplée par ouverture : 9**

**I.5.Les caractéristiques électriques des antennes : 13**

**I.5.1Coefficient de réflexion : 13**

**I.5.2Bande passante : 13**

**I.5.3. Le facteur de qualité : 14**

**I.6.2La directivité : 14**

**I.6.3Rendement de l'antenne : 15**

**I.6.4Diagramme de rayonnement : 15**

**I.6.5. Ouverture de l'antenne : 16**

**I.6.6. Polarisation : 16**

**I.7 Méthodes d'analyse d'une antenne Patch : 16**

**I.7.1. Méthode analytique : 17**

**I.7.2. Méthodes numériques : 17**

**I.8. Les substrats : 17**

**I.8.1 Les matériaux diélectriques utilisés : 17**

**I.8.2 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat : 18**

**I.8.3 Critères de choix du substrat : 18**

**I.9. Applications : 19**

**I.10 Conclusion : 19**

**II.1. Introduction : 20**

**II.3. Réseau d'antennes : 20**

**II.4. Réseau d'antennes imprimées : 21**

**II.5. Types de réseaux d'antennes : 22**

**II.6. Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch : 22**

**II.6.1 Alimentation parallèle 23**

**II.6.2 Alimentation série 23**

**II.6.3 Réseaux bidimensionnels 24**

**II.7Conclusion : 24**

**III.1 Introduction 25**

**III.2 Présentation du Logiciel HFSS 25**

**III.2.1 Description du logiciel HFSS : 25**

**III.2.2 Les outils d'An soft : 26**

**III.3 Cahier de charge : 27**

**III.3.1Choix du type de solution : 28**

**III.4. La présentation du travail 28**

**III.5. Simulation d'une antenne patch 29**

**III.5.1 Simulation des antennes simples rectangulaires pour la fréquence f=2.4GHz ___ 29**

**III.5.1.1 Étapes de simulation de première antenne _____ 29**

**III.5.1.2 Résultats de simulation : _____ 32**

**III.6Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes : _____ 36**

**II.6.1 Étapes de simulation de deuxième antenne (réseaux patch) : _____ 36**

**III.6.2 Résultats de simulation_____ 39**

**III.7 Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes : _____ 41**

**III.7.1 Étapes de simulation de quatre antennes (réseaux patch) : _____ 41**

**III.7.2 Résultats de simulation_____ 46**

**III.8Conclusion : _____ 49**

**Conclusion générale : _____ 50**

# Liste de Figures

**Figure.1 : Présentation générale d'une antenne patch……..3**

**Figure.2 : structure d'une antenne imprimée…….4**

**Figure.3 : différentes formes d'élément rayonnant…….5**

**Figure.4 : distribution de charge et de densité de courant…….6**

**Figure.5 : distribution du champ électrique vertical……6**

**Figure.6 : alimentation par ligne micro-ruban…….7**

**Figure.7 : alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée(c) axiale à encoche...7**

**Figure.8 : le circuit équivaut d'une antenne patch……*8***

**Figure.9 : alimentation coaxial……..8**

**Figure.10 : le circuit équivaut d'une antenne patch……9**

**Figure.11 : alimentation couplée par proximité……...9**

**Figure.12 : circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité…….10**

**Figure.13 : alimentation couplée par ouverture……...10**

**Figure.14 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement…….13**

**Figure.15 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne…… 15**

**Figure.16 : Rayonnement d'une antenne Patch……...16**

**Figure.17 : Types de polarisation……..16**

**Figure.18 : Applications de annetanes……..19**

**Figure.19 : Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antenne……..21**

**Figure.20 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes……21**

**Figure.21 : Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels…….22**

**Figure.22 : Alimentation parallèle d'un réseau linéaire……..23**

**Figure.23 : Alimentation série d'un réseau linéaire…….23**

**Figure.24 : Alimentation parallèle d'un réseau plan……...24**

**Figure.25 : Alimentation série d'un réseau plan……..24**

**Figure.26 : Fenêtre de logiciel HFSS pour model 3D……..27**

**Figure.27 : Fenêtre des paramètres de substrat……...29**

**Figure.28 : Fenêtre des paramètres de plan de masse…….30**

**Figure.29 : Fenêtre des paramètres de patch……..30**

**Figure.30 : Fenêtre des paramètres de Gap…….30**

**Figure.31 : Fenêtre des paramètres de linge d'alimentation……..31**

**Figure.32 : Fenêtre des paramètres de point d'excitation……...31**

**Figure.33 : Fenêtre des paramètres d'Air Box…….32**

**Figure.34 : une antenne microbande rectangulaire…….32**

**Figure.35 : Coefficient de réflexion *S*11 en fonction de la fréquence…….32**

**Figure.36 : Diagramme de rayonnement 3D Gain……..33**

**Figure.37 : Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique……33**

**Figure.38 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°……..34**

**Figure.39 : La directivité totale……34**

**Figure.40 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence……..35**

**Figure.41 : Fenêtre des paramètres de substrat……...36**

**Figure.42 : Fenêtre des paramètres de plan de masse…….36**

**Figure.43 : Fenêtre des paramètres de patchs…….....36**

**Figure.44 : Fenêtre des paramètres de Gaps……....37**

**Figure.45 : Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation……..37**

**Figure.46 : Fenêtre des paramètres d'Air Box…….38**

**Figure.47 : Conception des réseaux 2 patch……38**

**Figure.48 : Coefficient de réflexion *S*11en fonction de la fréquence…….39**

**Figure.49 : Diagramme de rayonnement 3D Gain……..39**

**Figure.50 : Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique……..39**

**Figure.51 : La directivité totale……40**

**Figure.52 : La directivité totale……40**

**Figure.53 : Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence……..40**

**Figure.54 : Fenêtre des paramètres de substrat ……41**

**Figure.55 : Fenêtre des paramètres de plan de masse……42**

**Figure.56 : Fenêtre des paramètres de patchs……..42**

**Figure.57 : Fenêtre des paramètres de Gaps……43**

**Figure.58 : Fenêtre des paramètres de linges alimentations……..44**

**Figure.59 : Fenêtre des paramètres de point d'exécution……..44**

**Figure.60 : Fenêtre des paramètres d'Air Box……45**

**Figure.61 : Conception des réseaux 4 patch……45**

**Figure.62 : Coefficient de réflexion *S*11en fonction de la fréquence……46**

**Figure.63 : Diagramme de rayonnement 3D Gain……..46**

**Figure.64 : Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique……47**

**Figure.65 : La directivité totale……47**

**Figure.66 : Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence……47**

**Figure.67 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°……48**

# Liste Des Tableaux

**Tableau 1 : caractéristiques de différentes techniques d'alimentation. .....11**

**Tableau2: avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. .....12**

**Tableau 3 : Résultats de simulation .....35**

**Tableau 4 : Résultats de simulation .....41**

**Tableau 5 : Résultats de simulation .....48**

**Tableau 6 : Tableau comparatif entre les simples et des réseaux des antennes……49**

# Liste des Acronymes

EM : champ électromagnétique

$\varepsilon r$ : permittivité relative

RF : radio fréquence

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

Zc: l'impédance de normalisation,

MMIC: monolithic Microwave Integrated 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 transversal.

φ : C'est un angle longitudinal.

# Introduction Générale

# Introduction général :

Avec les progrès du système de radiocommunication, l'antenne est devenue un élément essentiel dans l'émission et la réception des ondes électromagnétiques. En plus des réseaux d'antennes, l'objectif de leur fabrication est d'obtenir une augmentation de la directivité ou de la concentration de l'énergie émise par le réseau dans une zone géographique.

La plupart sinon toutes les applications nécessitent de concevoir des antennes à haut rendement et la possibilité de corriger l'orientation. D'autre part, il faut également rechercher des antennes à faible coût avec des dimensions possibles.

Les chercheurs se sont attachés à orienter leurs études vers la conception d'antennes capables de répondre aux besoins et limitations susmentionnés, appelées antennes patch ou antennes imprimées.

L'antenne de correction a été conçue pour répondre à ces besoins, c'est un substrat fini au niveau du sol et sa structure en miniature lui permet d'être facilement intégrée dans les systèmes d'émission/réception Partie conception et simulation à l'aide du programme HFSS. La thèse est divisée comme suit en trois chapitres

- Tout d'abord, nous commençons par une introduction générale. Le premier chapitre est consacré à une étude générale et approfondie des antennes imprimées, ainsi que de leurs propriétés physiques, chimiques et radiologiques, en plus des différentes techniques et mécanismes d'alimentation.
- Le deuxième chapitre, que nous avons consacré à une étude complète sur tout ce qui concerne les réseaux d'antennes, y compris les propriétés, les propriétés, les méthodes et les méthodes d'alimentation, ainsi que leurs types, les éléments utilisés dans leur conception et les positions d'ingénierie que nous pouvons trouver sur eux.
- Le troisième et dernier chapitre était une collection de toutes les données théoriques que nous avons étudiées dans les deux chapitres précédents et leur application dans la modélisation et la simulation de chacune des antennes simples, deux réseaux d'antennes et quatre réseaux d'antennes patch rectangulaires 2,4 GHz en étudiant les résultats obtenus par le programme de simulation HFSS
- Finalement nous terminerons par une conclusion générale.

# Chapitre I :

# Généralités sur les antennes patchs

# Chapitre I :

# Généralités sur les antennes patchs

## I.1.Introduction :

Comme on le sait, l'antenne est un dispositif qui convertit le courant électrique en une onde électromagnétique qui est transmise dans l'air, dans le cas de la transmission. Ou comme un outil qui convertit l'onde électromagnétique en courant électrique s'il fonctionne comme un récepteur. À travers elle, le processus de communication sans fil a lieu. Les antennes sont disponibles dans de nombreux types, formes, tailles et applications

Parmi ces différentes antennes, nous parlerons aujourd'hui de l'antenne la plus courante dans les stations d'émission sans fil, qui est l'antenne patch. Ce type d'antenne a été développé dans les années cinquante du siècle dernier et n'a été utilisé en pratique que vingt ans après son développement, en raison de la difficulté de contrôler la fréquence sur laquelle ce type d'antenne fonctionne en premier et de l'absence d'applications appropriées pour son utiliser en second lieu.

L'antenne patch est constituée d'un matériau isolant qui sert de base posé sur une surface conductrice d'un côté (le conducteur de masse), et le matériau isolant est surmonté de l'autre côté par une fine surface conductrice en cuivre responsable du processus de transmission, généralement de forme rectangulaire, mais ce n'est pas nécessairement la seule forme utilisée. Cette surface supérieure en cuivre s'appelle le patch et est directement connectée à la ligne d'alimentation.

Il se caractérise par être bon marché et facile à fabriquer car ce n'est rien de plus qu'un circuit imprimé.

Mécaniquement stable. Il est flexible et peut être fixé avec de petites vis sur tous types de surfaces.

• Sa taille est petite et son poids est léger, il convient donc aux applications nécessitant des antennes de petite taille et de petit poids, comme c'est le cas avec les stations de transmission radio qui desservent les téléphones mobiles.

• Cependant, la grande importance de l'antenne patch réside dans notre capacité à contrôler la forme du faisceau radio qu'elle émet pour adopter la forme du faisceau sur la forme du patch de cuivre supérieur que représente l'antenne.

Pour ces raisons, il est actuellement utilisé dans les systèmes de communication sans fil pour sa simplicité et son intégration aux circuits électriques imprimés. Il est utilisé dans les téléphones, les communications par satellite, les avions, les engins spatiaux et les missiles.

## I.2. Définition d'antennes :

Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée antenne patch (en anglais) ou antenne planaire est une ligne micro ruban de forme particulière. Elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques.

L'antenne patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face et est donc favorable à une production industrielle. Le concept d'antenne patch est apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970. Elle peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau. De même, elle peut être intégrée au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. [Wikipédia].

## I.3.Présentation générale d'une antenne patch :

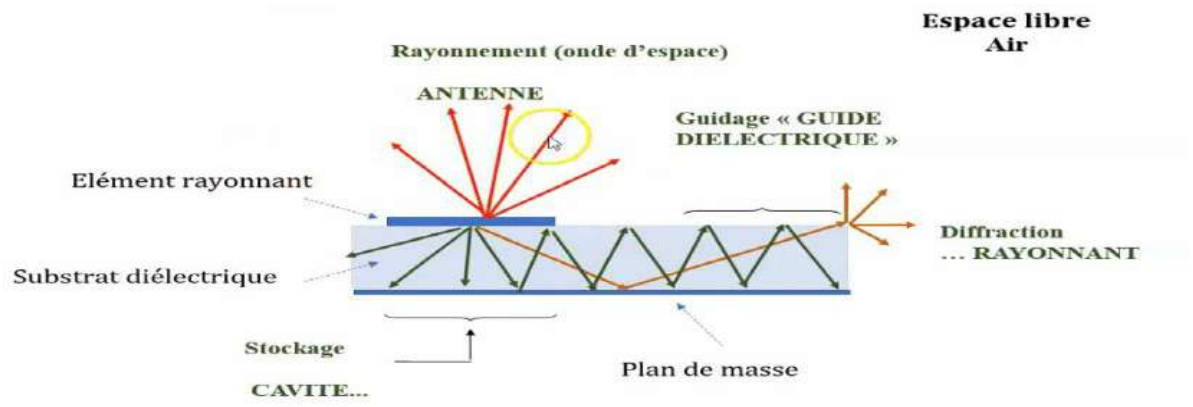



**Figure.1 : Présentation générale d'une antenne patch**

### I.3.1. Description d'une antenne imprimée ou patch :

Une antenne à éléments rayonnants imprimés (figure.2), communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (micros trip) 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 (grounds plane)** est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.
- **Un substrat diélectrique (diélectrique substrat)** composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2{,}2<\varepsilon r<12$). 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]

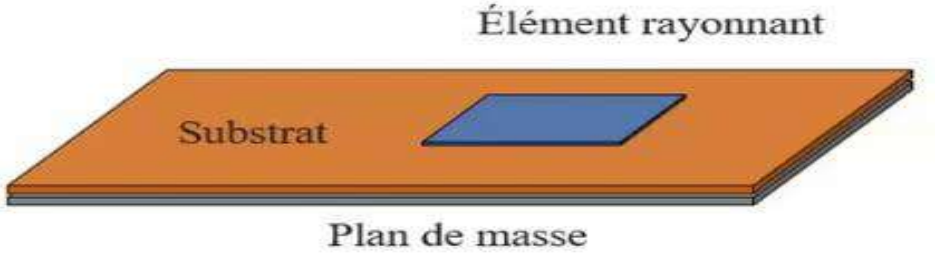



**Figure. 2 : structure d'une antenne imprimée**

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 3) sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

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 non planes. [5] [6].




**Figure .3 : différentes formes d'élément rayonnant**

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.3.2 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 4 » va se s'établir à l'interface substrat /plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant, et crée un champ électrique vertical « figure5» 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).

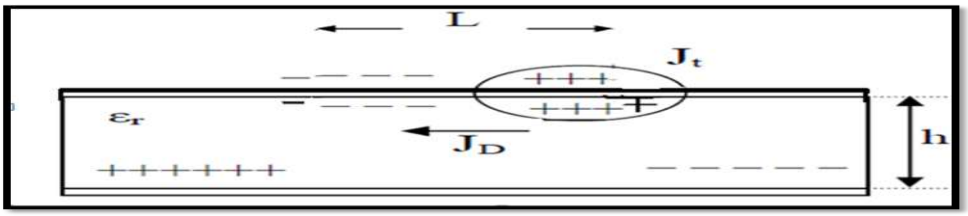



Figure .4 : distribution de charge et de densité de courant (Avec, JD : courant de déplacement J t : Courant de surface.)

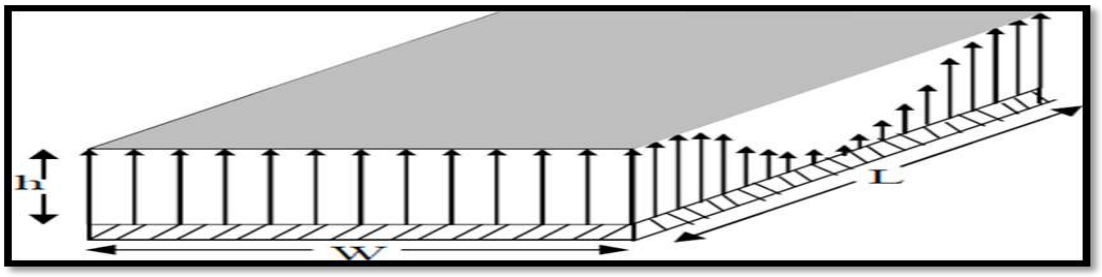



**Figure .5 : distribution du champ électrique vertical.**

## I.4. 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 par fente).

### I.4.1 Alimentation par ligne micro-ruban :

L'alimentation peut se faire par connexion directe avec une ligne micro-ruban (figure 6)

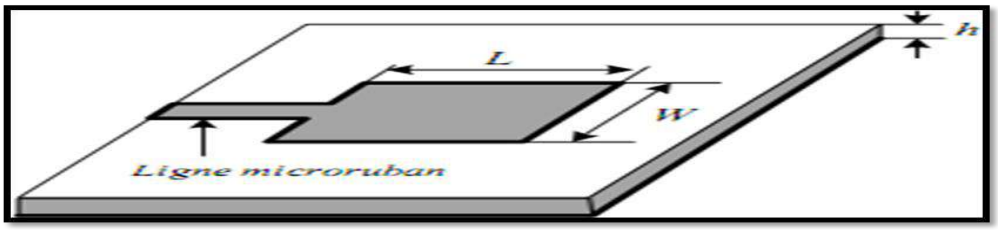



**Figure .6 : alimentation par ligne micro-ruban.**

Généralement de 50Ω), [9] s'est-il 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.

