REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications
Spécialité : Systèmes des télécommunications

Etude et simulation des performances des réseaux d'antennes micro-rubans de forme rectangulaire

---

Présenté par :

M. TCHIKOU Mohamed

M. MELZI Abderrahim

Proposé et Dirigé par :

M. MIMENE Bakhti

Promotion 2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes utilisés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, ma précieuse offre de Dieu, à qui je dois ma réussite et qui n'a jamais cessé de m'encourager. Je lui exprime toute ma gratitude : mon cher père Mustapha.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère Hafida.

A mes chères sœurs et leurs maris qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme Abderrahim pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce travail à Ma Mère, Mon Père affable, honorable, aimable, qui représentent pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'ont pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, soyez sûrs que je continuerai mon chemin.

A mes sœurs, à la nouvelle génération Haitham, Aya et Anes, en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

A tous les membres de ma famille, petits et grands. A tous mes proches amis, Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon Affection.

A la seule personne que j'apprécie vraiment, qui m'a abandonné dans un temps de besoin.

A Monsieur MIMENE qui m'a guidé et m'a donné des conseils quand j'étais sur le point d'abandonner.

Enfin je dédie ce travail à mon binôme Mohamed, qui a été très compréhensif et serviable cette année, et un très bon ami toutes ces années, merci pour tout.

Abderrahim

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 Encadreur, qui a été toujours être à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration.

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

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

ملخص

كعنصر إشعاع واحد ، يتم تصنيف الهوائي المطبوع (باتش) بشكل عام على أنه هوائي منخفض إلى متوسط الربح مع أرباح تتراوح بين (5-8 ديسيبل) و النطاق الترددي في حدود ال (ميجاهيرتز) في شكله التقليدي. تتمثل إحدى الميزات الحاسمة في الهوائي المطبوع في السهولة النسبية التي يمكن من خلالها دمج هذه الهياكل و دمجها لتشكيل مجموعة من الهوائيات. يسمح استخدام التكنولوجيا المطبوعة لتطوير الهيكل بأكمله في إجراء بسيط ومنخفض التكلفة. لهذا السبب ، تحتوي معظم الأنظمة اللاسلكية الأرضية على هوائيات من هذا النوع. في عملنا هذا سوف ندرس أداء شبكات الهوائي من خلال معالجة المعلمات المختلفة مثل التردد وحجم الرقع(باتش) بإستعمال البرناج المحاكي (HFSS).

الكلمات المفتاحية : شبكة هوائيات، رقعة(باتش)، ربح، النطاق الترددي، HFSS.

Résumé

En tant qu'élément rayonnant unique, l'antenne Patch micro-ruban est généralement classée comme une antenne à gain faible à modéré avec des gains de l'ordre de 5 à 8 dBi et des bandes passantes de l'ordre des MHz dans sa forme conventionnelle. Un avantage critique du Patch micro-ruban est la relative facilité avec laquelle ces structures peuvent être intégrées ou combinées pour former un réseau d'antennes. L'utilisation de la technologie imprimée pour développer un réseau permet de fabriquer la structure entière de façon simple et peu coûteuse. Pour cette raison, la plupart des systèmes sans fil terrestres incorporent ces réseaux. Dans notre travail on va étudier les performances des réseaux d'antennes en manipulant les différents paramètres tels que la fréquence et la taille des Patches en utilisent le simulateur 'HFSS'.

Mots clés : Réseau d'antennes, Micro-ruban, Gain, Bande passante, HFSS.

Abstract

As a single radiating element, the microstrip patch antenna is generally classified as a low to moderate gain antenna with gains in the order of (5 - 8 dBi) and bandwidths in the order of MHz in its conventional form. One critical advantage of the microstrip patch is the relative ease in which these structures can be integrated or combined to form an array of antennas. Utilizing printed technology to develop an array allows for fabricating the entire structure with a simple and low cost procedure. For this reason most terrestrial wireless systems incorporate this array antennas. In our work we will study the performance of this array antenna networks by manipulating the different parameters such as the frequency and size of the Patches using HFSS Simulator.

Key words : Antennas Array, Microstrip, Gain, Bandwidth, HFSS.

Table des matières

Dédicaces I
Remerciements III
Résumé IV
Table des matières V
Liste des figures X
Liste des tableaux XIV
Liste des acronymes XV
Introduction générale
Introduction générale 1
CHAPITRE I : Principe fondamentaux des antennes
I.1 Introduction 3
I.2 Définition d'une antenne 3
I.3 Rayonnement des OEM 4
I.3.1 Sources des OEM 6
I.3.2 Paramètres d'OEM 6
I.4 Modes de fonctionnement d'une antenne 7
I.5 Densité de puissance d'une antenne 7
I.6 Zones de rayonnement 8
I.6.1 Zone de Rayleigh 8
I.6.2 Zone de Fresnel 8
I.6.3 Zone de Fraunhofer 8
I.7 Paramètres caractéristiques des antennes 9
I.7.1 Impédance d'entrée 9
I.7.2 Diagramme de rayonnement 9
I.7.2.1 Lobe principal 9
I.7.2.2 Angle d'ouverture 10
I.7.2.3 Lobes secondaires 10
I.7.2.4 Lobe arrière 10
I.7.3 Directivité 10

I.7.4 Coefficient de réflexion 11
I.7.5 Adaptation et le R.O.S 11
I.7.6 Gain 12
I.7.7 Bande passante 13
I.7.8 Polarisation 13
I.7.9 Rendement 13
I.8 Quelque types d'antennes 14
I.8.1 Antennes élémentaires 14
I.8.2 Antennes à ouverture 14
I.8.3 Antennes imprimées (Micro-Ruban) 15
I.8.4 Réseaux d'antennes 16
I.9 Différents domaines d'utilisation des antennes 16
I.9.1 Systèmes de communications 16
I.9.2 Communication mobile 17
I.9.3 Radar 17
I.10 Conclusion 17
CHAPITRE II : Généralités sur les réseaux d'antennes micro-rubans
II.1 Introduction 18
II.2 Description des antennes Micro-rubans 18
II.2.1 Définition 18
II.2.2 Structure 19
II.3 Paramètres caractéristiques des antennes micro-rubans 20
II.3.1 Elément rayonnant (Patch) 20
II.3.2 Plan de masse 20
II.3.3 Substrat diélectrique 21
II.3.3.1 Matériaux semi-conducteurs 21
II.3.3.2 Matériaux synthétiques 21
II.3.3.3 Matériaux céramiques 21
II.3.3.4 Matériaux ferromagnétiques 21
II.3.4 Dimensionnement des antennes micro-rubans rectangulaires 21
II.3.4.1 Fréquence de fonctionnement 22

II.3.4.2 Epaisseur du substrat 22
II.3.4.2 Longueur d'onde effective 22
II.3.4.3 Constant diélectrique effectif 22
II.3.4.4 Extension de longueur du Patch 23
II.3.4.5 Largeur et Longueur du Patch 23
II.4 Principe de fonctionnement 23
II.4.1 Modèle de ligne de transmission 24
II.4.2 Modèle de cavité résonante 24
II.5 Techniques d'alimentation 25
II.5.1 Alimentation par ligne microbande 26
II.5.2 Alimentation par sonde (coaxiale) 27
II.5.3 Alimentation couplée à ouverture 28
II.5.4 Alimentation couplée à proximité 29
II.6 Avantages, inconvénients et applications 30
II.6.1 Avantages 30
II.6.2 Inconvénients 30
II.6.3 Applications des antennes micro-rubans 31
II.6.3.1 Communication mobile et satellite 31
II.6.3.2 Systèmes de positionnement global 31
II.6.3.3 Interopérabilité mondiale pour l'accès aux micro-ondes (WiMax) 31
II.7 Réseaux d'antennes 32
II.7.1 Histoire 32
II.7.2 Définition 32
II.7.3 Présentation de concept 32
II.7.3 Géométries possibles pour les réseaux d'antennes 33
II.7.3.1 Réseau linéaire 33
II.7.3.2 Réseau planaire 33
II.7.4 Quelques exemples des réseaux d'antennes 34
II.8 Réseaux d'antennes micro-rubans rectangulaire 34
II.9 Techniques d'alimentation des réseaux d'antennes 35
II.9.1 Alimentation des réseaux linéaire 35

II.9.1.1 Alimentation série 35
II.9.1.2 Alimentation parallèle 36
II.9.1.3 Alimentation combinée 37
II.9.2 Alimentation des réseaux planaires 37
II.9.2.1 Alimentation série 37
II.9.2.2 Alimentation parallèle 38
II.10 Méthodes d'analyse 38
II.10.1 Méthodes approximatif 38
II.10.2 Méthodes numérique 39
II.11 Conclusion 39
CHAPITRE III : Simulation, résultats et discussion
III.1 Introduction 40
III.2 Logiciels de simulation EM 40
III.3 Présentation du logiciel de simulation HFSS 41
III.4 Cahier de charge 42
III.5 Simulation d'antenne avec le substrat FR4_EPOXY 42
III.5.1 Calcul des dimensions pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 4.4$ 42
III.5.2 Etapes de simulation de première antenne 43
III.5.3 Résultats de simulation pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 4.4$ 46
III.5.4 Cas optimal pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 4.4$ 46
III.5.5 Résultats de simulation pour h = 3.6 mm et $\varepsilon r = 4.4$ 49
III.5.6 Cas optimal pour h = 3.6 mm et $\varepsilon r = 4.4$ 49
III.6 Simulation d'antenne avec le substrat RT_DUROID 5880 52
III.6.1 Calcul des dimensions pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 2.2$ 52
III.6.2 Résultats de simulation pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 2.2$ 53
III.6.3 Cas optimal pour h = 1.5 mm et $\varepsilon r = 2.2$ 53
III.6.4 Résultats de simulation pour h = 3.6 mm et $\varepsilon r = 2.2$ 56
III.6.5 Cas optimal pour h = 3.6 mm et $\varepsilon r = 2.2$ 56
III.7 Simulation des réseaux d'antenne micro-rubans 59
III.7.1 Simulation des réseaux avec 2 Patchs 59
III.7.2 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs 60

III.7.3 Cas optimal (2 Patches) avec un espacement de 40 mm + Décalage 60
III.7.4 Simulation des réseaux avec 4 Patchs 62
III.7.5 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs 62
III.7.6 Cas optimal (4 Patchs) avec un espacement de 40 mm 63
III.7.7 Simulation des réseaux avec 6 Patchs 65
III.7.8 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs 66
III.7.9 Cas optimal (6 Patchs) avec un espacement de 40 mm 66
III.8 Discussion et interprétation des résultats 68
III.8.1 Choix des paramètres et matériaux 68
III.8.2 Choix de l'antenne optimal d'un seul Patch 68
III.8.3 Performance des réseaux d'antennes 69
III.9 Conclusion 69
Conclusion générale
Conclusion générale 70

Liste des figures

CHAPITRE I : Principes fondamentaux des antennes

Figure I.1 : Champ électromagnétique d'une onde plane polarisée rectilignement 4
Figure I.2 : Source, ligne de transmission, antenne et création de champ électrique 5
Figure I.3 : Schéma bloc d'un système de transmission par antenne 7
Figure I.4 : La densité de puissance dans les différentes zones de rayonnement 8
Figure I.5 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive 10
Figure I.6 : Circuit équivalent d'une antenne adaptée en émission 12
Figure I.7 : Différents types de polarisation 13
Figure I.8 : Corne pyramidale 14
Figure I.9 : Corne conique 14
Figure I.10 : Guide d'onde rectangulaire 15
Figure I.11 : Antenne Patch circulaire 15
Figure I.12 : Réseaux d'antennes Patches rectangulaires 16

CHAPITRE II : Généralités sur les réseaux d'antennes micro-rubans

Figure II.1 : Structure d'une antenne imprimée 19
Figure II.2 : Formes représentatives des éléments de Patch micro-ruban 20
Figure II.3 : Plan de masse 20
Figure II.4 : Géométrie du constant diélectrique efficace 22
Figure II.5 : Géométrie de Patch rectangulaire 23
Figure II.6 : Ligne micro-ruban et ses lignes de champ électrique 24
Figure II.7 : Distribution de charge et création de densité de courant sur cavité résonante 24
Figure II.8 : Techniques d'alimentation 25
Figure II.9 : Alimentation par ligne microbande 26
Figure II.10 : Différents types d'alimentation par ligne microbande 26
Figure II.11 : Alimentation par sonde coaxiale 27
Figure II.12 : Forme de Connecteur coaxial 27
Figure II.13 : Alimentation couplée à ouverture 28
Figure II.14 : Alimentation couplée à proximité 29
Figure II.15 : Géométrie d'un réseau linéaire à espacement régulier 33

Figure II.16 : Géométrie d'un réseau planaire uniforme 33
Figure II.17 : Configurations typiques de réseaux de fils, d'ouvertures et de microbande 34
Figure II.18 : Réseau de 8 éléments alimenté en série..... 35
Figure II.19 : Réseau de 8 éléments alimenté en parallèle 36
Figure II.20 : Réseau planaire d'antennes alimenté en série 37
Figure II.21 : Réseau planaire d'antennes alimenté en parallèle 38

CHAPITRE III : Simulation, résultats et discussion

Figure III.1 : Logos des logiciels les plus utilisés 40
Figure III.2 : Fenêtre des paramètres de plan de masse 43
Figure III.3 : Fenêtre des paramètres de substrat 43
Figure III.4 : Fenêtre des paramètres de Patch 43
Figure III.5 : Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande 44
Figure III.6 : Fenêtre des paramètres de point d'excitation..... 44
Figure III.7 : Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement 44
Figure III.8 : Représentation de première antenne avec f = 2 GHz et h = 1.5 mm..... 45
Figure III.9 : Conception d'antenne pour f = 4 GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$ 46
Figure III.10 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance 47
Figure III.11 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance..... 47
Figure III.12 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique 47
Figure III.13 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ 48
Figure III.14 : Directivité totale 48
Figure III.15 : Conception d'antenne pour f = 3 GHz, h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$ 49
Figure III.16 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance 50
Figure III.17 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance 50
Figure III.18 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique 50
Figure III.19 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ 51
Figure III.20 : Directivité totale 51
Figure III.21 : Influence de la fréquence sur les dimensions d'antennes 52
Figure III.22 : Conception d'antenne pour f = 5 GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$ 53
Figure III.23 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance 54
Figure III.24 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance..... 54

Figure III.25 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique 54
Figure III.26 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ 55
Figure III.27 : Directivité totale 55
Figure III.28 : Conception d'antenne pour f = 3.5 GHz, h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$ 56
Figure III.29 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance 57
Figure III.30 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance..... 57
Figure III.31 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique 57
Figure III.32 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ 58
Figure III.33 : Directivité totale 58
Figure III.34 : Conception des réseaux avec les différents espacements (2 Patches) 59
Figure III.35 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance 60
Figure III.36 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance 60
Figure III.37 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain 61
Figure III.38 : Influence d'espacement des patches sur les diagrammes de rayonnement 61
Figure III.39 : Conception des réseaux avec les différents espacements (4 Patches) 62
Figure III.40 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance..... 63
Figure III.41 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance..... 63
Figure III.42 : Directivité totale (4 Patches) 63
Figure III.43 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain 64
Figure III.44 : Influence d'espacement des Patches sur les diagrammes de rayonnement 64
Figure III.45 : Conception des réseaux avec les différents espacements (6 Patches) 65
Figure III.46 : Coefficient de réflexion S_{11}en fonction de la fréquence de résonance..... 66
Figure III.47 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance..... 66
Figure III.48 : Directivité totale (6 Patches) 67
Figure III.49 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain 67
Figure III.50 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ 67

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Largeur et Longueur du patch et ligne d'alimentation par rapport à la fréquence 42

Tableau III.2 : Résultats obtenus pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$ 46

Tableau III.3 : Résultats obtenus pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$ 49

Tableau III.4 : Largeur et Longueur du patch et ligne d'alimentation par rapport à la fréquence 52

Tableau III.5 : Résultats obtenus pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$ 53

Tableau III.6 : Résultats obtenus pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$ 56

Tableau III.7 : Résultats obtenus pour les cas optimaux de chaque substrat 59

Tableau III.8 : Influence de la position des patches sur les performances des réseaux (2 Patches) 60

Tableau III.9 : Influence de la position des patches sur les performances des réseaux (4 Patches) 62

Tableau III.10 : Influence de la position des patches sur les performances des réseaux (6 Patches) 66

Tableau III.11 : Comparaison des performances entre les cas optimaux étudié 69

Liste des acronymes

OEM : Onde Electromagnétique.

ROS : Rapport d'Onde Stationnaire.

DBI : Décibel Isotrope

BP : Bande Passante

2G et 3G : Deuxième Génération et Troisième Génération.

RADAR : Radio Detection And Ranging.

VHF : Very High Frequency.

RF : Radio Frequency.

GPS : Global Positioning System

WIMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access.

FDTD : Finite Difference Time Domain.

FEM : Finite Element Method.

MOM : Method Of Moments.

SDA : Spectral Domain Analysis.

HFSS : High Frequency Structure Simulation.

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

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio.

ISM : Industriel, Scientifique et Médicale.

Introduction Générale

Introduction générale

Les systèmes de communications ont provoqué de nombreux changements fondamentaux à l'échelle mondiale. Ainsi ces systèmes nous permettent de la communication libre et l'accès universel aux réseaux d'information, tout cela est rendu possible par les progrès de l'électronique et les techniques de traitement d'informations. Cependant il ne faut pas négliger l'importance des ondes électromagnétique qui sont la liaison entes ces systèmes, stations de base et autres infrastructures, ils sont très importants pour le fonctionnement de ces systèmes, on peut les considéré comme une interface entre les moyens de traitement de l'information et les transducteurs, c'est-à-dire les antennes. Ces antennes en réalité, déterminent les paramètres essentiels et caractéristiques critique des communications, tel que la puissance émise, la directivité de rayonnement ou bien sa portée et les dimensions des équipements. [1]

Les antennes sont des dispositifs qui assurent l'émission et la réception des ondes électromagnétiques. Il existe de nombreux types d'antennes. Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale. Les techniques de conception et de réalisation d'antennes se sont affinées au fur et à mesure que le domaine de l'électromagnétisme s'est développé. C'est un domaine relativement récent, puisque c'est en s'appuyant sur les équations de Maxwell que tous les développements théoriques et techniques ont pu progresser. Les avancées dans ce domaine ont été rapides car touchant aux transmissions radioélectriques dont le nombre d'applications est considérable. [1]

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de caractériser des réseaux d'antennes micro-rubans. La caractérisation de ces antennes se poursuit également par la détermination de ses paramètres hyperfréquences (fréquence de résonance, bande passante, diagramme de rayonnement et gain) à l'aide d'un logiciel de simulation électromagnétique HFSS (High frequency structure simulator). Pour atteindre cet objectif, le présent travail est scindé en trois chapitres.

Chapitre I : Dans ce chapitre on répond à la question c'est quoi une antenne, puis on présentera la théorie liée aux antennes qui servira de base à leur conception. Après On tentera de classer les antennes par rapport à leur principe de fonctionnement et par rapport à leur rôle dans les systèmes de communication. Enfin on terminera par les domaines d'utilisation de ces antennes.

Chapitre II : Dans ce chapitre on présente en premier lieu la description des antennes imprimées et leurs paramètres caractéristiques. On cite aussi les types des substrats, leurs avantages et limitations, ensuite on se penche sur les différentes dimensions et autres paramètres de calcul de ces antennes, après cela on détermine les modes de fonctionnement et les types d'alimentation ainsi que les avantages et inconvénients des antennes imprimées. Pour la deuxième partie du chapitre on détermine les réseaux d'antennes micro-rubans. On commence par leur définition, principe de fonctionnement et géométries possibles et on termine par les types d'alimentation.

Chapitre III : Dans ce chapitre on va développer la phase de conception en présentant un bref récapitulatif sur le logiciel de simulation **« HFSS »,** Après cela on cherche une antenne micro-ruban rectangulaire optimale d'un seul 'Patch' en changeant les différents paramètres tels que la fréquence, l'épaisseur et la permittivité de substrat diélectrique. Ainsi que la largeur et longueur de Patch, la largeur de la ligne d'alimentation microbande et le point d'excitation. Ensuite on va utiliser cette antenne optimale pour créer un ensemble de réseaux d'antennes de 2,4 et 6 'Patchs'. On finira par exposer les résultats des simulations de ces réseaux et par une discussion sur leurs performances.

Chapitre I

Principes fondamentaux des antennes

I.1 Introduction

Les premières antennes sont apparues à la fin du 19 e siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme et plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communicants... [1]

Actuellement, la course à l'innovation concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes. Dans ce chapitre on répond à la question c'est quoi une antenne, puis on présentera la théorie liée aux antennes qui servira de base à leur conception. Après on tentera de classer les antennes par rapport à leur principe de fonctionnement et par rapport à leur rôle dans les systèmes. Enfin on terminera par les domaines d'utilisation de ces antennes.

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un appareil utilisé pour transférer des ondes électromagnétiques guidées (signaux) vers des ondes rayonnantes dans un milieu non borné, généralement un espace libre, et vice versa (c'est-à-dire en mode de fonctionnement d'émission ou de réception). Les antennes sont des appareils dépendant de la fréquence. Chaque antenne est conçue pour une certaine bande de fréquences. Au-delà de la bande de fonctionnement, l'antenne rejette le signal. Par conséquent, on peut considérer l'antenne comme un filtre passe-bande et un transducteur. [2]

Une définition traditionnelle est la suivante : « Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur » [3]

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. [3]

I.3 Rayonnement des OEM

Toute charge et tout mouvement de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et devraient être capables de produire un rayonnement EM (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace). Cependant, dans la nature, quasiment tous les objets ne rayonnent pas. En effet, la plupart des objets contiennent des charges positives et négatives en équilibre, si bien que les champs électriques que chacune de ces charges génèrent s'annulent. Lorsqu'un courant circule le long d'une interconnexion, les charges véhiculées ne s'accumulent pas au bout de l'interconnexion, mais reviennent par un autre chemin, formant ainsi une boucle. Ainsi, le champ magnétique créé par chaque élément de cette boucle s'additionne avec la contribution des autres et annulent quasiment le champ magnétique total. [3]

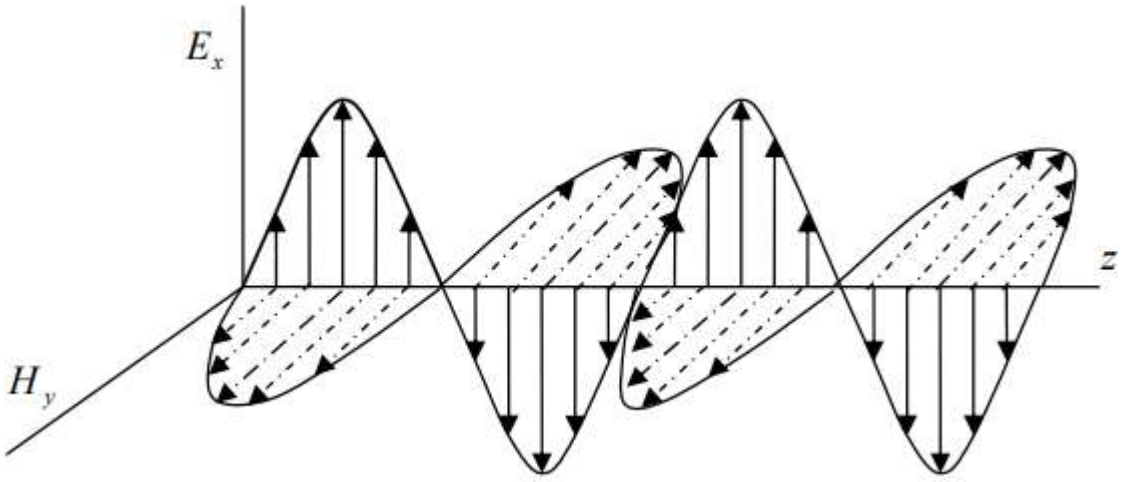


Figure I.1 : Champ électromagnétique d'une onde plane polarisée rectilignement.

Alors comment une antenne fait-elle pour rayonner ? Intuitivement, on sent qu'il faut qu'il y ait un déséquilibre dans la distribution des charges et les courants parcourant l'antenne, par exemple produit par toute variation temporelle du courant ou toute discontinuité dans l'antenne conduisant à une accumulation de charges. Ceci pour empêcher l'annulation de la contribution de chaque charge et de chaque élément de courant de l'antenne, permettant la création d'un rayonnement électromagnétique pendant un temps très bref. Si maintenant un courant variable se met à parcourir la boucle, un rayonnement électromagnétique sera produit continuellement. On peut donc voir le rayonnement électromagnétique comme la résultante des différences de phase des contributions de chaque élément de l'antenne. [3]

Plus simplement, Le rayonnement d'une antenne peut être expliqué comme suit : soit un système qui présente une source de tension connecté à une ligne de transmission à deux conducteurs. Quand une tension sinusoïdale est appliquée à travers la ligne de transmission, un champ électrique est créé et a une forme sinusoïdale dans la nature. Il en résulte la création de lignes de force électrique qui sont tangentielles du champ électrique. Les électrons libres sur les conducteurs sont déplacées par les lignes électriques de force et le mouvement de ces charges provoque la circulation du courant qui à son tour conduit à la création d'un champ magnétique. [1]

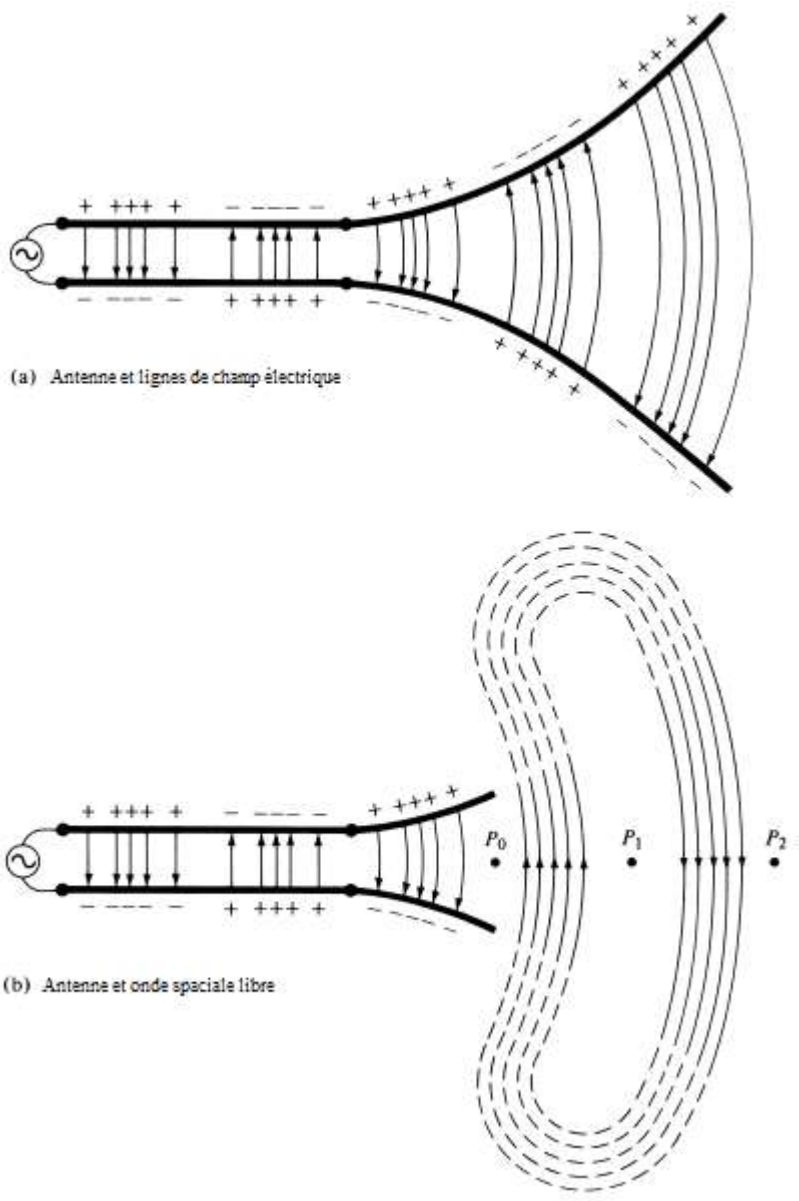


Figure I.2 : Source, ligne de transmission, antenne et création de champ électrique.

