

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : SYSTEME DE TELECOMMUNICATION (STLC)

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : BENKHERBACHE ahlam

SALEM asma

Intitulé

Etude D'un Réseau D'antenne Patch
Rectangulaire A Bande Interdite
Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La
Bande X

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. ZERDOUMI Zahra	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. KHALFA Ali	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا
عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ "

(صدق الله العظيم)

الآية 32 من سورة البقرة

Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier Le Bon Dieu Tout Puissant et Miséricordieux de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a accordé tout au long de notre étude.

Nous ne pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur Dr. Fadila BENMEDDOUR, afin de la remercier pour sa sympathie sa patience, ses encouragements ses conseils, son aide, ainsi que pour le temps qu'elle a consacrée pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence totale, au cours de cette modeste étude.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'examen et l'étude de notre travail. Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département d'électronique qui nous ont encouragé à donner le meilleur de nous-mêmes en nous assurant une formation aussi meilleure que possible .Un remerciement spécial aux Étudiants du département de l'Électroniques et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Grand Merci

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

À ceux qui sont les plus chères au monde, nos parents, à qui nous n'arriverons jamais à exprimer notre gratitude et notre reconnaissance. Pour leur amour et leur soutien tout au long de nos études.

À nos frères et sœurs

À nos Familles

À ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

À Tous nos proches, nos amies et nos collègues.

Nous dédions ce travail

Ahlam et Asma

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Liste Des Figures	xii
Liste Des Tableaux	xv
Liste Des Abréviations.....	xvi
Résumé.....	xiii
ABSTRACT	xiii
ملخص	xiii
Introduction Générale.....	2
<u>Chapitre 01: les réseaux d'antennes imprimées</u>	
I. .1. Introduction	6
I.2. Définition de réseau d'antenne	6
I.3 Réseau d'antennes imprimées	6
I.4. Les antennes imprimées	7
I.5. Description d'antenne imprimée (microstrip).....	8
I.6. Les Matériaux Diélectriques utilisés pour le substrat.....	9
I.6.1. Critères de choix du substrat	9
I.6.2. Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat.....	9
I.7. Caractéristiques des antennes imprimées	10
I.7.1. Représentation en quadripôles :.....	11
I.7.2. Coefficient de réflexion S11	11
I.7.3. Directivité et gain	11
I.7.3.1. Directivité :	11
I.7.3.2. Gain	12

I.7.4. Impédance d'entrée :	12
I.7.5. Fréquence de résonance f_r :	12
I.7.6. Bande passante et facteur de qualité :	12
I.7.6.1. Bande passante	12
I.7.6.2. Le facteur de qualité	13
I.7.7. Rendement de l'antenne	13
I.7.8. Ouverture	13
I.8. Techniques d'alimentation	13
I.8.1. Alimentation par ligne micro ruban [13]	14
I.8.2. Alimentation par sonde coaxiale	14
I.8.3. Alimentation par couplage par fente [13]	14
I.8.4. Alimentation par couplage de proximité	14
I.9. Association d'antennes en réseau	15
I.9.1. Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées :	16
I.9.1.1 Alimentation parallèle	16
I.9.1.2 Alimentation série	17
I.9.2 Réseaux bidimensionnels	17
I.10. Avantages et inconvénients des antennes imprimées	18
I.11. Applications des antennes imprimées	19
I.12. Conclusion	19
Bibliographie	20
<u>Chapitre 02: Généralités sur les structures BIE</u>	
II.1. Introduction	23
II.2. Préambule	23
II.3. Définitions de base des matériaux à bande interdite électromagnétique	24
II.4. Principe de fonctionnement d'une antenne BIE	24
II.5. Les surfaces partiellement réfléchissantes	25

II.6. Description des matériaux BIE diélectriques	28
II.6.1 Réseaux unidimensionnels	29
II.6.2 Réseaux bidimensionnels	29
II.6.3 Réseaux tridimensionnels.....	31
II.7. Description des structures BIE métalliques	32
II.8. Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE.....	32
II.8.1. Adaptation de l'antenne.....	32
II.8.2 Diagrammes de rayonnement et gain	33
II. 9. Domaines d'application	33
II.9.1. Dans le domaine de l'optique Les fibres optiques	33
II.9.2. Dans le domaine micro-onde.....	34
II.10. Conclusion	35
Bibliographie.....	36
 <u>Chapitre 03: Résultats & discussions</u>	
III.1 Introduction.....	39
III.2. Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO.....	39
III.2.1. La méthode d'intégration finie.....	40
III.2.2. Aperçu de la structure de l'interface utilisateur.....	40
III.3. Exemple d'un projet en CST	41
III.3.1. Démarrer le logiciel	41
III.3.2. Créer le plan de masse	43
III.3.3. Créer des substrats diélectriques	43
III.3.4. Créer les patches :	44
III.3.5. Créer les encoches de patch	45
III.3.6. Créer la ligne microbande	46
III.3.7. Définir le port.....	46
III.3.8. Définir le domaine de fréquence.....	47

III.3.9. Définir les conditions au bord.....	47
III.3.10. La simulation	48
III.4. Présentation de la structure d'un seul élément.....	49
III.5. Structure d'antenne réseau à deux patches rectangulaires :.....	49
III.6. Influence des paramètres de l'antenne sur ses caractéristiques.....	50
III.6.1. Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle) et une antenne d'un seul élément.....	50
III.6.2. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal	52
III.6.3. Effet de la variation de longueur du patch rectangulaire	54
a) Fréquence De Résonance Et La Bande Passante	54
b) La Directivité	55
III.6.4. Effet de la variation de largeur du patch rectangulaire	55
a) Fréquence de résonance et la bande passante	56
b) La Directivité	56
III.6.5. Effet de la variation de la permittivité $\epsilon r1$	57
a) Fréquence de résonance et la bande passante	57
b) La Directivité	58
III.6.6. Effet de la variation de la permittivité $\epsilon r2$	59
a) Fréquence De Résonance Et La Bande Passante	59
b) La Directivité	60
III.6.7. Effet de l'épaisseur de la couche du substrat $h2$	61
a) La fréquence de résonance et la bande passante.....	61
III.7 conclusion.....	62
Conclusion générale.....	67

Liste des Figures

Chapitre I

Figure.I.1 Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels	7
Figure.I.2 Structure d'une antenne micro ruban	8
Figure.I.3 Différentes formes d'antennes micro ruban	9
Figure.I.4 Représentation en quadripôle	11
Figure.I.5 Bande passante et coefficient de réflexion	13
Figure.I.6 Techniques d'alimentation.	15
Figure.I.7 Alimentation parallèle d'un réseau linéaire.....	17
Figure I.8 : Alimentation série d'un réseau linéaire.....	17
Figure I.8 : Alimentation parallèle d'un réseau plan.....	18
Figure I.8 : Alimentation série d'un réseau plan.....	18

Chapitre II

Figure.II.1 Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D.	25
Figure.II.2 Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS	26
Figure.II.3 Motif élémentaire métallisé sur les deux faces.	27
Figure.II.4 Phase du coefficient de réflexion à profil croissant du motif élémentaire métallisé sur les deux faces (a) , directivité de l'antenne proposée et celle de l'antenne classique (b)	27
Figure.II.5 Structure d'antenne utilisant des métallisations inductives et capacitives.....	28
Figure.II.6 Gain de l'antenne avec et sans méta-surfaces	28
Figure.II.7 Structures périodiques, (a) type inductif, (b) type capacitif	29
Figure.II.8 Structure périodique proposée dans la référence [9], (a) l'interface de la PRS proposée, (b) motif élémentaire, (c) circuit équivalent du motif élémentaire.....	29
Figure.II.9 Exemples De Structures Périodiques 1D, 2D et 3D	30
Figure.II.10 Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.	30
Figure.II.11 Exemples De Différents Réseaux 2D	31

Figure.II.12 Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation	31
Figure.II.13 Différentes Structures 3D Comme La Structure Cubique (1), Le Tas De Bois (2), La Structure Multicouches (3), Les Opales Ou Opales Inversées (4) Et La Yablonovite (5).....	32
Figure.II.14 Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF)	33
Figure.II.15 Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE	34

Chapitre III

Figure.III.1 Interface graphique de CST MICROWAVE STUDIO	40
Figure.III.2 La fenêtre principale du logiciel CST.	42
Figure.III.3 La fenêtre d'accue	43
Figure.III.4(a-b-c-d-f) : Les fenê.tres pour créer un nouveau projet.	44
Figure.III.5 Créer un plan de masse.....	44
Figure.III.6 Créer des substrats diélectriques.	45
Figure.III.7 Créer le premier élément du réseau.....	46
Figure.III.8 Créer le deuxième élément du réseau.....	46
Figure.III.9 Créer les encoches des éléments rayonnants.....	47
Figure.III.10 Créer les lignes microbandes.....	48
Figure.III.11 Définir le port.	48
Figure.III.12 Définir le domaine de fréquence.	49
Figure.III.13 Définir les conditions au bord	49
Figure.III.14 choisir la précision	50
Figure.III.15 La structure d'antenne 1 patch.	51
Figure.III.16 Antenne réseau de 2 patches rectangulaires alimentés : a) en série et b) en parallèle	51
Figure.III.17 Coefficient de réflexion S_{11} pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne d'un seul élément.....	52
Figure.III.18 Directivité en 3D d'une antenne 1 patch rectangulaire.....	53
Figure.III.19 Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation parallèle	53