On trouve trois cas illustrés sur la figure .7 :

- 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 une meilleure adaptation d'impédance (b).
- Alimentation axiale avec une encoche (c).

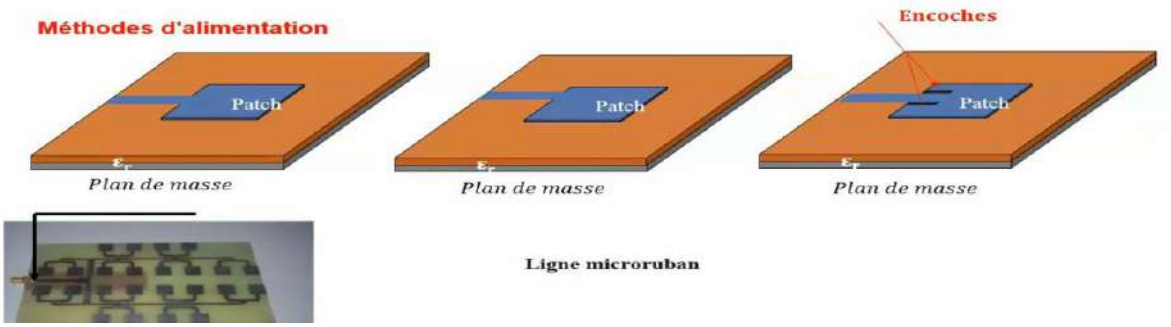



**Figure.7 : alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée(c) axiale à encoche.**

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.4.2 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. 8).

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].

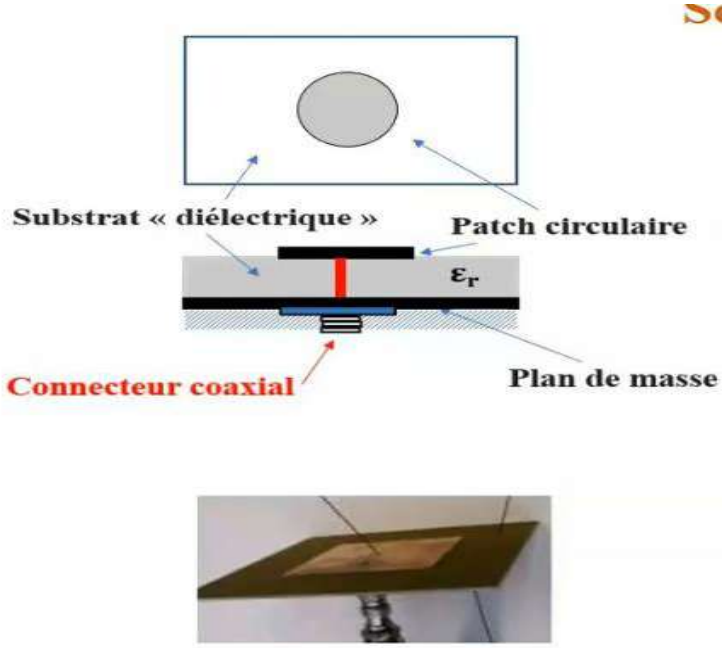



**Figure.8 : alimentation coaxial**

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 9). [11]

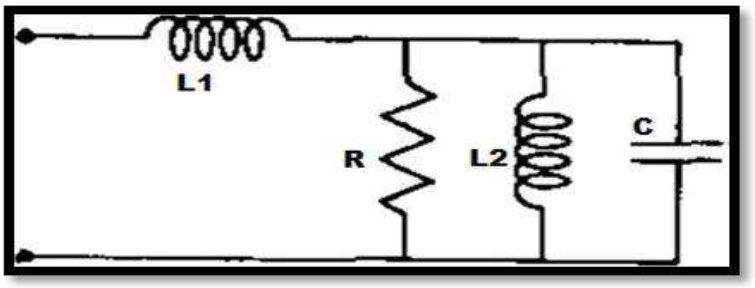



**Figure 9 : le circuit équivaut d'une antenne patch.**

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.4.3 Alimentation couplée par proximité :

Ce type d'alimentation est représenté sur la (figure 10), 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.

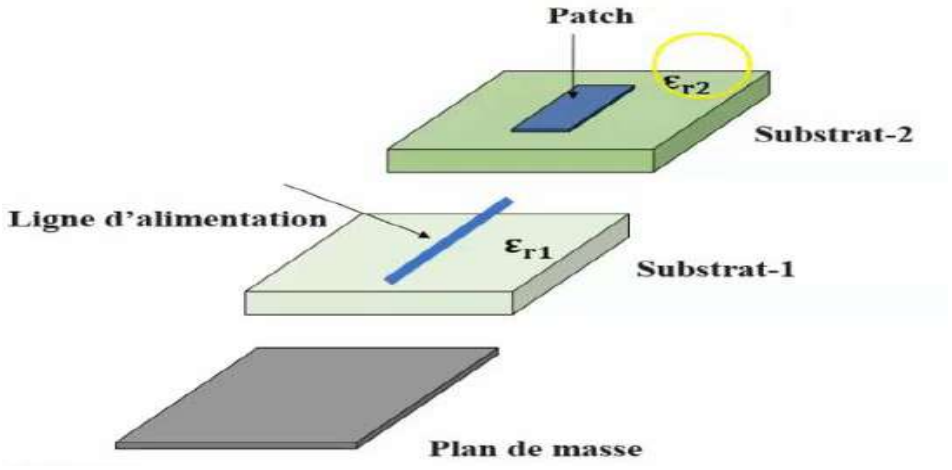



**Figure. 10 : alimentation couplée par proximité**

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

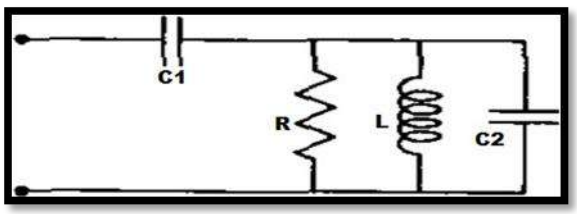



**Figure. 11 : circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité**

### I.4.4 Alimentation couplée par ouverture :

Dans ce type d'alimentation illustré dans (figure.12) 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

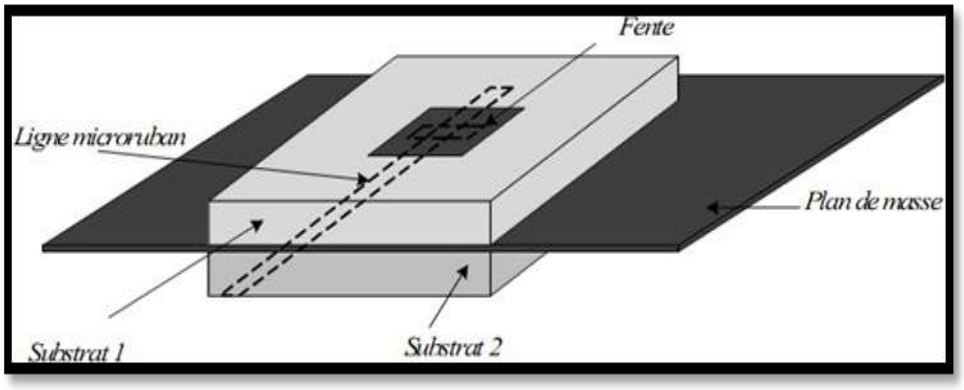



**Figure. 12 : alimentation couplée par ouverture**

Le circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture est représenté par la (figure.14) suivante [11] :

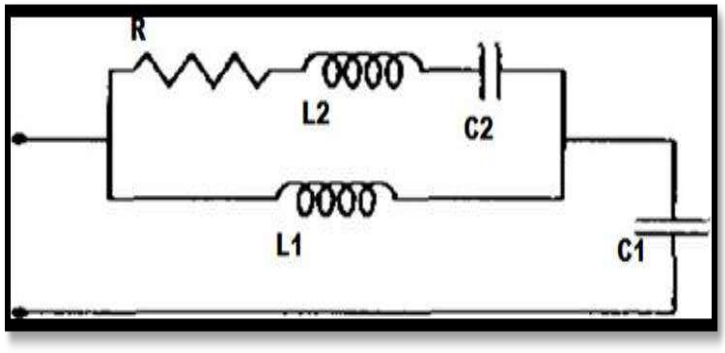



**Figure .13 : circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture**

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

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

| ***Caractéristiques*** | ***Alimentation par line micro ruban*** | ***Alimentation par cable coaxial*** | ***Alimentation par couplage de proximité*** |
|---|---|---|---|
| ***Rayonnement parasite alimentation*** | ***Plus*** | ***Plus*** | ***Minimum*** |
| ***Fiabilité*** | ***Milleara*** | ***Bonne*** | ***Fiable à cause de la soudure*** |
| ***Facility de fabrication*** | ***Facile*** | ***Nécessite Une soudure et un perçage*** | ***Necessity d'alignement*** |

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*** | ***Inconvenient*** |
|---|---|---|---|
| *Alimentation avec contact* | *Cable coaxial* | ✓ *Pas de pertes de rayonnement de ligne.*<br>✓ *Sélection possible d'un mode privilégié.*<br>✓ *Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde.*<br>✓ *Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur.*<br>✓ *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.*<br>✓ *Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique.*<br>✓ *La difficulté d'excitations de chaque élément d'un réseau seul.* |
| | *Ligne Microruban* | ✓ *Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit alimentation.*<br>✓ *Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant.* | ✓ *Rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérienne.*<br>✓ *Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétriques.*<br>✓ *Structure figée après gravure.* |
| *Alimentation sans contact* | *Par couplage* | ✓ *Dessin du circuit modifiable par aux aériens.*<br>✓ *Bande passante plus large par augmentation de la hauteur.* | ✓ *Deux couches du substrat requises.*<br>✓ *Difficulté pour l'intégration des dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.* |

**Tableau2: avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. [10] de type Wilkinson [15]**

## I.5.Les caractéristiques électriques des antennes :

### I.5.1Coefficient 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 :

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

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 :

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

### I.5.2 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] :

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

$$BP\% = \frac{BP}{F0} \qquad \text{…….. (3)}$$

La figure 14 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 passan – 10 à).

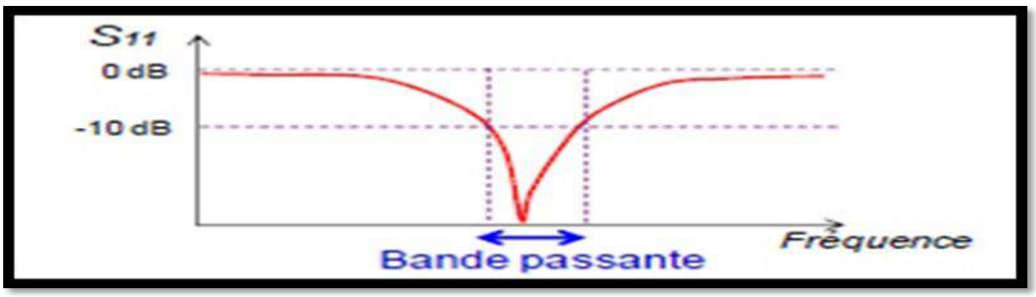



**Figure 14: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement**

### I.5.3. Le facteur de qualité :

Pour obtenir l'expression du facteur de qualité Q d'une antenne à résonateur diélectrique 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 $t_r$ de l'antenne et sa bande passante Δf :

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

### I.6. 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 permettent de grouper les antennes tels que le gain, le diagramme de rayonnement, la largeur de fonctionnement, la polarisation, etc. [18]

### I.6.1 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].

$$(\theta,\varphi) = \frac{p(\theta,\varphi)}{p_0} \quad \text{……..(6)}$$

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.6.2La directivité :

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

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

### I.6.3Rendement de l'antenne :

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

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

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

### I.6.4 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 ($\theta 0$, $\varphi 0$) 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 $r$ ($\theta$, $\varphi$), qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure 16). 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].

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

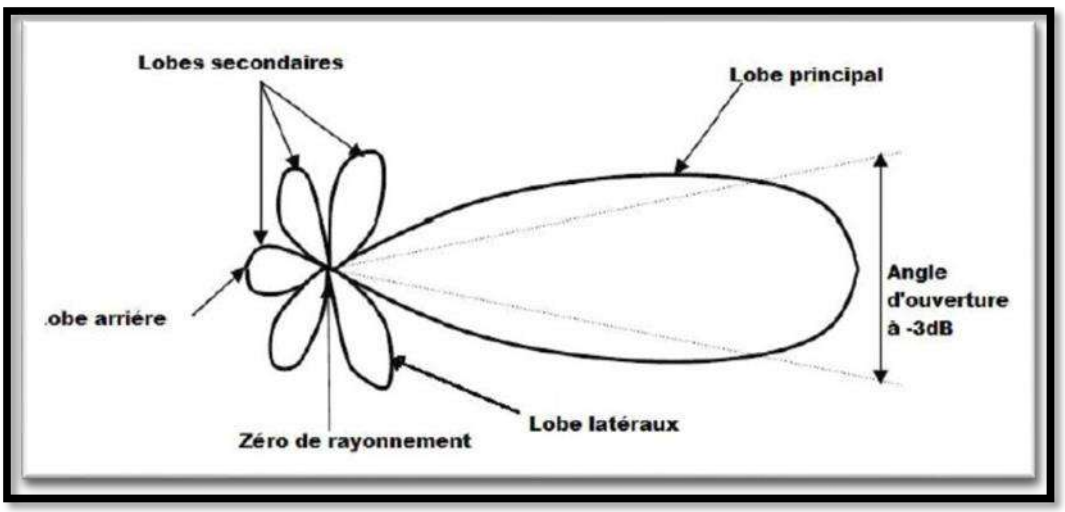



**Figure. 15 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [22]**

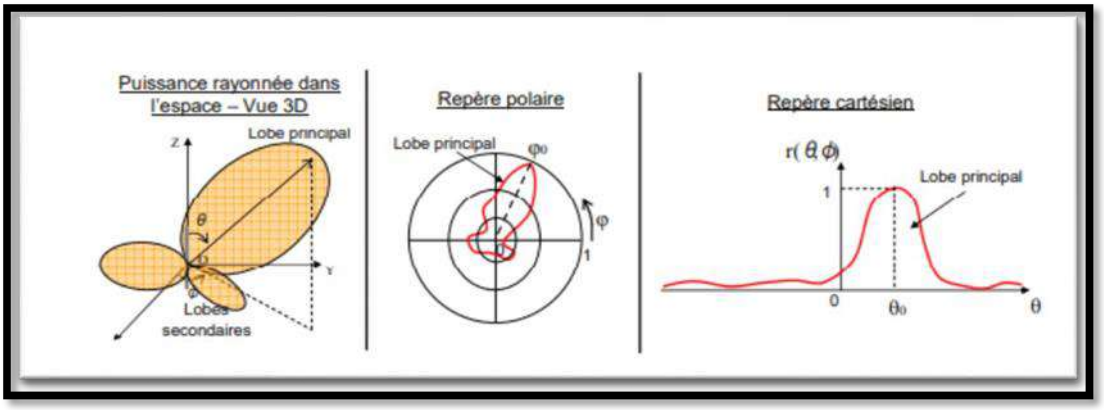



Figure .16: Rayonnement d'une antenne Patch [23].

### I.6.5. 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.6.6. 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].

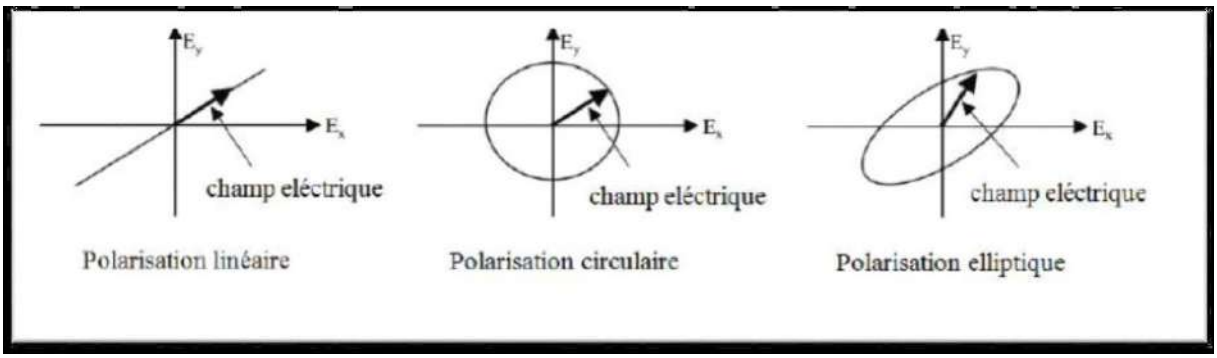



**Figure .17 : Types de polarisation**

## I.7 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.7.1. 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.7.2. Méthodes numériques :

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

- ✓ Méthode variation elle : les éléments finis.
- ✓ Méthode différentielle : différences finies et TLM.
- ✓ La méthode intégrale.

## I.8. 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.8.1 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.8.2 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.8.3 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.9. Applications :




**Figure.18 : Aplication de annetanes**

## I.10 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.

# Chapitre II :

# Réseaux des antennes patchs

# Chapitre II :

# Réseaux des antennes patchs

## II.1. Introduction :

De nombreux appareils sont devenus dépendants de la présence de l'antenne, tels que les téléphones cellulaires et les téléavertisseurs automatiques, et tout système sans fil a besoin d'une antenne émettrice pour transmettre les ondes électromagnétiques qui représentent les informations envoyées par la source. Il a également besoin d'une antenne réceptrice pour convertir l'onde électromagnétique capturée en signaux électriques adaptés à la détection dans le contact. Les réseaux d'antennes sont formés lorsque deux antennes ou plus sont combinées pour former une antenne.