I.3.1 Sources des OEM

Les ondes électromagnétiques sont émises par deux types de source à savoir : les sources naturelles et les sources artificielles.

Les premières sont produites de façon naturelle dans l'environnement, par l'activité solaire (émission de la lumière) et atmosphérique (présence de charges électriques dans les nuages) et aussi les cellules vivantes (le cœur et le cerveau).

Les secondes sont produites par l'ensemble des appareilles électriques qui génèrent des ondes électromagnétiques, (antenne de téléphone mobile, radio, émission TV, les appareilles électroménagers et les dispositifs médicaux comme la radiologie). Les ondes émises par ces sources sont classées selon leur gamme de fréquences. [3]

I.3.2 Paramètre d'OEM

Les OEM sont caractérisées par certains paramètres liées entres eux. Il s'agit de :

- **Longueur d'onde λ :** c'est la distance parcourue par l'onde au cours d'une période mesurée en mètre (m) et si on appelle « c » la célérité de l'onde et T sa période on a :

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \tag{I.1}$$

- **Fréquence f :** est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de mesure de temps. L'unité de mesure de fréquence dans le système international est l'hertz (Hz).
- **Puissance surfacique de rayonnement Ps :** qui est les flux énergétique reçu par unité de surface s'exprime en (watt /m²) elle est donnée par la relation :

$$P_s = \frac{P}{S_l} \tag{I.2}$$

- **Polarisation de l'OEM :** c'est l'orientation du champ électrique E par rapport à l'horizontal, si E est parallèle à l'horizontale on dit que l'onde a une polarisation horizontale si le champ E est perpendiculaire alors la polarisation est verticale. Si la direction de E reste constante on dit que la polarisation est rectiligne. [3]

I.4 Modes de fonctionnement d'une antenne

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif passif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur. De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce cas, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée.

Cependant, il est nécessaire de supprimer toute distinction entre antenne émettrice et antenne réceptrice, en introduisant le principe de réciprocité : toute structure qui reçoit une onde électromagnétique peut transmettre une onde électromagnétique. Une antenne passive peut réciproquement être utilisée en émission et en réception. Les propriétés de l'antenne resteront les mêmes qu'elle soit utilisée en émission ou en réception. [3]

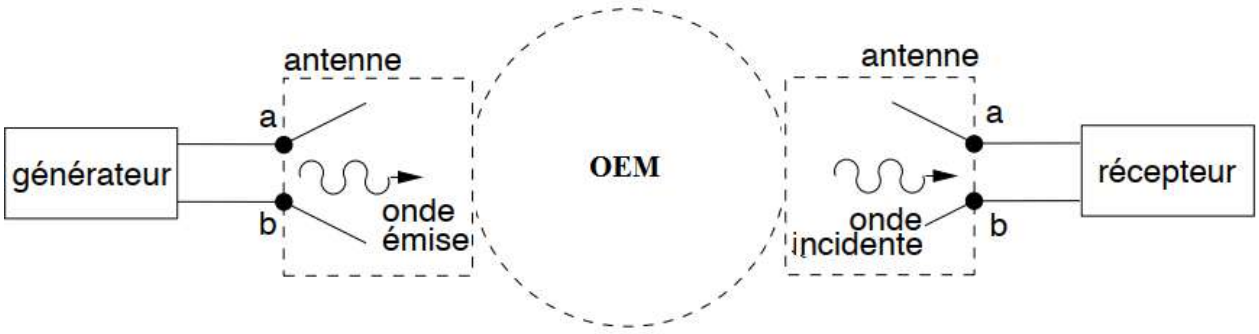


Figure I.3 : Schéma bloc d'un système de transmission par antenne.

I.5 Densité de puissance d'une antenne

Considérons une source de rayonnement électromagnétique, alimentée par une puissance Pa, rayonnant une onde électromagnétique traversant un élément de surface dS, On définit la densité de puissance par unité de surface au point M, distant de r par apport à la source, par la relation suivante [4] :

$$P(r,\theta,\varphi) = \frac{P_a}{4\pi.r^2}\ (Watt/m^2) \qquad (I.3)$$

I.6 Zones de rayonnement

I.6.1 Zone de Rayleigh

Les termes inductifs et électrostatiques sont prépondérants au voisinage immédiat de l'antenne. Il y a une accumulation d'énergies électrique et magnétique. Les champs varient peu en fonction de la distance mais ils sont très complexes à analyser. [5]

I.6.2 Zone de Fresnel

Elle se situe entre les deux extrêmes. Ici les champs varient avec de fortes oscillations. Dans cette zone la densité de puissance est fluctuante, alors ils sont aussi complexes à analyser. [5]

I.6.3 Zone de Fraunhofer

Loin de l'antenne, les champs électrique et magnétique sont orthogonaux entre eux, et orthogonaux à la direction de propagation. Le front d'onde est plan et la décroissance des champs selon la distance est $\frac{1}{r}$: c'est l'onde plane. Toutes les caractéristiques de l'antenne se calculent dans la zone de champs lointains, ces caractéristiques sont indépendantes de r dans cette zone. [5]

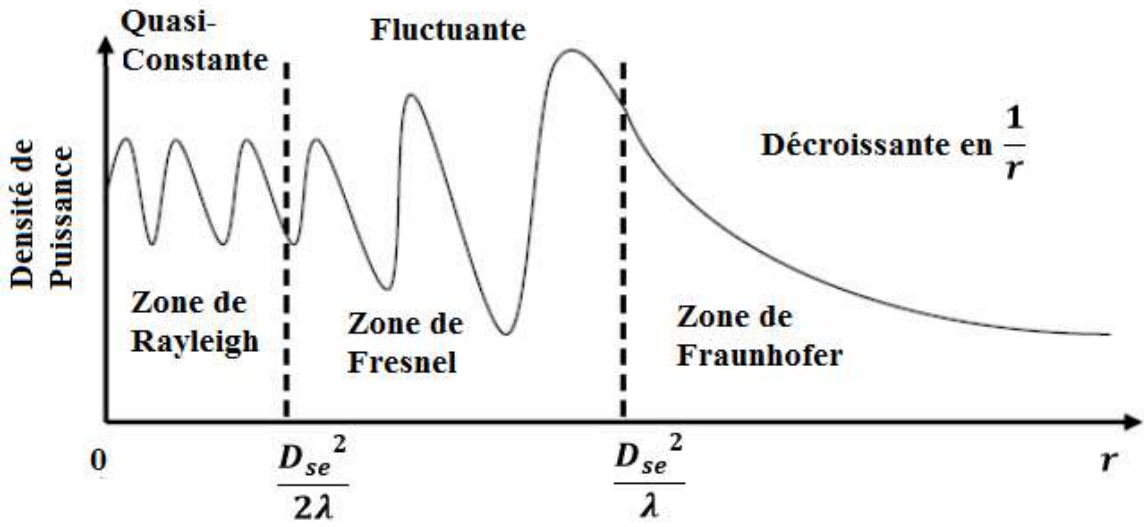


Figure I.4 : Densité de puissance dans les différentes zones de rayonnement.

Avec : D_{se} est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne et r la distance à l'antenne.

I.7 Paramètres caractéristiques des antennes

Un grand nombre de paramètres permettent de classifier les antennes telles que l'impédance d'entrée, la directivité, le diagramme de rayonnement, la bande passante et la polarisation, etc... Ces derniers sont valables et applicable seulement dans la zone de Fraunhofer, et les performances d'une antenne peuvent être évaluées à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous :

I.7.1 Impédance d'entrée

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{in} et une tension V_{in}. Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{in} ou mieux encore, Z_a. Comme toute impédance, celle de l'antenne comprend une partie réelle R_a (active) qui est reliée aux champs (puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules. Une partie imaginaire X_a (réactive) qui représente la puissance stockée dans les régions proches du champ rayonné. [5]

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \tag{I.4}$$

I.7.2 Diagramme de rayonnement

C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné. En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont le plan E (plan vertical) et le plan H (plan horizontal), ce sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace, certaine directions sont privilégiées, ce sont les lobes de rayonnement. Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certain directions et moins de puissance dans d'autres directions. [6] On détaille les paramètres de diagramme de rayonnement ci-dessous.

I.7.2.1 Lobe principal

C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement, en trouve le lobe principal généralement dans les antennes directive, pour les antennes omnidirectionnelle le rayonnement est dans tous les côtés.

I.7.2.2 Angle d'ouverture

C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.

I.7.2.3 Lobes secondaires

Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables de l'espace.

I.7.2.4 Lobe arrière

C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal. [6]

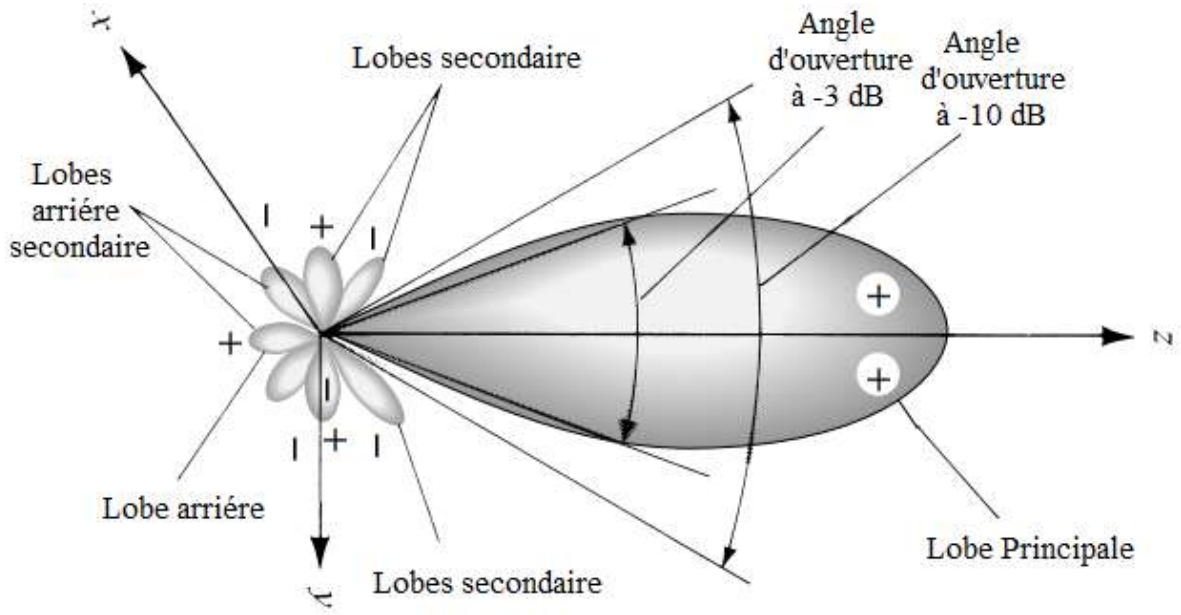


Figure I.5 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

I.7.3 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [7] :

$$D(\theta,\varphi) = \frac{P(\theta,\varphi)}{P(\theta,\varphi)iso} \qquad (I.5)$$

Une antenne qui a un lobe principal étroit à une meilleure directivité par rapport à celui qui a un lobe principal large, donc elle est plus directive.

I.7.4 Coefficient de réflexion

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchie et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. Pour une antenne d'impédance Z_{in} reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_s, le coefficient de réflexion peut être défini comme suit [2] :

$$S_{11} = \frac{Zin - Zs}{Zin + Zs} \tag{I.6}$$

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}|(dB) = 20\log|S_{11}| \tag{I.7}$$

Le coefficient de réflexion permet de connaitre la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module en (dB) tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal. [2]

I.7.5 Adaptation et le R.O.S

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximal de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas s'il n'y a pas une adaptation entre l'entrée de l'antenne et l'émetteur «Figure I-6». La puissance peut être transférée si l'impédance de l'émetteur est le complexe conjugué de l'impédance de l'antenne [8] :

$$Z_{in} = Z_G^{*} \tag{I.8}$$

Avec l'impédance de sortie de l'émetteur :

$$Z_G = R_G + jX_G \tag{I.9}$$

R_G : La partie active est reliée aux champs rayonnés et a puissance perdue par effet de joules.

X_G : La partie réactive (réactance) de l'antenne.

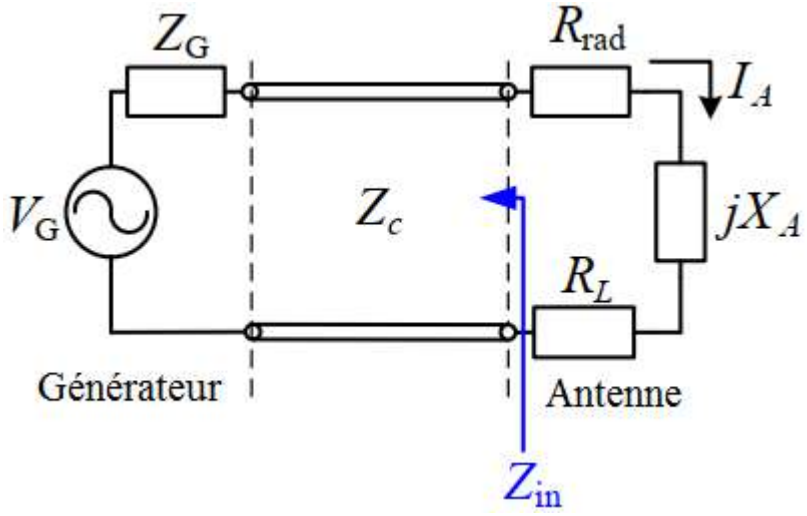


Figure I.6 : Circuit équivalent d'une antenne adapté en émission.

Avec R_L: Résistance aux pertes et R_{rad} : Résistance de rayonnement.

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchie, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisée par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires (ROS). Le ROS est donné par [9] :

$$ROS = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (I.10)$$

Le ROS minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de 50 Ω à 75 Ω.

I.7.6 Gain

Le gain d'une antenne dans une direction donnée est la quantité descriptive de la performance de l'antenne, c'est la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée. Pour avoir un gain important, l'antenne doit avoir un diagramme de rayonnement directif, le rapport de gain est donné par [10] :

$$Gain = \frac{P(\theta,\varphi)}{P(\theta,\varphi)_{iso}} \quad (I.11)$$

I.7.7 Bande passante

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir des OEM dans l'espace libre. Les valeurs de limite sur les critères de fonctionnement de l'antenne définissent un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance. La bande passante normalisée est donnée par [11] :

$$BP = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \times 100\ (\%) \qquad (I.12)$$

I.7.8 Polarisation

La polarisation peut être classée comme linéaire, circulaire ou elliptique. Si le vecteur qui décrit le champ électrique en un point de l'espace en fonction du temps est toujours dirigé le long d'une ligne, le champ est dit polarisé linéairement. En général, cependant, la figure que le champ électrique trace est une ellipse, et le champ serait polarisé elliptiquement. Les polarisations linéaires et circulaires sont des cas particuliers de l'elliptique. [12]

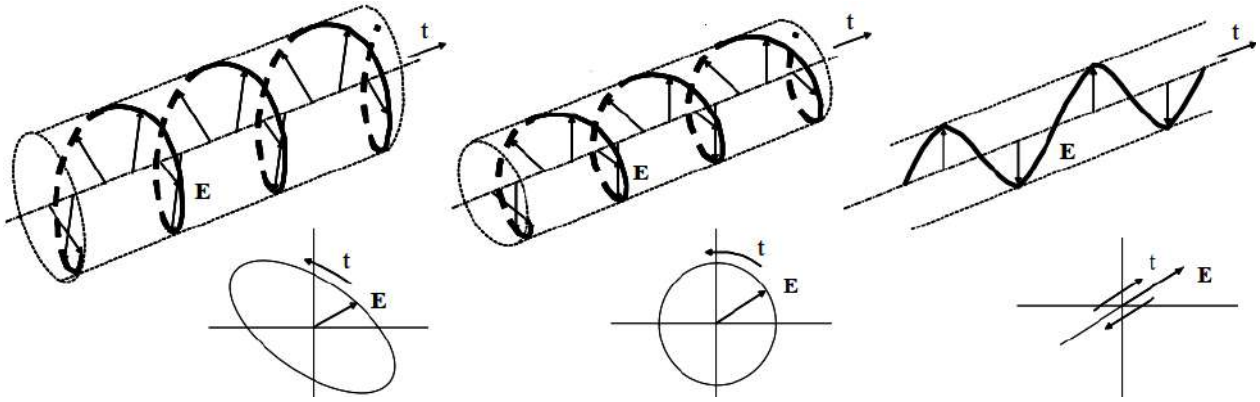


Figure I.7 : Différents types de polarisation.

I.7.9 Rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle qui lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [7] :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \qquad (I.13)$$

I.8 Quelque types d'antennes

Il existe de nombreux types d'antennes différents. L'antenne à source ponctuelle isotrope, l'une des antennes théoriques de base, est utile car elle peut être considérée comme une référence à d'autres antennes. Elle rayonne également dans toutes les directions dans l'espace libre. Physiquement, une telle source ne peut exister. La plupart des gains des antennes sont mesurés par rapport à une antenne isotrope et sont évalués en décibels isotrope (dBi). [2]

I.8.1 Antennes élémentaires

Ce genre d'antenne ne permettent qu'une polarisation linéaire dans cette catégorie, on peut citer : antennes isotrope, antennes dipolaires ou doublet demi-onde qui est constitué d'un élément conducteur de longueur égale à la demi longueur d'onde, et antennes monopoles constitué d'un élément conducteur de longueur égale au quart de la longueur d'onde.

Les antennes élémentaires sont donc des éléments petits devant la longueur d'onde au point où on les considère pratiquement ponctuelles. De plus, la distribution de courant sur l'élément est uniforme partout. [5]

I.8.2 Antennes à ouverture

Les antennes à ouverture sont familières maintenant que dans le passé en raison de la demande croissante de formes d'antennes plus sophistiquées et de l'utilisation de fréquences plus élevées. Les antennes de ce type sont très utiles pour les applications d'aéronefs, car elles peuvent être encastrées de manière très pratique sur la peau de l'aéronef. De plus, ils peuvent être recouverts d'un matériau diélectrique pour les protéger des conditions dangereuses de l'environnement. [12]

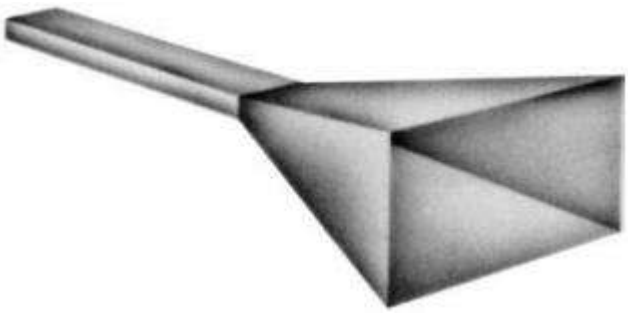


Figure I.8 : Corne pyramidale.



Figure I.9 : Corne conique.

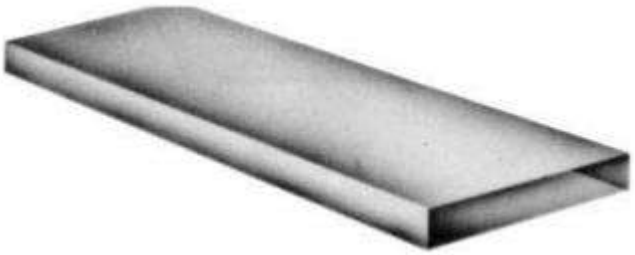


Figure I.10 : Guide d'onde rectangulaire.

I.8.3 Antennes imprimées (Micro-Ruban)

Ces antennes sont constituées d'un Patch métallique sur un substrat mis à la terre. Le Patch peut prendre de nombreuses configurations différentes. Cependant, les Patches rectangulaires et circulaires, sont les plus populaires en raison de la facilité d'analyse et de fabrication, et de leurs caractéristiques de rayonnement attrayantes, en particulier le rayonnement à faible polarisation croisée.

Ces antennes peuvent être montées à la surface d'avions, d'engins spatiaux, de satellites, de missiles, de voitures et même de téléphones portables de haute performance. Les antennes micro-rubans sont à profil bas, conformes aux surfaces planes et non planes, simples et peu coûteuses à fabriquer en utilisant la technologie moderne des circuits imprimés, mécaniquement robuste lorsqu'il est monté sur des surfaces rigides, et très polyvalent en termes de fréquence de résonance, de polarisation, de motif et d'impédance. [12]

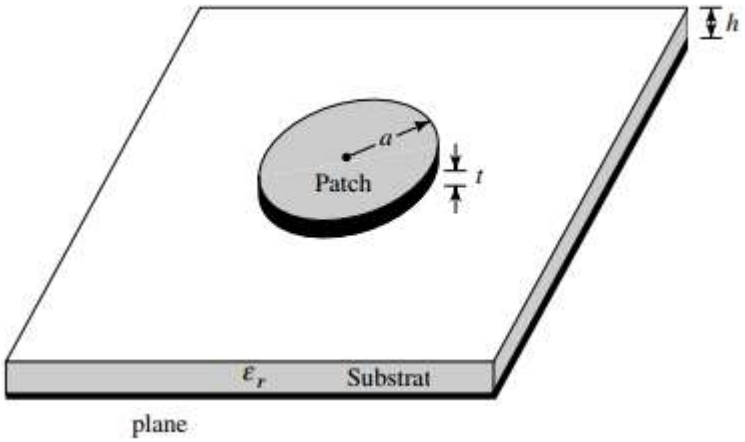


Figure I.11 : Antenne Patch circulaire.

I.8.4 Réseaux d'antennes

C'est un ensemble d'antennes élémentaires à une ou deux dimensions, augmentant ainsi le gain et la directivité. Alimenté de façon synchrone (le déphasage du courant entre deux paires d'antenne est fixe) [1]. Dans cette famille nous énumérons : les antennes Yagi-Uda utilisées pour la réception de la télévision analogique ou numérique terrestre, les antennes rideau (collinaires), les antennes cierges (constitué de plusieurs dipôles demi-onde alimenté de façon à rayonner en phase) et les antennes hybrides. [12]

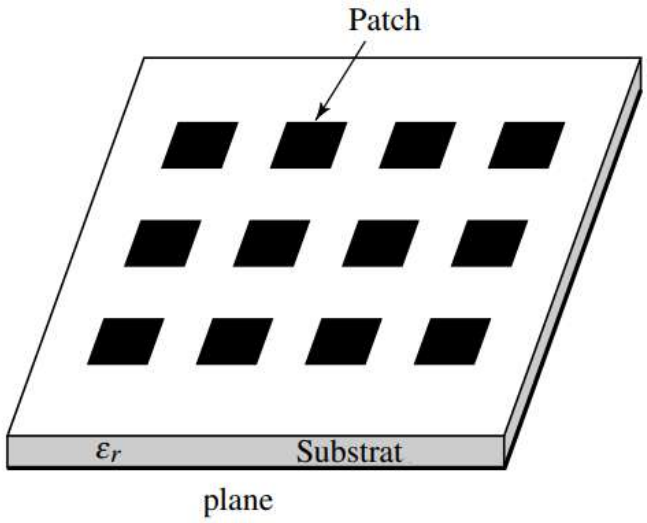


Figure I.12 : Réseaux d'antennes Patches rectangulaires.

I.9 Différents domaines d'utilisation des antennes

I.9.1 Systèmes de communications

Les communications représentent un domaine très vaste dans lequel les systèmes utilisent des antennes de formes variées. Au cours des années, avec les progrès de l'électronique, les fréquences ont eu tendance à augmenter, d'une part, en raison de l'encombrement du spectre et, d'autre part, en raison des demandes de transmission de débits élevés. Au début des télécommunications, il paraissait extraordinaire de transmettre de la voix. On est ensuite passé à la transmission des données. Grâce au développement des technologies sans fil on assiste à la transmission à haut débit sur internet. [1]

I.9.2 Communication mobile

Les fréquences d'exploitation des communications mobiles 2G et 3G se situent dans les bandes de fréquences 820–960 MHz et 1710–2170 MHz. Dans ces gammes de fréquences micro-ondes, la taille de l'antenne est un problème pour les antennes de station de base et les antennes de combiné. En général, nous préférons les antennes de station de base qui ont un profil bas et une structure profilée. Sinon, notre milieu de vie serait encombré par le grand nombre d'antennes pour différents systèmes et opérateurs. La conception d'antennes de station de base est plus difficile et intéressante que la conception d'antennes de combiné, car des exigences plus strictes sont imposées sur les performances des différentes antennes de station de base pour la couverture intérieure et extérieure. [2]

I.9.3 Radar

Le RADAR est une technique de détection et de mesure de positions d'objets réfléchissant les ondes électromagnétiques. Les caractéristiques d'antennes radar sont étroitement liées aux capacités de couverture, c'est-à-dire la capacité à voir « loin », et de résolution du radar, c'est-à dire la capacité à discerner deux cibles proches. En vertu de la loi liant l'ouverture rayonnante et la largeur du faisceau, il est assez facile d'imaginer que l'antenne doit afficher une grande surface de rayonnement ou de captation si l'on désire un grand pouvoir de résolution. Pour une application donnée, le choix de la fréquence radar se fera donc en fonction de la taille et de la largeur de faisceau d'antenne possible mais aussi en fonction du bruit environnant. [1]

I.10 Conclusion

La maitrise de la théorie des antennes est plus que nécessaire, elle permet de comprendre leur comportement à différentes gammes de fréquences. Car pour toute application, il faut choisir des caractéristiques bien conformes au standard spécifié.