Figure.III.20 Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation en série.....	53
Figure.III.21 Structure des antennes : a) à substrat normal b) à substrat à BIE.	54
Figure.III.22 La directivité en 3D : a) Substrat normal b) Substrat à BIE.....	55
Figure.III.23 Le coefficient de réflexion S_{11} : Substrat normal et Substrat à BIE.....	55
Figure.III.24 Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs du longueur du patch rectangulaire pour une alimentation parallèle.	56
Figure.III.25 : la directivité en 3D pour une variation de la longueur du patchs.	57
Figure.III.26 Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la largeur du patch rectangulaire pour une alimentation parallèle.	58
Figure.III.27 : la directivité en 3D pour une variation de la largeur du patch..	59
Figure.III.28 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1})..	60
Figure.III.29 : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité ϵ_{r1}	61
Figure.III.30 Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).	62
Figure.III.31 : la directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2}	63
Figure.III.32 Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h_2	64
Figure.III.33 La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur h_2	65

Liste des Tableaux

Tableau. III.1 Dimensions de l'antenne patch rectangulaire	50
Tableau. III.2 Les résultats pour les différentes structures d'antenne.....	54
Tableau. III.3 les résultats pour différents substrats.	55
Tableau. III.4 Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la longueur du patch rectangulaire.	56
Tableau. III.5 : Variation de la directivité en fonction de la longueur du patch	57
Tableau. III.6 Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la largeur du patch rectangulaire	58
Tableau. III.7 Variation de la directivité en fonction des dimensions du patch	59
Tableau. III.8 La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1}).....	60
Tableau. III.9 Variation de la directivité pour différents valeurs de la permittivité ϵ_{r1}	61
Tableau. III.10 La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).....	62
Tableau. III .11 La directivité en fonction de la permittivité ϵ_{r2}	63
Tableau. III.12 Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h_2P	64
Tableau. III.13 Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur des couches du substrat du patch h_2 (mm).....	64

Liste des Abréviations

BIE : Bande Interdite électromagnétique.

1D, 2D, 3D : Une, Deux, ou Trois Dimensions.

BIP: Bande Interdite Photonique.

CST : Computer Simulation Technology.

FIT: Finite Integration Technique.

PEC: Perfect Electric Conducting.

LHM: Left Hand Material.

BIEM : Bande Interdite électromagnétique Métallique.

PRS : Partially Reflective Surface (Surface Partiellement Réfléchissante).

WDM : Wavelength Division Multiplexing.

SSF : Surfaces Sélectives en Fréquence.

TMM : Thermoset Microwave Material..

Résumé

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'un réseau d'antenne micro ruban (patch) rectangulaire à bande interdite électromagnétique (BIE) 1D.

Nous étudions l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : les permittivités du substrat, la longueur et la largeur du patch, la hauteur de substrat du patch.

En utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

Mots clés: réseau d'antenne patch, BIE, miroir de Bragg.

ABSTRACT

The main objective of our work is the study of a rectangular microstrip (patch) antenna array electromagnetic bandgap (BIE) 1D.

We study the influence of the geometrical parameters of the antenna on the resonance frequency and the bandwidth and on the directivity. The parameters we studied: substrate permittivities, length and width of the patch, substrate height of the patch.

Using the frequency domain electromagnetic simulation tool CST is based on the finite integration method.

Key words: patch antenna array, BIE, Bragg mirror.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة مجموعة هوائي مدقق مستطيل الشكل ذو طبقات عازلة كهرومغناطيسيا احادية البعد.

قمنا بدراسة تأثير المعايير الأساسية للهوائي على التردد الرنان وعرض النطاق الترددي والاتجاهية، المعايير التي قمنا بدراستها هي: سماحية الطبقة العازلة، وطول وعرض الهوائي، وارتفاع الطبقة العازلة.

وذلك باستعمال برنامج CST الذي يعتمد على طريقة التكاملات المنتهية.

الكلمات الرئيسية: مجموعة هوائي مدقق، طبقات عازلة كهرومغناطيسيا، مرآة براغ.



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction Générale

Le Domaine des télécommunications connaît depuis plusieurs décennies une croissance sans précédent et des services de plus en plus variés (téléphonie mobile, services multimédia interactif, ...), se voient proposés par de nombreux systèmes (systèmes cellulaires, transfert de données sans fil, radiomessagerie, radiocommunication professionnelle, systèmes satellitaires), permettant ainsi au grand public d'accéder à ces nouvelles technologies.

Dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires où le faible volume, le faible poids, le faible coût, les hautes performances et la facilité de mise en œuvre sont les principales exigences, les antennes faiblement profilées sont une nécessité. Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, ces contraintes se retrouvent dans les applications commerciales sans fils. Pour répondre à ces exigences un nouveau type d'antenne a été proposé : les antennes imprimées [1].

Les antennes micro rubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) ont connu une évolution considérable. En effet, plusieurs recherches ont été menées afin de concevoir une antenne micro ruban optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications aéronautiques, aérospatiales et militaires. Ce type d'antennes s'adapte facilement aux surfaces planes et non planes et présentent une grande robustesse et flexibilité lorsqu'il est monté sur des surfaces rigides. Les antennes imprimées sont également très performant en termes de résonance, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement. Les inconvénients majeurs des antennes micro rubans résident dans leur faible pureté de polarisation et une bande passante étroite, malgré ses inconvénients, sont les structures d'antennes les plus utilisées dans les systèmes de communication sans fil, grâce aux avantages qu'elle présente (faible coût et facilité d'intégration).

Pour surpasser plusieurs limitations intrinsèques de ce type d'antenne (telles que : la bande passante étroite, le faible gain et la dégradation de l'efficacité de rayonnement aux fréquences élevées), une nouvelle technique, basée sur le concept de bande interdite électromagnétique (BIE), peut être utilisée [2].

Les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE), ont incité un vif intérêt depuis leur création par le Professeur Eli Yablonovitch, à la fin des années quatre-vingt [3]. Celui-ci a introduit une bande interdite pour contrôler l'émission stimulée et spontanée de la lumière [4].

Ces matériaux présentent, pour les ondes électromagnétiques, des propriétés physiques intéressantes (en matière de propagation) à la fois dans le domaine de l'optique et dans le domaine des micro-ondes, mais plus particulièrement dans celui des antennes [5].

Les réseaux d'antennes imprimées sont composés d'éléments rayonnants branchés entre eux par des tronçons de lignes micro rubans, avec une distance entre eux de demi-longueur d'onde de l'antenne, pour éviter le bruitage. Ce réseau a permis d'obtenir de meilleures caractéristiques par rapport aux antennes d'un seul élément, qui ne peuvent pas répondre aux besoins d'encombrement et de simplicité pour atteindre les performances exigées. L'objectif majeur d'un réseau d'antenne imprimé est d'améliorer la largeur de bande passante.

La présence des structures BIE, au-dessus de l'antenne patch, a pour effet d'augmenter sa directivité. L'antenne résultante de cette association s'appelle antenne BIE [6].

Le travail développé dans ce mémoire a pour objectif d'étudier un réseau d'antenne micro-ruban rectangulaire à BIE 1D opérant dans la bande X, en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Ce manuscrit est scindé en trois chapitres Il est présenté comme suit :

- Dans le premier chapitre introductif, nous avons présenté les réseaux d'antennes patches, les différents matériaux et substrat utilisés pour ces types d'antennes. Ainsi que les différentes méthodes d'alimentation rencontrées dans la littérature, aussi leur avantage et inconvénients, leur caractéristiques. Enfin nous présentons leur applications.

- Dans le deuxième chapitre nous présentons les concepts de base liés aux matériaux à BIE. Nous étudions les différents types de ces matériaux, particulièrement : les BIE unidimensionnels (1D), débutant par une définition des matériaux à BIE et leurs caractéristiques, une description pour les matériaux BIE et sa structure. Enfin leurs domaines d'application.

- Dans le troisième chapitre nous montrons comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO, et nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure au réseau d'antennes patches de forme rectangulaire à substrat BIE 1D opérant dans la bande X [8 GHz-12 GHz], sur la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité.

Et nous terminons par une conclusion générale.