Dans la plupart des applications, il est nécessaire de concevoir l'antenne avec un gain élevé, et la capacité de corriger la direction, et ceci en augmentant les éléments de guidage et en les plaçant dans une forme géométrique appropriée sous la forme de réseaux linéaires, carrés ou circulaires.

## II.2. Définition du réseau d'antenne :

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone. C'est-à-dire que le déphasage du courant entre deux paires d'antennes est fixe, un réseau peut comporter des éléments non alimentés directement par une source (éléments parasites) mais qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments (c'est le cas des antennes Yagi-Uda).

Le champ électromagnétique produit par un réseau d'antennes est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments. En choisissant convenablement l'espacement entre les éléments et la phase du courant qui circule dans chacun, on peut modifier la directivité du réseau grâce à l'interférence constructive dans certaines directions et à l'interférence **[1].**

## II.3. 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].

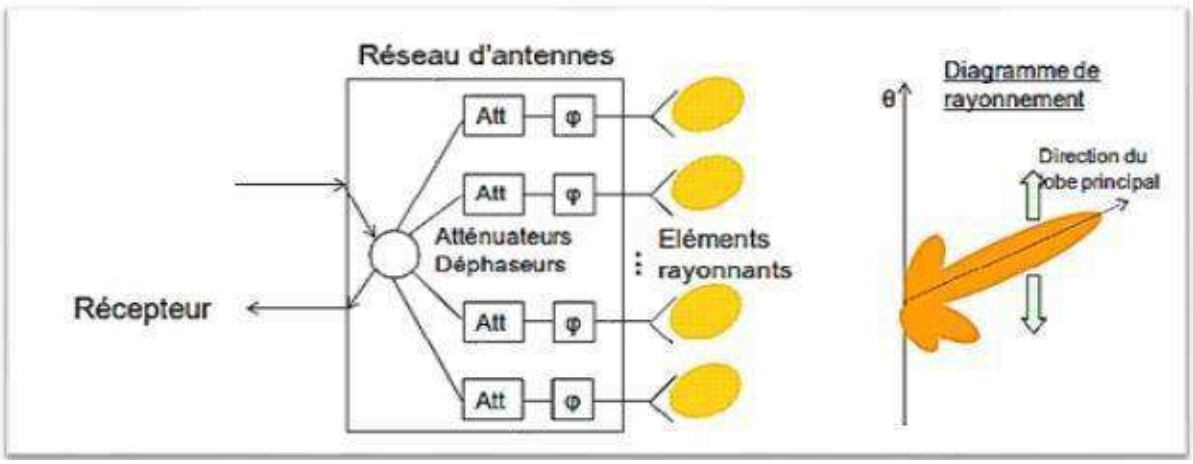



**Figure 19 : Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antenne [2]**

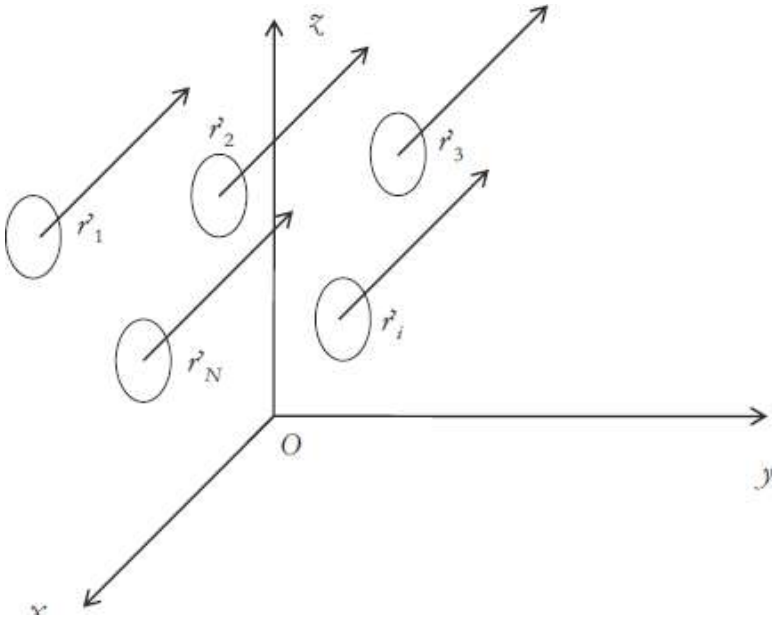



**Figure 20 : Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes [2]**

## II.4. 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-adaptative, la génération de diagrammes de rayonnement variés ou désirés, le contrôle du diagramme de directivité, le contrôle de la polarisation, etc.… [3].

## II.5. 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 20)

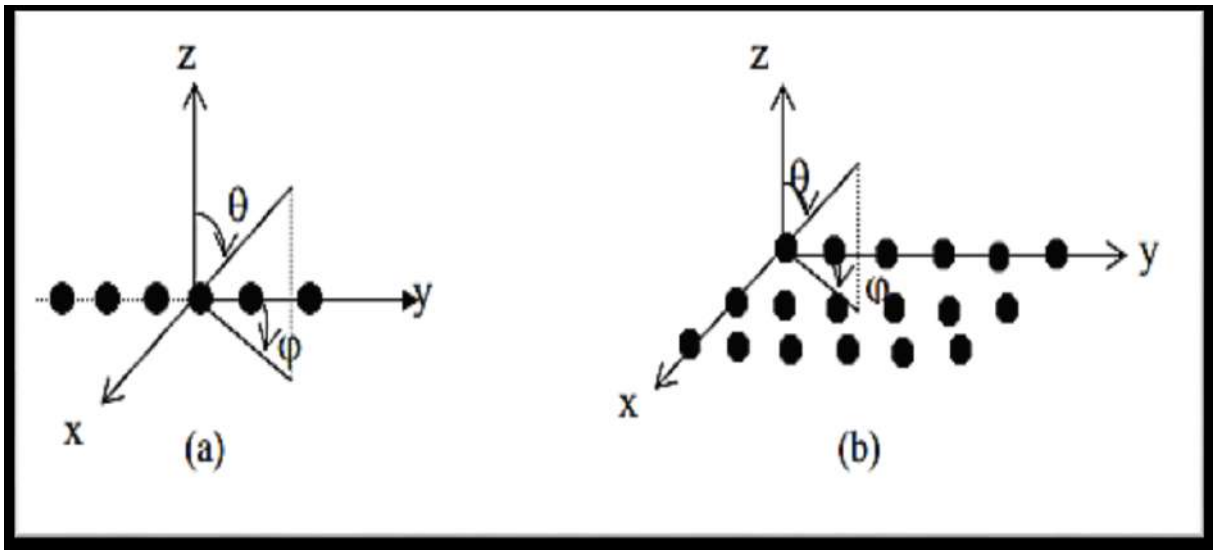



**Figure 21 : Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels.**

## II.6. 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 ;
- 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].

### II.6.1 Alimentation parallèle

Un réseau parallèle (Figure 22), 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 davantage 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]

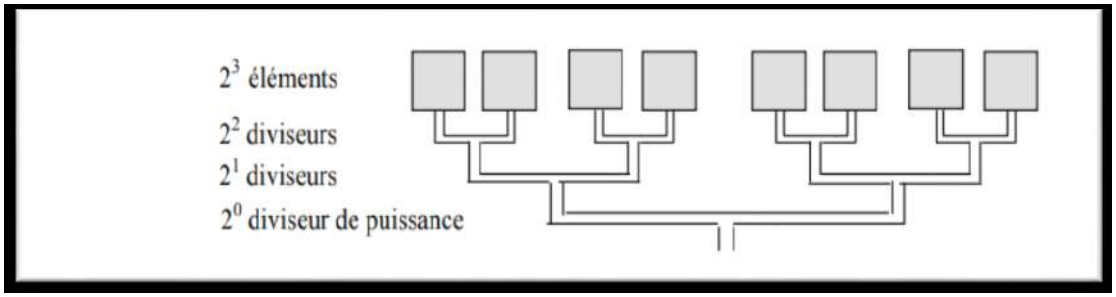



**Figure 22: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire**

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

### II.6.2 Alimentation série

Dans la figure (23) 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].

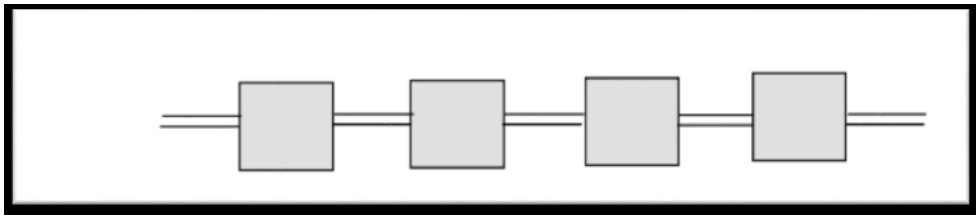


Figure 23: Alimentation série d'un réseau linéaire

### II.6.3 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 24- 25). Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [15].

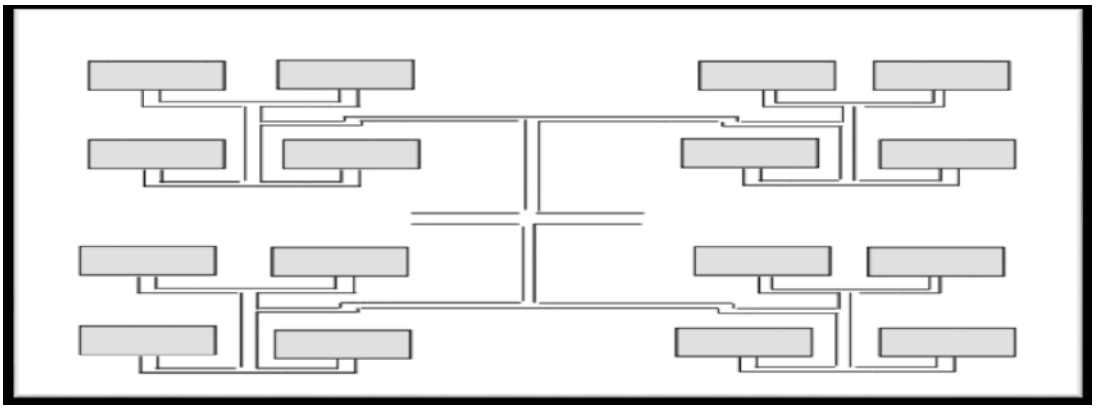


**Figure24: Alimentation parallèle d'un réseau plan**

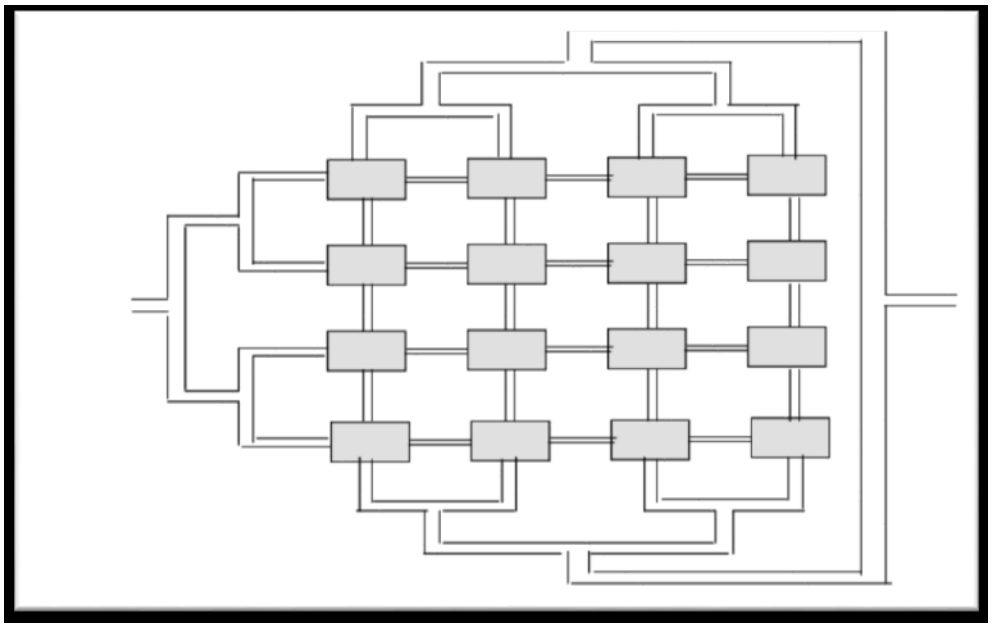


**Figure 25 : Alimentation série d'un réseau plan**

## II.7 **Conclusion** :

A l'issue de ce chapitre, nous avons apporté de nouvelles informations sur les réseaux d'antennes, leur constitution et leurs types, ainsi que leurs caractéristiques et leur mode d'alimentation. Nous avons conclu que les caractéristiques techniques (gain et directivité...) diffèrent d'une antenne à l'autre des réseaux d'antennes, et nous avons donc pu avoir une idée générale complète sur les réseaux d'antennes, ce qui nous aidera à obtenir de bons résultats de simulation que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

# Chapitre III :

# Simulation des réseaux d’ antennes et Discussion des résultats

# Chapitre III :

# Simulation des réseaux d'antennes et Discussion des résultats

## III.1 Introduction

La simulation est une étape essentielle qui nous fournit une approximation des résultats réels pour choisir les paramètres corrects et optimaux avant la mise en œuvre. Ainsi, pour fabriquer un objet (antenne imprimée, circuit, composant, carte imprimée...) il faut bien sûr passer par trois étapes nécessaires, qui sont les suivantes :

- Modélisation : par programme ou formule.
- Simulation au moyen d'un logiciel approprié.
- Implémentation (caractérisée par un analyseur de réseau vectoriel...)

Nous recommandons de concevoir des antennes micro ruban avec un logiciel approprié, ce qui est une étape importante pour gagner du temps et optimiser la structure aux paramètres souhaités. La conception peut également prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs du matériau à faible coût choisi, qui ne sont pas parfaits, et nous permettre d'approximer les calculs pour les futures antennes fabriquées.

Pour cela, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique, HFSS, qui permet d'étudier et de simuler des structures complexes en trois dimensions (3D). Il est particulièrement utile pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonance et la visualisation des champs électromagnétiques et des modèles de rayonnement 3D.

Dans ce chapitre, nous présentons la phase de conception d'antennes à un et deux éléments rayonnants et de réseaux d'antennes rectangulaires sur des substrats à faible constante diélectrique, ainsi que des résultats de simulation à l'aide de lignes micro ruban.

## III.2 Présentation du Logiciel HFSS

### III.2.1 Description du logiciel HFSS :

HFSS (High Fréquence Structural Simulator) est l'un des outils d'analyse électromagnétique 3D les plus avancés basés sur la méthode des éléments finis (FEM). C'est un logiciel développé par Ansoft Corporation des États-Unis. Il possède une interface graphique avancée et de nombreuses fonctionnalités, et il bénéficie de nombreuses optimisations pour accélérer le calcul. Il s'avère relativement adapter pour décrire des cartes électroniques de manière précise, mais nécessite beaucoup de temps de calcul [31].

HFSS est un logiciel qui calcule le comportement électromagnétique des structures, et afin d'analyser ce comportement en détail, le logiciel nous fournit des outils d'interprétation en post-traitement. Il effectue une modélisation électromagnétique en résolvant les équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis [32].

Le principe de la méthode est de diviser l'espace d'étude en un grand nombre de petites régions (tétraèdres) puis de calculer localement le champ électromagnétique dans chaque cellule.

En d'autres termes, les étapes de 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 (S11 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].

### III.2.2 Les outils d'An soft :

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

a) Un chef de projet qui contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.

b) Un gestionnaire de messages qui nous permet de regarder toutes les erreurs ou les avertissements qui se produisent avant que nous commencions une simulation.

c) Une fenêtre de propriété qui nous montre et permet de changer les paramètres ou les attributs modèles.

d) Une fenêtre de progrès qui montre le progrès de solution.

e) Une fenêtre du modeleur 3D qui contient le modèle et l'arbre de modèle pour la conception active.

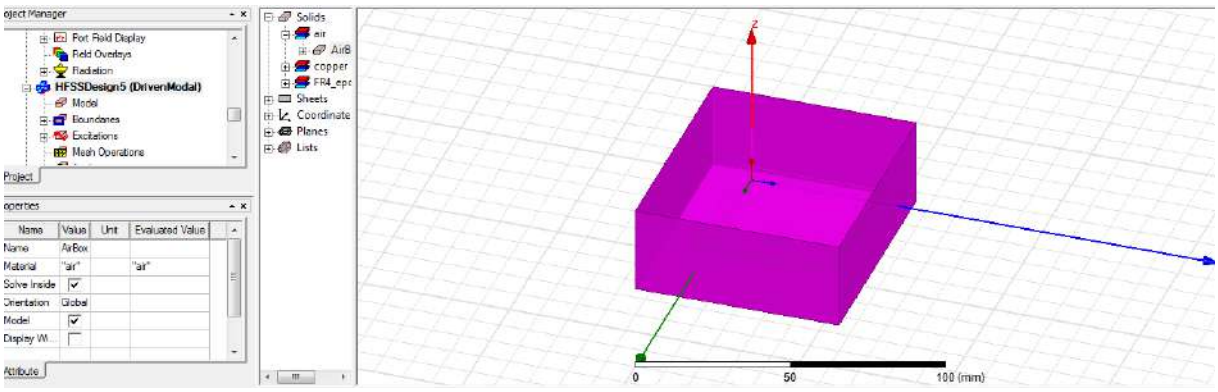



**Figure. 26 : Fenêtre de logiciel HFSS pour model 3D**

## III.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 $\varepsilon r$=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.