Dans ce chapitre on a dressé des généralités sur les antennes : l'historique des antennes, la définition d'une antenne. Puis on a présenté les différents modes de fonctionnement et les paramètres caractéristiques des antennes, ensuite on a donné un bref aperçu sur quelques types d'antennes. Après ce passage, on présente l'antenne imprimé et les réseaux d'antennes qu'on détaillera dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Généralités sur les réseaux d'antenne micro-rubans

II.1 Introduction

Les communications hertziennes, les télécommunications spatiales et les radars utilisent le plus souvent des antennes à réflecteur. Ce sont des dispositifs performants qui possèdent un bon rendement, une grande pureté de polarisation et une large bande de fréquences. Dans le cas des applications mobiles, leur poids et leur encombrement deviennent deux inconvénients majeurs. Bien avant d'être appliquée aux antennes micro-rubans, dans les années soixante, la technologie dite de circuit imprimée avait été largement mise à contribution notamment dans le domaine de l'électronique. [1]

L'idée de l'antenne micro-ruban remonte aux années 1950. L'apparition de premières réalisations ne se fera qu'en 1970. Cependant, l'attention particulière qui leur est portée de nos jours, est liée directement à la popularité croissante des réseaux d'antennes. Cette dernière découle du fait que les circuits numériques permettent une souplesse extraordinaire avec plusieurs degrés de liberté. Ces circuits numériques deviennent de plus en plus puissants, de moins en moins volumineux et surtout, à des coûts acceptables qui ne cessent de diminuer. [5]

Dans ce chapitre on présente en premier lieu la description des antennes imprimées et leurs paramètres caractéristiques. On cite aussi les types de substrat, leurs avantages et limitations, ensuite on se penche sur les différents dimensions et paramètres de calcul de ces antennes, après cela on détermine les modes de fonctionnement et les types d'alimentation, ainsi que les avantages et inconvénients des antennes imprimés. Pour la deuxième partie de chapitre on détermine les réseaux d'antennes : définition, principe de fonctionnement et géométries possible et on termine par leurs types d'alimentation.

II.2 Description des antennes micro-rubans

II.2.1 Définition

Les antennes imprimées ou microbande ou bien micro-rubans, ou « Patch » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. à part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes Patch sont utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes VHF. [3]

II.2.2 Structure

Dans sa version la plus simple, l'antenne micro-ruban, ou antenne imprimée, représentée dans « figure II.1 », est constituée d'une plaque de substrat entièrement métallisée d'un côté tandis qu'un film métallique de forme variable et de dimensions ajustées est déposé sur son autre face. Ce dernier constitue l'élément rayonnant dont les dimensions et les caractéristiques du substrat sur lequel il est déposé fixant, entre autres, la fréquence de résonance. Le plan de masse métallique est suffisamment grand par rapport à l'élément rayonnant de façon à limiter les effets d'ondes de surface qui rayonnent sur les extrémités de la plaque. [1]

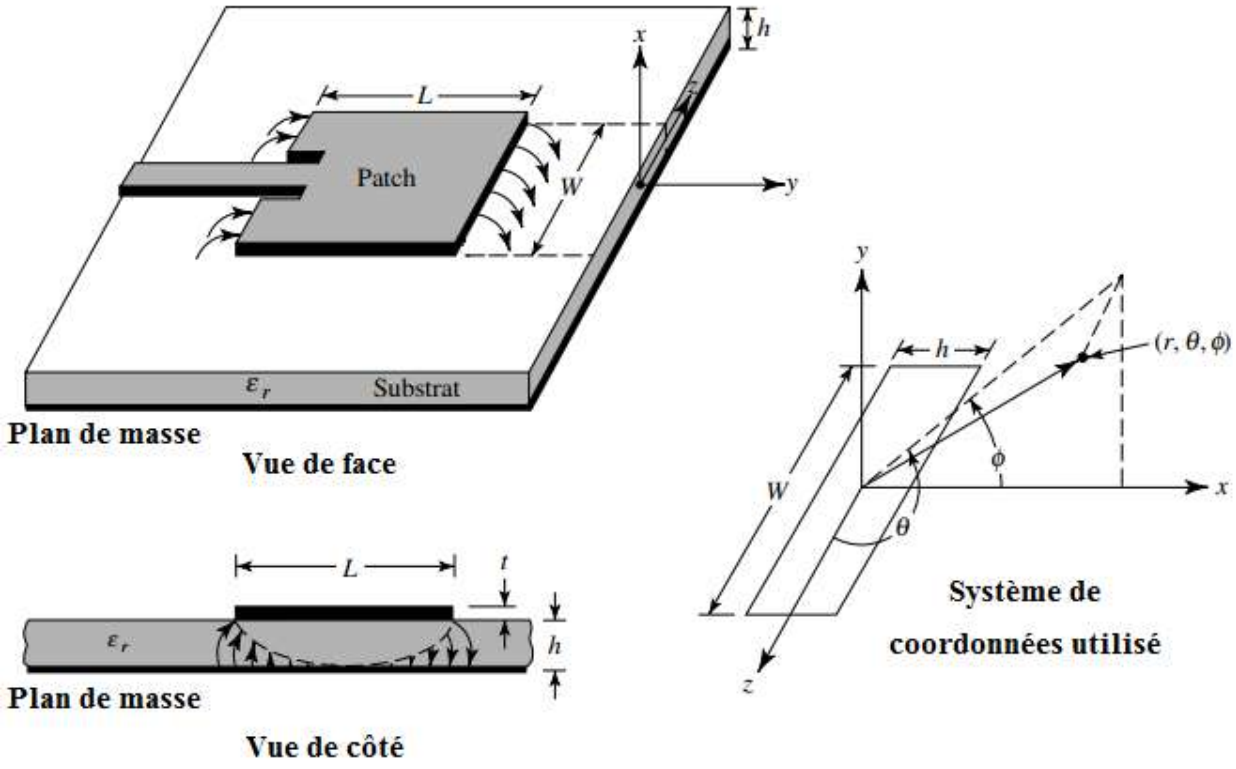


Figure II.1 : Structure d'une antenne imprimée.

Les dimensions du Patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à quatre fois la longueur d'onde. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde [3]

II.3 Paramètres caractéristiques des antennes micro-rubans

II.3.1 Elément rayonnant (Patch)

L'élément rayonnant 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. Il est constitué d'une partie conductrice qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées, chaque forme influe les performances des antennes tant que le disque a une meilleur bande passante (8%) par rapport au forme rectangulaire mais le Patch rectangulaire est plus facile à adaptée. [12]

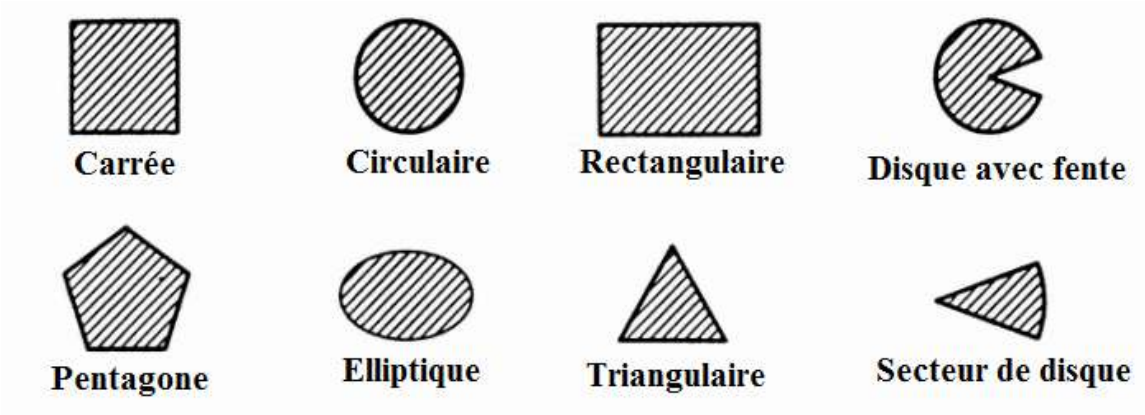


Figure II.2 : Formes représentatives des éléments de Patch micro-ruban.

II.3.2 Plan de masse

C'est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure. [13]

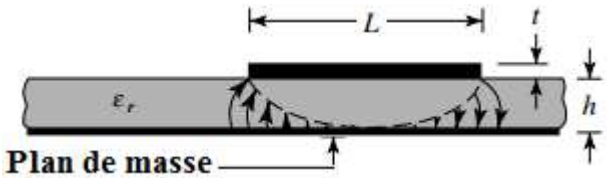


Figure II.3 : Plan de masse.

II.3.3 Substrat diélectrique

Il existe différents matériaux de substrat pour la conception d'une antenne Patch micro-ruban. Un matériau diélectrique est un isolant électrique qui peut être contrasté en appliquant des champs électriques. La sélection d'un matériau de substrat approprié est un effort important dans la conception d'une antenne Patch. Les matériaux du substrat ont deux propriétés de base telles que la constante diélectrique et la tangente de perte. En général, pour l'antenne micro-ruban, l'augmentation de la tangente de perte altère les performances de cette antenne. Lorsque la perte tangente augmente, le gain diminue et la bande passante augmente. La taille du substrat détermine les performances de l'antenne. [14] On cite quelques types :

II.3.3.1 Matériaux semi-conducteurs

Généralement destinées pour réaliser des antennes à des applications dans le domaine millimétrique, de type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si).

II.3.3.2 Matériaux synthétiques

La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, une permittivité proche de 2 avec de faibles pertes. Cependant, les pertes deviennent vite importantes lorsque l'on monte en fréquence. Un exemple de ces matériaux : le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène, etc…

II.3.3.3 Matériaux céramiques

Couramment employés pour les circuits micro-rubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine (Al2O3) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité mais sont cassants et donc fragiles. Leurs permittivités sont pour la plupart élevées et ils présentent de faibles pertes.

II.3.3.4 Matériaux ferromagnétiques

Ces matériaux comprennent les substrats ferrite. L'effet gyromagnétique est mis à profit pour concevoir des circulateurs, des isolateurs ou encore des antennes plaques rayonnant naturellement une onde en polarisation circulaire. Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques.

II.3.4 Dimensionnement des antennes micro-rubans rectangulaires

En guise de résumé, voici une procédure de conception d'une antenne Patch rectangulaire. Celle-ci peut être utilisée pour un premier dimensionnement. L'optimisation peut être faite ensuite à l'aide d'un simulateur électromagnétique. On considère un plan de masse parfait et infini.

II.3.4.1 Fréquence de fonctionnement

Dans le cas d'une antenne de forme rectangulaire de dimensions L, W, les fréquences de résonances d'un mode TM_{mn} dans la cavité sont données par la formule suivante :

$$f_{mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 - \left(\frac{n}{W}\right)^2} \qquad (II.1)$$

Où m et n sont des modes d'excitation orthogonaux. Le mode fondamental est TM_{10}, avec m = 1 et n = 0. Ce fonctionnement correspond à l'excitation du mode fondamental (ou fréquence de résonance fondamentale) qui correspond à la plus faible fréquence excitée. [1]

II.3.4.2 Epaisseur du substrat

$$h \leq \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \qquad (II.2)$$

II.3.4.2 Longueur d'onde effective

$$\lambda_e = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_e}} \qquad (II.3)$$

II.3.4.3 Constant diélectrique effectif

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (II.4)$$

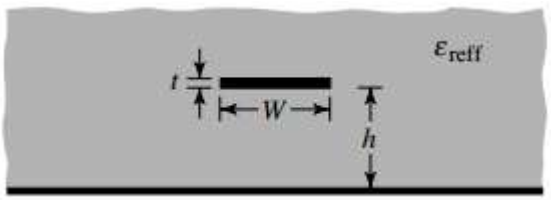


Figure II.4 : Géométrie du constant diélectrique efficace.

II.3.4.4 Extension de longueur du Patch

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_e + 0.3)}{(\varepsilon_e - 0.258)} + \frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.8} \quad (II.5)$$

II.3.4.5 Largeur et Longueur du Patch

$$W = \frac{\lambda_0}{2}\sqrt{\frac{2}{1+\varepsilon_r}} \quad (II.6)$$

$$L = L_e - 2\Delta L = \frac{\lambda_e}{2} - 2\Delta L \quad (II.7)$$

Avec : L_e : Longueur efficace du Patch. λ_e : Longueur d'onde efficace

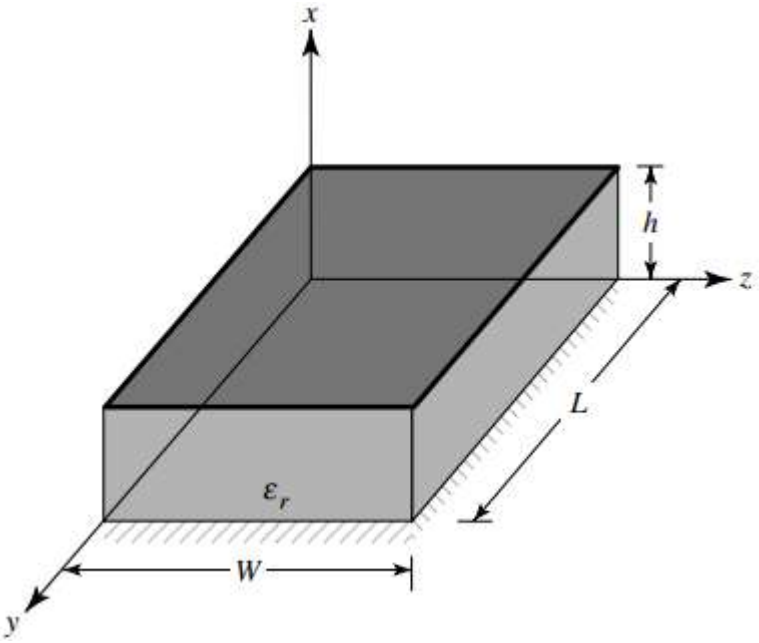


Figure II.5 : Géométrie de Patch rectangulaire.

II.4 Principe de fonctionnement

Le Patch rectangulaire est généralement la configuration la plus utilisée. Il est très facile d'analyser en utilisant à la fois les modèles de ligne de transmission et de cavité, qui sont les plus précis pour les substrats minces. Nous commençons par le modèle de ligne de transmission car il est plus facile à illustrer, puis on parle sur le modèle de cavité résonante. [12]

II.4.1 Modèle de ligne de transmission

Une antenne Patch peut être vue comme une ligne de transmission (ligne micro-ruban) ouverte à chacune de ses extrémités. Ces 2 discontinuités se comportent comme deux extrémités rayonnantes. [3] Fondamentalement, le modèle de ligne de transmission représente l'antenne Patch par deux fentes, séparées par une faible impédance $\boldsymbol{Z_C}$ et une ligne de transmission de longueur $\boldsymbol{L}$.

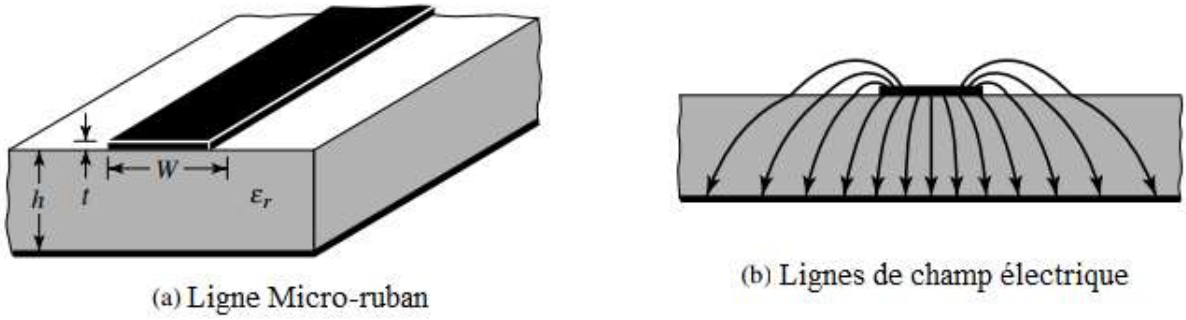


Figure II.6 : Ligne micro-ruban et ses lignes de champ électrique.

II.4.2 Modèle de cavité résonante

Une antenne imprimée peut être considérée comme une cavité résonnante ouverte constituée de quatre murs latéraux magnétiques et de deux murs horizontaux électriques. Le rayonnement est provoqué par la fuite du champ aux extrémités entre le Patch métallique proprement dit et le plan de masse. Le fonctionnement de l'antenne étant alors illustré à l'aide de deux fentes équivalentes aux bords rayonnants et séparées par la distance $\boldsymbol{L}$. [1] En basse fréquence, la cavité peut être considérée comme une capacité qui stocke des charges et dans laquelle un champ électrique uniforme est créé entre le Patch et le plan de masse. Tant que l'épaisseur du substrat est faible, le champ électrique est orienté selon l'axe $\boldsymbol{z}$ et indépendant de $\boldsymbol{z}$. [3]

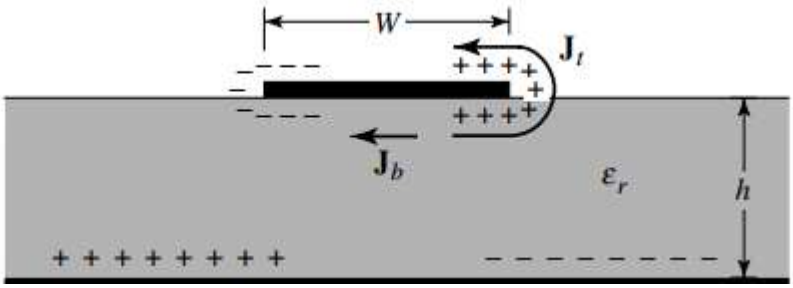


Figure II.7 : Distribution de charge et création de densité de courant sur cavité résonante.

Lorsque le Patch micro-ruban est sous tension, une répartition des charges est établie sur les surfaces supérieure et inférieure du patch, ainsi que sur la surface du plan de masse, comme indiqué sur « la figure II.7 ». La répartition des charges est contrôlée par deux mécanismes, un mécanisme attractif et répulsif [15]. Le mécanisme attractif se situe entre les charges opposées correspondantes sur le côté inférieur du Patch et le plan de masse, ce qui tend à maintenir la concentration de charge sur le bas du Patch. Le mécanisme répulsif se situe entre des charges similaires sur la surface inférieure du patch, ce qui tend à pousser certaines charges du bas du Patch, autour de ses bords, vers sa surface supérieure. Le mouvement de ces charges crée des densités de courant correspondantes $\boldsymbol{J_b}$et $\boldsymbol{J_t}$. [12]

II.5 Techniques d'alimentation

Un problème récurrent dans la conception des antennes imprimées concerne le choix de la technique d'excitation. L'alimentation des antennes imprimée repose essentiellement sur deux classes d'excitation, excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patchs rayonnants en utilisant un élément de contact tels que le câble coaxial et la ligne microbande. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne microbande au Patch rayonnant. Les trois techniques d'alimentation les plus utilisée sont la ligne microbande, sonde coaxiale et couplage par fente. [14] Nous distinguerons plusieurs types d'alimentations :

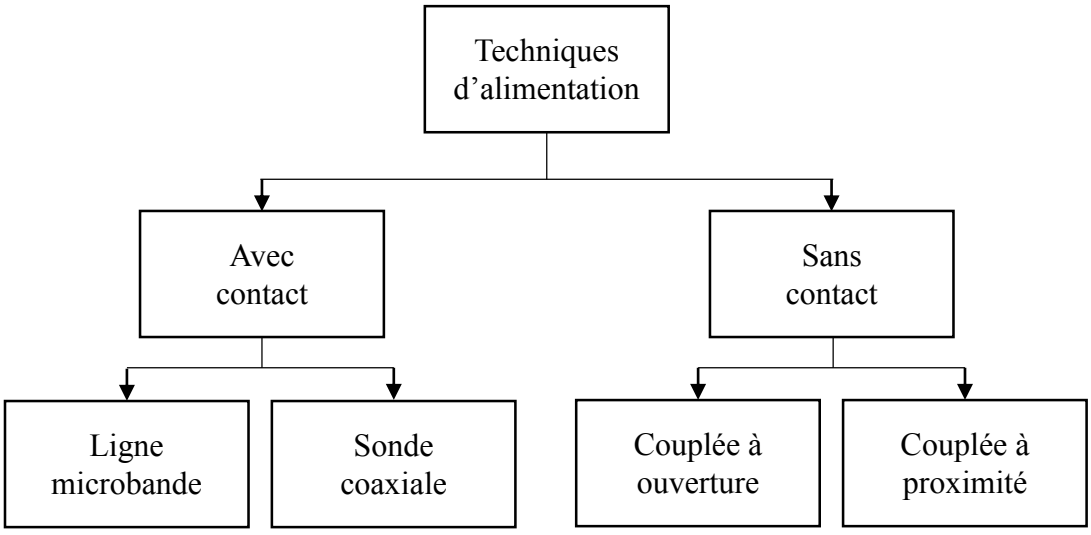


Figure II.8 : Techniques d'alimentation.

II.5.1 Alimentation par ligne microbande

Dans ce type de technique d'alimentation, une bande conductrice est connectée directement au bord du Patch microbande, comme illustré à « la figure II.9 ». La bande conductrice est plus petite en largeur par rapport au Patch. Ce type d'agencement d'alimentation présente l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane. Une découpe en médaillon peut être incorporée dans le Patch afin d'obtenir une bonne adaptation d'impédance sans avoir besoin d'un élément d'adaptation supplémentaire. Ceci est réalisé en contrôlant correctement la position de l'encart. [16]

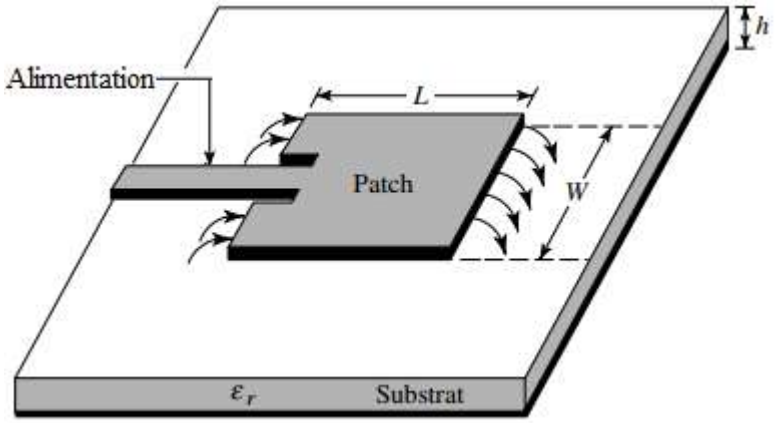


Figure II.9 : Alimentation par ligne microbande.

Il s'agit donc d'une technique d'alimentation facile, car elle offre une facilité de fabrication et une simplicité de modélisation ainsi qu'une adaptation d'impédance. Cependant, à mesure que l'épaisseur du substrat diélectrique augmente, les ondes de surface et les rayonnements parasites augmentent également, ce qui entrave la bande passante de l'antenne. Ce type de technique d'alimentation entraîne des effets indésirables de polarisation croisée. [16]

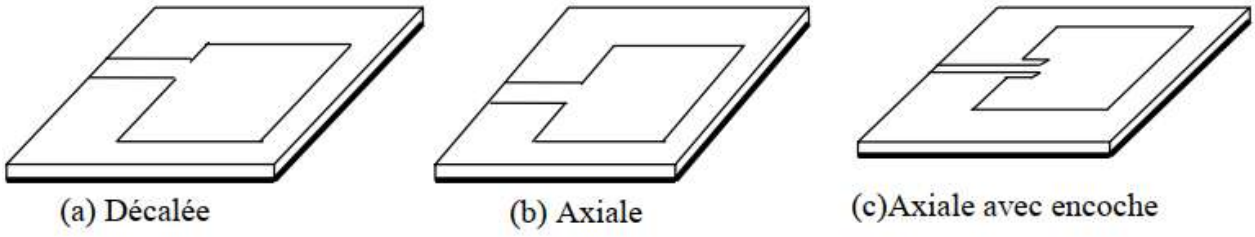


Figure II.10 : Différent types d'alimentation par ligne microbande.

II.5.2 Alimentation par sonde (coaxiale)

L'alimentation coaxiale illustrée à la figure II.11. Également appelée alimentation par sonde est une technique largement utilisée pour l'alimentation des antennes Patch microbande. Dans cette technique, le conducteur intérieur du connecteur coaxial est tiré à travers le diélectrique et soudé sur le Patch rayonnant, tandis que le conducteur extérieur est attaché au plan de masse. [17]

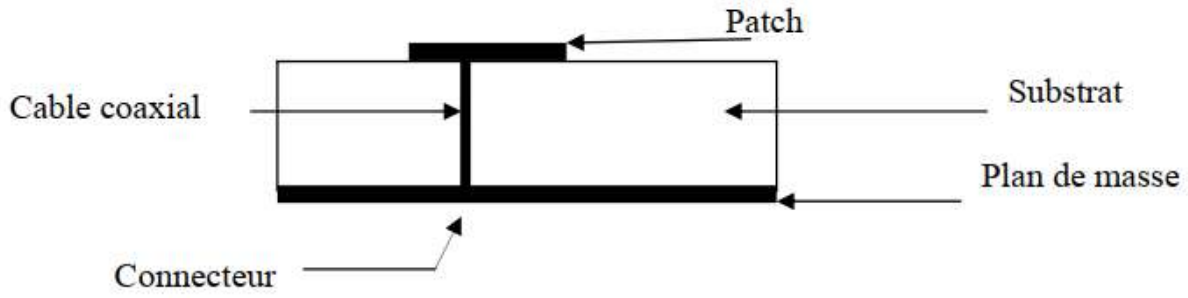


Figure II.11 : Alimentation par sonde coaxiale.

Le principal avantage de ce type de schéma d'alimentation est que l'alimentation peut être placée à n'importe quelle position souhaitée à l'intérieur du Patch afin d'obtenir une adaptation d'impédance. Cette méthode d'alimentation est facile à fabriquer et à de faibles effets de rayonnement parasite. Cependant, son inconvénient majeur est qu'il offre une bande passante étroite et est difficile à modéliser car un trou doit être percé dans le substrat. De plus, pour les substrats plus épais, la longueur accrue de la sonde rend l'impédance d'entrée plus inductive, ce qui entraîne des problèmes d'adaptation. En utilisant un substrat diélectrique épais pour améliorer la bande passante, l'alimentation de ligne microbande et l'alimentation coaxiale souffrent de nombreux inconvénients tels que le rayonnement d'alimentation parasite et le problème d'adaptation. Les techniques d'alimentation sans contact décrites ci-dessous résolvent ces problèmes. [16]

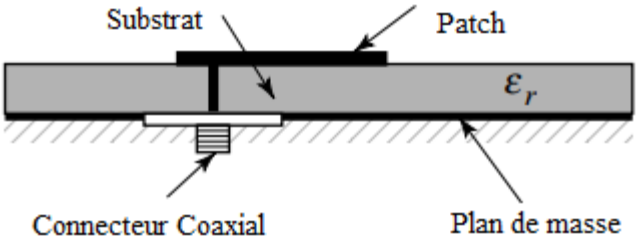


Figure II.12 : Forme de Connecteur coaxial.