Bibliographie

- [1] BOUSAHLA Miloud, *Analyse et synthèse de réseaux plans ou conformés d'antennes imprimées par méta-heuristiques floues*, Thèse de doctorat en Télécommunications présentée à l'université ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, en 2012.
- [2] Y. Qian, D. Sievenpiper, V. Radisic, E. Yablonovitch and T. Itoh, *A novel approach for gain and bandwidth enhancement of patch antennas*," Proceedings of IEEE Radio and Wireless Conference, Colorado, United States, 221–224, 1998.
- [3] T. Jaffre, *Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes*,"Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges, France, 2005.
- [4] A. Scherer, T. Doll, E. Yablonovitch, H. O. Everitt and J. A. Higgins, *Guest editorial electromagnetic crystal structures, design, synthesis, and applications*," Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 11, 1928–1930, 1999.
- [5] L. Schreider, *Antennes à très large bande passante et de très faible épaisseur –Application à l'intégration d'antennes dans des structures de porteurs dans la bande 100MHz-1GHz*,"Thèse de doctorat présentée à l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, France, 2006.
- [6] D. Kim and J. I. Choi, *Analysis of a high-gain Fabry-Perot cavity antenna with an FSS superstrate: effective medium approach*,"Progress in Electromagnetics Research Letters, vol. 7, 59–68, 2009.



CHAPITRE I

les réseaux d'antennes imprimées

I.1. Introduction

Dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires où le faible volume, le faible poids, le faible coût, les hautes performances et la facilité de mise en œuvre sont les principales exigences, les antennes faiblement profilées sont une nécessité. Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, ces contraintes se retrouvent dans les applications commerciales sans fils. Pour répondre à ces exigences le réseau d'antenne imprimé a été proposé, et pour le but d'améliorer la largeur de la bande passante et d'avoir une bonne directivité pour assurer un haut débit.

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la définition d'un réseau d'antenne, la définition et la description des antennes imprimées, aussi leur caractéristique. Nous donnerons ensuite leurs avantages ainsi que leurs inconvénients et les différentes techniques d'alimentation d'un réseau. Finalement, nous précisons leurs domaines d'utilisation.

I.2. Définition de réseau d'antenne

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone. C'est-à-dire que le déphasage du courant entre deux paires d'antennes est fixe, un réseau peut comporter des éléments non alimentés directement par une source (éléments parasites) mais qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments (c'est le cas des antennes Yagi-Uda). Le champ électromagnétique produit par un réseau d'antennes est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments. En choisissant convenablement l'espacement entre les éléments et la phase du courant qui circule dans chacun, on peut modifier la directivité du réseau grâce à l'interférence constructive dans certaines directions et à l'interférence [1].

I.3 Réseau d'antennes imprimées

L'utilisation d'une antenne plaque unitaire s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Le réseau d'antennes imprimées est constitué par des éléments rayonnants reliés en chaîne les uns aux autres par des tronçons de ligne microbandes. Les antennes élémentaires fonctionnent à la même fréquence et sont disposées périodiquement selon une ou plusieurs directions. Les réseaux d'antennes sont actuellement utilisés dans de nombreuses applications radars, radio mobile ou spatial. Les antennes réseaux peuvent avoir différentes géométries : réseaux linéaires et réseaux planaires (bidimensionnels) [2].

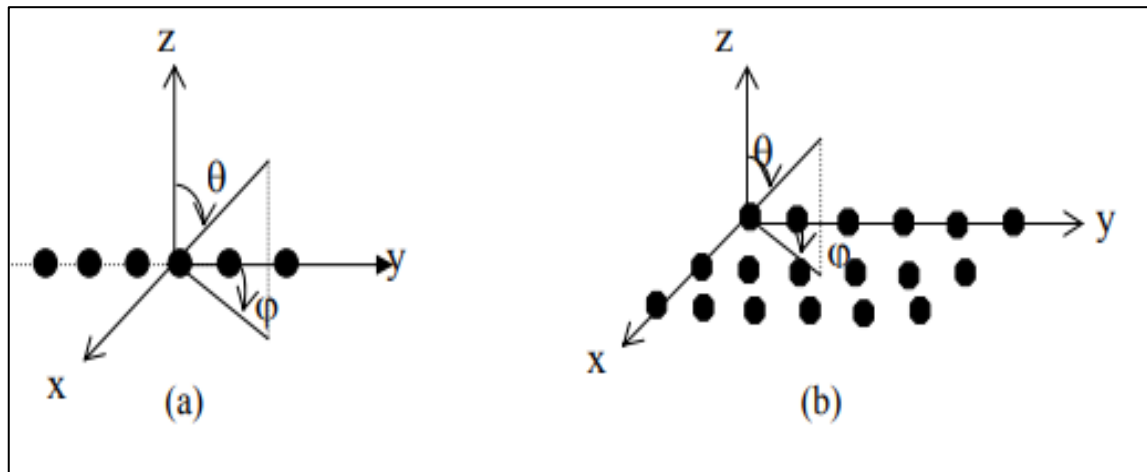


Figure I.1 : Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments. La forme du rayonnement global doit prendre en considération les paramètres suivants :

- La géométrie du réseau : linéaire, plan... ;
- L'espacement relatif entre chaque élément ;
- L'amplitude de l'excitation de chaque élément ;
- La phase appliquée à chaque excitation ;
- Le diagramme de rayonnement propre à chaque élément.

I.4. Les antennes imprimées

Depuis les années 1990, les antennes micro-ruban (microstrip) ont connu des innovations et une évolution exemplaire en matière d'antenne. Avant cette période, la technologie micro-ruban était réservée à des applications militaires. Mais depuis quelques temps, il y a de plus en plus des applications vouées au commerce, et de nombreux produits issus de la technologie sans fil ont surgit sur le marché [3].

Il y a des spécificités propres aux antennes micro-rubans qui font qu'elles soient parfaites pour des multiples applications commerciales. D'abord, elles peuvent être produites à moindre coût, car elles reposent sur la technologie des circuits imprimés [3].

En effet, puisqu'elles ont une forme plate, elles peuvent être installées dans le même boîtier que le produit qu'elles alimentent. On peut également les insérer sur la plaque portant le circuit radiofréquence ou micro-onde [3].

L'antenne à éléments rayonnant au départ contient un fin conducteur métallique (environ 17,5 à 35 μm d'épaisseur) de forme aléatoire (l'élément rayonnant), que l'on pose sur un substrat diélectrique dont la face inférieure contient un plan de masse tout métallisé [4,5]. Dans le domaine des micro-ondes et des ondes millimétriques, les antennes imprimées emploient habituellement une seule couche de substrat et sont très populaires. Dans une forme géométrique quelconque (Figure I.2.), elles sont installées sur un substrat diélectrique et un plan de masse. On a plusieurs formes de ces éléments rayonnants : carrée, rectangulaire, circulaire, elliptique ou plus complexe. Nous notons que leur dimension est de l'ordre de $\lambda/2$ à λ [5].

Afin de satisfaire les exigences particulières des antennes, on peut construire des formes plus pointues.

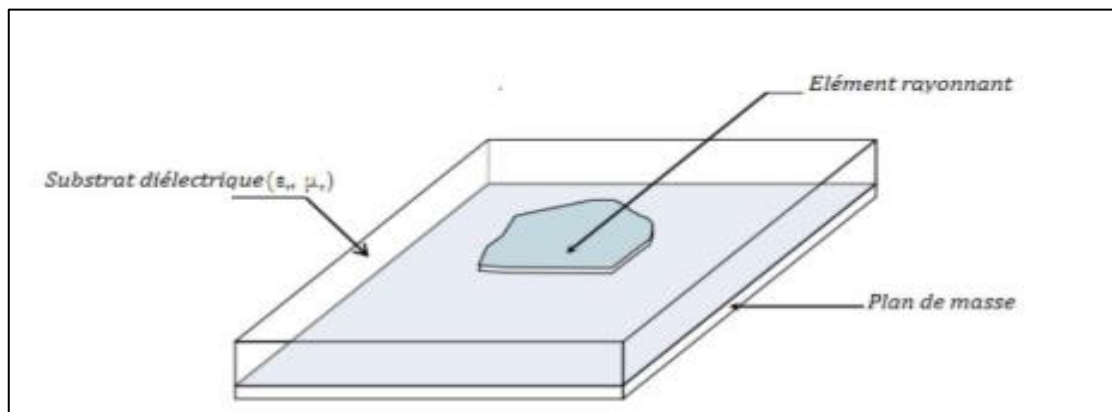


Figure I.2 : Structure d'une antenne micro ruban

Parce qu'elles répondent de façon fiable aux exigences des systèmes, les antennes imprimées sont abondamment sollicitées à l'heure actuelle. À cause de leurs forme et dimensions, elles sont facilement intégrables sur les mobiles (avion, voiture, missile, téléphone portable, etc.). Leur technologie prend sa source de celle des circuits imprimés, ce qui fait qu'elles ont des atouts devant les antennes classiques (cornet et dipôle filaire) [6].