### III.3.1Choix du type de solution :

Nous sélectionnons le type de solution à partir du menu HFSS, il existe plusieurs types de solutions :

- **Drivent Modal :** permet de calculer S11 d'une structure en haute fréquence en fonction des ondes incidentes et réfléchies.
- **Drivent Terminal :** nous permet de calculer les paramètres S de mode des structures passives haute fréquence tel que les micro-rubans, les guides d'ondes et les lignes de transmission excitées par une source.
- **Eigenmode :** permet de calculer la fréquence de résonance de la structure et les champs à ces fréquences. [7]

Pour notre conception on a utilisé le (Driven Modal) comme type de solution.

### III.4. La présentation du travail

Nous allons présenter les paramètres spécifiques choisis et les calculs des paramètres géométriques pour les utilisés dans la conception d'une antenne micro-ruban rectangulaire afin de réussir une simulation en utilisant l'environnement de conception d'Ansoft HFSS et pour cela nous devons suivre les étapes suivantes :

- Déterminer les unités en mm
- Présenter la gamme de fréquence utilisée.
- Présenter et justifier le choix de matériau et épaisseur du substrat.
- Présenter le calcul de la largeur et la longueur du patch.
- Présenter le calcul de la largeur du la ligne d'alimentation et la position d'alimentation

- **Calculs des paramètres géométriques de l'antenne micro-rubans rectangulaire**

On va se contenter dans ce qui suit sur une étude paramétrique d'une antenne alimentée par ligne micro-rubans axiale avec encoche. Les dimensions à déterminer sont la longueur L et la largeur W du patch, la position d'alimentation Y0, la largeur Wf de la Ligne d'alimentation.

A. Détermination de la longueur **L** et la largeur **W** du patch :

A.1 **Donnés** :

- $fr$ = 2.4 GHz (Fréquence de résonance).
- $h$ = 3 mm (Hauteur du substrat).

- $\varepsilon r$ = 4.4 (La constante diélectrique du substrat).
- $C$ = 3 × 108 m /s (La célérité de la lumière)

**A.2 Objectif** :

- w : La largeur du patch en mm.
- L : La longueur du patch en mm.
- La méthode est :

$$L = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

### III.5. Simulation d'une antenne patch

#### III.5.1 Simulation des antennes simples rectangulaires pour la fréquence f=2.4GHz

Après les études théoriques que nous avons menées dans les deux chapitres précédents sur le fonctionnement des antennes et des réseaux d'antennes imprimées et leurs caractéristiques les plus importantes, nous allons simuler chacune des antennes patch et des réseaux d'antennes constitués de deux antennes et de quatre antennes et en déduire leurs résultats à l'aide du programme HFSS.

#### III.5.1.1 Étapes de simulation de première antenne

On utilise le model de Box :

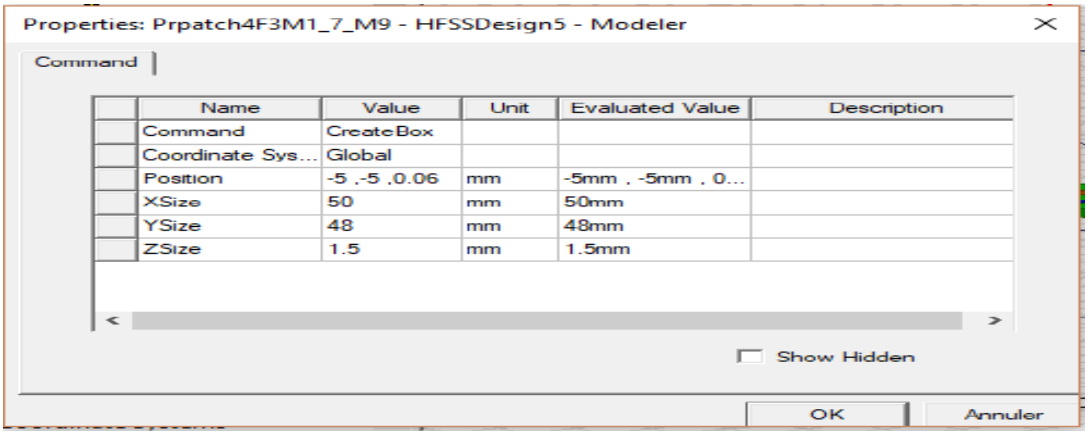



**Figure.27: Fenêtre des paramètres de substrat.**

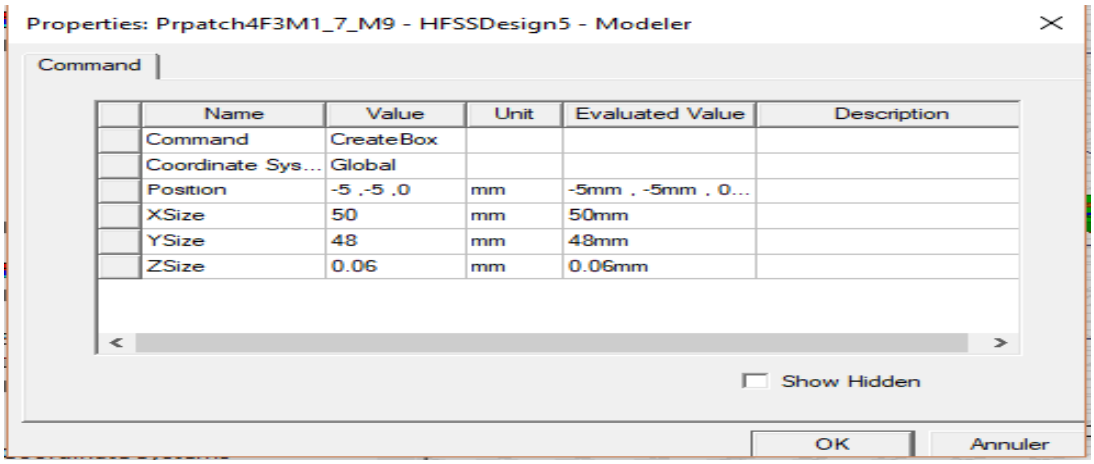



**Figure.28 : Fenêtre des paramètres de plan de masse.**

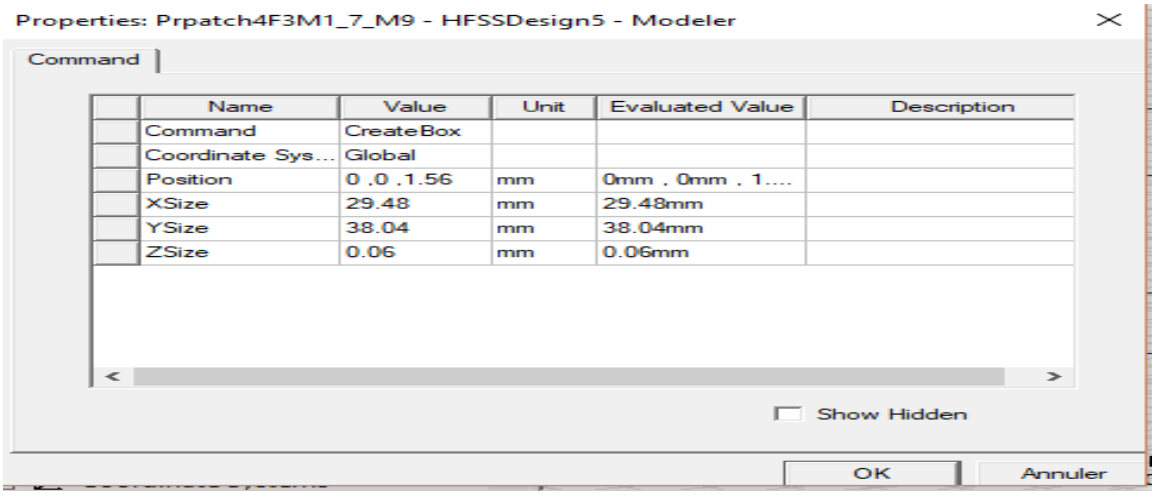



**Figure.29 : Fenêtre des paramètres de patch.**

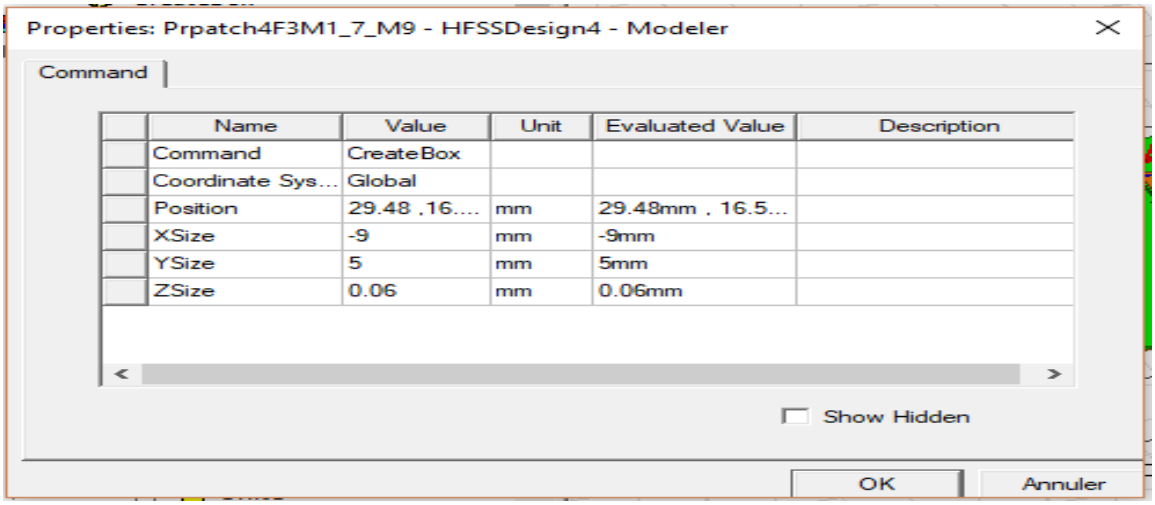



**Figure.30 : Fenêtre des paramètres de Gap**

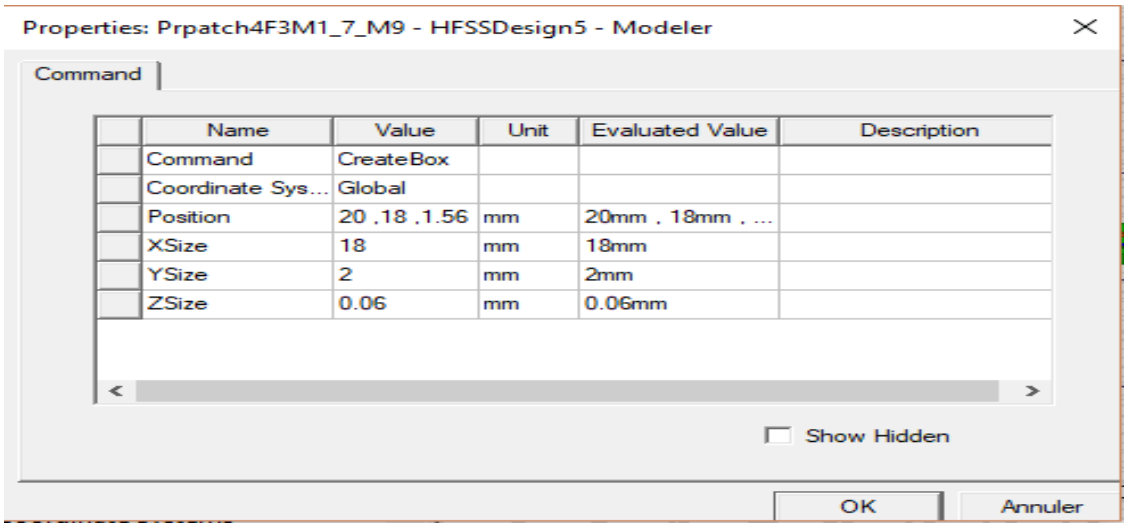



**Figure.31 : Fenêtre des paramètres de linge d'alimentation.**

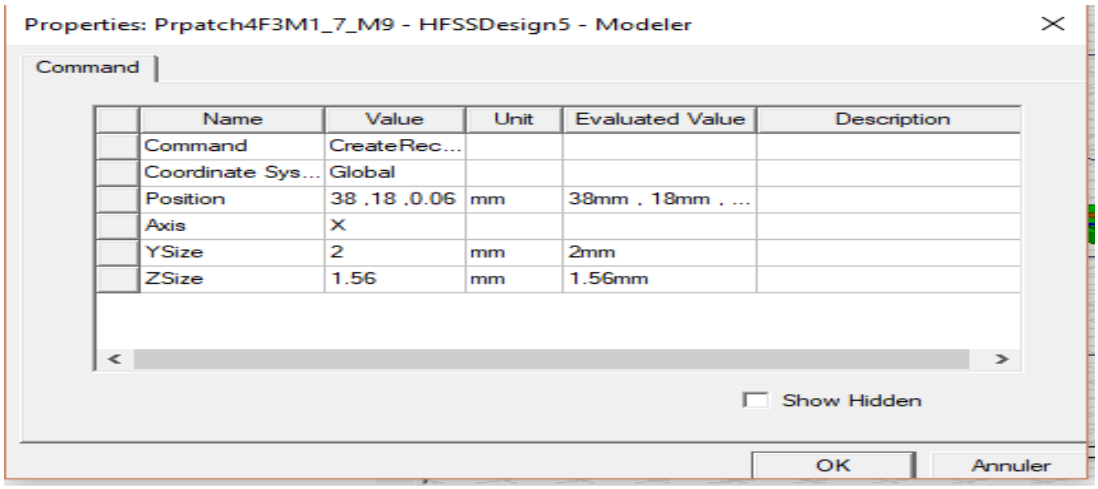



**Figure.32 : Fenêtre des paramètres de point d'excitation.**

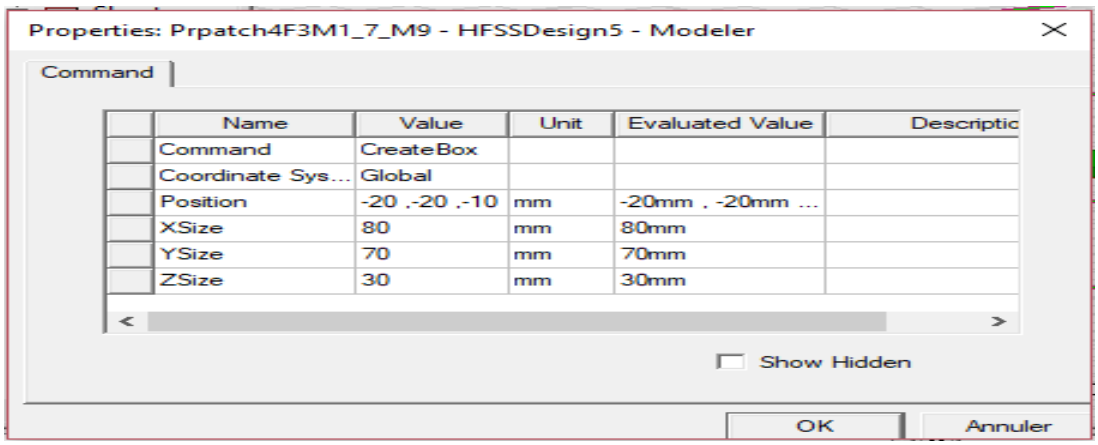



**Figure.33 : Fenêtre des paramètres d'Air Box.**

Conception d'antenne pour f = 2.4GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r$ =4.4 :

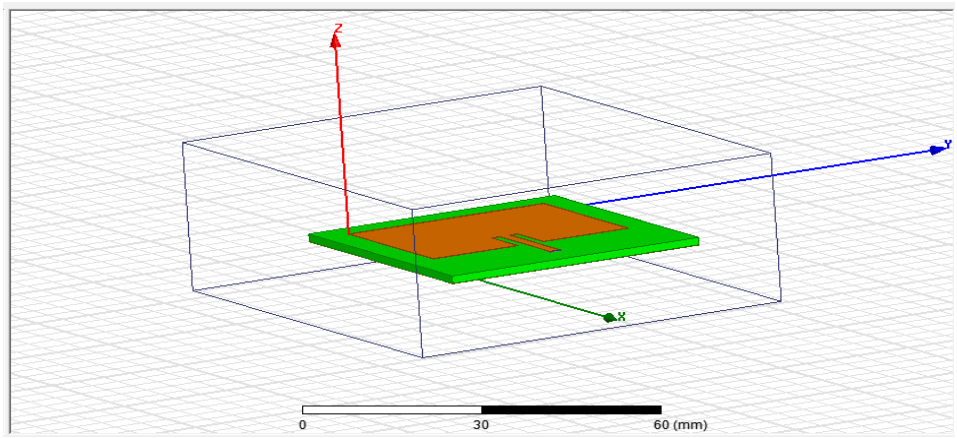



**Figure.34 : une antenne microbande rectangulaire.**

### III.5.1.2 Résultats de simulation :

- La figure.34, présente l'évolution du paramètre S11 en fonction de la fréquence :