II.5.3 Alimentation couplée à ouverture

Dans le couplage à ouverture tel que montré sur la figure II.13, l'élément de Patch microbande rayonnant est gravé sur le dessus du substrat d'antenne, et la ligne d'alimentation microbande est gravée sur le fond du substrat d'alimentation afin d'obtenir un couplage d'ouverture. L'épaisseur et les constantes diélectriques de ces deux substrats peuvent ainsi être choisies indépendamment pour optimiser les fonctions électriques distinctes du rayonnement et des circuits. L'ouverture de couplage est généralement centrée sous le Patch, ce qui entraîne une polarisation croisée plus faible en raison de la symétrie de la configuration. La quantité de couplage de la ligne d'alimentation au Patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Étant donné que le plan de masse sépare le Patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. [16]

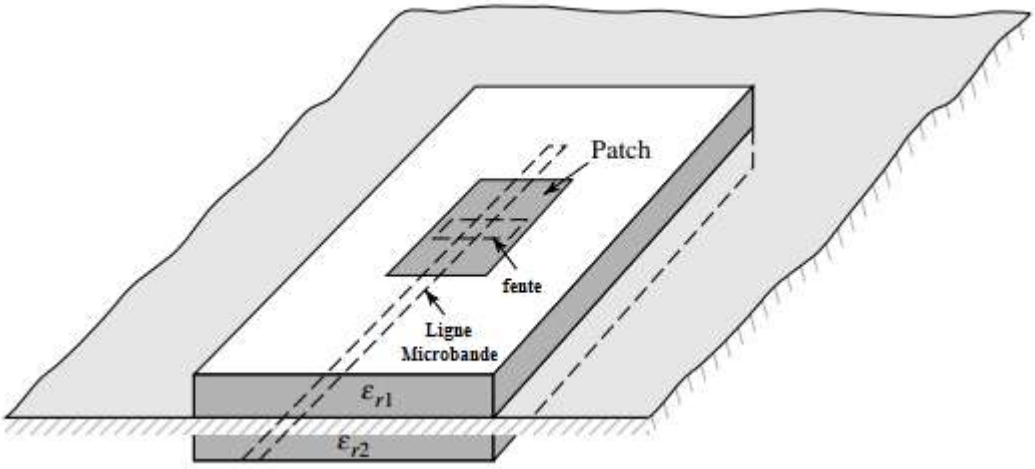


Figure II.13 : Alimentation couplée à ouverture.

Généralement, un matériau diélectrique élevé est utilisé pour le substrat inférieur et un matériau épais, à constante diélectrique faible, est utilisé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement provenant du Patch. Ce type de technique d'alimentation peut donner une bande passante très élevée d'environ 21%. L'effet des rayonnements parasites est également très moindre par rapport à d'autres techniques d'alimentation. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des couches multiples, ce qui augmente également l'épaisseur de l'antenne. [16]

II.5.4 Alimentation couplée à proximité

Ce type de technique d'alimentation est également appelé schéma de couplage électromagnétique. Comme la montre « la figure II.14 », deux substrats diélectriques sont utilisés dans cette technique pour placer la ligne d'alimentation entre les deux substrats et le Patch rayonnant est située au-dessus du substrat supérieur. Le principal avantage de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine les rayonnements parasites et offre une bande passante très élevée. Ce schéma offre également une alternative entre deux supports diélectriques différents, l'un pour le Patch et l'autre pour la ligne d'alimentation. Le principal inconvénient de ce schéma d'alimentation est qu'il est complexe à fabriquer car les deux couches diélectriques doivent être correctement alignées. [17]

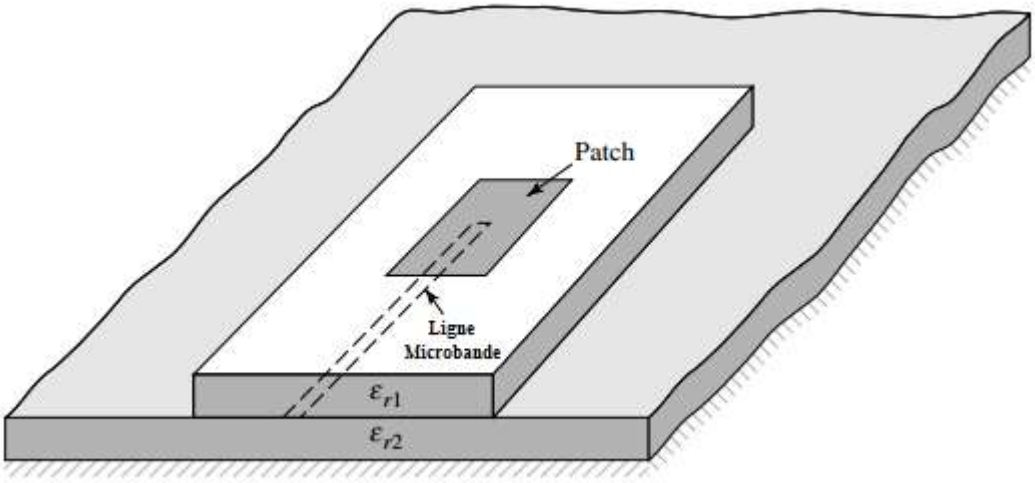


Figure II.14 : Alimentation couplée à proximité.

Outre les diverses techniques d'alimentation mentionnées, plusieurs autres méthodes ont été adoptées ces derniers temps pour improviser le problème inhérent du gain et de la bande passante dans les antennes à microbande haute fréquence. [17] On cite quelques d'entre eux :

- Structures de masse défectueuses.
- Fentes d'alimentation double.
- Substrat diélectrique.
- Patch parasite.
- Trou d'air.

II.6 Avantages, inconvénients et applications

II.6.1 Avantages

Depuis que la configuration d'origine a été proposée, des dizaines de variations de la forme des Patches, des techniques d'alimentation, des configurations des substrats et des géométries des réseaux ont été développées par des chercheurs du monde entier. La variété de conception possible avec les antennes à microbande dépasse probablement celle de tout autre type d'élément d'antenne. Une autre caractéristique intéressante est que les antennes à microbande peuvent être fabriquées assez facilement dans les universités ou d'autres laboratoires de recherche, qui ont souvent été une source de nouvelles conceptions. [18] On cite quelques avantages ci-dessous :

- Capacité à avoir une diversité de polarisation (peut facilement être conçue pour avoir des polarisations verticales, horizontales, circulaires à droite ou circulaires à gauche).
- Simples, robustes, et moins encombrantes et adaptables aux surfaces planes.
- Possibilité d'être intégrées dans des appareils électroniques transportables.
- Facilité d'intégration avec la technologie micro-ruban.
- Léger, peu coûteux et profil bas. [2]

II.6.2 Inconvénients

Les inconvénients des configurations d'antenne micro-ruban d'origine incluent :

- Bande passante étroite (généralement inférieure à 5%).
- Rayonnement parasite d'alimentation.
- Peut gérer une faible puissance RF.
- Mauvaise pureté de polarisation.
- Capacité d'alimentation limitée.
- Problèmes de tolérance.
- Grande perte ohmique.

Une grande partie du travail de développement dans les antennes à micro-ruban a donc consisté à essayer de surmonter ces problèmes, afin de satisfaire des exigences de systèmes de plus en plus strictes. [18]

II.6.3 Applications des antennes micro-rubans

Les antennes Patches micro-rubans sont bien connues pour leurs performances et leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. Les applications de ces antennes sont très vastes dans les différents domaines tels que les applications médicales, les satellites et bien sûr même dans les systèmes militaires comme dans les fusées, les missiles d'avions, etc. L'utilisation des antennes micro-rubans se répand largement dans tous les domaines et zones et maintenant elles sont en plein essor dans les aspects commerciaux en raison de leur faible coût du matériau du substrat et de la fabrication. Il est également prévu qu'en raison de l'utilisation croissante des antennes Patches dans la large gamme, cela pourrait prendre le pas sur l'utilisation des antennes conventionnelles pour les applications maximales. L'antenne Patch a plusieurs applications. [19] Certaines de ces applications sont décrites ci-dessous :

II.6.3.1 Communication mobile et satellite

La communication mobile nécessite des petites antennes à faible coût et à profil bas. L'antenne patch microbande répond à toutes les exigences et divers types d'antennes microbande ont été conçus pour être utilisés dans les systèmes de communication mobiles. En cas de communication par satellite, des diagrammes de rayonnement à polarisation circulaire sont nécessaires et peuvent être réalisés à l'aide d'un patch carré ou circulaire avec un ou deux points d'alimentation. [19]

II.6.3.2 Systèmes de positionnement global

De nos jours, les antennes Patches avec un substrat ayant un matériau fritté à haute permittivité sont utilisées pour le système de positionnement global. Ces antennes sont polarisées circulairement, très compactes et assez chères du fait de leur positionnement. Il est prévu que des millions de récepteurs GPS seront utilisés par la population générale pour les véhicules terrestres, les aéronefs et les navires maritimes afin de trouver leur position avec précision. [19]

II.6.3.3 Interopérabilité mondiale pour l'accès aux micro-ondes (WiMax)

Le standard IEEE 802.16 est connu sous le nom de WiMax. Les antennes micro-rubans génère trois modes de résonance à 2,7, 3,3 et 5,3 GHz et peut donc être utilisé dans un équipement de communication compatible WiMax. [19]

II.7 Réseaux d'antennes

II.7.1 Histoire

Les réseaux d'antennes occupent une place croissante, en particulier dans les domaines des télécommunications. La technologie de réseau d'antennes a été développée pour la radioastronomie vers 1946, par Antony Hewish et Martin Ryle, à l'université de Cambridge. Dans la même année Dolph-Tchebycheff a développé une technique de synthèse pour un réseau d'antennes. Les travaux de Dolph-Tchebycheff sont utilisés dans de nombreuses approches. L'utilisation des éléments imprimés pour produire un rayonnement électromagnétique remonte aux années cinquante, mais l'application de ce phénomène pour la première réalisation d'antennes ne date que du début des années soixante-dix, lorsque le besoin de conformer des réseaux est apparu. Les dernières décennies ont connu un développement spectaculaire dans le domaine de modélisation et synthèse de réseau d'antennes imprimées. [12]

II.7.2 Définition

Un réseau d'antennes est par définition l'association régulière d'antennes identiques pour créer un rayonnement de forme particulière. La puissance rayonnée est donc plus grande puisqu'on multiplie le nombre d'éléments rayonnants. Le rayonnement résulte de l'addition en phase des champs provenant de chaque élément. Les combinaisons possibles sont donc nombreuses et entraînent une grande souplesse dans la conception de réseaux. [1]

II.7.3 Présentation de concept

L'idée est de combiner le rayonnement de plusieurs éléments rayonnants afin d'accroître le rayonnement de l'antenne dans une ou plusieurs directions données. En d'autres termes, il s'agit de créer une interférence constructive entre les ondes électromagnétiques issues de différentes sources. La combinaison de ces différentes ondes va dépendre de la disposition et de la séparation entre les éléments rayonnants, ainsi que des propriétés en amplitude et en phase de l'excitation. Le réseau d'antennes comprend les différents éléments rayonnants ainsi que les structures permettant de modifier l'excitation de chaque élément rayonnant. Les éléments peuvent être quelconques : dipôles, Patchs, fentes rayonnantes. L'unique condition est que la mise en réseau de ces éléments ne modifie pas leurs caractéristiques propres. Par rapport aux éléments rayonnants, le gain et l'angle d'ouverture du réseau d'antenne seront donc modifiés. [4]

II.7.3 Géométries possible pour les réseaux d'antennes

II.7.3.1 Réseau linéaire

Considérons le cas de N éléments rayonnants identique, alignés et espacés par une distance identique (d), comme illustré sur « la figure II.15 », ou le premier élément se situe à l'origine du système de coordonnées global orienté avec l'axe du réseau **($\psi_r = \psi$)**. Ce type de géométrie est particulièrement privilégié car il demeure la simplicité au point de vue de sa réalisation. [5]

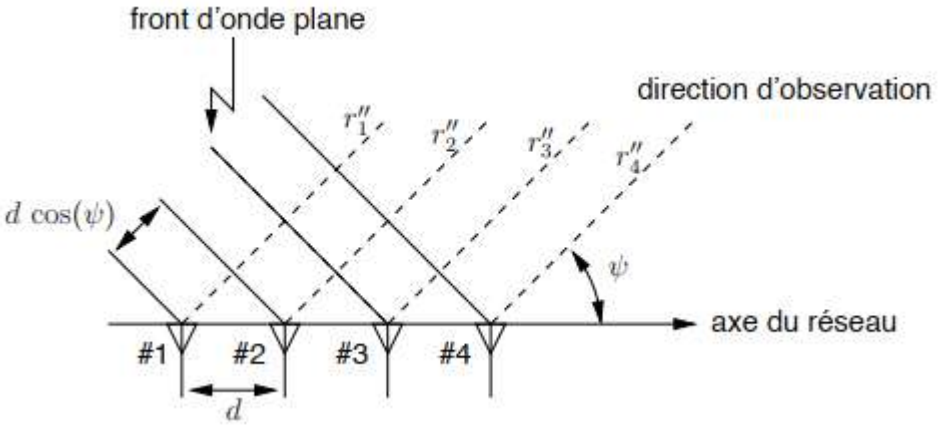


Figure II.15 : Géométrie d'un réseau linéaire à espacement régulier.

II.7.3.2 Réseau planaire

Le réseau planaire ajoute une dimension qui permet un balayage sur deux angles : azimut et élévation. Imaginons un réseau constitué de $N_x \times N_y$ éléments placée dans le plan (X,Y). [5]

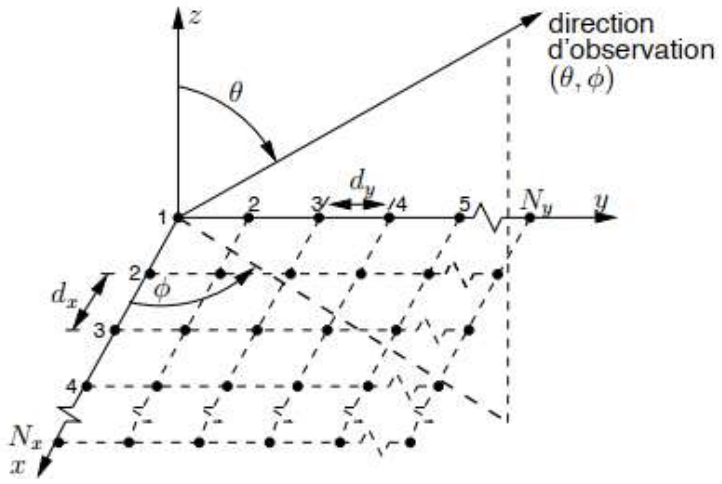


Figure II.16 : Géométrie d'un réseau planaire uniforme.

II.7.4 Quelque exemple des réseaux d'antennes

Des exemples typiques de réseaux sont présentés dans « la figure II.17 ». Habituellement, le terme réseau est réservé à un agencement dans lequel les radiateurs individuels sont séparés, comme le montrent les figures (a – c). Cependant, le même terme est également utilisé pour décrire un ensemble de radiateurs montés sur une structure continue, illustré à la figure (d). [12]

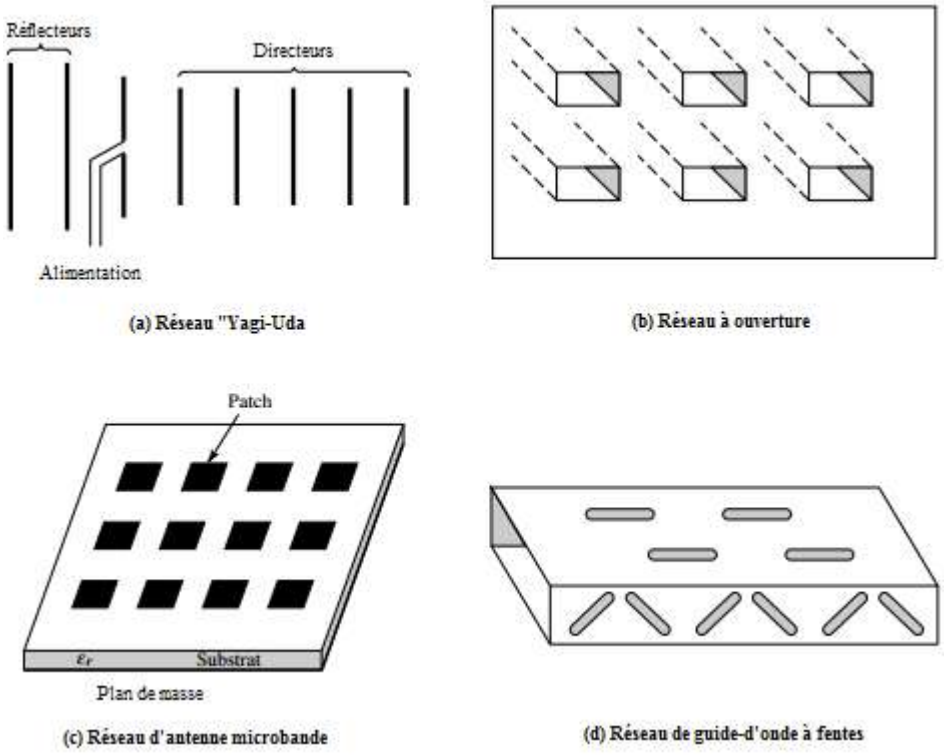


Figure II.17 : Configurations typiques de réseaux de fils, d'ouvertures et de microbande.

II.8 Réseaux d'antennes micro-rubans rectangulaires

Les problèmes majeurs des antennes micro-ruban à élément unique sont un gain faible et une bande passante étroite qui limitent leurs larges applications. Un élément d'antenne micro-ruban peut être utilisé seul ou en combinaison avec d'autres éléments similaires dans le cadre d'un réseau. Généralement, l'objectif global d'une conception est d'obtenir des performances spécifiques à une fréquence de fonctionnement stipulée. Si une configuration d'antenne micro-ruban peut atteindre ces objectifs globaux, la première décision consiste à sélectionner une géométrie d'antenne appropriée. Dans notre étude, les réseaux d'antennes Patch rectangulaires sont conçus et comparée entre eux. [23]

II.9 Techniques d'alimentation des réseaux d'antennes

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'impédance quarte 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 prendre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps. [12]

II.9.1 Alimentation des réseaux linéaires

II.9.1.1 Alimentation série

L'une des premières réalisations d'un réseau d'antennes micro-rubans a été le réseau alimenté en série. Ici, chaque élément du réseau est connecté en série via un arrangement de lignes de transmission. « La figure II.18 » montre un diagramme schématique d'un réseau alimenté en série à 8 éléments composé de patchs alimentés par les bords. Le réseau est alimenté par la gauche et est classé comme réseau à ondes stationnaires. Les réseaux alimentés en série ont été développés dans les réalisations de guides d'ondes pendant des décennies, mais les formes microbande ont beaucoup plus de flexibilité. [20]

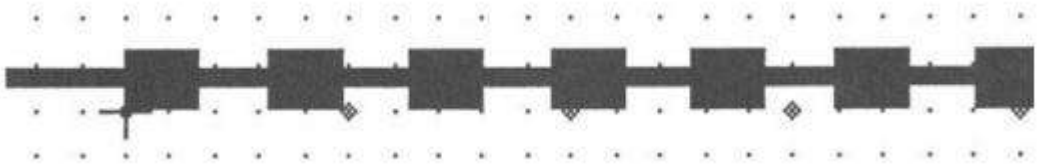


Figure II.18 : Réseau de 8 éléments alimenté en série.

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. [12]

Les avantages des réseaux d'antennes micro-rubans utilisant une configuration d'alimentation en série par rapport à d'autres formes (à discuter plus loin) incluent le fait d'avoir un réseau d'alimentation simple et plus compact, comme le montre « la figure II.18 », et une perte de ligne d'alimentation inférieure. Cependant, cette forme de réseau présente plusieurs inconvénients. Le problème le plus fondamental est la largeur de bande de rayonnement étroite, généralement beaucoup plus étroite que la largeur de bande d'impédance inhérente des éléments micro-ruban individuels. [20]

II.9.1.2 Alimentation parallèle

Les réseaux d'alimentation parallèle sont le type de réseau le plus courant utilisant la technologie micro-rubans. Ici, contrairement au réseau alimenté en série, chaque élément a sa propre ligne de transmission d'excitation, qui peut être rendue indépendante des lignes d'alimentation des autres éléments ainsi que des autres éléments du réseau. « La figure II.19 » montre un diagramme schématique d'un réseau d'alimentation d'entreprise à 8 éléments de Patchs à alimentation périphérique. Comme le montre la figure, chaque élément a sa propre ligne de transmission d'excitation. Chacune de ces lignes de transmission est ensuite connectée ensemble via une série de combinateurs de puissance à 2 voies, bien que des diviseurs à 3 voies soient couramment utilisés si un nombre impair d'éléments est utilisé dans le réseau. [20]

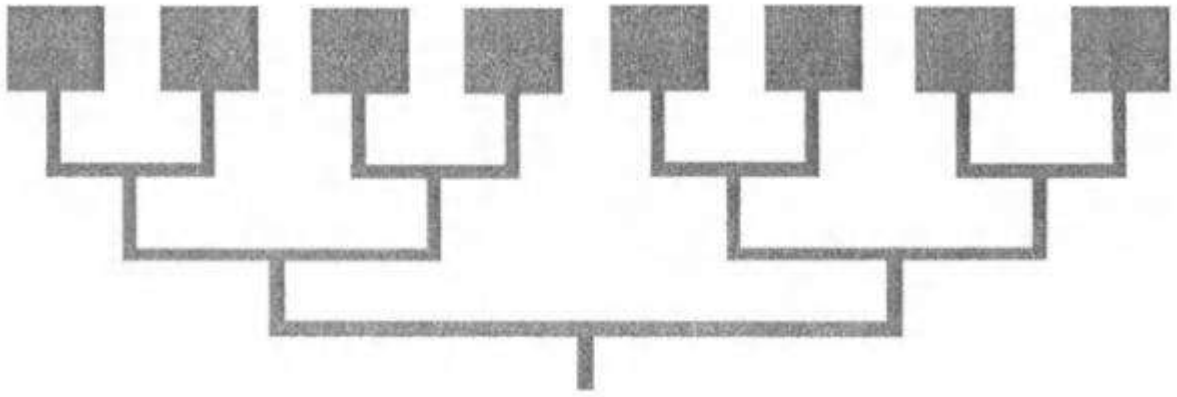


Figure II.19 : Réseau de 8 éléments alimenté en parallèle.

De tous les formats des réseaux, les configurations parallèles ont les bandes passantes les plus larges, dans certains cas même supérieures à celle des éléments individuels du réseau. [12]

II.9.1.3 Alimentation combinés

Il existe une troisième classe d'alimentation des réseaux micro-rubans, qui est une combinaison des méthodes d'alimentation en série et parallèle. Ici, une ligne d'alimentation commune est utilisée pour l'ensemble du réseau et chaque élément tape éteint cette ligne d'alimentation. Pour garantir que la bande passante est supérieure au réseau alimentée en série, chaque prise et section de la ligne d'alimentation est adaptée à une impédance commune. [20]

II.9.2 Alimentation des réseaux planaires

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan uniforme 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 II.20 ». Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle.

II.9.2.1 Alimentation série

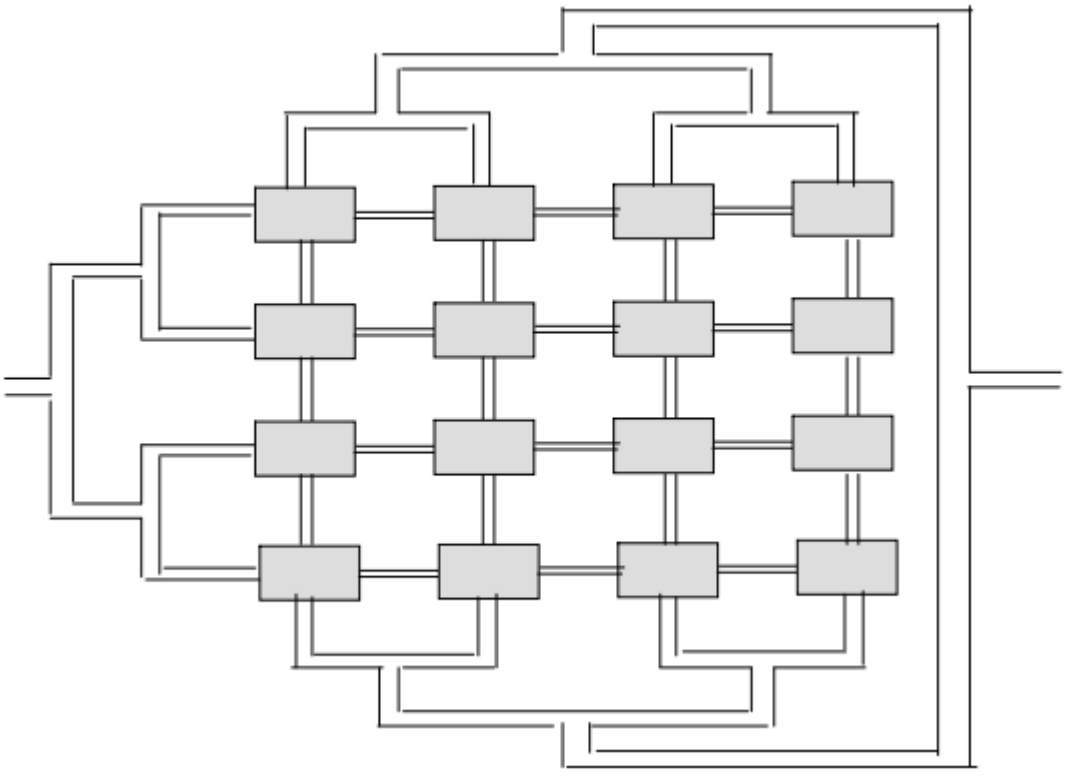


Figure II.20 : Réseau planaire d'antennes alimenté en série.

Remarque : L'excitation de ce réseau doit être d'un seul coté pas les deux au même temps.

II.9.2.2 Alimentation parallèle

La conception de ces réseaux peut être un peu compliquée, pas tant en termes de conception des éléments d'antenne que de configuration du réseau d'alimentation. Une bonne règle de base pour minimiser les rayonnements parasites provenant des lignes d'alimentation est de garder la structure aussi symétrique que possible. Ces réseaux planaires sont utilisés dans des applications telles que le radar anticollision à ondes millimétriques pour les véhicules, les services de distribution multipoint local et l'imagerie. [20]

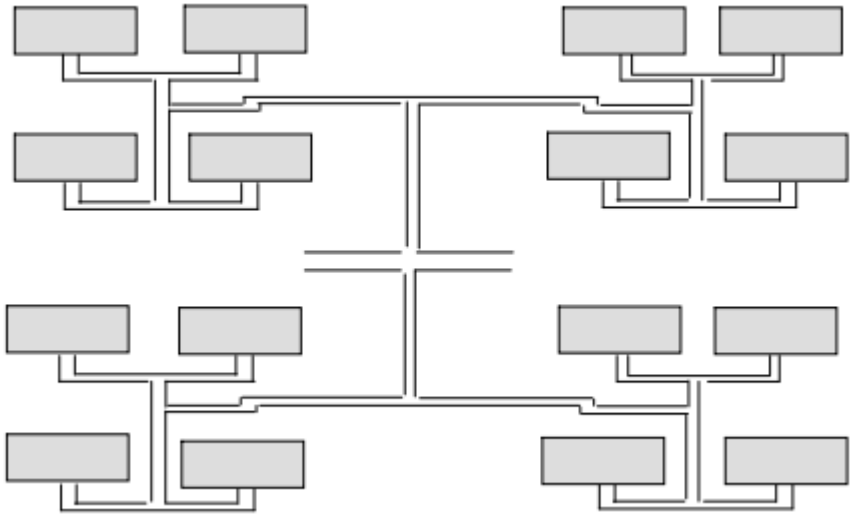


Figure II.21 : Réseau planaire d'antennes alimenté en parallèle.