I.5. Description d'antenne imprimée (microstrip)

Une antenne imprimées (appelée microstrip ou microbande) est constituée d'une plaque métallique de forme quelconque, appelée élément rayonnant (patch), située sur la face supérieure d'un substrat diélectrique. On considère en général le conducteur comme étant parfait et d'épaisseur négligeable, et on trouve en dessous du substrat diélectrique le plan de masse (voire (Figure I.2.) [7].

Les différentes formes du patch présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant, car présentant une faible composante croisée. Les dipôles micro rubans ont la particularité de présenter une large bande passante et d'occuper très peu d'espace, ce qui les rend particulièrement adaptés à la réalisation de réseaux d'antennes [8].

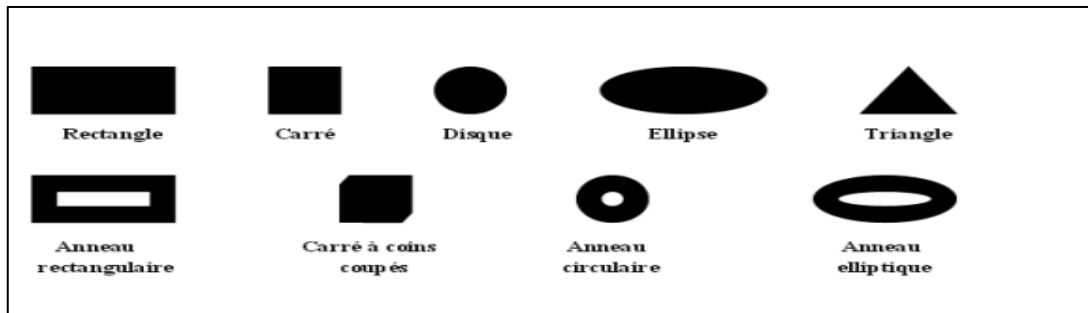


Figure I.3 : Différentes formes d'antennes micro ruban [8]

I.6. Les Matériaux Diélectriques utilisés pour le substrat

Le substrat joue un rôle double dans la technologie micro ruban. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure.

I.6.1. Critères de choix du substrat

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

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

I.6.2. Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories :

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

I.6.3. Anisotropie du substrat

L'anisotropie est définie comme étant la dépendance de la constante diélectrique du substrat sur l'orientation du champ électrique appliqué, Pour obtenir les propriétés électriques et mécaniques nécessaires.

I.7. Caractéristiques des antennes imprimées

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. D'une manière générale, une antenne utilisée dans un type d'application ne peut pas l'être dans d'autres [9].

Une antenne peut être caractérisée par :

I.7.1. Représentation en quadripôles :

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle Figure (I-5) défini par les paramètres : paramètre S :

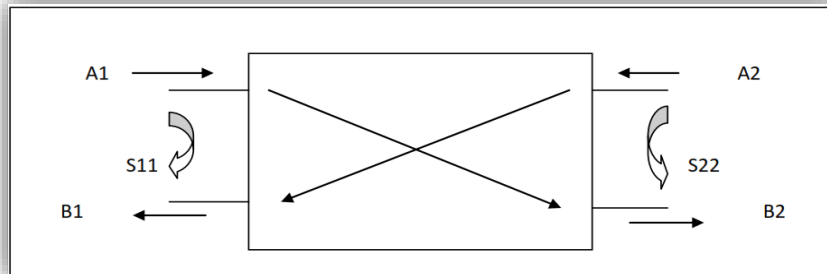


Figure I.4 : Représentation en quadripôle

A_1, A_2, B_1 et B_2 Sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$B_1 = S_{11} \times A_1 + S_{12}A_2 \dots \dots \dots (I - 1)$$

$$B_2 = S_{21} \times A_1 + S_{22}A_2 \dots \dots \dots (I - 2)$$

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

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

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

Le coefficient S_{22} est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $A_1 = 0$ [9].

I.7.2. Coefficient de réflexion S_{11}

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation [9].

I.7.3. Directivité et gain

I.7.3.1. Directivité :

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. [10].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \dots \dots \dots (I - 3)$$

I.7.3.2. Gain

Le gain est le résultat de deux effets : la directivité et la perte.

Si G est le gain, alors [4] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \dots \dots \dots (I - 4)$$

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \dots \dots \dots (I - 5)$$

I.7.4. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne.

Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \dots \dots \dots (I - 6)$$

$Z_0 =$ Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

N.B : Comme S_{11} est fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence [9].

I.7.5. Fréquence de résonance f_r

Une antenne s'utilise en général avec des signaux autour d'une fréquence donnée pour laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés [11].

I.7.6. Bande passante et facteur de qualité

I.7.6.1. Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas des critères précis pour la limite du coefficient de réflexion.

Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante **Figure (I-6)**.

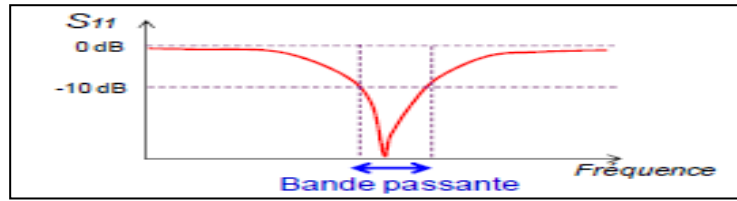


Figure I.5 : Bande passante et coefficient de réflexion

I.7.6.2. Le facteur de qualité

Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série équation) [12].

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \dots\dots\dots(I - 7)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}} \dots\dots\dots(I - 8)$$

R_{ant} =résistance d'antenne. Q =facteur de qualité du circuit RLC . BW =bande passante à 3 dB. f_{Res} =la fréquence de résonance. L_{ant} =longueur d'antenne.

I.7.7. Rendement de l'antenne

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

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \dots\dots\dots(I - 11)$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [9].

I.7.8. Ouverture

Si G_m est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à -3 dB), soit $G_m/2$ [9].

I.8. Techniques d'alimentation

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne micro ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.

I.8.1. Alimentation par ligne micro ruban [13]

Dans le premier cas, une ligne micro ruban est directement connectée à l'élément Rayonnant comme le montre la figure (I-7-a), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5%.

I.8.2. Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse Figure (I-7-b). L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats

Electriciquement épais [13].

I.8.3. Alimentation par couplage par fente [13]

L'alimentation par ligne micro ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite.

Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban comme le montre la figure (I-7-c). Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite.

I.8.4. Alimentation par couplage de proximité

La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée par la figure (I-7-d). L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre [13].

rayonnement, sur la présence de "zéros" (réjections d'interférences) dans des directions particulières ou tout simplement effectuer une synthèse de réseau permettant d'imposer un gabarit à ce rayonnement [14].

I.9.1. Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération. La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes microbandes. Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par utilisation des lignes microbandes et des transformateurs d'impédances quarts 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 patches doivent être alimentés avec la même puissance). Il faut mettre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps [3][15].

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

- ✓ Alimentation en série ;
- ✓ Alimentation en parallèle.

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

- ✓ La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase ;
- ✓ La bande passante souhaitée.

Un réseau série aura une bande passante plus faible dans la mesure où la loi de pondération sera plus sensible à la fréquence que dans le cas d'une alimentation parallèle.

I.9.1.1 Alimentation parallèle

Un réseau parallèle (Figure I.8), sera plus encombrant qu'un réseau série (Figure I.8). De plus, il est à noter qu'un réseau parallèle présente des longueurs de lignes supérieures et un plus grand nombre de coudes ce qui engendre davantage de pertes, en particulier dans le domaine millimétrique. Un autre choix important dans la conception d'une antenne imprimée est celui du substrat diélectrique. Si la structure du réseau à $2n$ éléments rayonnants qui peuvent être alimentés en parallèle par n étages de (2^{m-1}) diviseurs de puissance à chaque étage m . Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson.

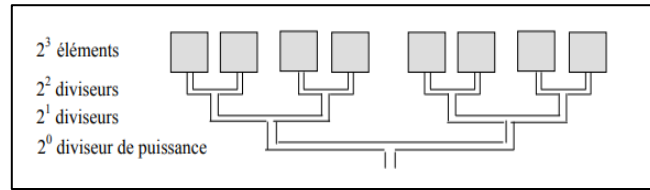


Figure I.7 : Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

I.9.1.2 Alimentation série

Dans la figure I.9 nous avons une ligne de transmission excite en série les éléments rayonnants. Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur, qui lui-même est lié de façon orthogonale à un guide commun d'alimentation. La distance des branchements des lignes sur la ligne principale doit être uniforme, et les signaux doivent arriver en phase jusqu'aux déphaseurs pour ne pas s'induire dans des erreurs de phase.