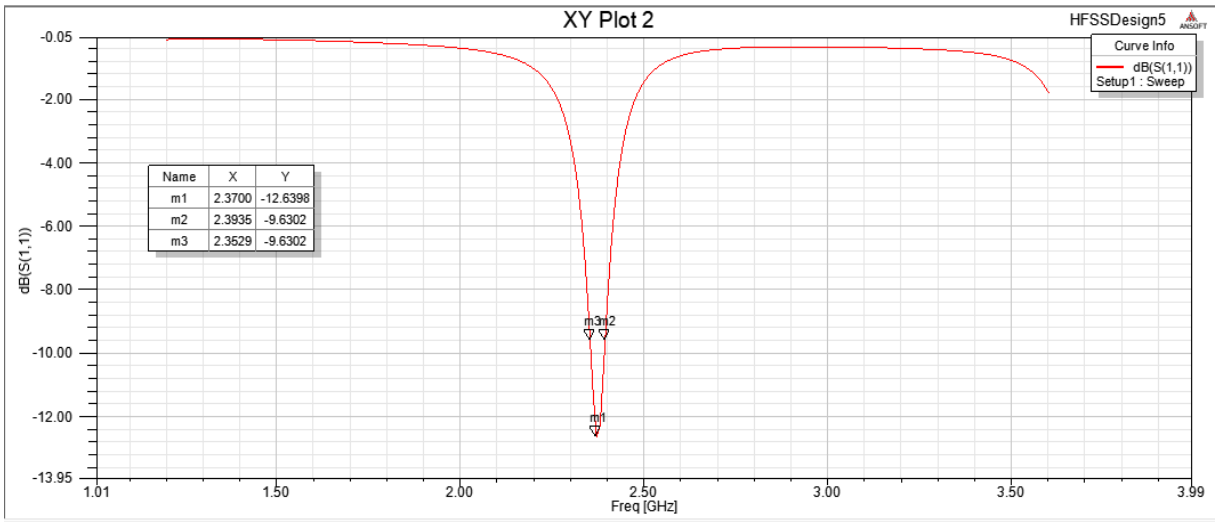



**Figure. 35 : Coefficient de réflexion *S*11 en fonction de la fréquence**

- Diagramme de rayonnement 3D Gain :

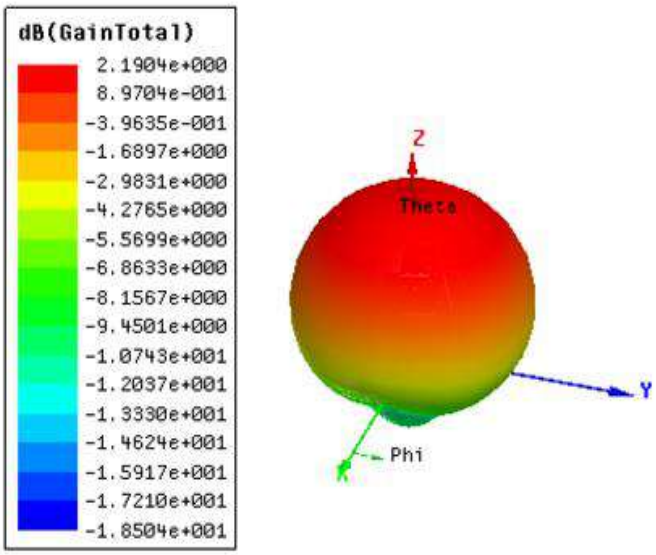



**Figure. 36: Diagramme de rayonnement 3D Gain**

- Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique :

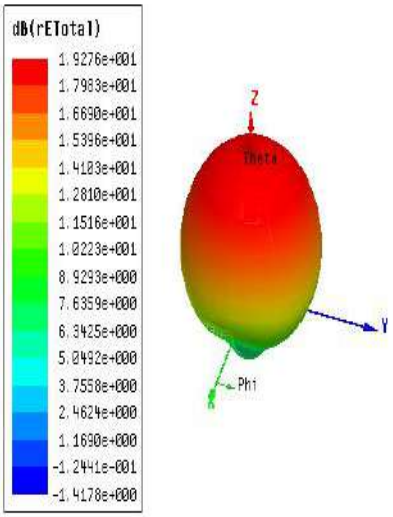



**Figure.37 : Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique**

- Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90° :

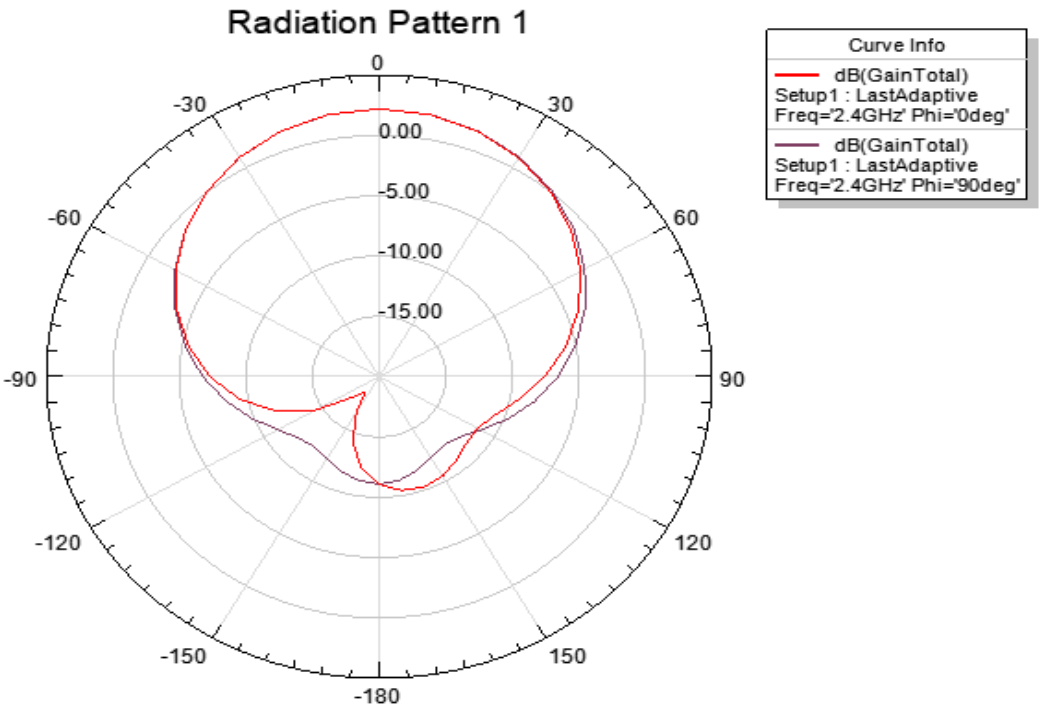



**Figure.38: Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°.**

- La directivité :

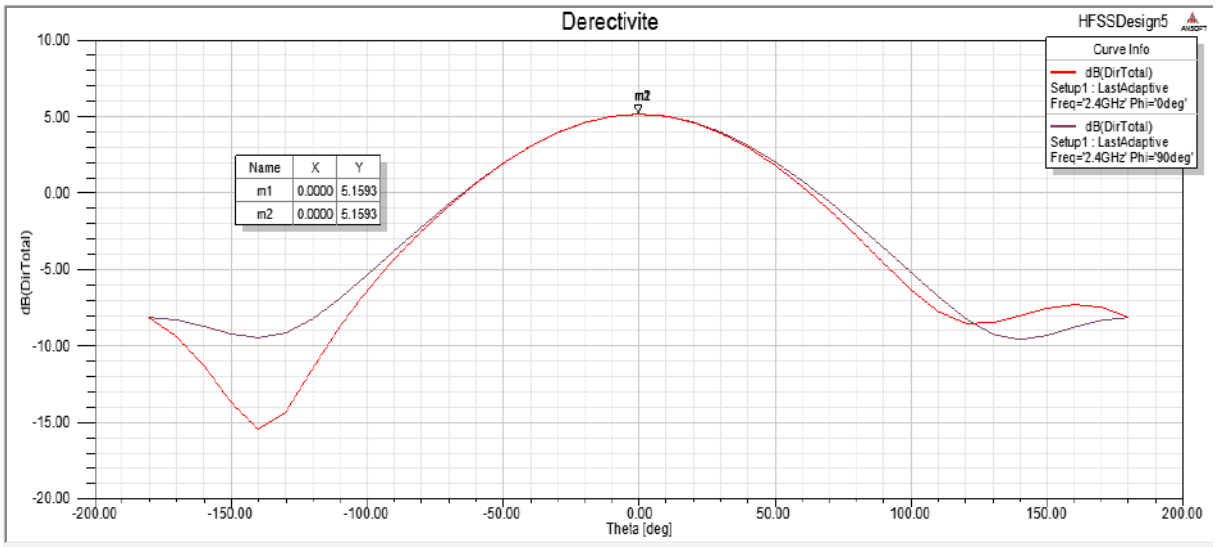



**Figure. 39 : La directivité totale.**

- VSWR

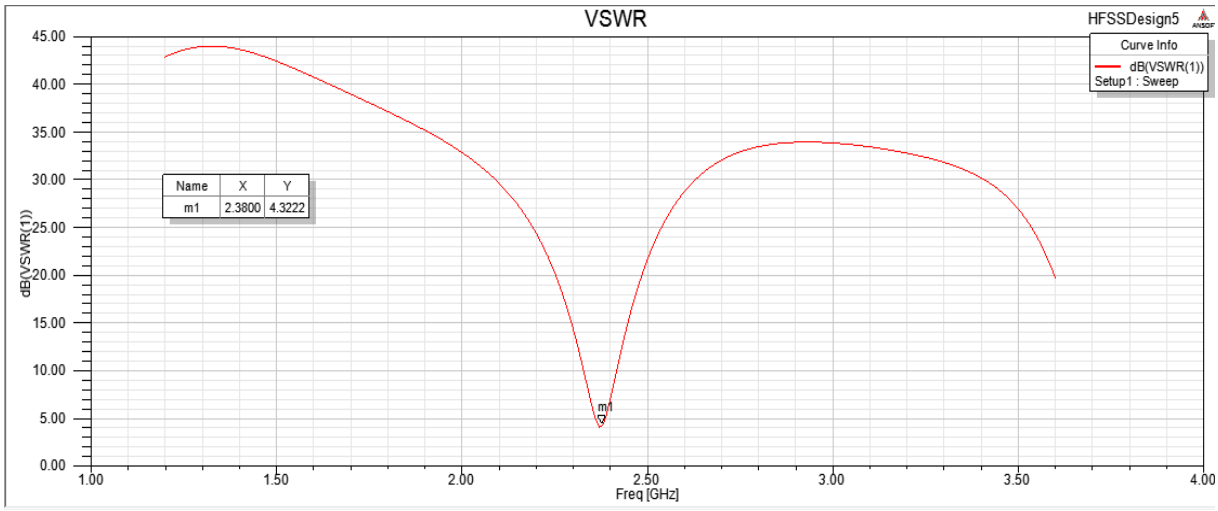



**Figure .40 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.**

**Tableau 3 :** Résultats de simulation obtenus

| Fréquence (GHz) | S11 (dB) | VSWR (dB) | Gain (dB) | Directivité (dB) | Champ E (dB) | BP(-3dB) (MHz) | Rendement (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.4 | -12.6398 | 4.32 | 2.1094 | 5.5193 | 1.9276 | 40.60 | 38.21 |

D'après les diagrammes de rayonnement et le tableau (3), on constate que cette antenne rectangulaire a :

- Une bonne directivité suivante l'axe Z. 5.5193dB
- Une bande passante étroite de l'ordre de 40.6 MHz,
- Une bonne adaptation pour un coefficient de réflexion de -12.6398 dB
- Un rendement faible de 38.21 %.