II.10 Méthodes d'analyse

II.10.1 Méthodes approximatives

Depuis l'avènement des antennes imprimées, plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées. Ces méthodes peuvent être largement divisées en deux groupes : Dans le premier groupe, les méthodes qui sont basées sur la distribution de courant magnétique équivalente, sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité résonante. On a déjà parlé sur ses méthodes précédemment. Cependant, ces méthodes sont limitées à des formes géométriques simples, et ces modèles sont fondés sur des approximations qui peuvent donner lieu à des résultats inexacts, notamment pour des applications qui requièrent un substrat épais ou un constant diélectrique élevé.

II.10.2 Méthodes numériques

Dans le deuxième groupe, les méthodes sont basées sur la distribution du courant électrique sur le conducteur. Ces méthodes ne souffrent d'aucune approximation, et s'avèrent être très rigoureuses, puisque aucune supposition initiale n'est considérée. En outre, ces méthodes permettent d'étudier des antennes de formes très variées, mais font appel à des formulations ou calculs plus complexes et des temps de calcul plus importants. On cite ces méthodes :

- Méthode de domaine de temps de différence finie (FDTD).
- Méthode des différences finies (FEM).
- Méthode des moments (MoM).
- Méthode spectrale (SDA).

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de faire une étude théorique concernant les antennes micro rubans. Cette étude nous a permis de mieux connaître la structure d'une antenne microbande et de distinguer les différentes techniques d'alimentation ainsi que leurs types de matériaux du substrat, elle nous a aidés aussi à faire le bon choix par rapport à la fiabilité et la facilité de fabrication pour notre prochaine conception.

Il est à signaler que ces notions sont très importantes pour le démarrage de la partie de conception. Le chapitre suivant concerne la conception et simulation de quelques réseaux d'antennes micro-rubans rectangulaires sous le programme de simulation électromagnétique « Ansoft HFSS ».

Chapitre III

Simulation, résultats et discussion

III.1 Introduction

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape obligatoire dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous permettre aussi de rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela on a choisi un outil de simulation électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Le choix de HFSS pour notre application est justifié, en effet c'est un logiciel dédié à la simulation haute fréquence des circuits micro-onde. Il s'agit d'un logiciel puissant qui étudie et simule des structures complexes en trois dimensions.

Dans ce chapitre on va développer la phase de conception en présentant un bref récapitulatif sur le logiciel de simulation **« HFSS »,** Après ça on va essayer de trouver une antenne optimale, ensuite on va présenter les structures des réseaux d'antennes à réaliser. En finira par exposer les résultats des simulations de ces réseaux et par une discussion de leurs performances.

III.2 Logiciels de simulation EM

Depuis quelques années, des logiciels de modélisation électromagnétique ont été commercialisés avec succès. A titre d'exemple, on peut citer HFSS (Ansoft), MicroWave Studio (CST) ou Grasp (Ticra). Ces codes commerciaux sont maintenant très bien implantés chez les industriels développant des antennes. Ils sont largement utilisés pour les études de sources primaires (cornet, antennes imprimées), les structures guidées (circuits d'alimentation, réseau formateur de faisceau) ou le calcul d'antenne à réflecteur. Ils sont basés sur des techniques numériques éprouvées et validées. Un autre avantage non négligeable est la facilité d'utilisation grâce à des interfaces graphiques performantes et conviviales. Ceci permet un gain de temps considérable lors des phases de pré et post traitements. [21]



Figure III.1 : Logos des logiciels les plus utilisé.

III.3 Présentation du logiciel de simulation HFSS

'Ansoft' est un leader dans le développement de logiciel pour la conception et la simulation électronique haute performance. Les ingénieurs utilisent les logiciels 'Ansoft' pour concevoir des produits électroniques de pointe telle que téléphone cellulaire, dispositifs d'accès Internet, système et composants pour la gestion de réseaux large bande, circuits intégrés, carte et circuit imprimés, systèmes électroniques pour l'industrie automobile, électronique de puissance et technologie de cellule-combustible. La suite des produits 'Ansoft' est une solution complète pour la simulation système, circuit, électromagnétique utilisé pour les produits sans fils, les interconnexions haut débit, les antennes et l'électronique spatiale. [22]

Le logiciel 'HFSS' (High Frequency Structure Simulation) de la société 'Ansoft' est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur les méthodes des éléments finis. En général, cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous-région (élément) avec une fonction local. HFSS est un système de simulation interactif dont l'élément maillé de base est un tétraèdre. Cela vous permet de résoudre n'importe quelle géométrie 3D arbitraire, en particulier celles avec des courbes et des formes complexes, en une fraction du temps qu'il faudrait en utilisant d'autres techniques. [22]

HFSS est un outil permettent le calcul de comportement électromagnétique d'une structure quelconque, le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse très détaillée. Il permet de calculé :

- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique afin de générer une solution du champ électromagnétique.
- Les impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation.
- Quantité de base dans le champ lointain.
- Fréquence de résonance, etc…

III.4 Cahier de charge

Notre Projet est divisé en deux parties, la première partie consiste à trouver une antenne microbande rectangulaire optimale, la deuxième partie consiste a créer un réseau d'antennes microbande rectangulaire en utilisant le patch optimal trouvé dans la première partie, on peut atteindre cela par l'utilisation des différentes fréquences, substrats et dimensions.

- Pour les fréquences on a choisi (2Ghz, 2.4Ghz, 3Ghz, 3.5Ghz, 4Ghz ,4.5Ghz et 5Ghz).
- Pour les matériaux diélectrique on va utiliser 2 matériaux à base de verre renforcé : FR4_EPOXY avec $\varepsilon_r = 4.4$, RT_DUROID 5880 avec $\varepsilon_r = 2.2$. 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 w_0.
- 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 et h = 3.6mm.
- L'impédance caractéristique est de l'ordre de $Z_0 = 50\ \Omega$.
- Matériau de plan de masse et patch est à base de cuivre.
- La surface est de l'ordre $A = (60 \times 60)\ mm^2$.

III.5 Simulation d'antenne avec le substrat FR4_EPOXY

III.5.1 Calcul des dimensions pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$

Tableau III.1 : Largeur et Longueur du Patch et ligne d'alimentation par rapport à la fréquence.

Fréquence (GHz)	W (mm)	L (mm)	w_0 (mm)
2	45.61	35.45	2.8183
2.4	38.01	29.46	2.8125
3	30.41	23.45	2.7968
3.5	26.06	20.02	2.7839
4	22.81	17.43	2.7695
4.5	20.27	15.42	2.7548
5	18.24	13.8	2.7385

III.5.2 Etapes de simulation de première antenne

On commence par le plan de masse avec $A = (60 \times 60)\ mm^2$

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateRectangle			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	0 ,0 ,0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
	Axis	Z			
	XSize	60	mm	60mm	
	YSize	60	mm	60mm	

Figure III.2 : Fenêtre des paramètres de plan de masse.

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

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateBox			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	0 ,0 ,0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
	XSize	60	mm	60mm	
	YSize	60	mm	60mm	
	ZSize	1.5	mm	1.5mm	

Figure III.3 : Fenêtre des paramètres de substrat.

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

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateRectangle			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	12.275 ,7.195 ,1.5	mm	12.275mm , 7.1...	
	Axis	Z			
	XSize	35.45	mm	35.45mm	
	YSize	45.61	mm	45.61mm	

Figure III.4 : Fenêtre des paramètres de patch.

On trace aussi la ligne d'alimentation avec la Largueur w_0 déjà calculé

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateRectangle			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	47.725 ,28.59 ,1.5	mm	47.725mm , 28....	
	Axis	Z			
	XSize	12.275	mm	12.275mm	
	YSize	2.8183	mm	2.8183mm	

Figure III.5 : Fenêtre des paramètres de ligne d'alimentation microbande.

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

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateRectangle			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	60 ,28.59 ,1.5	mm	60mm , 28.59m...	
	Axis	X			
	YSize	2.8183	mm	2.8183mm	
	ZSize	-1.5	mm	-1.5mm	

Figure III.6 : Fenêtre des paramètres de point d'excitation.

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

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Command	CreateBox			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	-15 ,-15 ,-23	mm	-15mm , -15mm ...	
	XSize	90	mm	90mm	
	YSize	90	mm	90mm	
	ZSize	50	mm	50mm	

Figure III.7 : Fenêtre des paramètres de boîte de rayonnement.

Enfin, il faut donner à chaque élément son rôle, pour le substrat il faut définir le type et l'épaisseur, le plan de masse et le patch doit être à base de cuivre, et on doit exciter le plan de masse par le point d'excitation, il faut aussi donner la fréquence de solution et la bande de fréquence de balayage. La dernière étape consiste à la vérification des erreurs et de l'analyse.

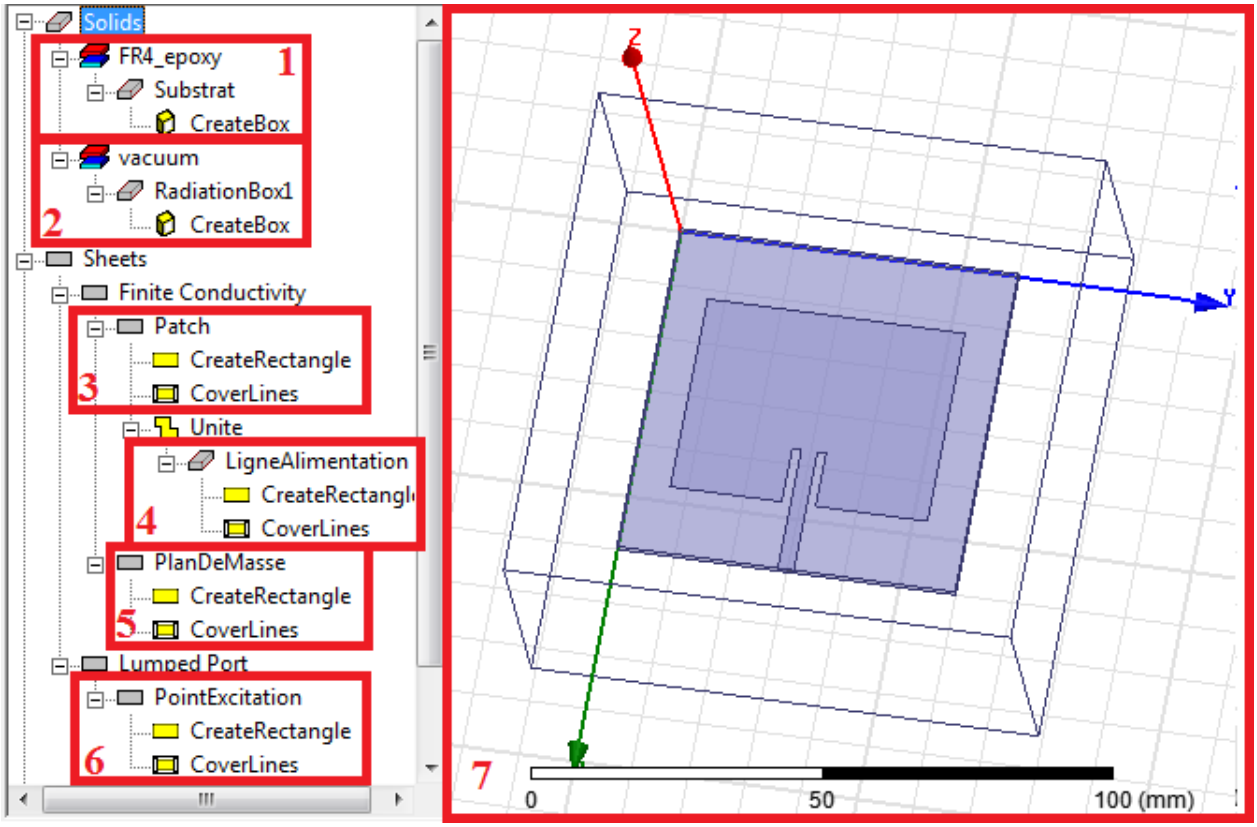


Figure III.8 : Représentation de première antenne avec f = 2 GHz et h = 1.5 mm.

1 : Substrat diélectrique.

2 : Boîte de rayonnement.

3 : Patch rectangulaire.

4 : Ligne d'alimentation microbande.

5 : Plan de masse.

6 : Point d'excitation.

7 : Représentation graphique de l'antenne.

Après cette première simulation on va changer les différents paramètres tels que la fréquence, l'épaisseur et la permittivité de substrat diélectrique, la Largeur et Longueur de patch et la Largeur de ligne d'alimentation microbande et le point d'excitation, tout cela pour trouver une antenne optimale avec le gain le plus élevé et la bande passante la plus large.

III.5.3 Résultats de simulation pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$

Tableau III.2 : Résultats obtenus pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$.

On affiche les paramètres caractéristiques simulé des antennes par rapport à la fréquence :

Fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Champ E (dB)	BP(-10dB) (MHz)	Rendement (%)
2	-18.3914	1.9303	2.1216	-0.32532	44.7	43.83
2.4	-10.5201	5.2413	2.9665	0.32774	17.9	44.44
3	-16.7493	2.4933	3.4129	1.1004	67.5	45.04
3.5	-25.4155	0.8043	3.9147	1.6750	97.2	46.25
4	-27.7480	0.6434	4.1141	1.8439	127	47.45
4.5	-15.6997	2.7346	4.4591	2.1004	160.7	50.74
5	-9.2279	6.2413	4.8802	2.0864	-	51.94

III.5.4 Cas optimal pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$

Après une comparaison entre les cas au-dessus, on a trouvé que l'antenne le plus performant dans cette batch est celle de (4 GHz). On donne la représentation graphique de cette antenne :

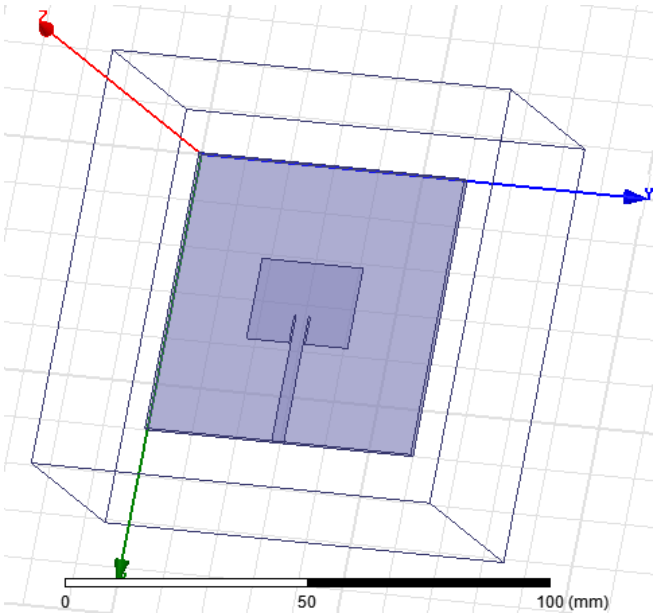


Figure III.9 : Conception d'antenne pour f = 4 GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 4.4$.

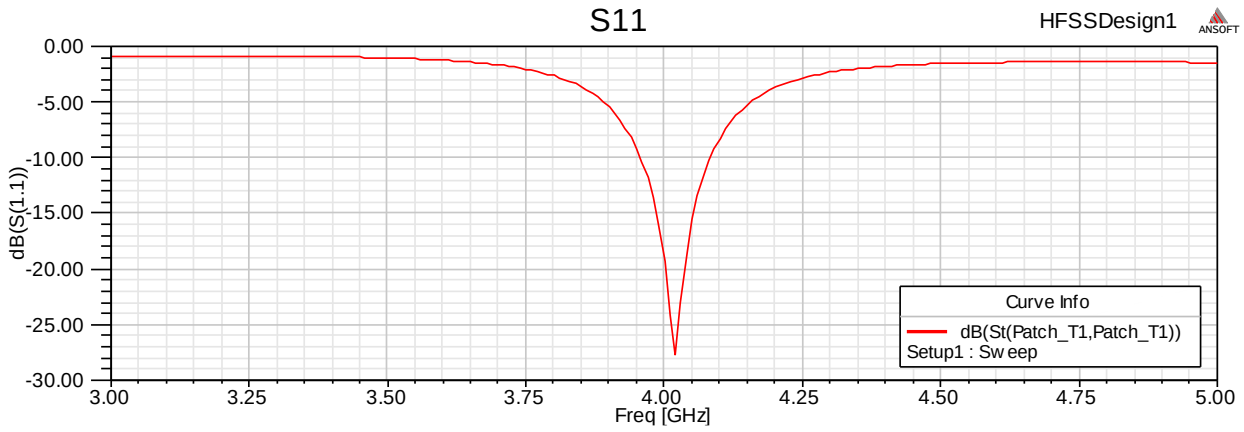


Figure III.10 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

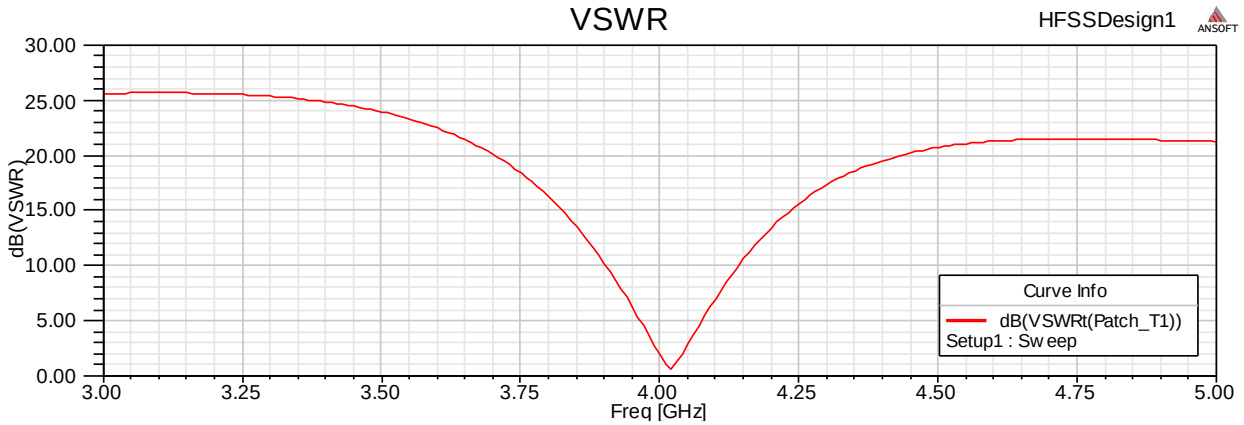


Figure III.11 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

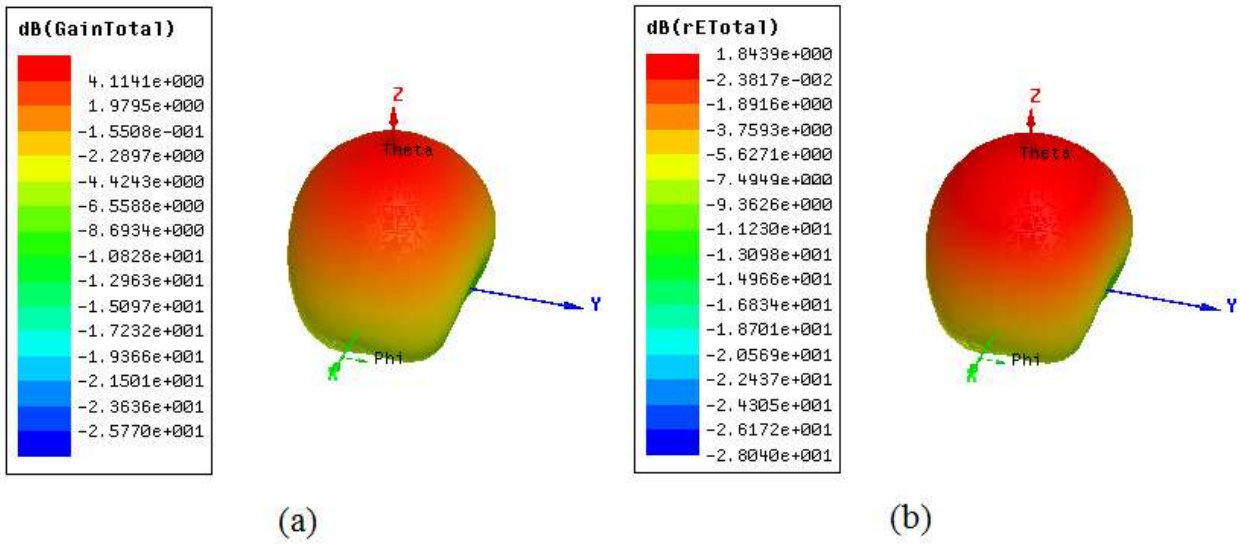


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique.

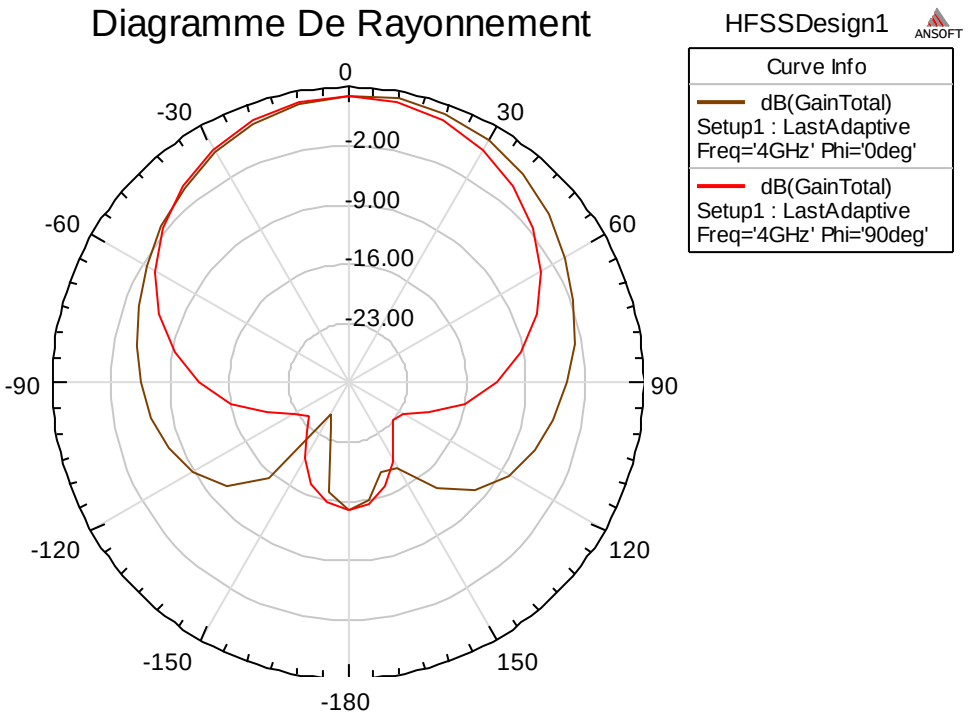


Figure III.13 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$.

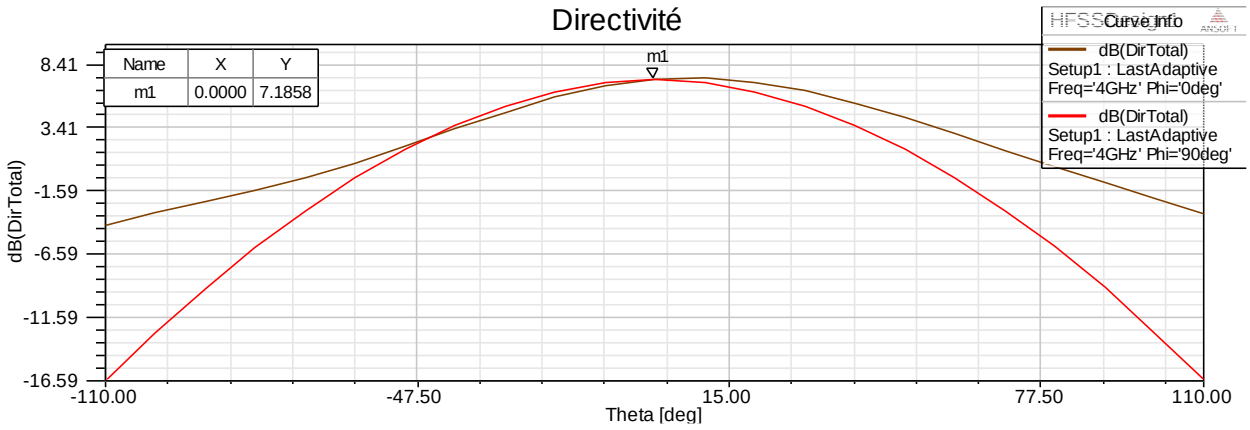


Figure III.14 : La directivité totale.

D'après le tableau et les résultats obtenus, on constate que le cas optimal a :

- Une bande passante de l'ordre de 127 Mhz.
- Une bonne adaptation avec un coefficient de réflexion de $S_{11} = -27.7480$.
- Un rapport d'onde stationnaire très faible $VSWR = 0.6434$.
- Un rendement moyen de $\eta = 47.45\ \%$.

III.5.5 Résultats de simulation pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$

Tableau III.3 : Résultats obtenus pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$.

Dans ce tableau on affiche les paramètres simulé des antennes par rapport à la fréquence :

Fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Champ E (dB)	BP(-10dB) (MHz)	Rendement (%)
2	-7.5818	7.7212	3.2313	-0.32579	-	57.98
2.4	-11.6100	4.5500	4.5135	1.2225	52.2	66.44
3	-19.2500	1.8000	5.1404	2.8688	198.6	67.56
3.5	-21.4312	1.3750	5.4080	2.9751	156.5	68.13
4	-15.1732	3.0594	5.4699	3.0815	142.4	70.4
4.5	-15.0765	3.0944	5.7352	3.2996	180.5	74.94
5	-19.1165	4.5800	6.2759	3.6227	284.9	75

III.5.6 Cas optimal pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$

Après une comparaison entre les cas au-dessus, on a trouvé que l'antenne le plus performant dans cette batch est celle de (3 GHz). On donne la représentation graphique de cette antenne :

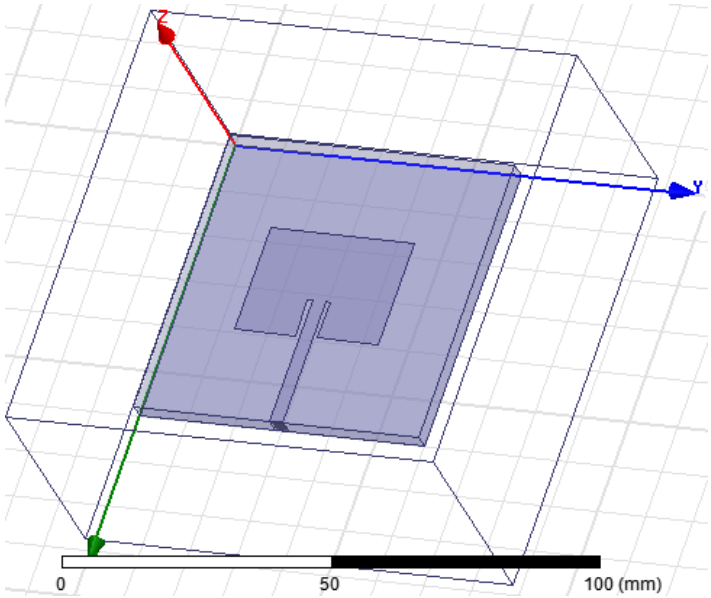


Figure III.15 : Conception d'antenne pour f = 3 GHz, h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 4.4$.