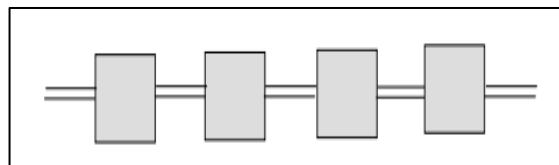


Figure I.8 : Alimentation série d'un réseau linéaire

I.9.2 Réseaux bidimensionnels

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan passant par les sources du réseau. Afin d'obtenir un effet de réseau dans tout l'espace et, en particulier dans les plan E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels (Figures I. 10- I. 11). Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [3] [15].

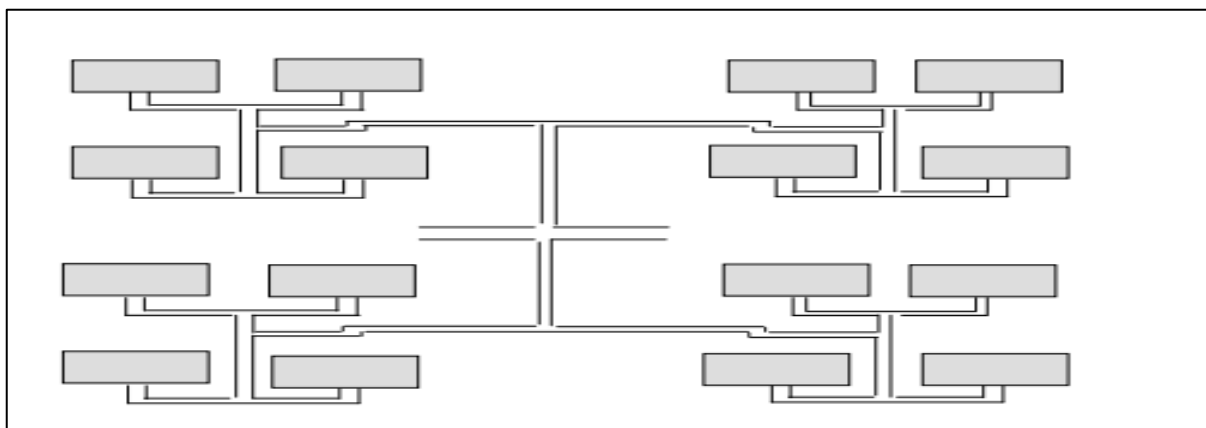


Figure I.10 : Alimentation parallèle d'un réseau plan

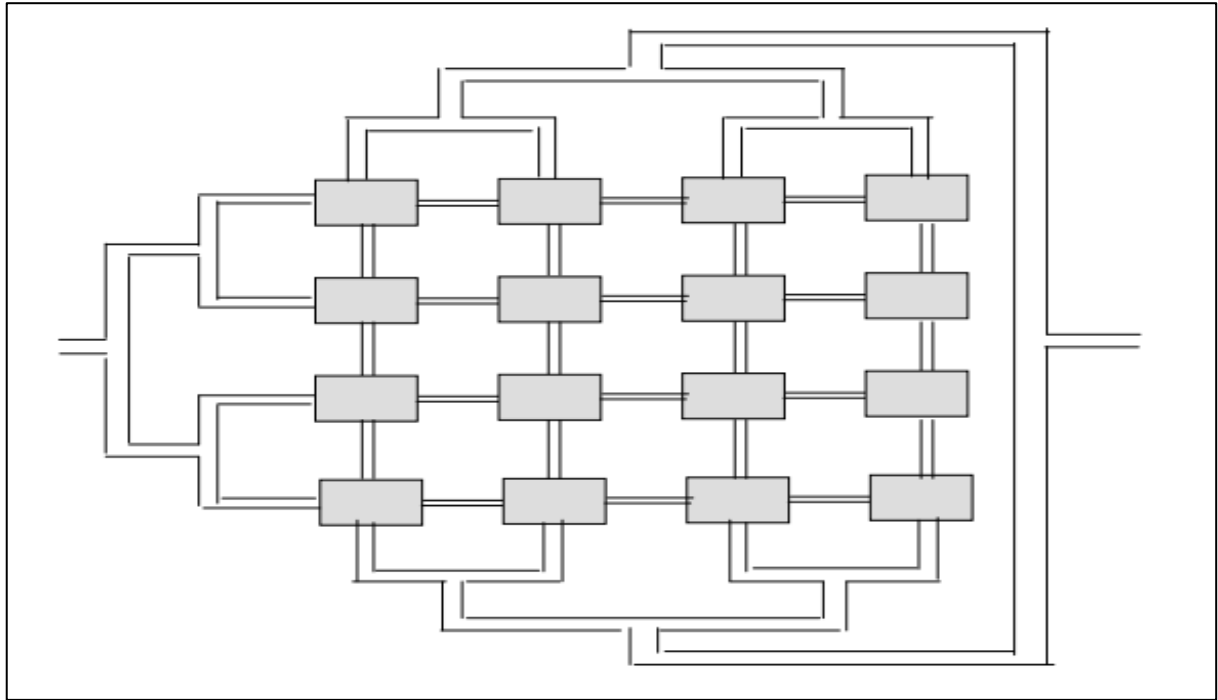


Figure I.11 : Alimentation série d'un réseau plan

I.10. Avantages et inconvénients des antennes imprimées

La technologie des antennes imprimées est issue de celle des circuits imprimés ce qui leur confère certains avantages par rapport aux antennes classiques (cornet, dipôle filaire,...)[16,17] dont :

- * Un poids léger et un volume petit,
- * Possibilité d'intégration des éléments actifs, directement sur le même substrat (oscillateurs, amplificateurs, modulateurs,),
- * Simples, robustes et non encombrantes,
- * La faculté de se conformer à des surfaces courbes (ailes d'avions, missiles,),
- * Faible coût de fabrication, par conséquent peut être fabriqué en grande quantité.
- * Une épaisseur et un encombrement minimes,
- * Elles peuvent être polarisées linéairement ou circulairement par simple changement de la position d'alimentation [18].

Elles présentent cependant quelques inconvénients tels que :

- * Faible rendement,
- * Faible puissance d'émission,
- * Pureté de polarisation difficile à obtenir,
- * Faible bande passante (1 à 5 %) [19].

I.11.Applications des antennes imprimées

Remplacer les antennes classiques par des antennes patches avec des performances équivalentes est le souci principal des concepteurs des systèmes de télécommunication, vu le besoin et les exigences du marché industriel. Il existe différentes applications réussies démontrant la possibilité de cette transition [20] :

- ✓ Télécommunication satellitaires.
- ✓ Commande et contrôle.
- ✓ Télémétrie (télémesure) par missile.
- ✓ Équipements portatifs.
- ✓ Éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- ✓ Antenne d'émission utilisée en médecine.
- ✓ Récepteur satellite de navigation

I.12. Conclusion

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

On a présenté brièvement le réseau d'antenne imprimé, ou on a cité quelques applications de ce type d'antennes, ainsi leur caractéristiques, le choix des paramètres et substrat, les avantages, les inconvénients et leurs applications on s'est intéressé par la suite aux plus importantes techniques utilisées pour son alimentation.

Dans le chapitre suivant on va donner une description et généralité sur les matériaux à Bandes Interdites électromagnétique.

Bibliographie

- [1] Electronic Radio and Engineering. F.R. Terman. MacGraw-Hill.
- [2] H. J. Visser, "Array and phased array antenna basics " John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 2005
- [3] Radio Research Laboratory (U.S.), "Very High-frequency Techniques," McGraw Hill, New York, 1947, pp.1-25, Chap 1.
- [4] J. D. Dyson, "The Equiangular Spiral Antenna," IRE Trans. Antennas & Propagation, vol. AP-7, pp181-187, April 1959.
- [5] R. H. Duhamel, "Dual Polarized Sinuous Antennas," U.S. Patent 4,658,262, April 14, 1987.38
- [6] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", 2005, John Wiley & Sons, INC.
- [7] D. Khedrouche, " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009
- [8] D. Aissaoui, " Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées, Université de Sétif. Juin 2011.
- [9] Dr Youssef Daher, "*Antenne – Cours Universitaire*" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche 1
- [10] B. Kadri, F.T. Bendimerad, E. Cambiaggio, "Modelisation of the feed network application to synthesis unequally spaced microstrip antennas arrays", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA 99, pp. 371-374, Torino 13-17 September 1999
- [11] A. Kamil, "*Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 Ghz-10.6 Ghz)*", thèse grade du Maître ès sciences (M. SC), Institut National de la recherche scientifique, Université du Québec, 2011
- [12] A. Boyer, "*Antennes support de cours énoncé de travaux dirigés*", Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011

- [13] **Yamina Tighilt**, " *Identification des antennes micro rubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones* ", thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Sétif. Juin 2011.
- [14] K.R. Carver, W.H. James Microstrip antennas technology. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, No. 8, 1984, pp. 884-887
- [15] F.T. Bendimerad Synthèse de réseaux non périodiques d'antennes micro rubans à loi d'alimentation uniforme ou prédéterminée. Thèse de Docteur de l'Université, Université de Nice Sophia Antipolis, France, Juin 1989
- [16] O. Barkat and A. Benghalia, "Radiation and Resonant Frequency of Superconducting Annular Ring Microstrip Antenna on Uniaxial Anisotropic Media", Springer, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Volume 30, Number 10, October 2009.
- [17] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip antennas," Dedham, Ma: Artech House 1980.
- [18] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992
- [19] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House Boston. London 2003
- [20] J.R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas," IEE Electromagnetic 2001



CHAPITRE II

Généralités sur les structures BIE

II.1. Introduction

Ce chapitre introductif du Généralités sur les structures BIE, débute par un historique, ensuite une définition du BIE et leurs caractéristiques, une description des matériaux BIE et une autre pour la structure. Ce type de matériau a des spécificités bien particulières que nous allons présenter dans ce chapitre.