## III.6Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes :

### II.6.1 Étapes de simulation de deuxième antenne (réseaux patch) :

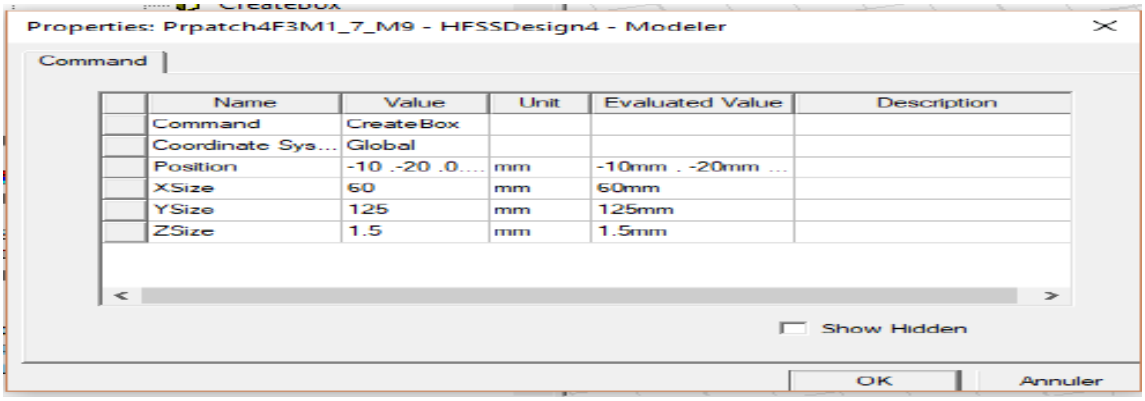



**Figure. 41 : Fenêtre des paramètres de substrat.**

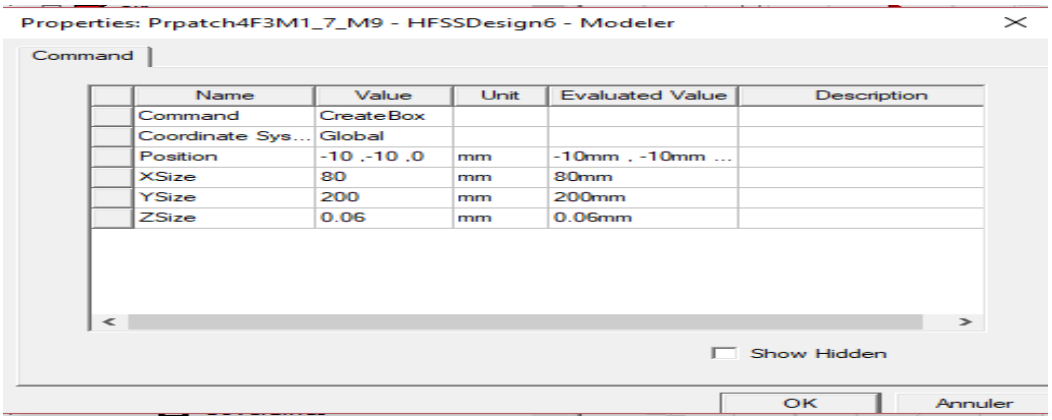



**Figure.42: Fenêtre des paramètres de plan de masse .**

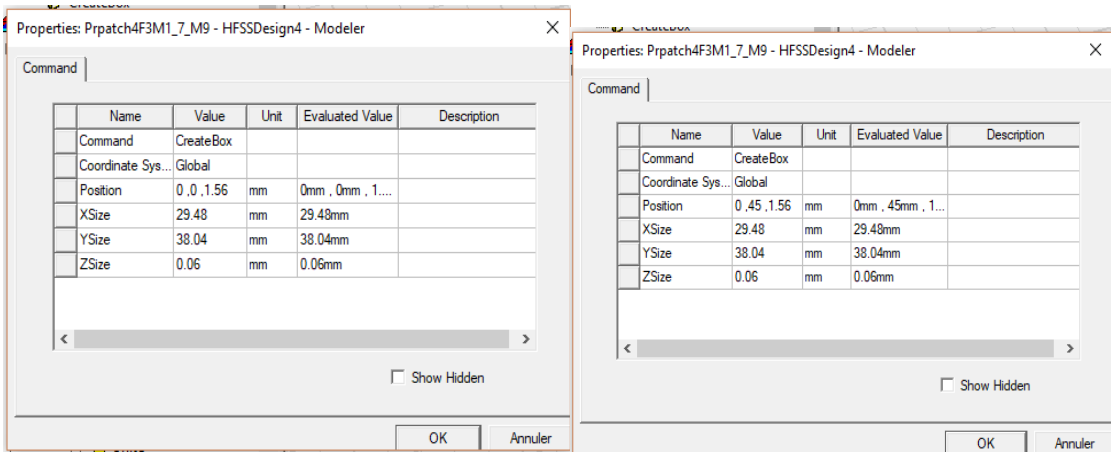



**Figure.43 : Fenêtre des paramètres de patchs.**

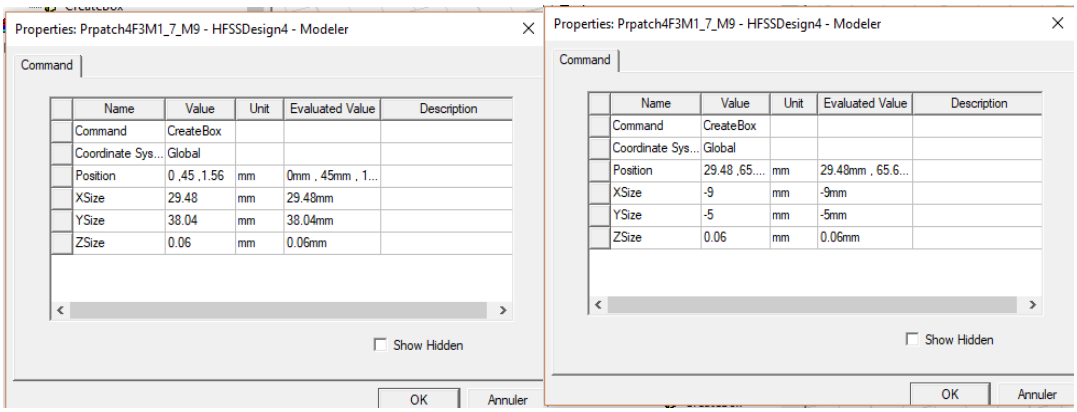



**Figure.44 : Fenêtre des paramètres de Gaps.**

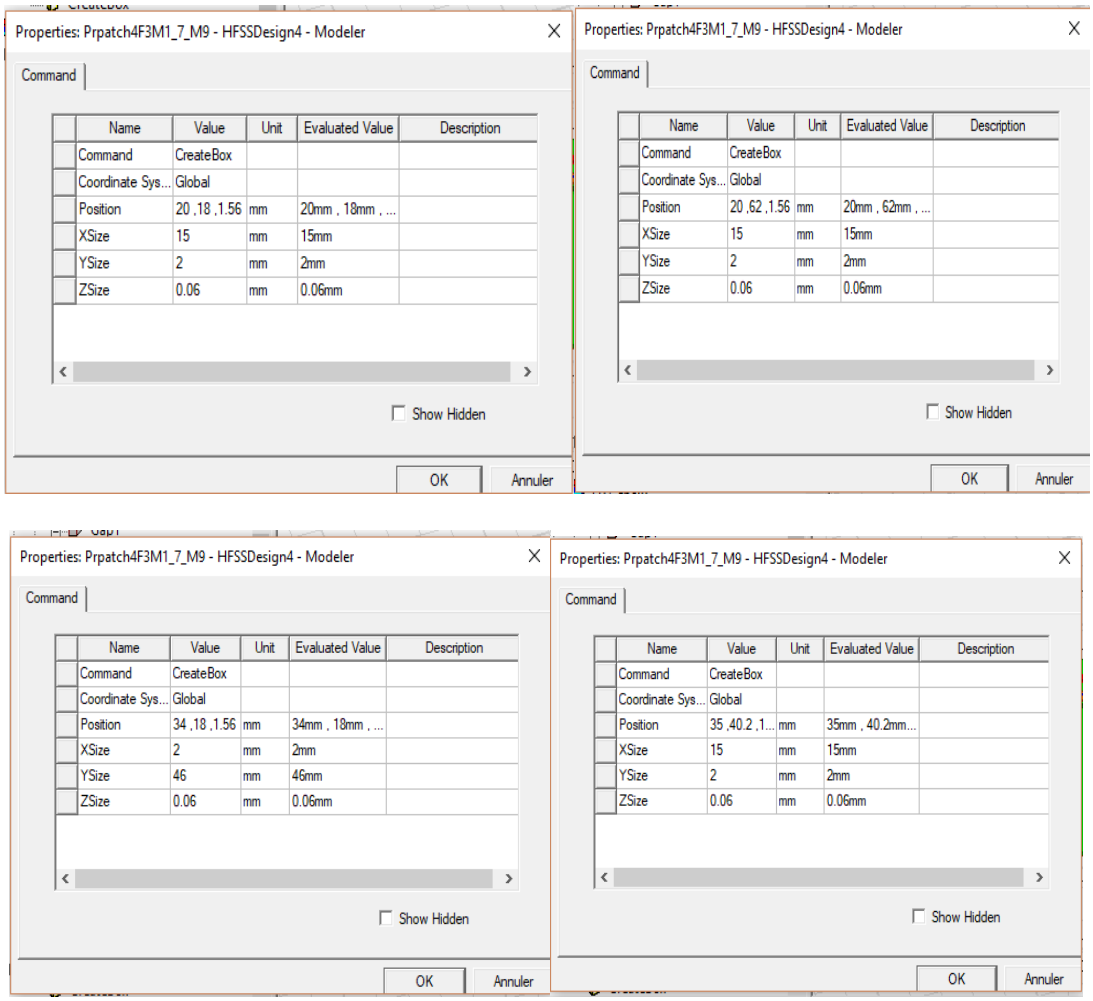



**Figure.45 : Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation**

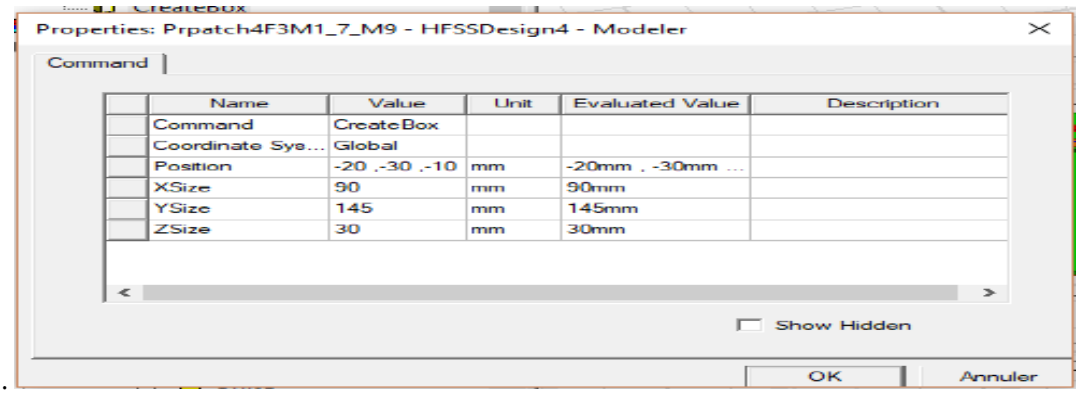



**Figure.46 : Fenêtre des paramètres d'Air Box.**

## Conception d'antenne réseau patch pour f = 2.4GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r$=4.4.

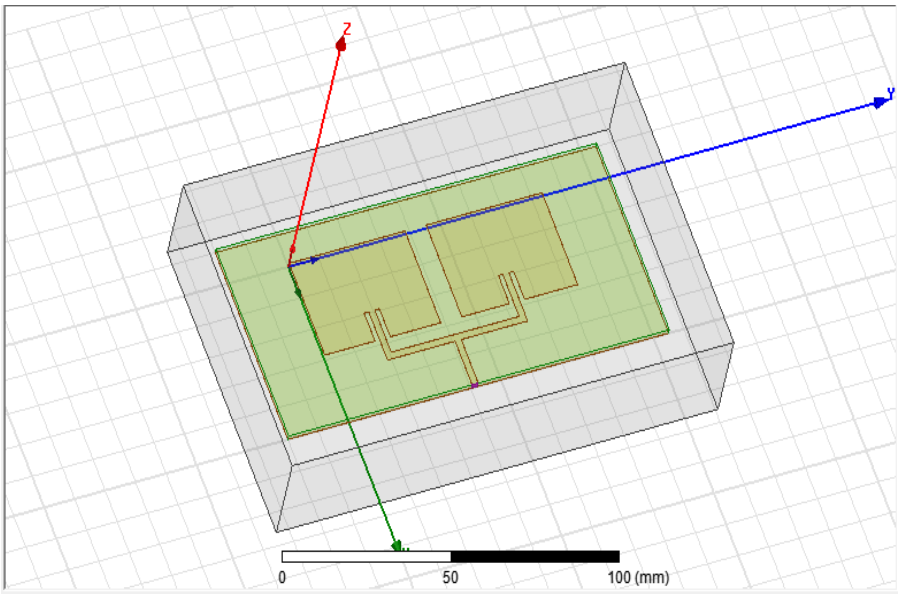



**Figure .47: Conception des réseaux 2 patch.**

### III.6.2 Résultats de simulation

La figure des paramètre S11

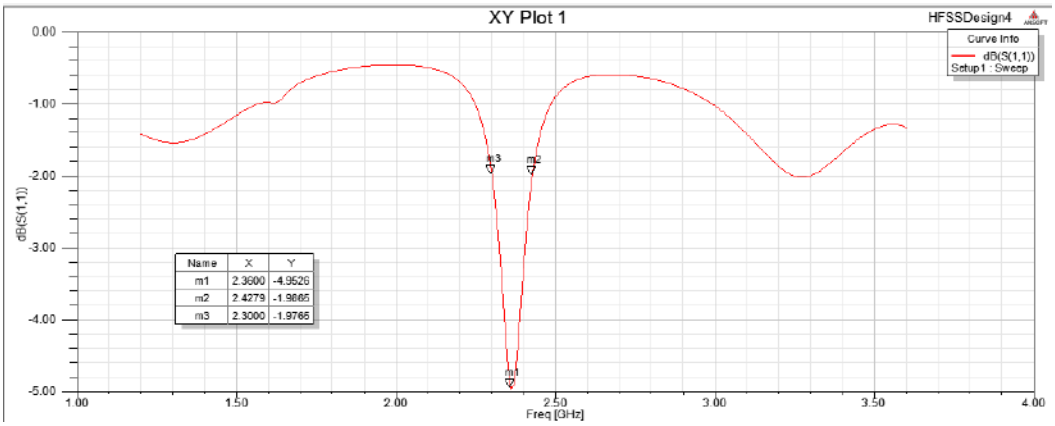



**Figure .48 : Coefficient de réflexion *S*11 en fonction de la fréquence.**

- **Diagramme de rayonnement 3D Gain**

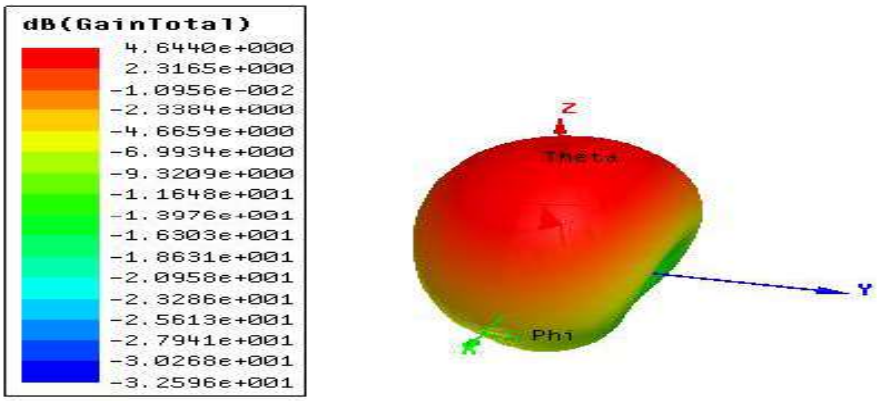



**Figure .49 : Diagramme de rayonnement 3D Gain**

- **Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.**

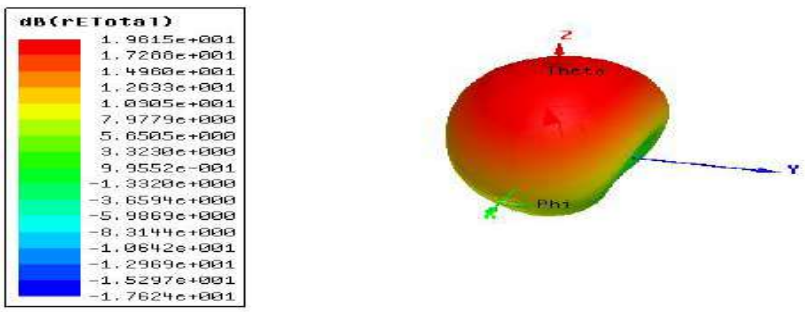



**Figure .50: Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.**

- **Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°.**

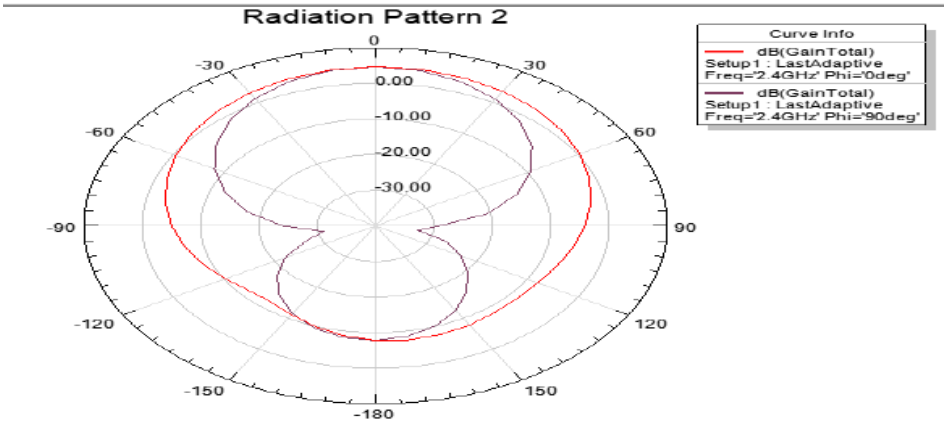



**Figure .51 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°.**

- **Directivité**

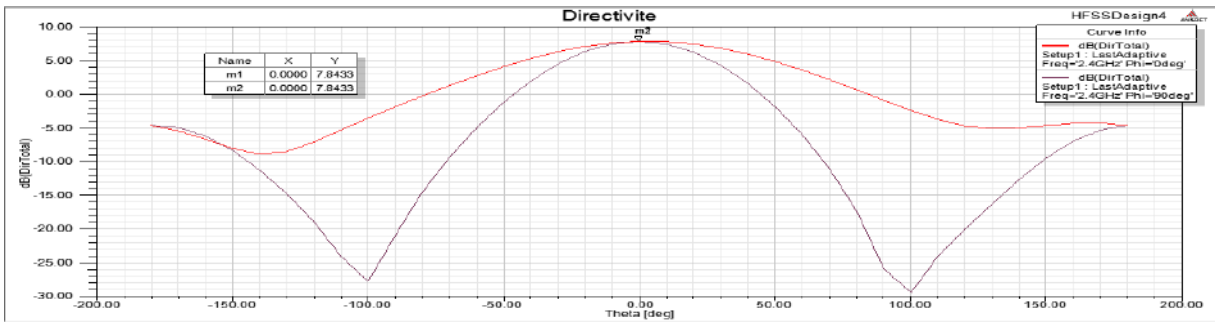



**Figure .52: La directivité totale.**

- **VSWR**

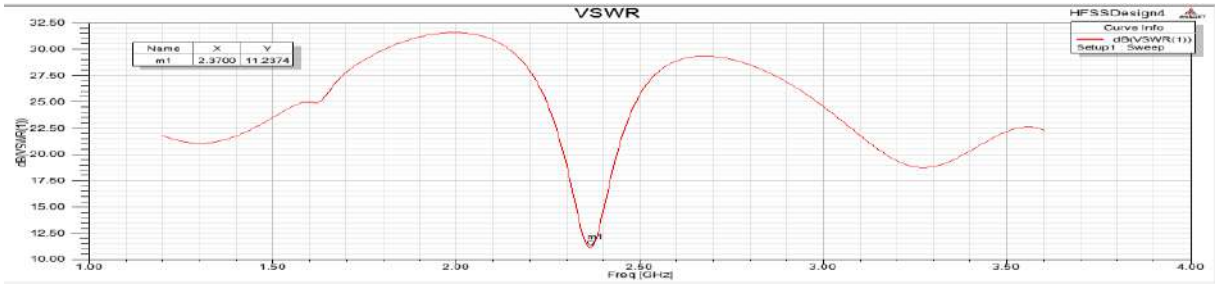



**Figure .53: Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.**

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

**Tableau 4 : Résultats de simulation**

| Fréquence (GHz) | S11 (dB) | VSWR (dB) | Gain (dB) | Directivité (dB) | Champ E (dB) | BP(-3dB) (MHz) | Rendement (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.4 | -4.9526 | 11.2374 | 4.6440 | 7.8433 | 1.9615 | 127.9 | 59.21 |

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 4.6440 dB.
- Une bande passante faible 127.9 MHz.
- Une bonne adaptation pour un coefficient de réflexion de 11.2374 dB.
- Un rendement faible de 59.21.