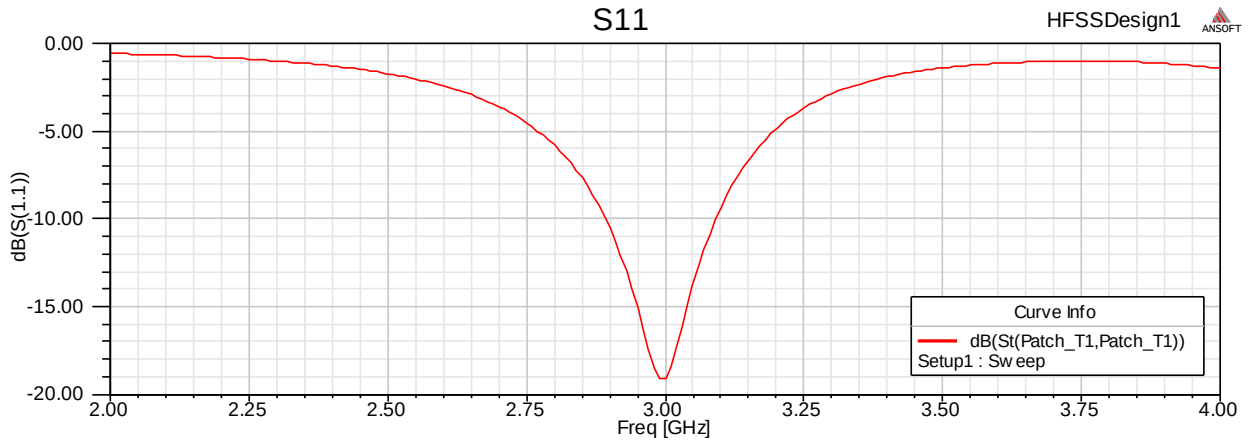


Figure III.16 : Le coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

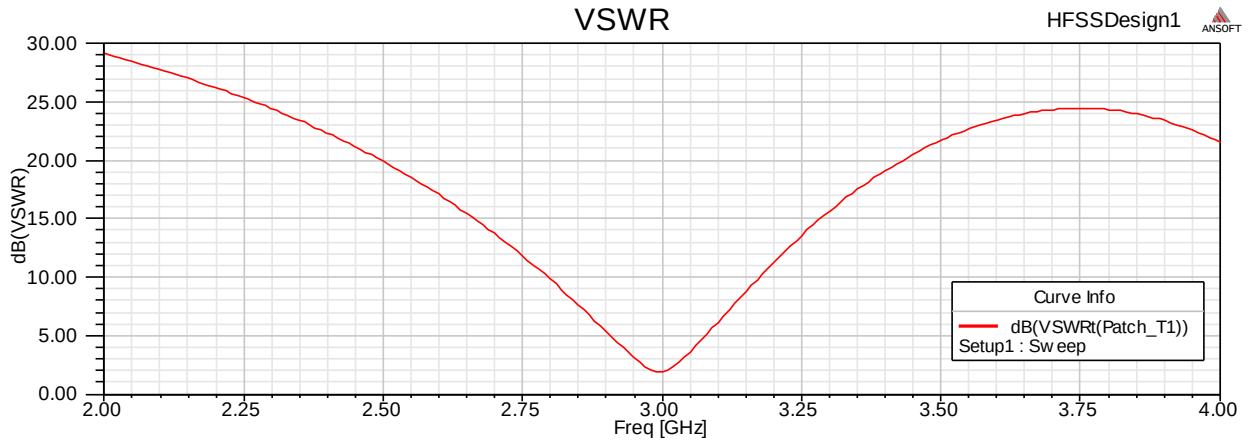


Figure III.17 : Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

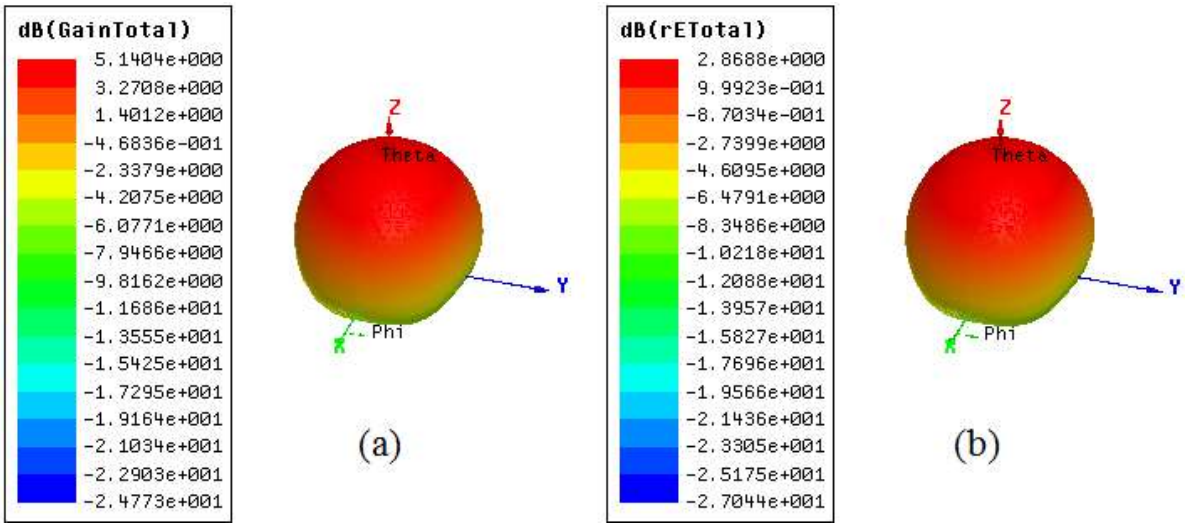


Figure III.18 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique.

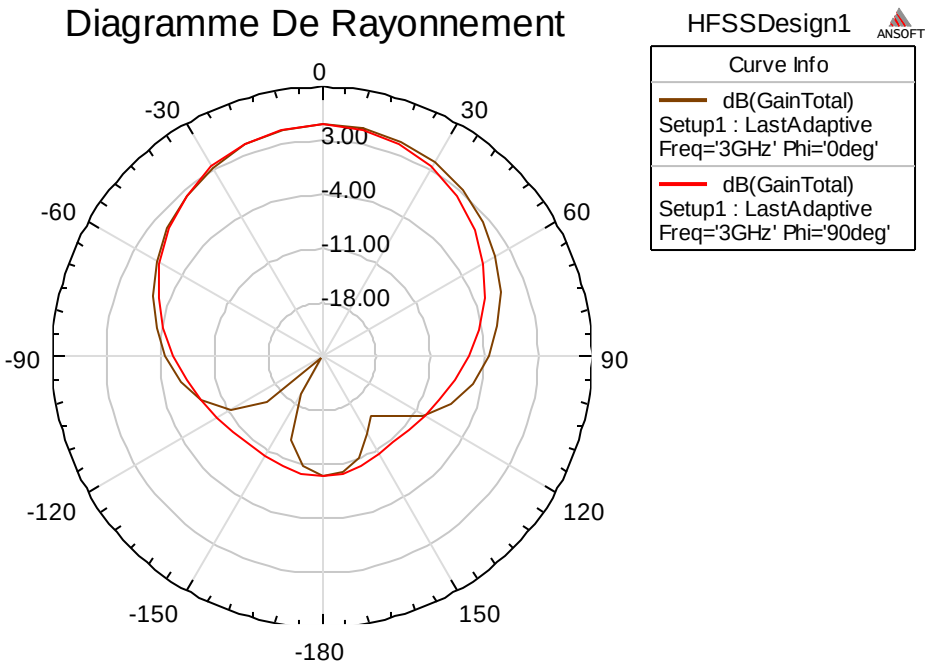


Figure III.19 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$.

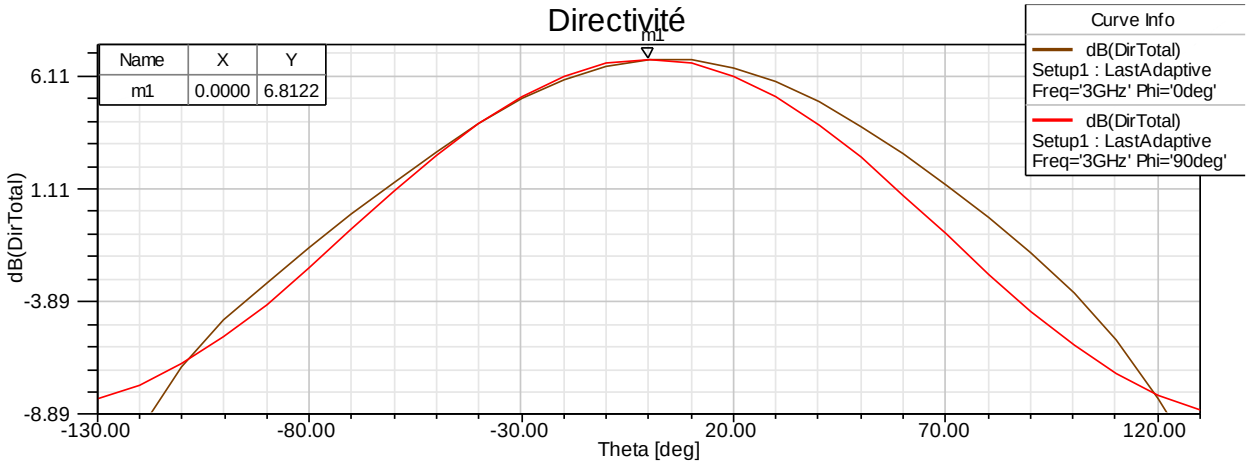


Figure III.20 : La directivité totale.

D'après le tableau et les résultats obtenus, on constate que le cas optimal a :

- Une bande passante large de l'ordre de 198.6 Mhz.
- Une adaptation acceptable avec un coefficient de réflexion de $S_{11} = -19.25$.
- Un rapport d'onde stationnaire un peu faible $VSWR = 1.8$.
- Un rendement de l'ordre de $\eta = 67.56\ \%$.

III.6 Simulation d'antenne avec le substrat RT_DUROID 5880

III.6.1 Calcul des dimensions pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$

Tableau III.4 : Largeur et Longueur du Patch et ligne d'alimentation par rapport à la fréquence.

Dans le tableau ci-dessous on a calculé les dimensions des Patchs en utilisent le 2^{eme} substrat :

Fréquence (GHz)	W (mm)	L (mm)	w_0 (mm)
2	59.25	49.82	3.702485
2.4	49.38	41.38	3.634463
3	39.5	32.92	3.511439
3.5	33.86	28.08	3.467356
4	29.63	24.45	3.295845
4.5	26.33	21.62	3.156805
5	23.7	19.36	3.004856

On remarque l'existence d'une relation corrélative inverse entre les Patchs et la fréquence, tel que lorsqu'on augmente la fréquence, la taille des Patchs diminués comme montre la figure :

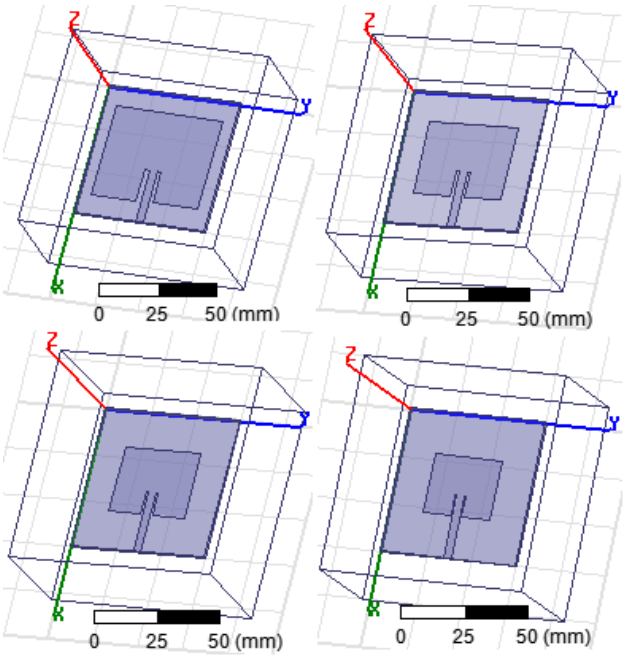


Figure III.21 : Influence de la fréquence sur les dimensions d'antennes.

III.6.2 Résultats de simulation pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$

Tableau III.5 : Résultats obtenus pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$.

On affiche les paramètres caractéristiques simulé des antennes par rapport à la fréquence :

Fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Champ E (dB)	BP(-10dB) (MHz)	Rendement (%)
2	-9.0116	6.4345	5.4278	-3.2861	-	86.38
2.4	-18.6500	2.0380	5.8233	-6.0333	31.6	78.38
3	-12.2813	4.3168	7.4437	3.9753	28.1	92.56
3.5	-20.7000	1.6068	7.7272	4.9240	60.2	93.13
4	-27.0750	0.7773	7.9463	5.5471	84.3	94.63
4.5	-29.4816	0.5833	8.1261	5.8709	104.3	96.14
5	-34.1745	0.3398	8.2645	6.0376	128.4	97.06

III.6.3 Cas optimal pour h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$

Après une comparaison entre les cas au-dessus, on a trouvé une antenne très performante avec une fréquence de résonance (5 GHz). On donne la représentation graphique de cette antenne :

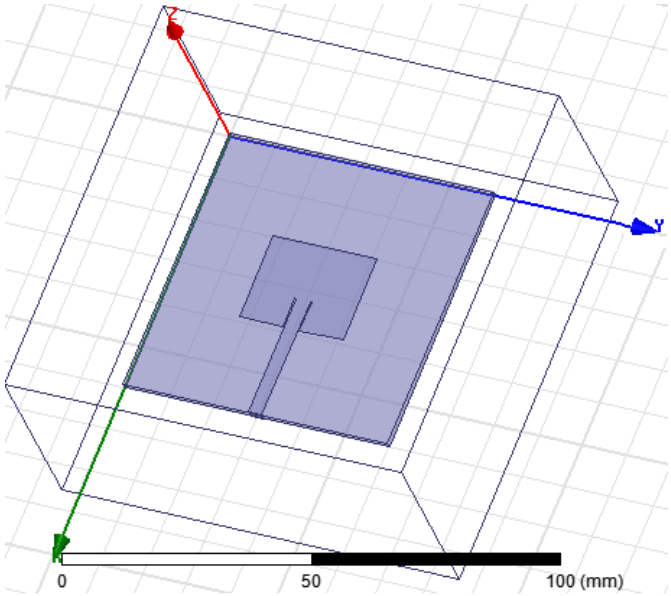


Figure III.22 : Conception d'antenne pour f = 5 GHz, h = 1.5 mm et $\varepsilon_r = 2.2$.

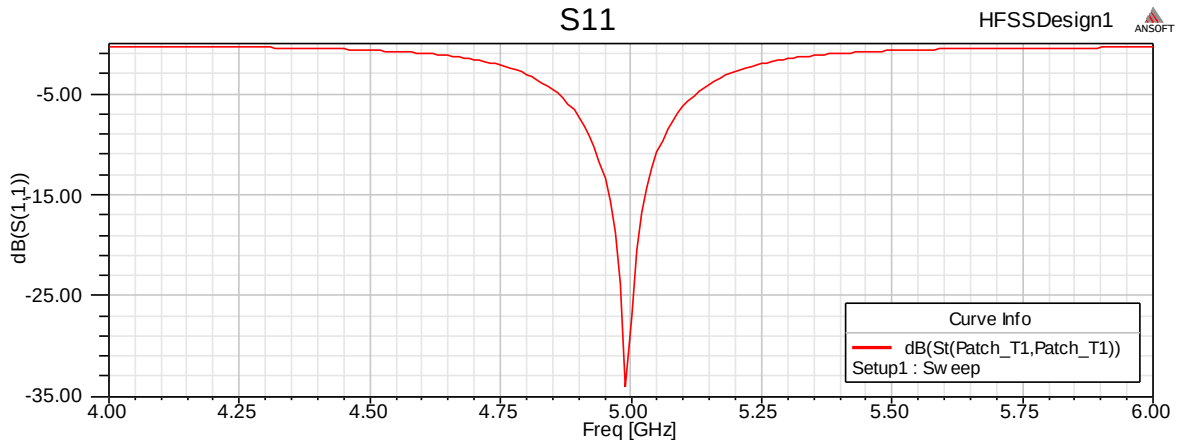


Figure III.23 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

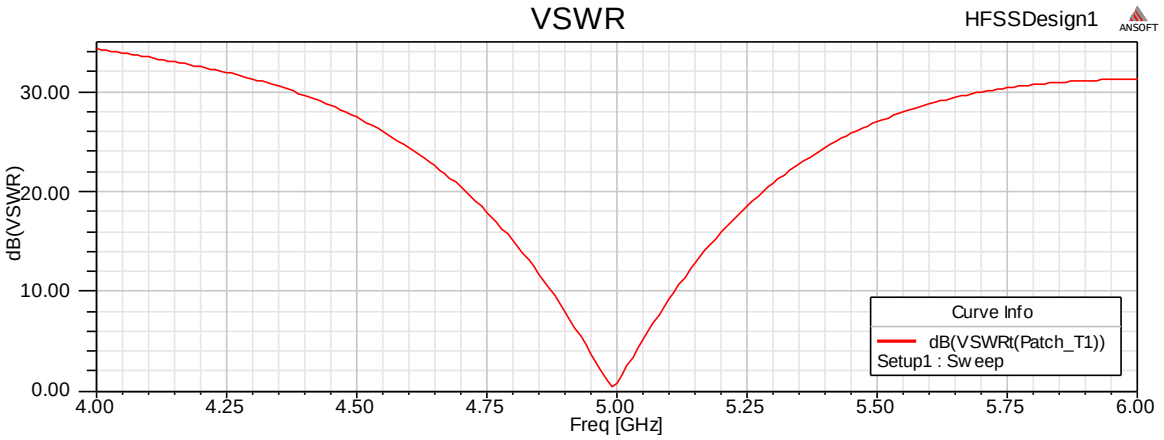


Figure III.24 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

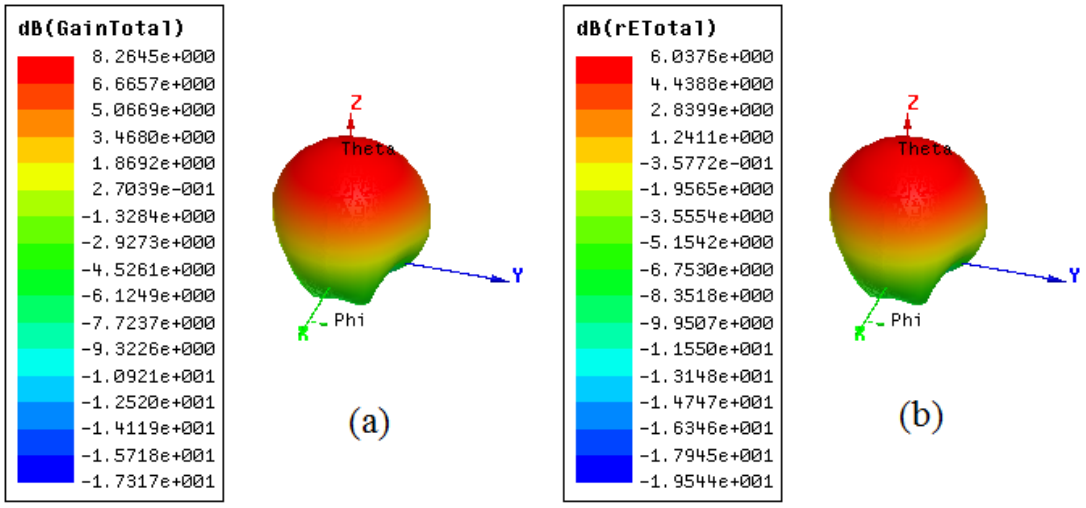


Figure III.25 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique.

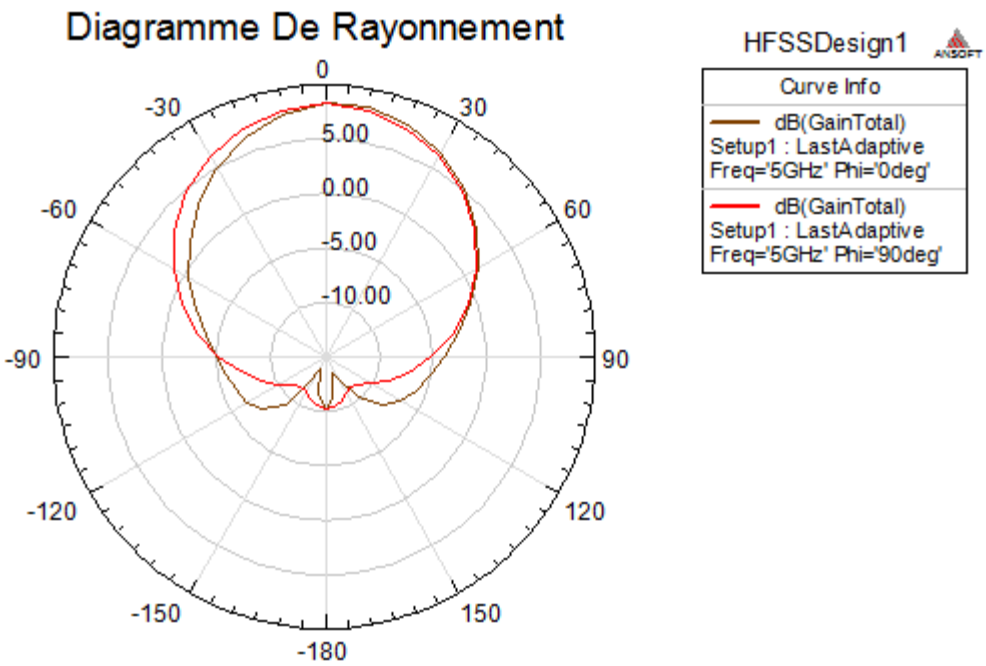


Figure III.26 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$.

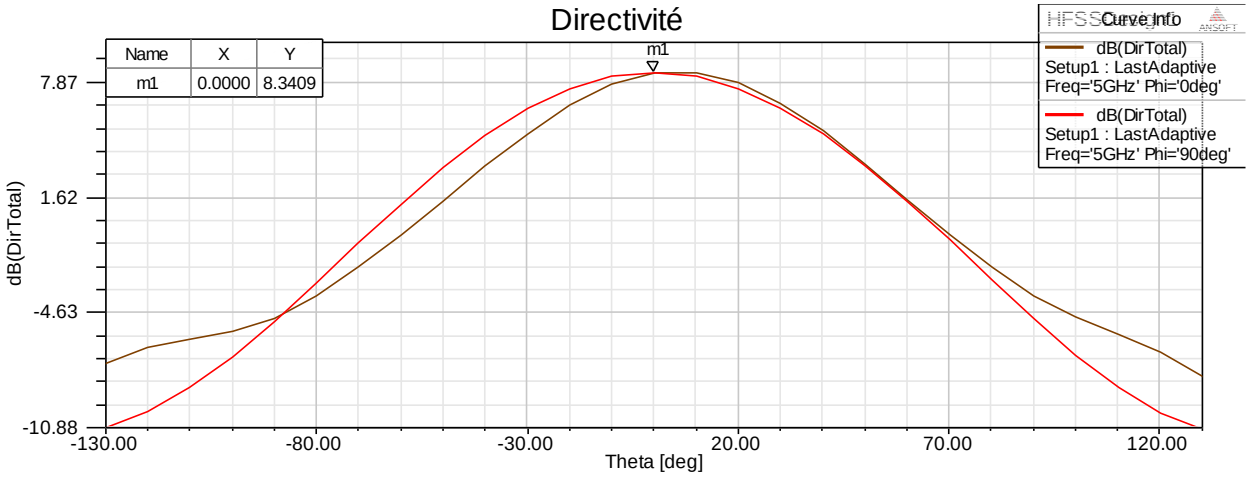


Figure III.27 : Directivité totale.

D'après le tableau et les résultats obtenus, on constate que le cas optimal a :

- Une bande passante moyenne de l'ordre de 128.4 Mhz.
- Une très bonne adaptation avec un coefficient de réflexion de $S_{11} = -34.1745$.
- Un rapport d'onde stationnaire très faible $VSWR = 0.3398$.
- Un rendement presque optimal $\eta = 97.06\ \%$.

III.6.4 Résultats de simulation pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$

Tableau III.6 : Résultats obtenus pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$.

On a changé l'épaisseur du substrat et on a remarqué un changement dans les performances comme montre le tableau au-dessous :

Fréquence (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	Champ E (dB)	BP(-10dB) (MHz)	Rendement (%)
2	-6.6692	8.7280	5.8374	-1.4324	-	94.32
2.4	-6.0201	9.5430	6.6803	-1.4161	-	95.26
3	-8.1905	7.1428	7.5774	3.1043	-	98.36
3.5	-20.4187	1.6689	7.8076	5.0800	143.1	98.28
4	-11.2200	4.9246	7.9517	5.2914	81.8	98.17
4.5	-16.7563	2.5650	8.0522	5.3864	204.5	100
5	-8.8437	6.5723	7.9138	4.7074	-	100

III.6.5 Cas optimal pour h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$

Après une comparaison entre les cas au-dessus, on a trouvé que l'antenne le plus performant dans la dernière batch est celle de (3.5 GHz). On donne la représentation de cette antenne :

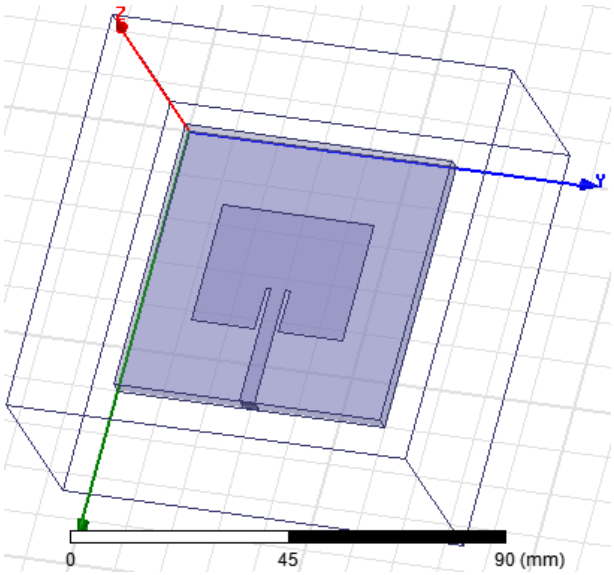


Figure III.28 : Conception d'antenne pour f = 3.5 GHz, h = 3.6 mm et $\varepsilon_r = 2.2$.