II.2. Préambule

Historiquement, nous trouvons la trace d'utilisation des structures périodiques ou répétitives pour contrôler la propagation d'une onde aussi loin qu'au XIX^{ème} siècle avec les travaux de Lord Rayleigh en 1887. Lorsque nous alternons une succession de couches diélectriques transparentes d'indices de réfraction différents, une lumière incidente à la surface de ces multicouches peut se trouver complètement réfléchi par des phénomènes d'interférences successives. La cause de ce phénomène : sur l'interface de chaque couche, la lumière est partiellement réfléchi, et si l'espacement entre chaque couche est périodique, les réflexions successives finissent par annuler la propagation de l'onde lumineuse au sein de ces couches. Le miroir de Bragg mis au point par William Lawrence Bragg est un parfait exemple de l'exploitation de ce phénomène en une dimension [1].

Le concept du contrôle de l'onde par des structures périodiques comme nous venons de le décrire émerge donc du domaine photonique, et l'on parlait alors de matériaux à bande interdite photonique (BIP), ou de cristaux photoniques. Le principe s'est ensuite rapidement étendu aux longueurs d'ondes supérieures, donnant lieu aux cristaux électromagnétiques, qui sont plus couramment appelés les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE). En effet, les équations de Maxwell obéissent à une loi d'échelle, et les mêmes propriétés peuvent par conséquent être observées quelle que soit la longueur d'onde [2].

Actuellement, ces matériaux BIE sont classés sous une famille de matériaux plus large, dénommés *métamatériaux*. Ces métamatériaux doivent leurs propriétés intéressantes plus à leur structuration interne qu'à leur composition chimique. Mises à part les structures BIE, les autres types de métamatériaux sont classés selon la propriété exotique qui est mise en avant [3] :

- Les matériaux dits à main gauche (LHM) sont des métamatériaux qui possèdent un indice de réfraction négatif où la loi de Snell-Descartes est inversée [4, 5].
- Les surfaces à haute impédance sont des métamatériaux qui annulent les ondes de surface car l'impédance de surface de la structure est plus importante que l'impédance en espace libre [6].

– Les métamatériaux phononiques traitent des structures périodiques pour les ondes acoustiques, qui plus récemment encore, trouvent une application pour les ondes sismiques dans les travaux de *Farhat et al.* [7].

II.3. Définitions de base des matériaux à bande interdite électromagnétique

Il existe une grande variété de matériaux à bande interdite électromagnétique. Ils sont construits à partir d'objets élémentaires, agencés périodiquement dans l'espace. Dans la Figure II.1, nous avons des exemples de réseaux BIE de périodicité selon une, deux et trois dimensions. [7].

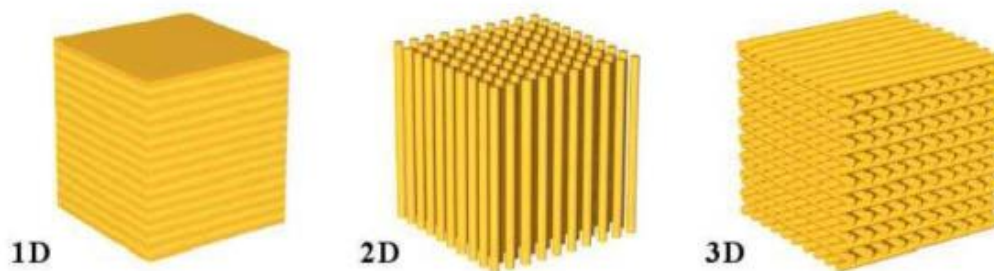


Figure II.1 : Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D

II.4. Principe de fonctionnement d'une antenne BIE

Généralement, l'antenne BIE est formée par une surface partiellement réfléchissante (PRS), disposée à une distance d'environ une demi-longueur d'onde, au-dessus d'une source primaire de faible gain, placée sur un plan de masse. L'amélioration du gain de la source primaire est due à la résonance de la cavité et aux multiples réflexions des ondes entre la PRS et le plan de masse. Le principe de fonctionnement d'une antenne BIE, avec superstrat métallique, est illustré dans la Figure II.2:

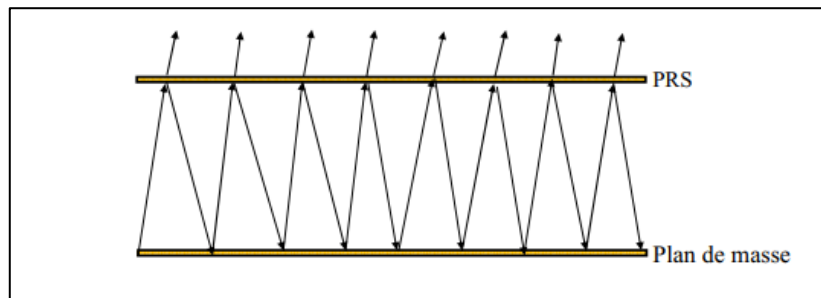


Figure II.2: Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS

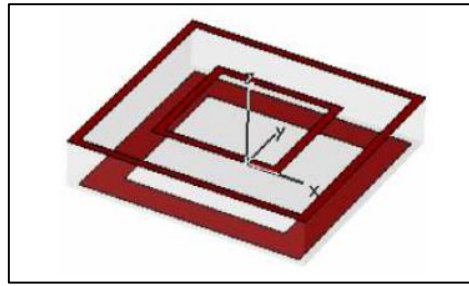


Figure II.3: Motif élémentaire métallisé sur les deux faces

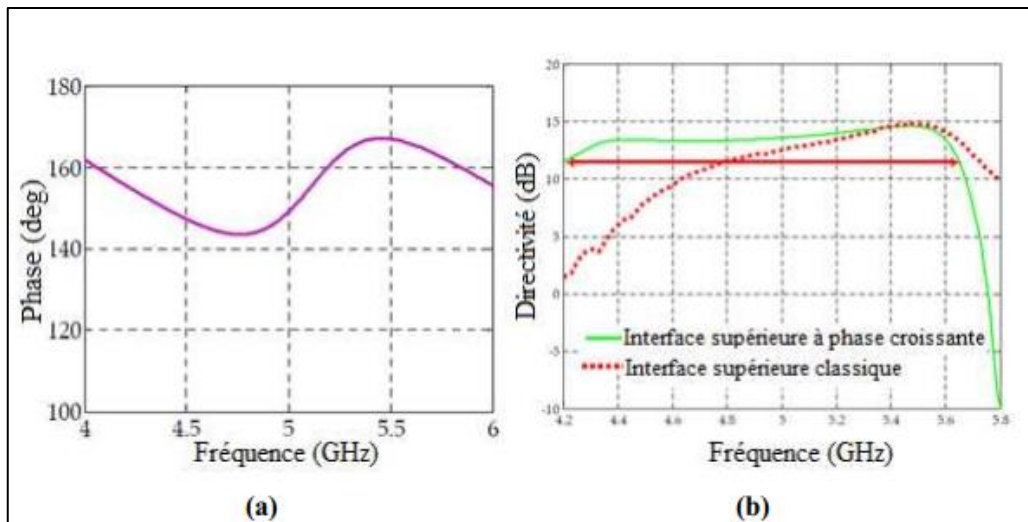


Figure II.4 : Phase du coefficient de réflexion à profil croissant du motif élémentaire métallisé sur les deux faces (a), directivité de l'antenne proposée et celle de l'antenne classique (b).

Il a été démontré que la combinaison des métallisations capacitives et inductives à ouvertures permet d'élargir la bande passante de rayonnement [11]. Une telle combinaison a été utilisée dans la référence [12] pour améliorer les performances de rayonnement de l'antenne proposée (Figure II.5) Comme le montre la Figure II.6 l'ajout de méta-surfaces a permis d'augmenter le gain de l'antenne proposée de plus de 4 dBi, sur la gamme de fréquence considérée (5 GHz à 8 GHz).