### III.7 Résultats de simulation des réseaux d'antennes microbandes :

### III.7.1 Étapes de simulation de quatre antennes (réseaux patch) :

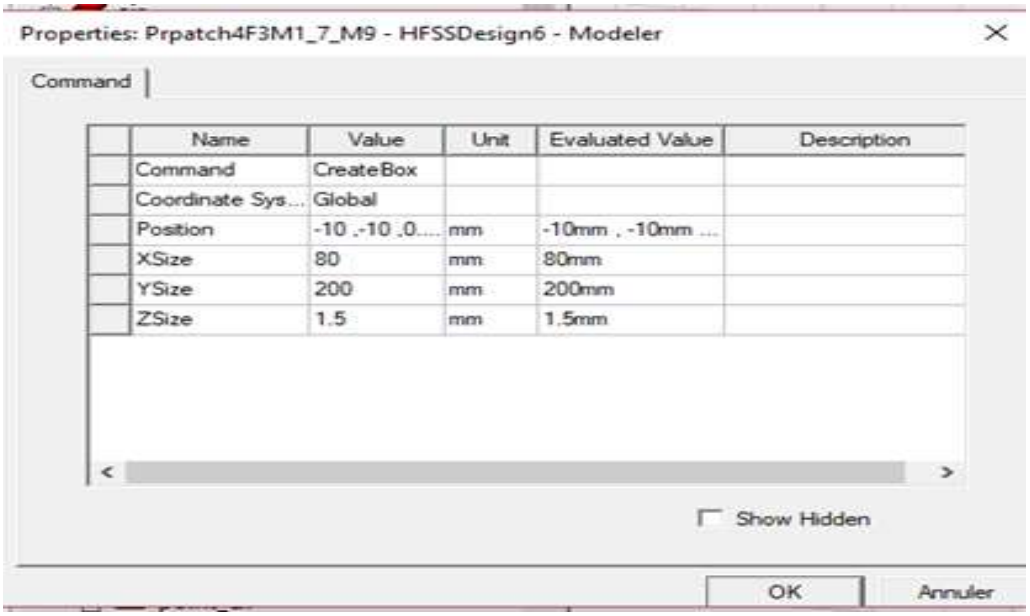



Figure.54: Fenêtre des paramètres de substrat

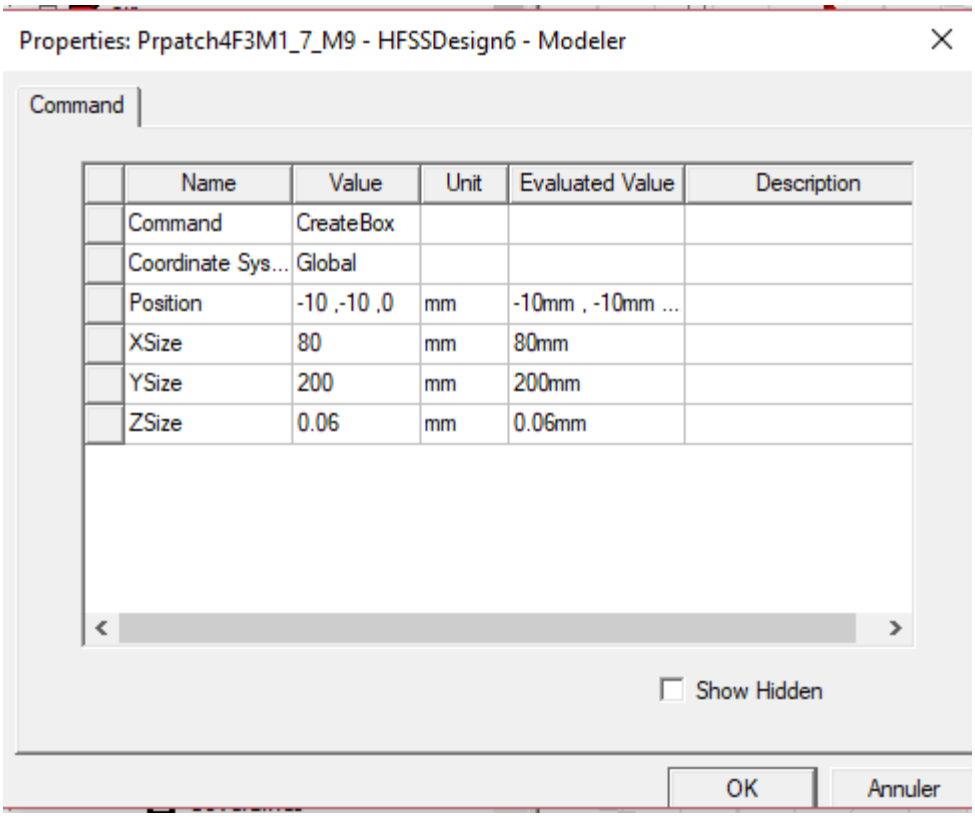



**Figure.55: Fenêtre des paramètres de plan de masse**

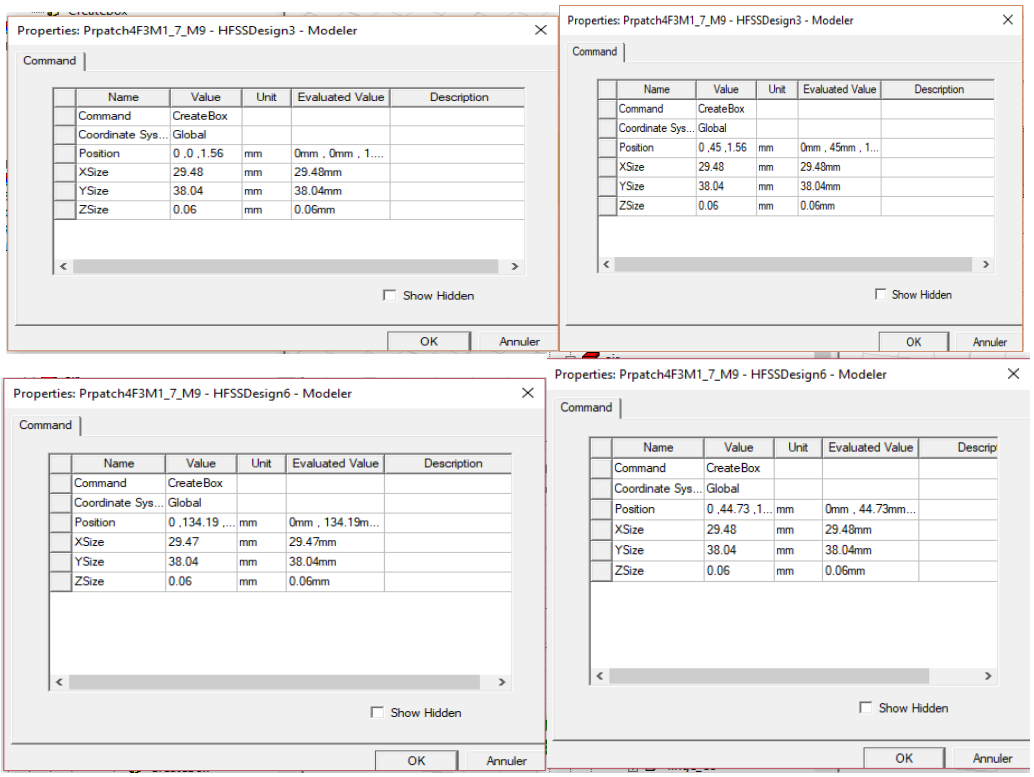



**Figure.56 : Fenêtre des paramètres de patchs.**

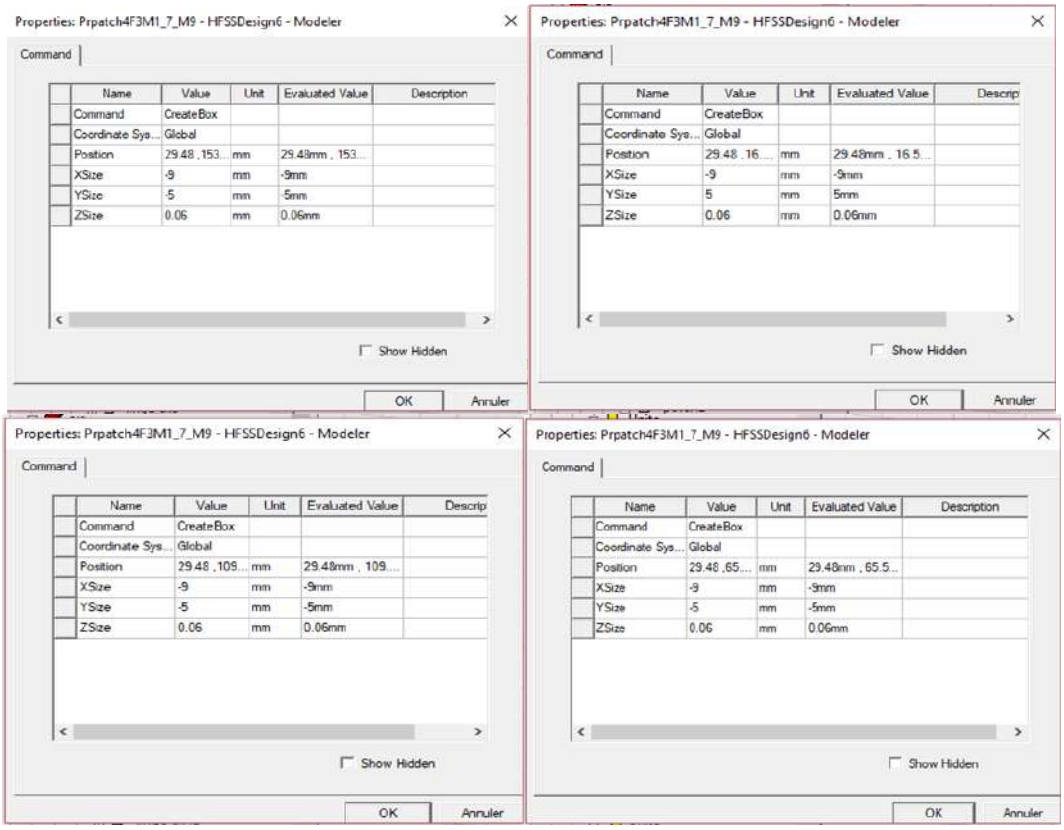
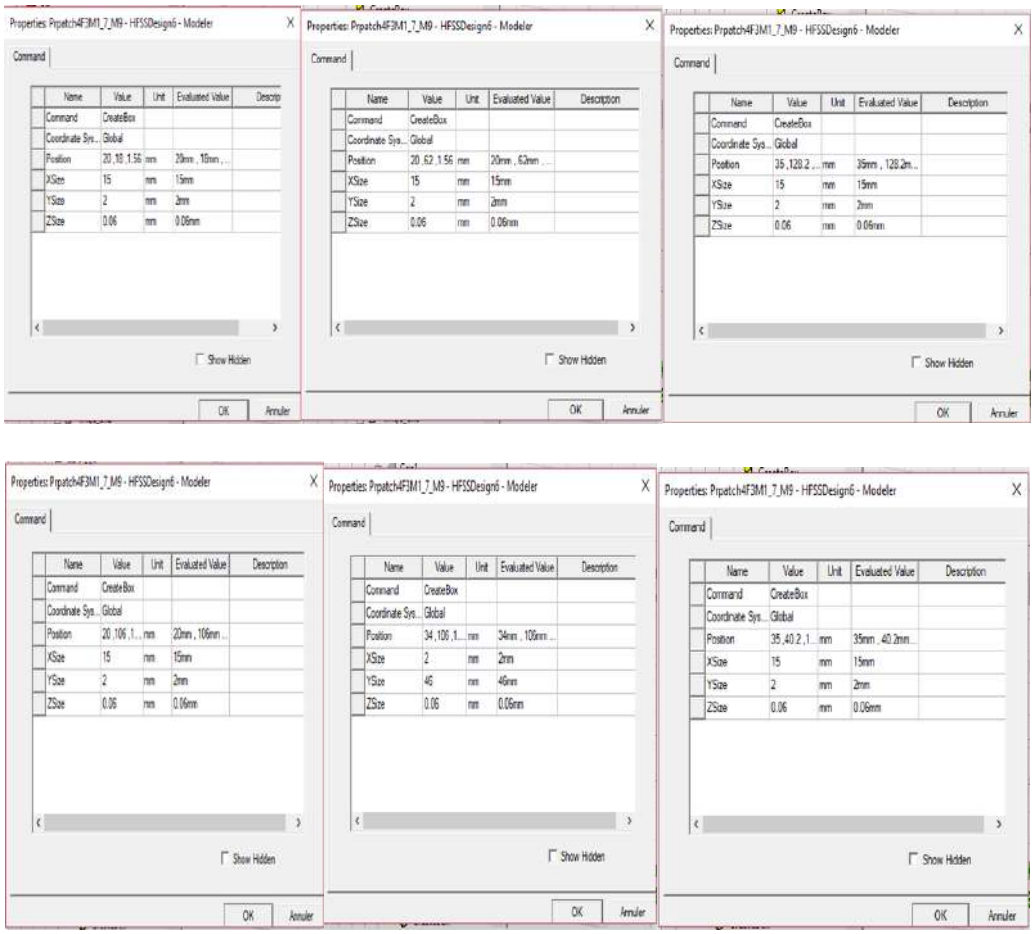



**Figure.57 : Fenêtre des paramètres de Gaps.**



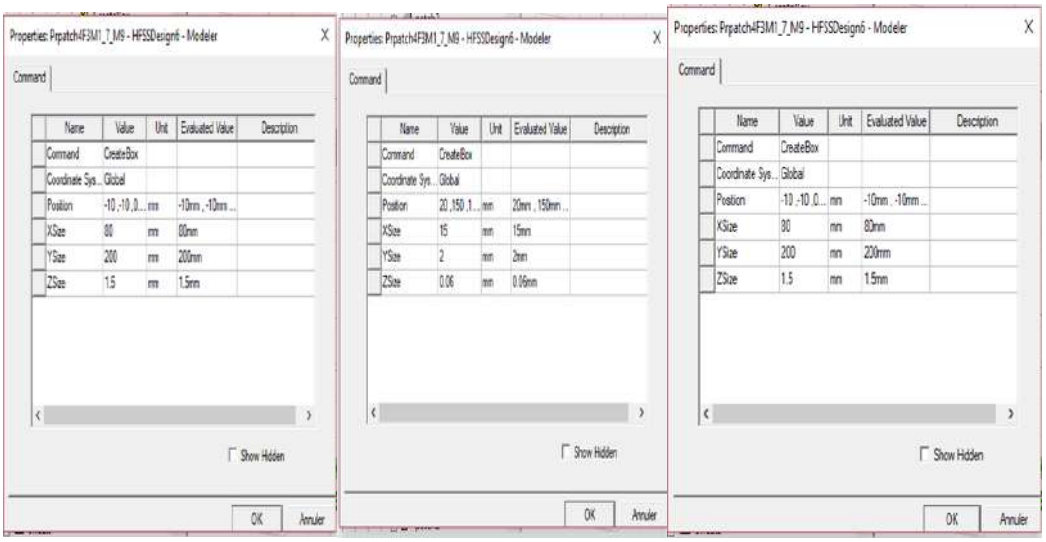


**Figure.58 : Fenêtre des paramètres de linges alimentations.**

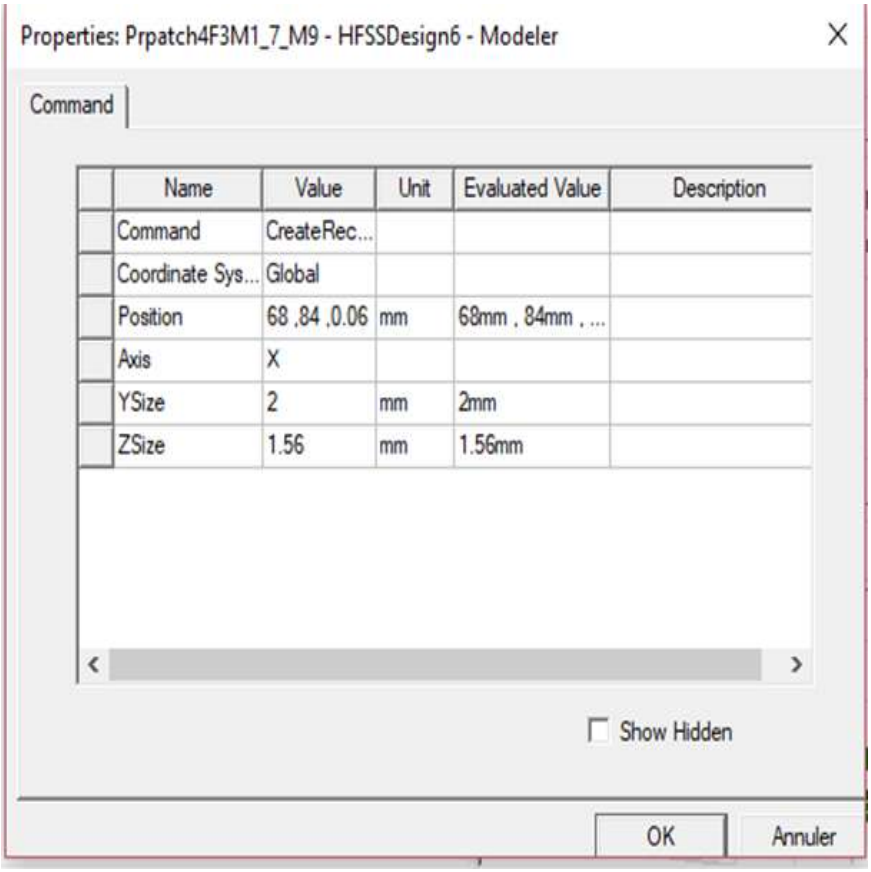



**Figure.59 : Fenêtre des paramètres de point d'exécution.**

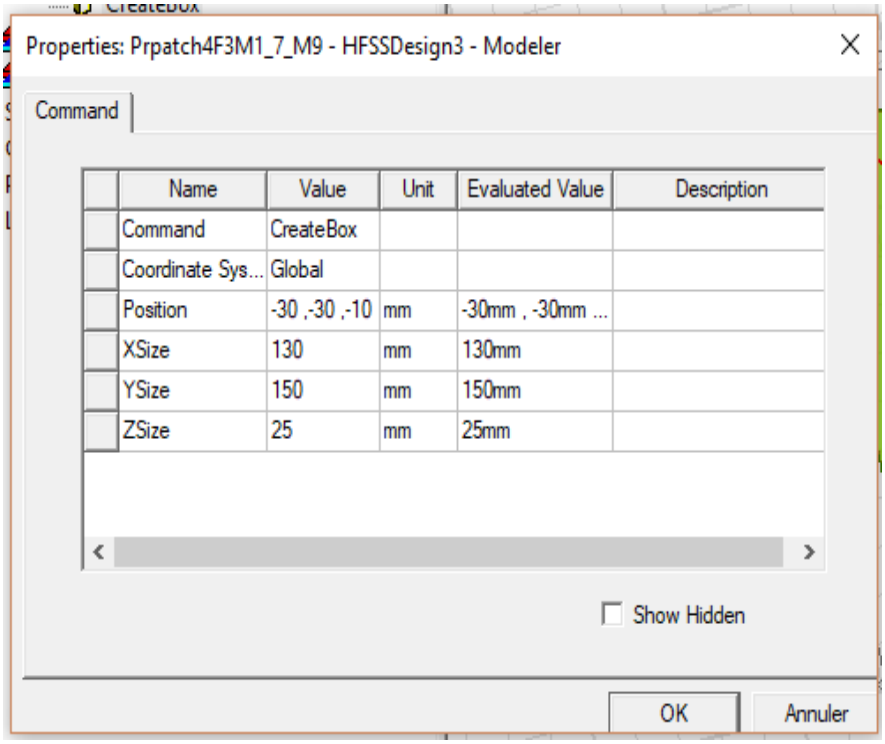



**Figure.60 : Fenêtre des paramètres d'Air Box.**

Conception d'antenne réseau patch pour f = 2.4GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r$=4.4.