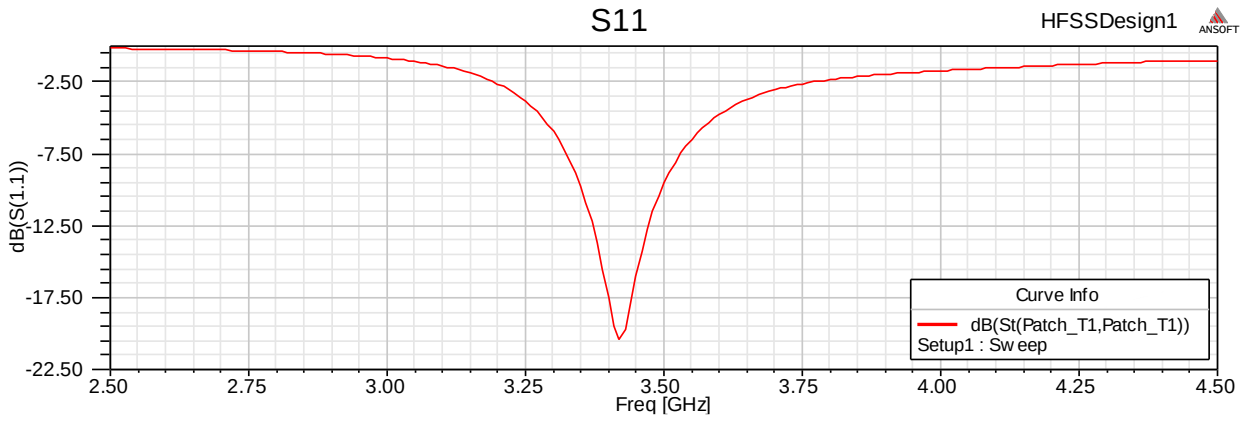


Figure III.29 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

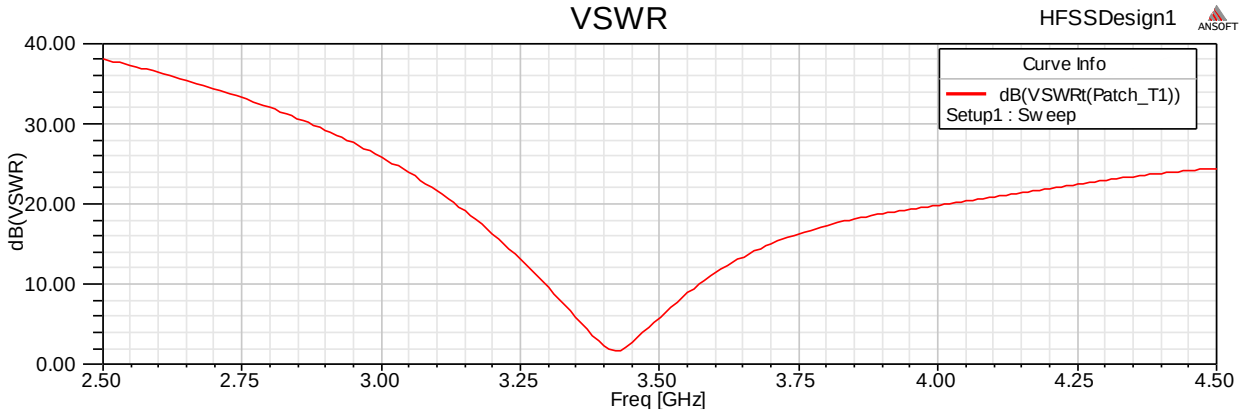


Figure III.30 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

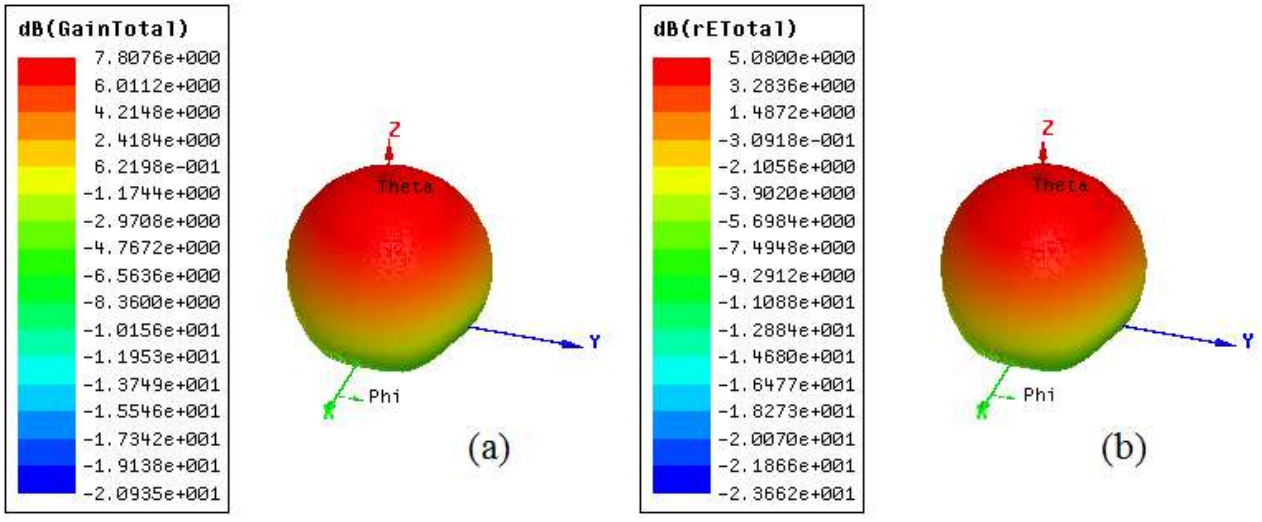


Figure III.31 : Diagramme de rayonnement 3D : (a) Gain, (b) Champ électrique.

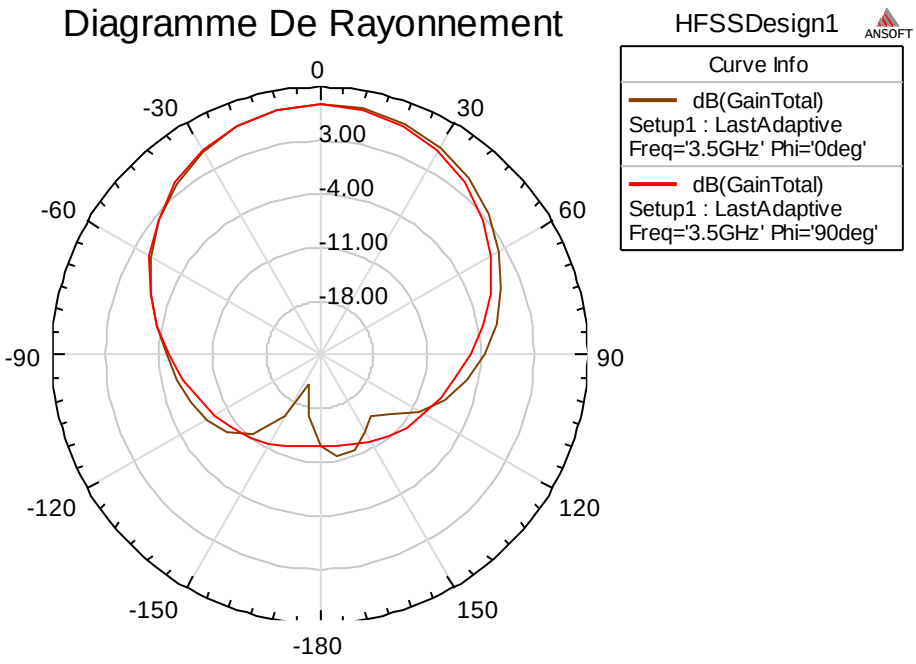


Figure III.32 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$.

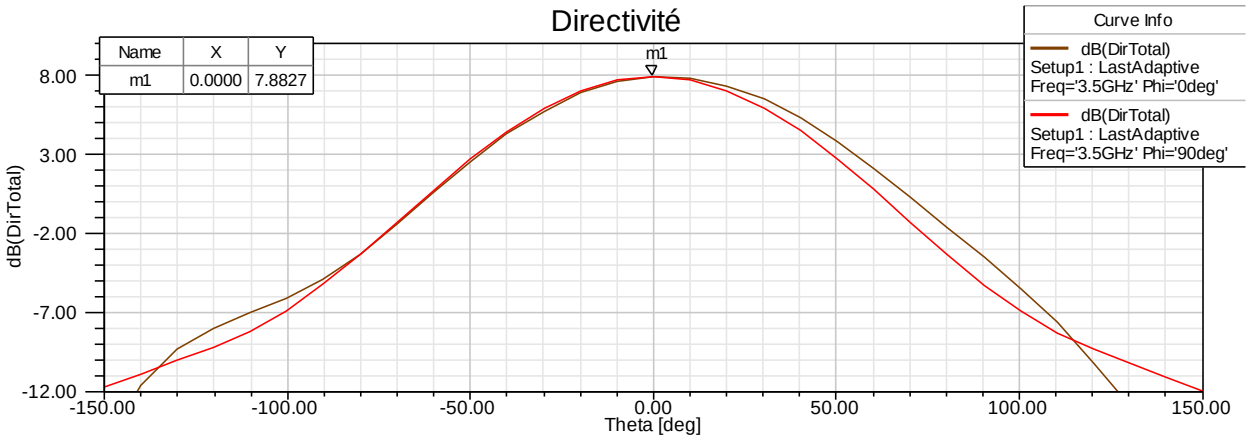


Figure III.33 : Directivité totale.

D'après le tableau et les résultats obtenus, on constate que le cas optimal a :

- Une bande passante de l'ordre de 143.1 Mhz.
- Une adaptation acceptable avec un coefficient de réflexion de $S_{11} = -20.4187$.
- Un rapport d'onde stationnaire faible $VSWR = 1.6689$.
- Un bon rendement de $\eta = 98.28\ \%$.

Tableau III.7 : Résultats obtenus pour les cas optimal de chaque substrat.

Après une étude approfondie des tous les cas on a trouvé que les meilleur résultats sont les suivant :

Fréquence (GHz)	Matériau diélectrique	Epaisseur Substrat	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	BP (MHz)	Directivité (dB)
4	FR_EPOXY	1.5	-27.74	0.6434	4.114	127	7.185
3	FR_EPOXY	3.6	-19.25	1.8	5.140	198.6	6.812
5	RT_DUROID	1.5	-34.17	0.339	8.264	128.4	8.34
3.5	RT_DUROID	3.6	-20.41	1.668	7.807	143.1	8

Après une comparaison entre les performances de tous les itérations, on a trouvé l'antenne optimal en utilisent le RT-DUROID et une fréquence de (5 GHz) avec une épaisseur de (1.5 mm) Pour cela on a basé sur cette antenne pour l'élaboration des différents réseaux.

III.7 Simulation des réseaux d'antenne micro-rubans

Pour cette partie de simulation on construit un réseau d'antennes de 2,4 et 6 éléments rayonnant et on introduit un nouveau paramètre, c'est l'espacement entre les Patchs E.

III.7.1 Simulation des réseaux avec 2 Patchs

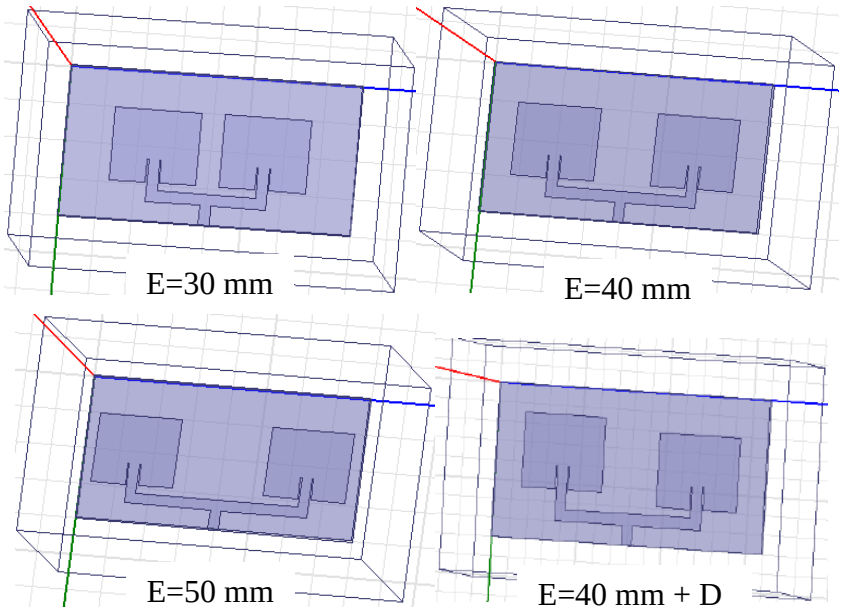


Figure III.34 : Conception des réseaux avec les différents espacements (2 Patchs).

III.7.2 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs

Dans ce cas on varie sur la distance entre les éléments rayonnants pour un réseau de 2 patchs et on remarque que l'espacement de 40 mm plus un petit décalage nous donne le bon résultat.

Tableau III.8 : Influence de la position des patchs sur les performances des réseaux (2 Patchs).

Position des Patchs	Espacement (mm)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	BP (MHz)	Directivité (dB)	Rendement (%)
Position 1	30	-5.89	9.715	9.66	-	9.72	98.5
Position 2	40	-24	1.098	9.94	145	10.32	91.5
Position 3	50	-9.03	6.416	10.88	-	10.94	98.6
Position 4	40 + D	-24	1.098	10.28	177	10.32	97.7

III.7.3 Cas optimal (2 Patchs) avec un espacement de 40 mm + Décalage

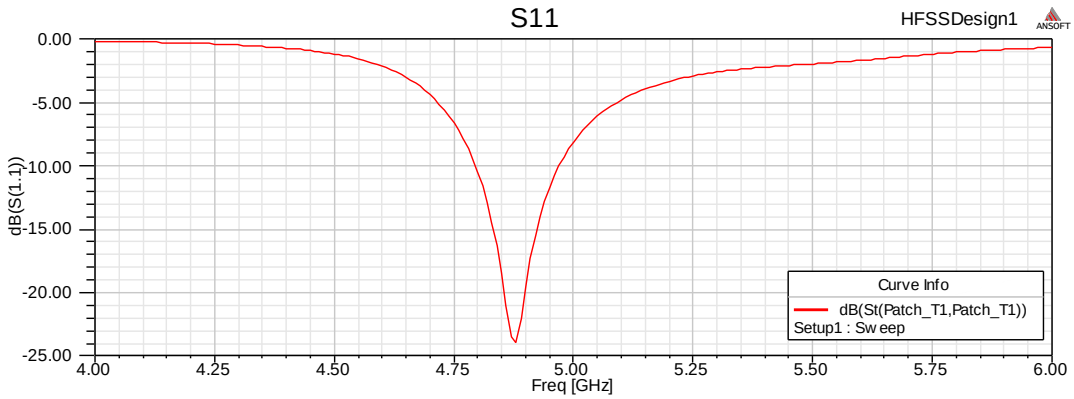


Figure III.35 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

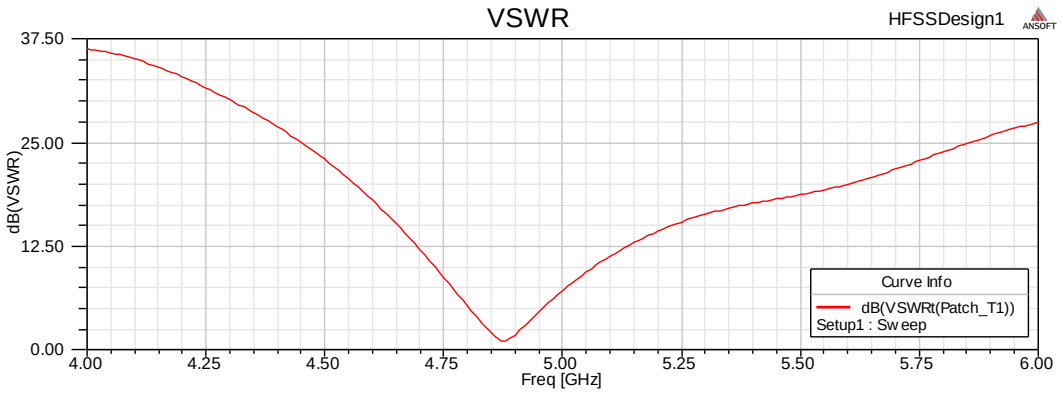


Figure III.36 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

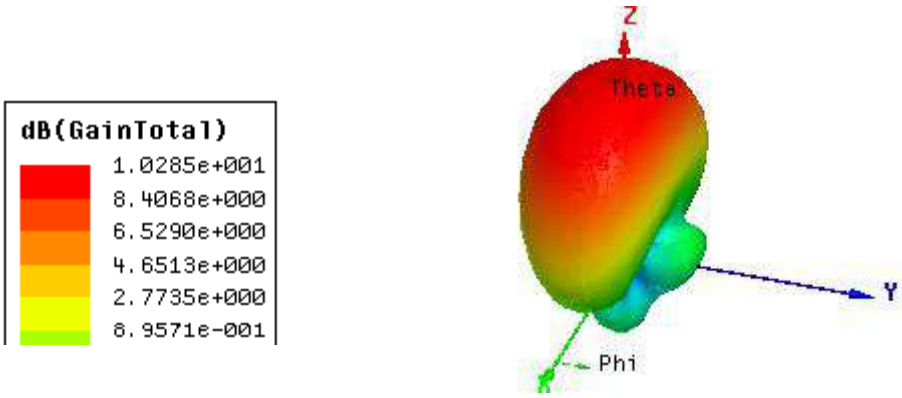


Figure III.37 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain.

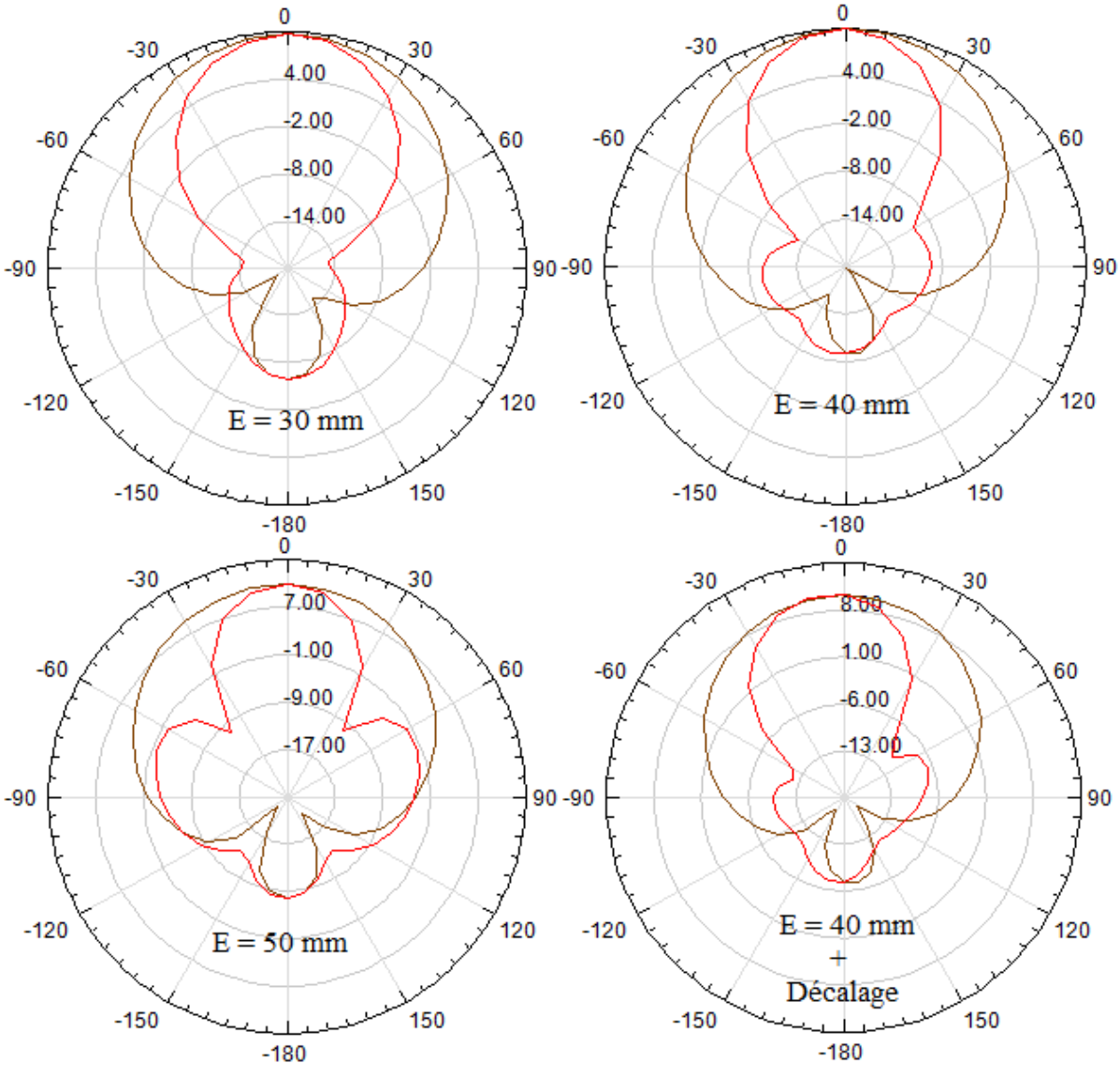


Figure III.38 : Influence d'espacement des patchs sur les diagrammes de rayonnement.

III.7.4 Simulation des réseaux avec 4 Patches

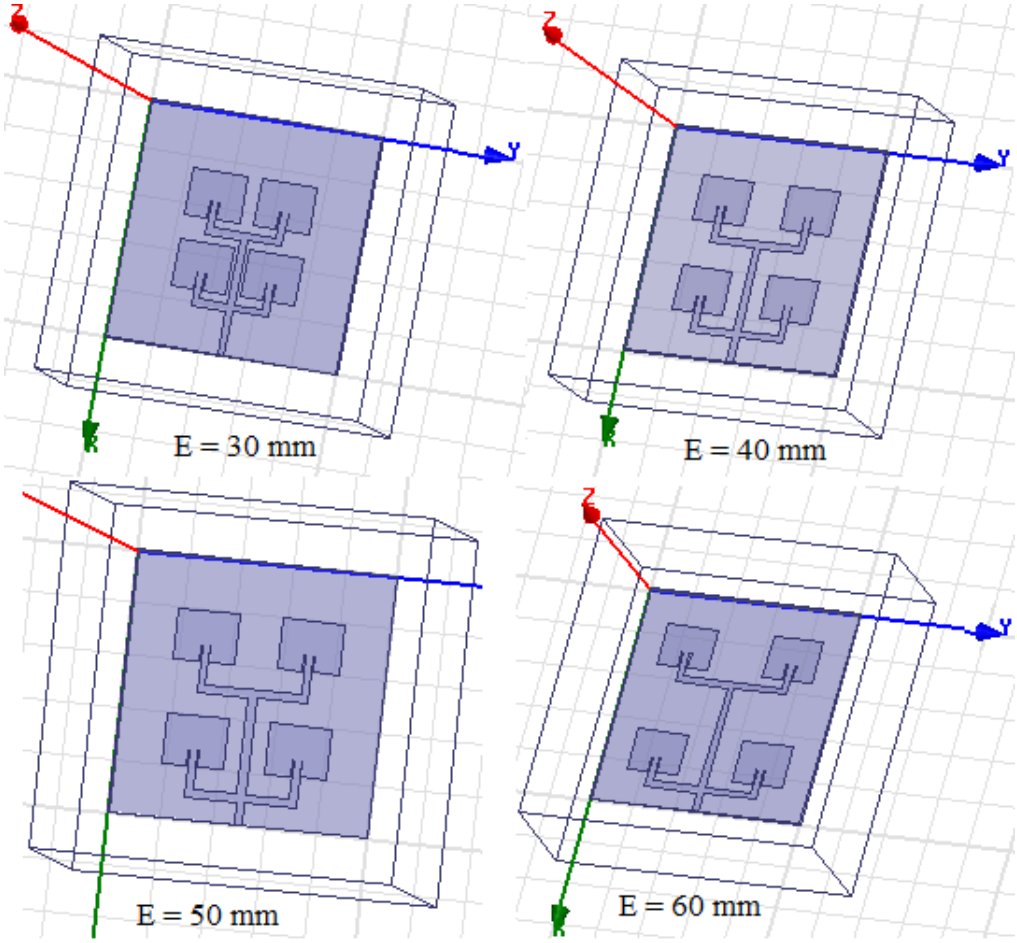


Figure III.39 : Conception des réseaux avec les différents espacements (4 Patchs).

III.7.5 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs

Dans ce cas on augmente le nombre des Patchs à 4 avec les mêmes espacements E et on remarque que le meilleur résultat se trouve aussi pour l'espacement de 40 mm.

Tableau III.9 : Influence de la position des patches sur les performances des réseaux (4 Patchs).