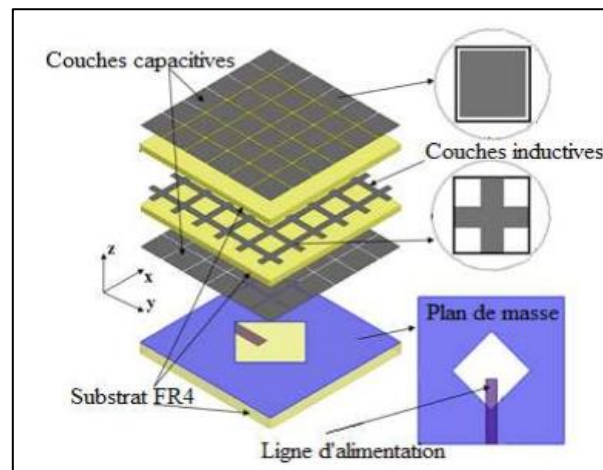


Figure II.5 : Structure d'antenne utilisant des métallisations inductives et capacitives

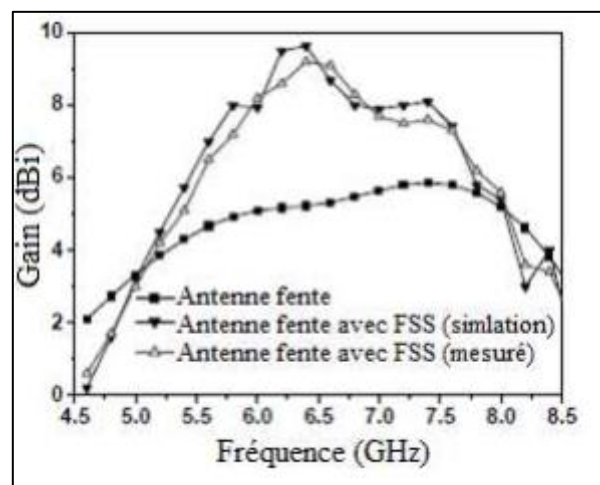


Figure II.6: Gain de l'antenne avec et sans méta-surfaces [10]

Parmi les nombreuses méthodes utilisées pour analyser les structures périodiques, on peut citer le modèle du circuit équivalent qui est l'une des méthodes les plus simples. Dans cette méthode, les différentes métallisations du motif élémentaire de la structure périodique sont modélisées comme des composants inductifs ou capacitifs, sur une ligne de transmission (Figure II.7) Cette approche permet de prédire et de vérifier les caractéristiques de réflexion des structures étudiées [11].

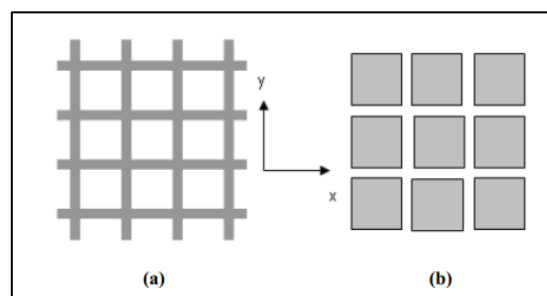


Figure II.7 : Structures périodiques, (a) type inductif, (b) type capacitif [11].

Les structures capacitive et inductive peuvent être représentées, respectivement, par une inductance en série avec une capacité et une inductance en parallèle avec une capacité (Figure II.8) [9].

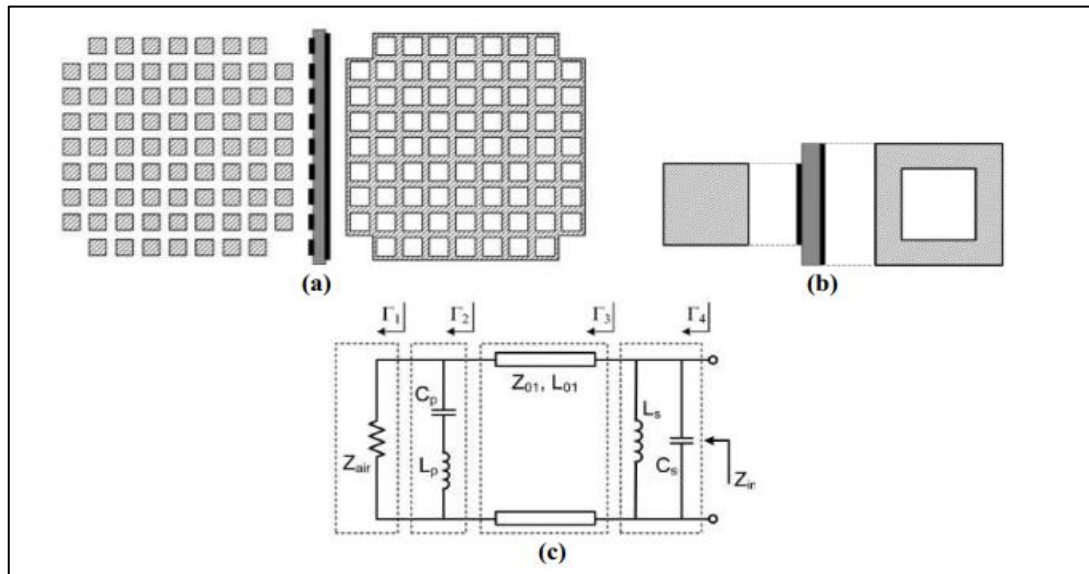


Figure II.8 : Structure périodique proposée dans la référence [9], (a) l'interface de la PRS proposée, (b) motif élémentaire, (c) circuit équivalent du motif élémentaire.

II.6. Description des matériaux BIE diélectriques

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétiques [13].

Il existe une grande variété de matériaux à bande interdite électromagnétique. Ils sont construits à partir d'objets élémentaires, agencés périodiquement dans l'espace. Dans la (Figure II.9) nous avons des exemples de réseaux BIE de périodicité selon une, deux et trois dimensions. Dans notre travail, nous nous intéressons uniquement aux structures BIE bidimensionnelles.

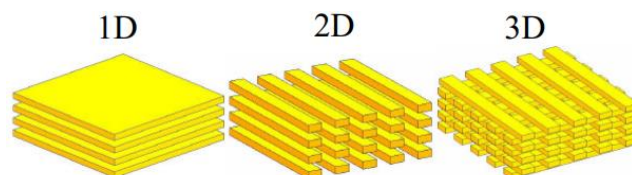


Figure II.9 : Exemples De Structures Périodiques 1D, 2D et 3D.

Puisque l'incidence des ondes est un facteur limitant les performances de ces structures, les chercheurs travaillent dans les domaines utilisant ces matériaux. Ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes [13].

II.6.1 Réseaux unidimensionnels

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures BIE. En effet, elles ont été déjà longtemps étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques. Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée (Figure II.10).

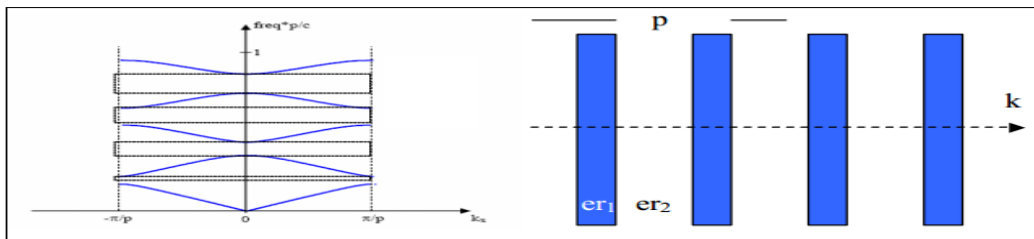


Figure II.10 : Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.

La conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions [13].

II.6.2 Réseaux bidimensionnels

Les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidente à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux). Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau [14].

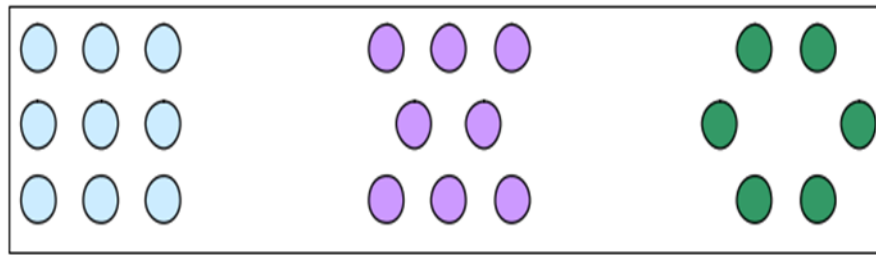


Figure II.11 : Exemples De Différents Réseaux 2D.

Nous présentons sur la(Figure II. 11), plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

Ce sont les paramètres géométriques c'est-à-dire le pas du réseau, le diamètre des tiges (par conséquent le taux de remplissage de la structure), le motif élémentaire et le contraste d'indice qui fixent les largeurs et les positions des bandes interdites et des bandes permises.

Les diagrammes de la Figure II.12 représentent :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ , X, M de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, la fréquence des modes calculés.