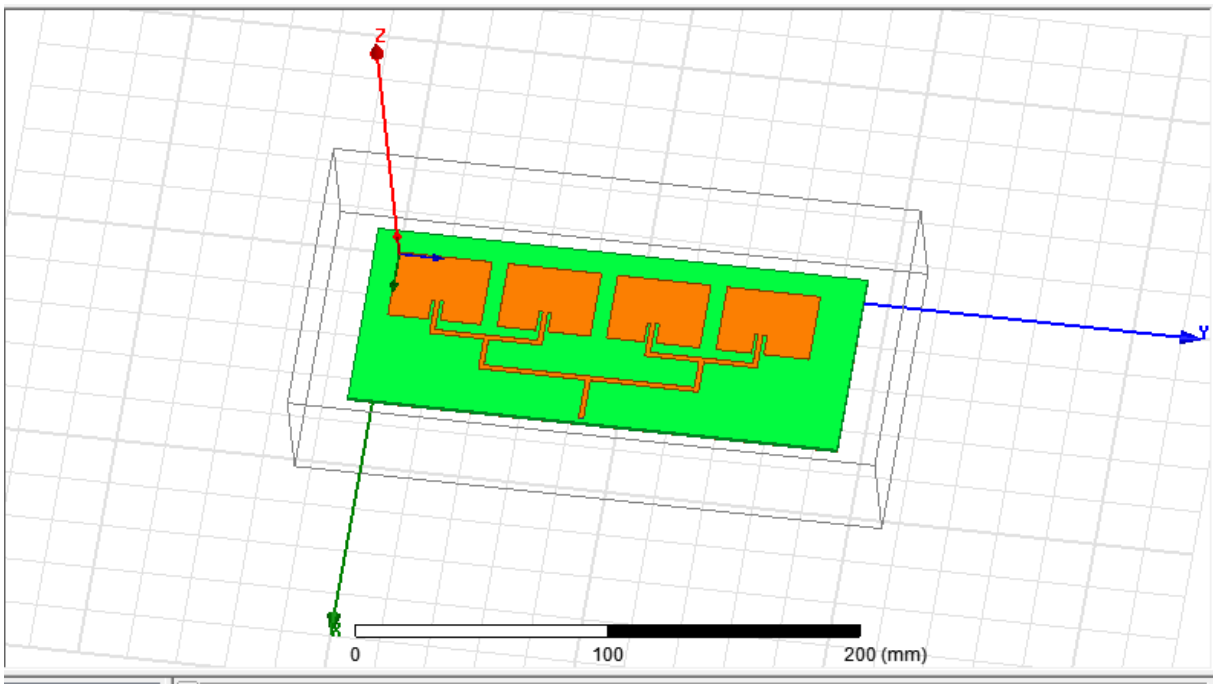



**Figure .61 : Conception des réseaux 4 patch.**

### III.7.3 Résultats de simulation

- La figure des paramètre S11

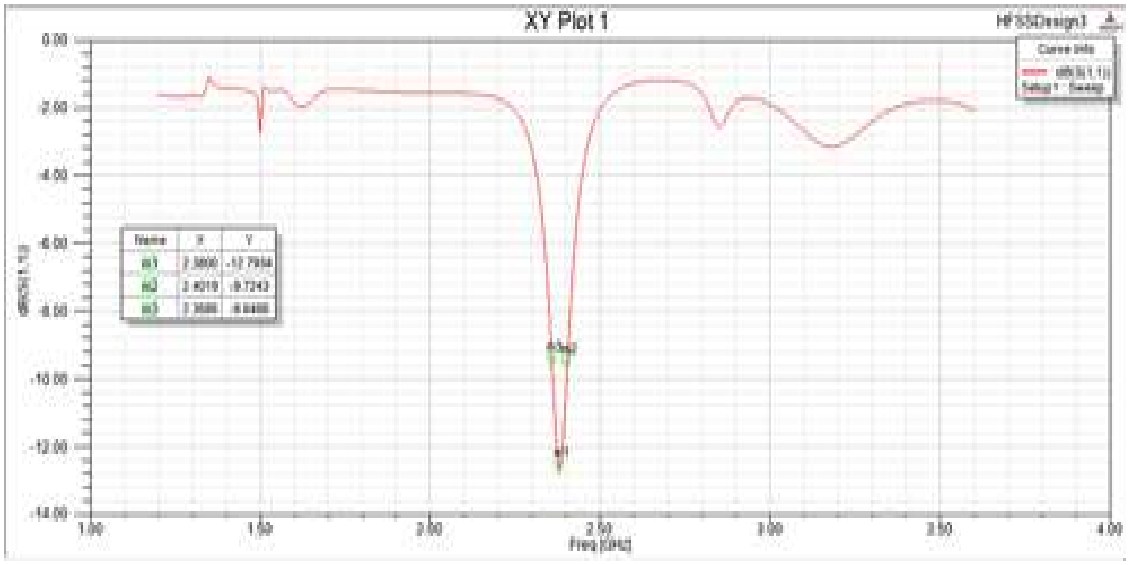



**Figure.62 : Coefficient de réflexion *S*11en fonction de la fréquence.**

- Diagramme de rayonnement 3D Gain

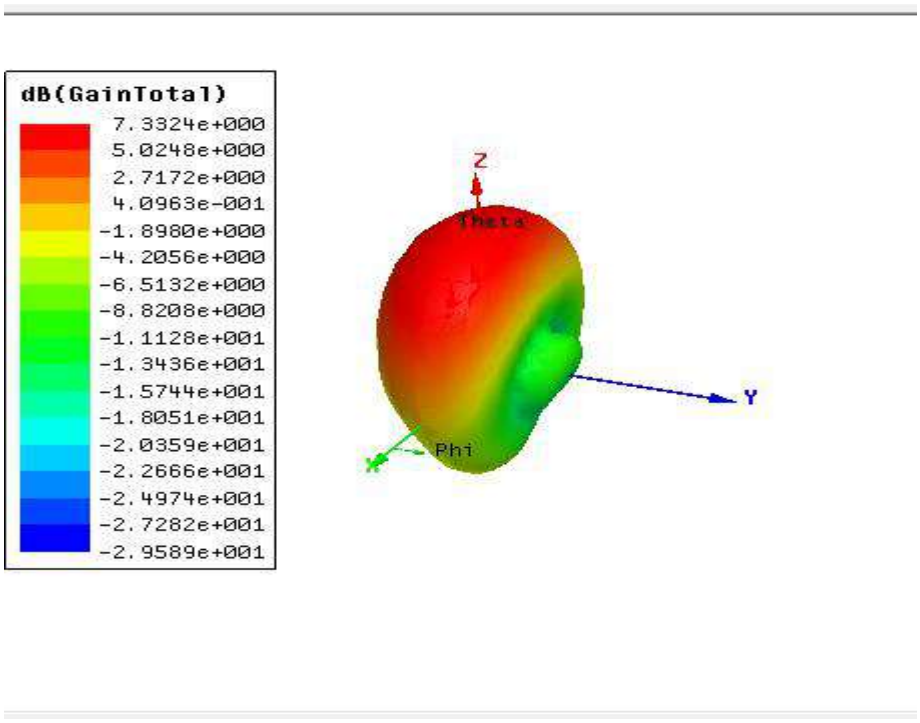



**Figure .63: Diagramme de rayonnement 3D Gain**

- Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.

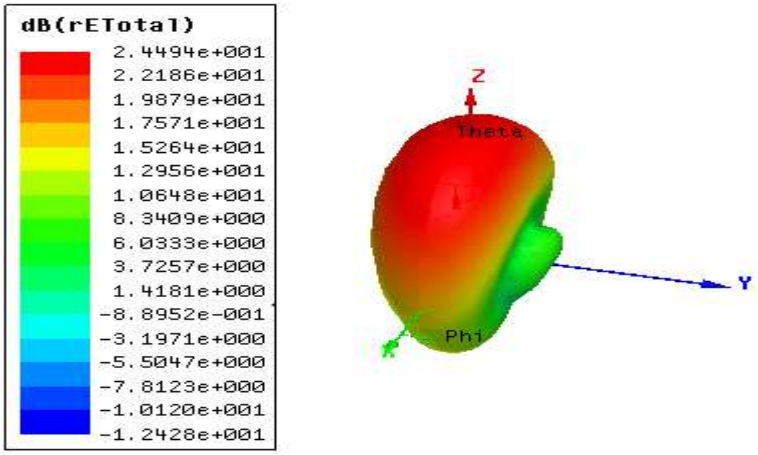



**Figure.64 : Diagramme de rayonnement 3D Champ électrique.**

- **Directivité**

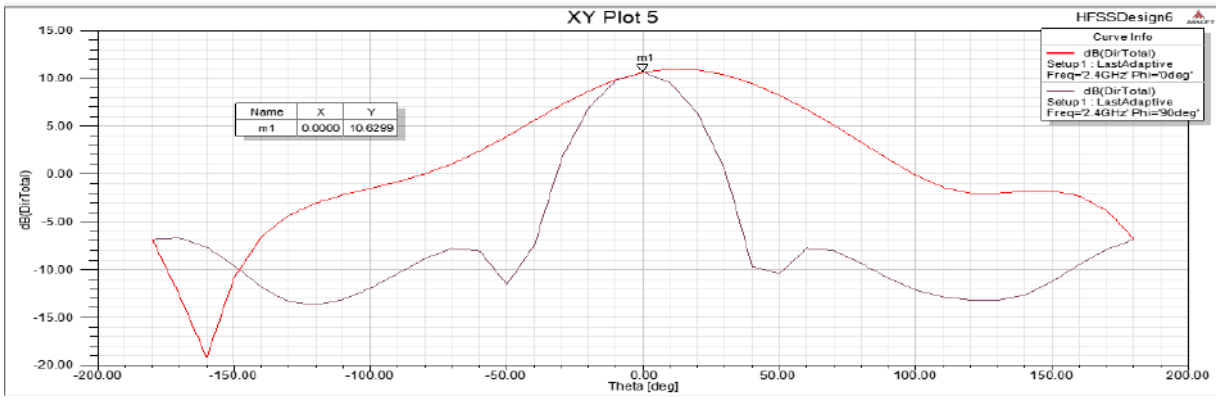



**Figure .65 : La directivité totale.**

- **VSWR**

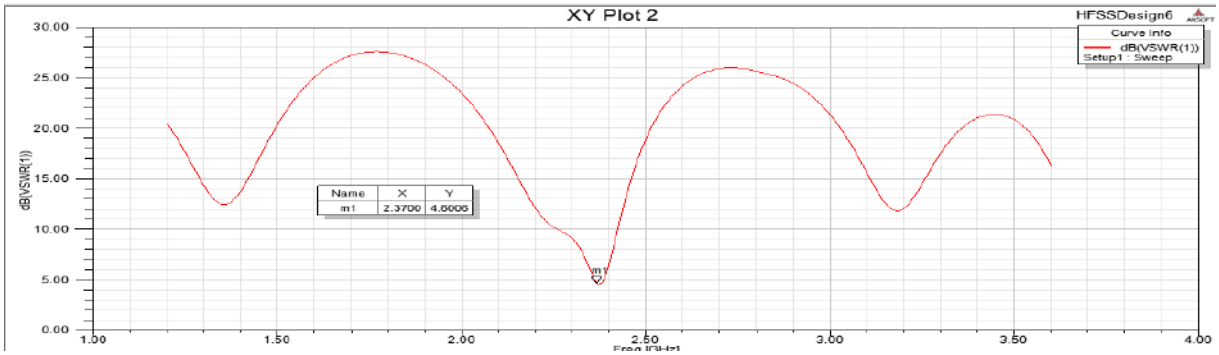



**Figure 66: Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.**

- **Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°.**

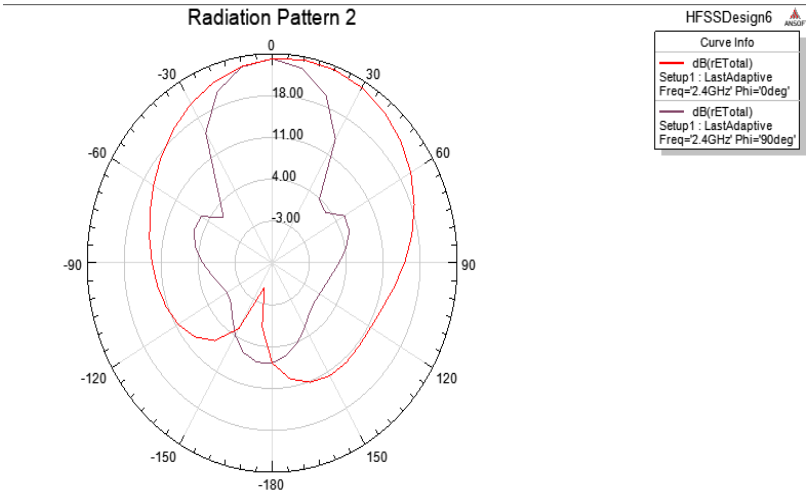



**Figure .67 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi$ = 0°, 90°.**

Le Tableau 5, présente les différents paramètres de simulation à la fréquence 2.4 GHz.

**Tableau 5 : Résultats de simulation**

| Fréquence (GHz) | S11 (dB) | VSWR (dB) | Gain (dB) | Directivité (dB) | Champ E (dB) | BP(-3dB) (MHz) | Rendement (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.4□ | -11.5708 | 4.6006 | 7.3324 | 10.6299□□ | 2.4494□ | 62.4 | 68.97 |

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 7.3324 dB.
- ✓ Une bande passante faible 62.4 MHz.
- ✓ Une bonne adaptation pour un coefficient de réflexion de-11.5708 dB.
- ✓ Un rendement faible de 68.97

**Remarques**

A travers nos valeurs de simulation, nous sommes arrivés à des résultats, et nous avons déduit de ces résultats les observations suivantes :

- ➢ À mesure que le nombre d'antennes patch augmente, la directivité et l'efficacité du réseau d'antennes augmentent
- ➢ Position géométrique La position des antennes de correction est importante, et la distance entre elles affecte les résultats de la simulation

- Plus la taille du substrat est grande, plus les résultats sont imprécis et inacceptables

**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 4 Patch, et on peut voir une augmentation dans le gain (2.1094dB à 4.6440Db a 7.3324), la bande passante (40.60 MHz à 127.9 MHz a 62.4) et la directivité (5.5193 dB à 7.8433 à 10.6299).

Tableau 5 **:** Tableau comparatif

| Caractéristique | Patch simple | Réseau d'antenne à 2 patches. | Réseau d'antenne à 4 patches. |
|---|---|---|---|
| S11 (dB) | -12.6398 | -4.9526 | -11.5708 |
| VSWR (dB) | 4.32 | 4.6440 | 4.6006 |
| Gain (dB) | 2.1094 | 4.6440 | 7.3324 |
| Champ électrique (dB) | 1.9276 | 1.9615 | 2.4494 |
| Directivité (dB) | 6.6690 | 8.6144 | |
| Rendement (%) | 38.21 | 59.21 | 69.97 |
| BP(MHz) à -3dB | 40.60 | 127.9 | 62.4 |

**Tableau 1 : Tableau comparatif entre les simples et des réseaux des antenne**

**III.6Conclusion :**

Grâce aux résultats obtenus à partir d'une simulation utilisant HFSS pour chacune des antennes patch et deux réseaux d'antennes et quatre antennes à 2,4 GHz, il a été constaté que les antennes collantes (réseaux) sont meilleures par rapport à l'antenne patch simple et que plus le nombre d'antennes dans un réseau, nous avons obtenu de bons résultats en termes d'augmentation de la directivité et d'augmentation de la concentration de l'énergie émise par la matrice et c'est notre objectif principal

# Conclusion générale

# Conclusion générale

Nos travaux nous ont permis de consolider l'ensemble de nos acquis et informations découverts dans le domaine des antennes d'abord à travers l'étude portant sur les antennes imprimées d'une manière exhaustive qui comprend une description et mention des différentes techniques d'alimentation ainsi que des méthodes d'analyse pour calculer différents paramètres comme la fréquence de résonance, la bande passante, le facteur de qualité...etc. Que ces méthodes restent imprécises et cantonnées à quelques formes géométriques simples et courantes, car il n'est pas possible d'en tirer une conclusion claire et explicite pour atteindre notre objectif.

Une simulation numérique doit être réalisée sur la base du programme HFSS, qui permet d'expérimenter plusieurs formes géométriques, plusieurs propositions, et de concevoir plusieurs structures avec moins de temps et d'efforts.

A travers cette simulation nous avons étudié le comportement physique, électrique et radiatif de chacune des antennes patch en général et des réseaux d'antennes en particulier (fréquence de résonance, bande passante, diagramme…)

En fonction des paramètres représentés dans la conception (propriétés des matériaux, dimensionnement des antennes...) au final, nous avons abouti à une étude comparative d'un réseau d'antennes composé de deux antennes et d'un réseau composé de quatre antennes. En termes de directivité et de concentration d'énergie émise par celui-ci.

# *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, " Microstipt 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 Trans 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. 62

[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 », Mémoire de Master, Université de M'sila 2019.

[30] 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

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

[32]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

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

[34] La fenêtre d'An soft HFSS.