Position des Patchs	Espacement (mm)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	BP (MHz)	Directivité (dB)	Rendement (%)
Position 1	30	-23.72	1.133	10.86	103.8	10.35	97.74
Position 2	40	-26.33	0.838	13.75	123.4	13.75	96.53
Position 3	50	-12.5	4.198	13.7	87.7	13.63	98.67
Position 4	60	-5.29	10.59	12.74	-	12.53	93.22

III.7.6 Cas optimal (4 Patches) avec un espacement de 40 mm

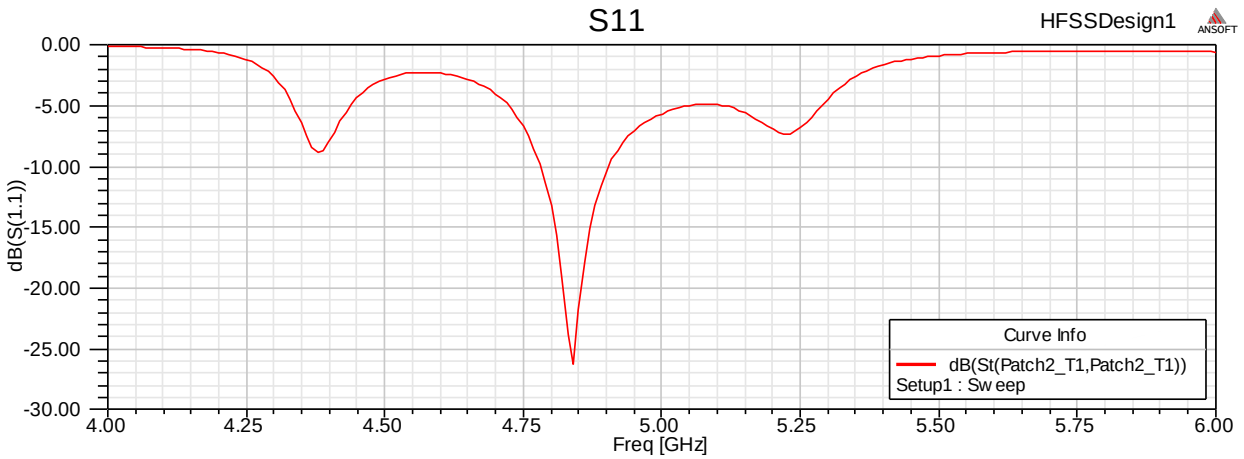


Figure III.40 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

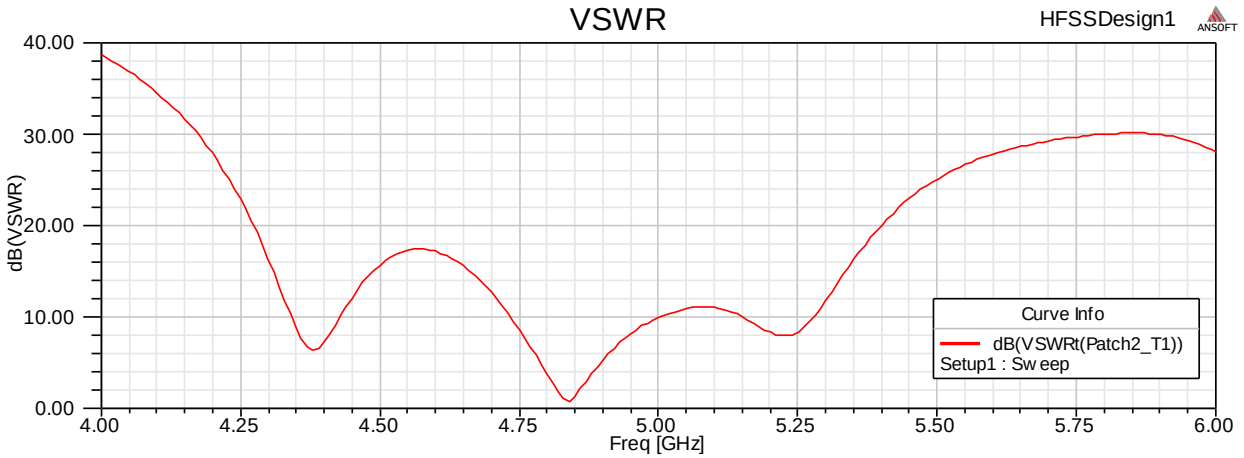


Figure III.41 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

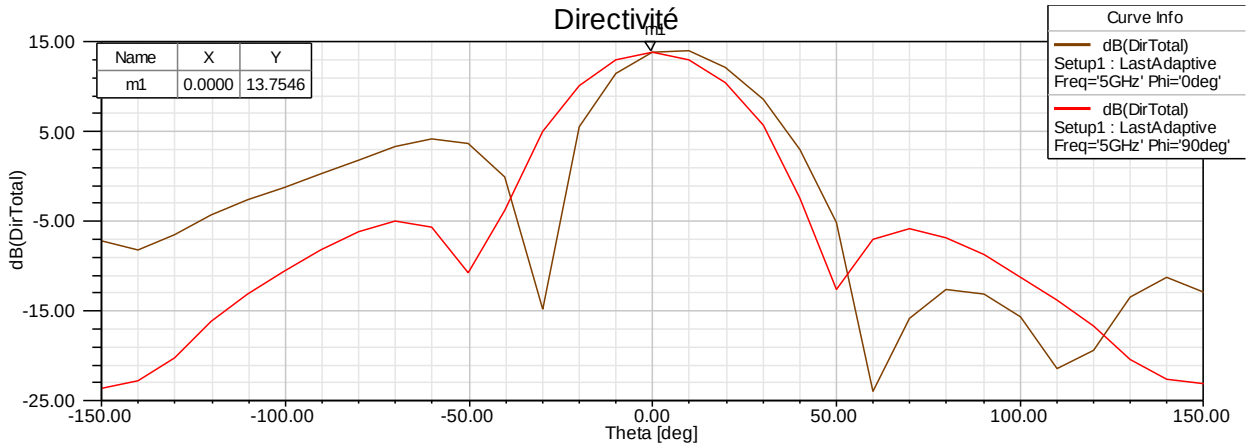


Figure III.42 : Directivité totale (4 Patches).

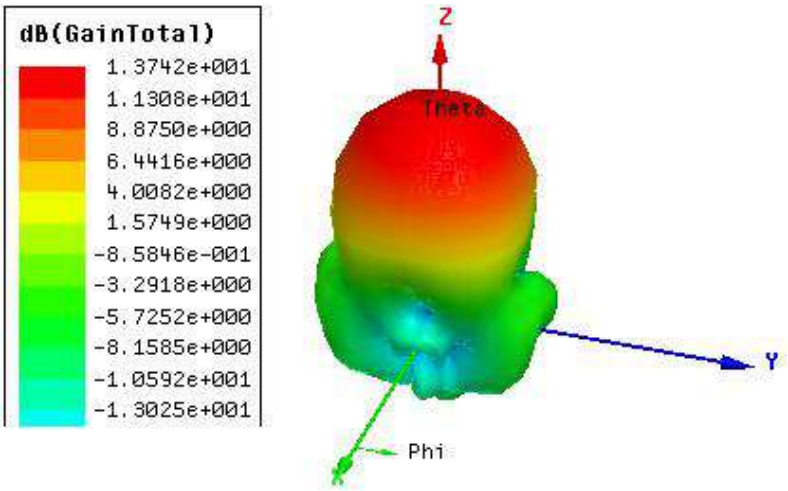


Figure III.43 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain.

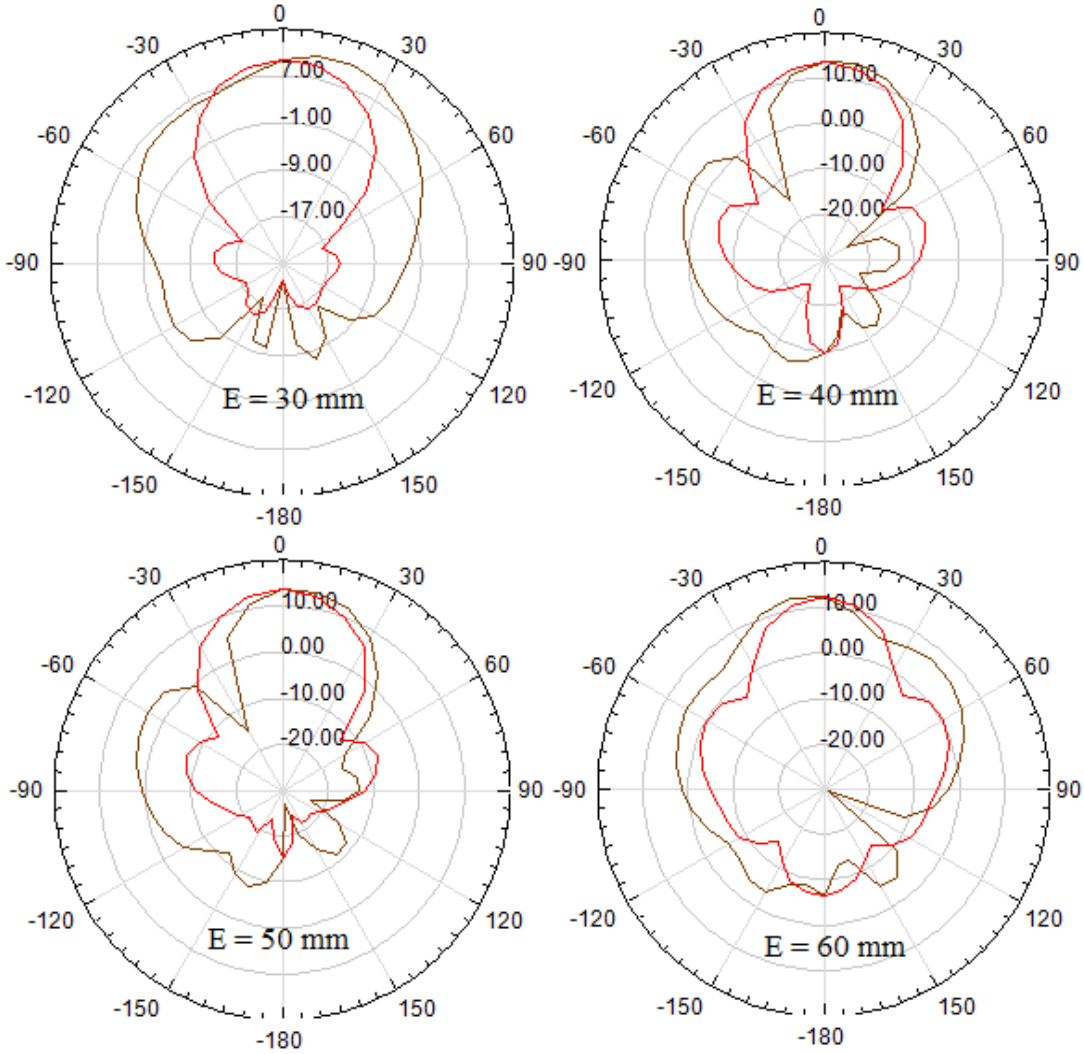


Figure III.44 : Influence d'espacement des patches sur les diagrammes de rayonnement.

III.7.7 Simulation des réseaux avec 6 Patches

Dans ce cas on travaille sur les mêmes espacements E de 30, 40, 50 et 60 mm, mais on augmente le nombre de Patchs a 6, on donne la représentation graphique de ces réseaux:



Figure III.45 : Conception des réseaux avec les différents espacements (6 Patchs).

III.7.8 Résultats de simulation pour les différentes positions des patchs

D'après le tableau ci-dessous, les résultats de simulation des réseaux pour 6 Patchs sont affichés, les performances ont augmenté mais on remarque des déformations dans les figures.

Tableau III.10 : Influence de la position des patches sur les performances des réseaux (6 Patchs).

Position des Patchs	Espacement (mm)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	BP (MHz)	Directivité (dB)	Rendement (%)
Position 1	30	-24.66	1.016	10.62	27.8	9.70	96.54
Position 2	40	-20.33	1.676	14.73	136	13.4	94.57
Position 3	50	-14.04	3.493	12.87	21.3	9.92	93.53
Position 4	60	-32.38	0.417	12.6	59.7	5.87	94.24

III.7.9 Cas optimal (6 Patchs) avec un espacement de 40 mm

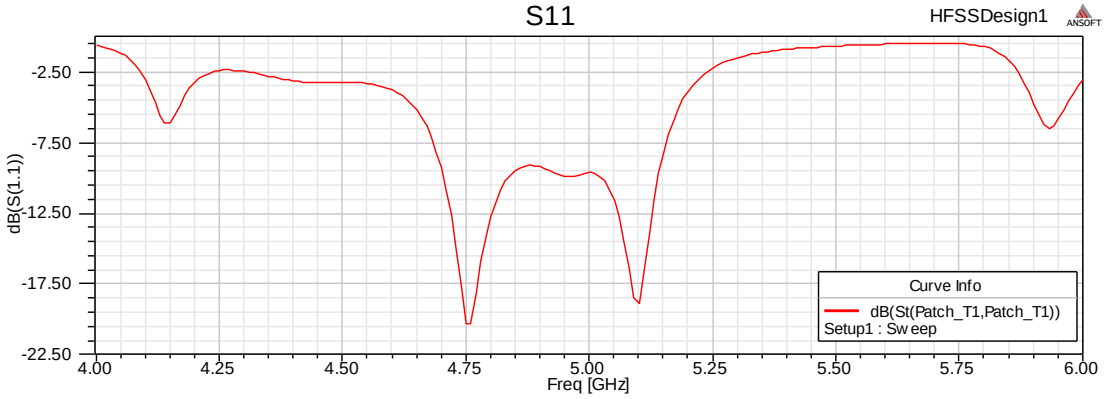


Figure III.46 : Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence de résonance.

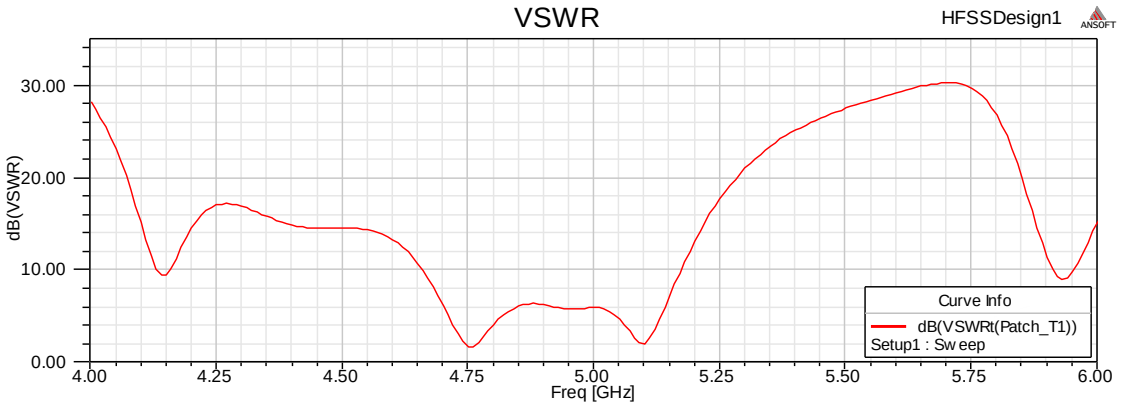


Figure III.47 : Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence de résonance.

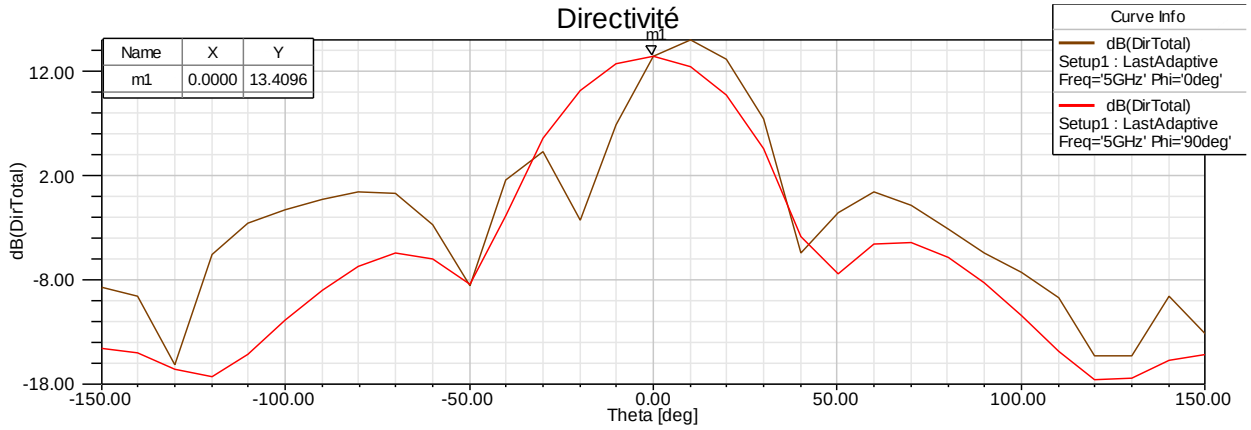


Figure III.48 : Directivité totale (6 Patchs).

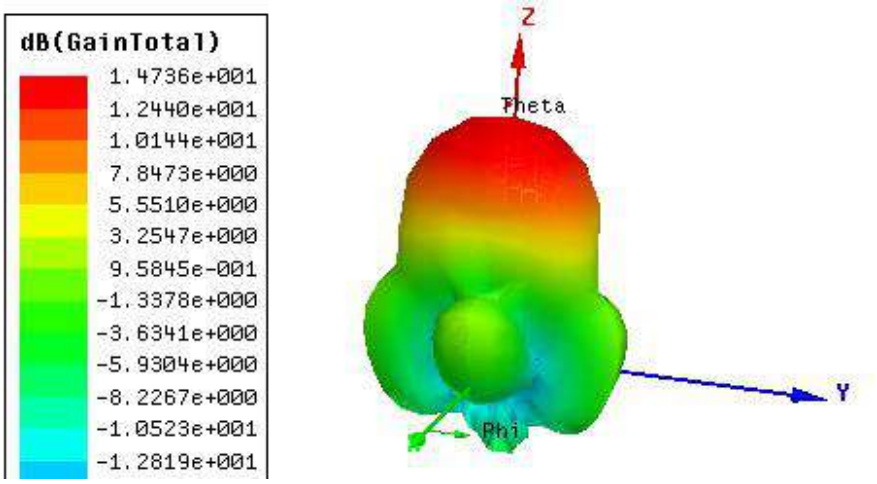


Figure III.49 : Diagramme de rayonnement 3D : Gain.

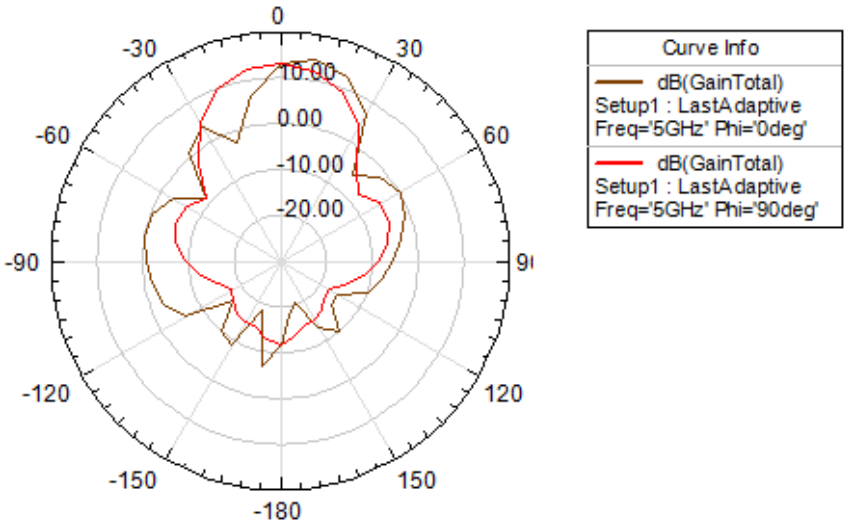


Figure III.50 : Diagramme de rayonnement suivant l'angle $\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$.

III.8 Discussion et interprétation des résultats

III.8.1 Choix des paramètres et matériaux

a- Matériaux diélectriques : On a choisi deux substrats à base de verre renforcé (FR4_EPOXY et RT_DUROID 5880) pour leur faible permittivité 4.4 et 2.2 respectivement et leur disponibilité dans le marché.

b- Epaisseur de substrat : Pour les réseaux d'antennes 'patch' utilisées dans les systèmes de télécommunication, il est essentiel que l'antenne soit peu encombrante par conséquent la hauteur du substrat doit être toujours petite (quelques millimètres).

c- Bande fréquentielle : On a choisi la bande [2 GHz à 5 GHz] car un grands nombre des systèmes de communication fonctionnent dans les limites de cette bande.

d- Conductivité : Le cuivre a la conductivité la plus élevée de tous les métaux non précieux et celle qui est 65% plus élevée que l'aluminium. Ceci, combiné à sa ductilité élevée, sa résistance moyenne, sa facilité de jonction et sa bonne résistance à la corrosion, font du cuivre le premier choix comme conducteur pour les applications électriques.

e- Alimentation : Il s'agit d'une technique d'alimentation facile, car elle offre une facilité de fabrication et une simplicité de modélisation ainsi qu'une adaptation d'impédance. Ce type d'agencement d'alimentation présente l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane. Une découpe en médaillon peut être incorporée dans le patch afin d'obtenir une bonne adaptation d'impédance sans avoir besoin d'un élément d'adaptation supplémentaire. Ceci est réalisé en contrôlant correctement la position de l'encart.

f- Dimensions des réseaux d'antennes : On ne peut pas choisir des dimensions aléatoirement car elles sont liées avec la fréquence et la permittivité déjà choisies.

III.8.2 Choix de l'antenne optimal d'un seul Patch

Après de nombreux essais, on a accumulé les meilleurs résultats dans le tableau ci-dessus (Tableau III.7), comme vous pouvez le voir, les meilleurs cas sont généralement similaires, mais on a essayé de choisir le cas le plus arrondi dans la majorité des résultats pour l'utiliser dans la simulation des réseaux d'antenne.

III.8.3 Performance des réseaux d'antennes

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'autre types d'antennes, l'une des solutions trouvée consiste à utiliser des réseaux de ces antennes. On a commencé avec un réseau à 2 Patchs, et on peut voir une augmentation dans le gain (8.26 dB à 10.88 dB), la bande passante (128.4 MHz à 177 MHz) et la directivité (8 dB à 10.32 dB). Deuxièmement on crée un réseau de 4 Patchs, on peut voir ici un peu de déformation dans les graphes mais il y a toujours une augmentation dans le gain (10.88 dB à 13.74 dB) et la directivité (10.32 dB à 13.75 dB). Enfin on a crée un réseau de 6 Patchs. De ce fait on peut voir une mauvaise déformation et une chute dans les performances du réseau, c'est tout à fait normal car lorsqu'on augmente le nombre de Patchs il faut aussi augmenter la fréquence et dans notre projet on a utilisé une bande limitée entre 2 GHz et 5 Ghz. L'une des antennes les plus utilisées dans l'exploration spatiale est un réseau d'antenne imprimé avec 32×32 Patches et une fréquence de résonance de 38 GHz (Courtesy Ball Division).

Tableau III.11 : Comparaison des performances entre les cas optimaux étudiés.

Nombres de Patchs	Espacement (mm)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	Gain (dB)	BP (MHz)	Directivité (dB)	Rendement (%)
1	-	-34.17	0.339	8.264	128.4	8.34	97.06
2	40	-24	1.098	10.28	177	10.32	97.7
4	40	-26.33	0.838	13.75	123.4	13.75	96.53
6	40	-20.33	1.676	14.73	136	13.4	94.57

III.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre on a commencé par acquérir des informations de base sur le logiciel de simulation. Il s'agit du HFSS. Puis on a cherché une antenne micro-ruban optimale par l'utilisation des différents substrats, fréquences, et dimensionnements pour atteindre une bonne adaptation avec une bande passante relativement large. Deuxièmement, on a construit un réseau d'antenne de 2,4 et 6 Patchs basé sur l'antenne optimal déjà acquise, on a manipulé l'espacement des Patchs jusqu'à l'obtention d'un meilleur positionnement. Enfin, on a discuté l'influence de changement des paramètres d'antenne et les performances de ces réseaux.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Bien que les antennes Patch présentent un grand intérêt grâce à leur commodité et leur compatibilité avec les instruments de télécommunication les plus récents, ce type d'antenne rencontre toujours des problèmes, et notamment le gain faible et la bande passante limitée. On a d'ailleurs essayé de travailler sur l'optimisation afin d'obtenir les meilleures performances avec les moindres coûts. Le présent travail nous a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- Le changement des paramètres (longueur, largeur et l'épaisseur) dépend de la fréquence utilisé. Dans notre cas on a utilisé la bande des fréquences ISM.
- La bande passante est proportionnelle à l'épaisseur du substrat.
- Les substrats avec le constant diélectrique le plus faible donne des meilleures directivités.
- Quand la permittivité diélectrique augmente, la taille de Patch diminue.
- Selon le diagramme de rayonnement, le Patch est une antenne directive.
- Lorsqu'on augmente le nombre de patchs dans un réseau, le gain augmente.
- L'espacement entre les patchs doit être entre λ et $1/2\ \lambda$.
- On a trouvé de bons résultats pour un espacement de $0.6\ \lambda$.
- L'augmentation de l'espacement entre les éléments rayonnants (Patch) influe le diagramme de rayonnement par la création des lobes secondaires.
- Lorsqu'on augmente le nombre des patchs, il faut aussi augmente la fréquence de fonctionnement en parallèle. Sinon les résultats vont être dégradés.

Au départ on a utilisé Excel pour les calculs afin de déterminer les dimensions du patch mais après, on a exploité une application disponible sur Android qui s'appelle (Making Waves), elle nous a donnée des valeurs très précises.

Le Patch peut s'apprêter à de nombreux domaines très utiles. A l'avenir dès que l'opportunité se présentera nous la saisirons pour faire une réalisation pratique pour ce projet.

Bibliographie

[1] Odile Picon et coll, "*Les antennes Théorie, conception et application*", Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054245-1.

[2] Chen, Zhi Ning, and Kwai Man Luk. "*Antennas for base stations in wireless communications*". 2009, ISBN 978-0-07-161289-0.

[3] Alexandre Boyer, "*Antennes*", Support de cours Enonce de travaux dirigés, Institut National des sciences Appliquées de Toulouse.

[4] P. F. Combes, "*Circuits Passifs, Propagation, Antennes, Micro-ondes*" Tome 2, Dunod, 1997.

[5] Grenier, Dominic. "*Antennes et propagation radio*" Cours, Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Québec, été (2012).

[6] Ulaby, Fawwaz T. "*Fundamentals of applied electromagnetics* (1999 revised and enlarged edition) (Book)." Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc, 1999. (1999).

[7] Carver, Keith, and James Mink. "*Microstrip antenna technology*" IEEE transactions on antennas and propagation 29.1 (1981).

[8] Wang, Daihua, et al. "*A compact annular ring Microstrip antenna for WSN applications*" Sensors 12.7 (2012): 8663-8674.

[9] N. Markov, "*Antenna EM modeling with Matlab*", Josh Wiley & sons, N.J 2002.

[10] Punit, Nakar S. "*Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for use in Wireless/Cellular Devices*" The Florida State University. Diss. Thesis, 2004.

[11] Gujral, Manik, et al. "*Bandwidth improvement of Microstrip antenna array using dummy EBG pattern on feedline*" Progress in Electromagnetics Research 127 (2012): 79-92.

[12] Balanis, Constantine A. "*Antenna theory: analysis and design*" John wiley & sons, 2016.

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

[14] Srivastava, Amba, and Nandita Pradhan. "*Analysis of Different Substrate Material & Frequency on Microstrip Patch Antenna*" International Journal of Electronics, Electrical and Computational System 6.2 (2017): 58-64.

[15] Yaghjian, Arthur. "*An overview of near-field antenna measurements*" IEEE Transactions on antennas and propagation 34.1 (1986): 30-45.

[16] Bisht, Sourabh, et al. "*Study the various feeding techniques of microstrip antenna using design and simulation using CST microwave studio*" International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 4.9 (2014): 318-324.

[17] A. M. Kabir, A.R. Yauri, "*Review of Feeding Techniques for Microstrip Patch Antenna*" International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Volume 178 – No. 27, June 2019.

[18] Pozar, David M. "*Microstrip antennas*" Proceedings of the IEEE 80.1 (1992): 79-91.

[19] Singh, Indrasen, and V. S. Tripathi. "*Micro strip patch antenna and its applications: a survey*" Int. J. Comp. Tech. Appl 2.5 (2011): 1595-1599.

[20] Rodney B Waterhouse, RB Waterhouse, Rod Waterhouse. "*Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*". Springer 1edition 2013.

[21] Thierry KOLECK, "*La modélisation d'antenne pour applications spatiales*", CNES.

[22] 'Ansoft' HFSS Official guide 2013.

[23] Khraisat, Yahya SH, and Melad M. Olaimat. "*Comparison between rectangular and triangular patch antennas array*." 2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT). IEEE, 2012.