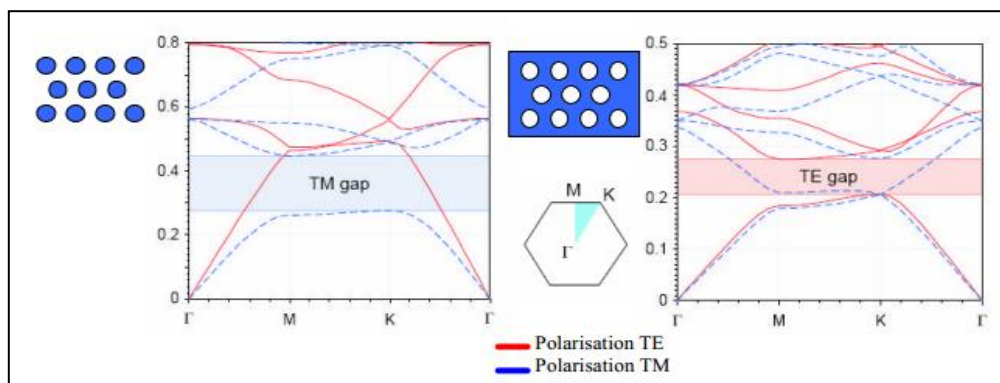


Figure II.12 : Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation.

Dans les deux cas, nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites dans les deux polarisations (en étudiant ici les diagrammes de bande d'une structure 2D en polarisation TE et TM). Mais, lorsque les bandes interdites correspondant à chacune des polarisations se recouvrent même de façon partielle, nous parlons alors de bandes interdites complètes. En réalité, il n'y a que dans le cas des structures en trois dimensions que nous pouvons obtenir théoriquement une vraie bande interdite complète, c'est-à-dire dans le cas où il n'y a aucune propagation possible quelles que soient la polarisation et la direction de l'onde incidente [14].

II.6.3 Réseaux tridimensionnels

Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite photonique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles (Figure II.13) [15].

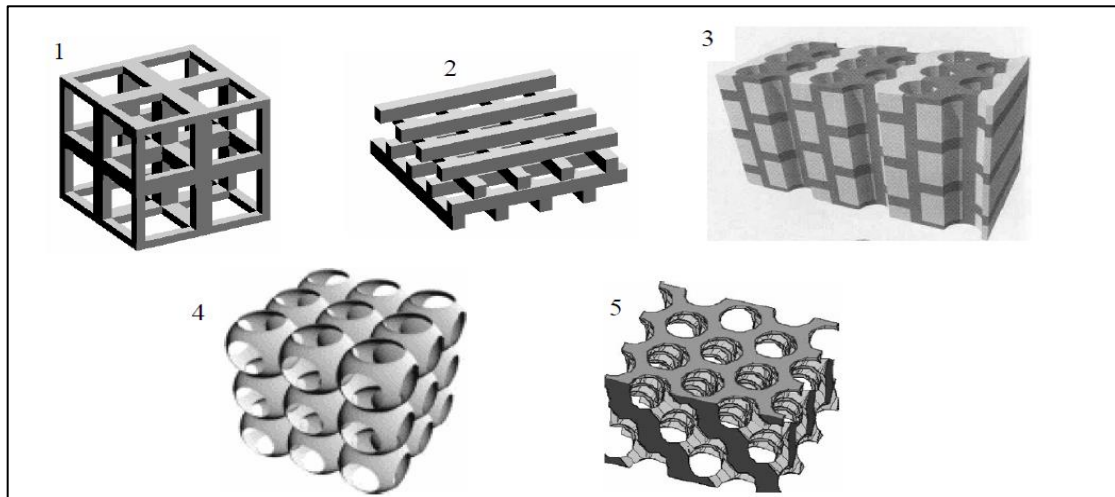


Figure II.13 : *Différentes Structures 3D Comme La Structure Cubique (1), Le Tas De Bois (2), La Structure Multicouches (3), Les Opales Ou Opales Inversées (4) Et La Yablonovite (5)*

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète. Ho, Chan et Soukoulis ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie Cubique à Face Centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant [15].

Les deux types de structures BIE 3D réalisées dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique sont la Yablonovite (un diélectrique percé de trous d'air) et la structure tas de bois. Cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des micro-ondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de 90° à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble [15].

Auguste Bravais a établi un classement des différentes familles de cristaux. Il a montré qu'ils peuvent se répartir en 7 types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux. Ceux-ci sont à la base des structures périodiques tridimensionnelles.

II.7. Description des structures BIE métalliques

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau d est très faible devant la longueur d'onde λ qui est bien en dessous des fréquences optiques.

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs. Elles ont aussi permis de concevoir des Surfaces Sélectives en Fréquence ou SSF (Figure II.14) mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les structures BIE Métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions .

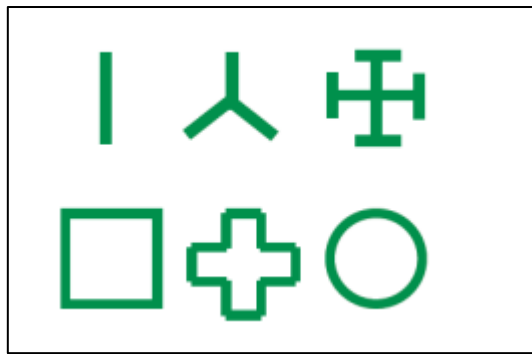


Figure II.14: Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).

II.8. Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE

La finalité des recherches sur les matériaux BIE est la conception d'antennes directives. Ce paragraphe se propose de présenter et de décrire les différentes étapes nécessaires pour réaliser une telle antenne mais aussi d'expliquer son fonctionnement à travers ses différents paramètres. Dans un premier temps, il faut chercher à identifier le fonctionnement de l'antenne à travers l'adaptation et son impédance d'entrée, puis dans un second temps, à travers son rayonnement et son gain [16].

II.8.1. Adaptation de l'antenne

L'adaptation d'une antenne quelconque est un des objectifs incontournables et primordiaux lors de la réalisation d'une antenne.

II.8.2 Diagrammes de rayonnement et gain

Le diagramme de rayonnement doit présenter un seul lobe principal à la verticale du plan de masse. En effet, la direction de l'énergie émise par le système d'alimentation doit correspondre avec la direction de propagation autorisée par le matériau BIE. Dans ce cas, le dispositif complet aura un fonctionnement optimal. De plus, cette énergie ne doit pas être rayonnée hors du BIE. Il est donc primordial d'utiliser des sources ayant un rayonnement de type antenne plaquée avec un niveau faible des lobes secondaires pour favoriser la direction

dans l'axe (**Figure II.15**).

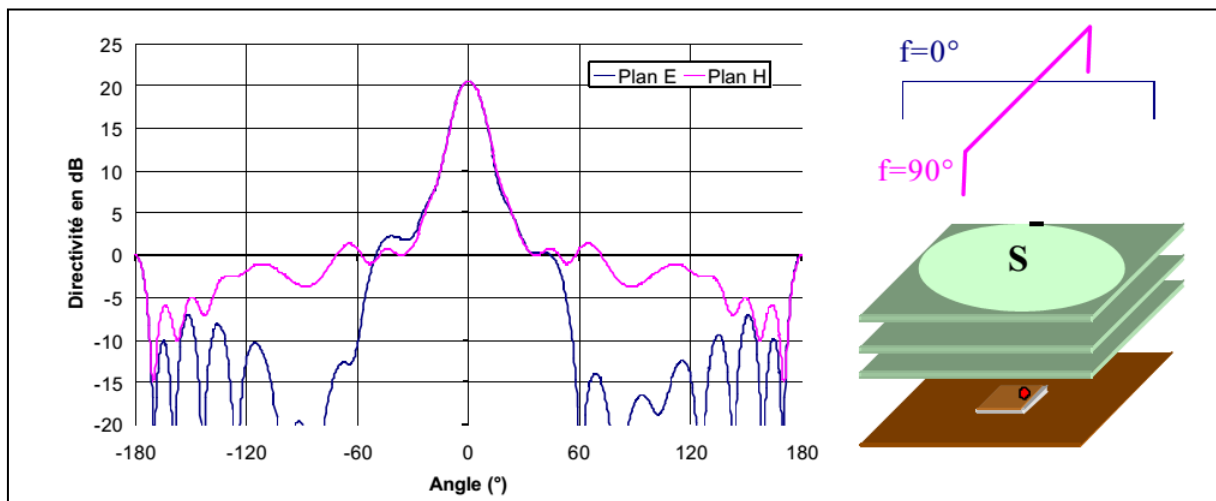


Figure II.15 : Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE.

II.9. Domaines d'application [17]

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes applications possibles des matériaux à bande interdite électromagnétique. Nous limiterons au cas des cristaux photoniques bidimensionnels qui sont ceux qui offrent, pour l'instant plusieurs applications. Dans un premier temps on parlera du domaine optique ensuite, on évoquera le domaine micro-onde.

II.9.1. Dans le domaine de l'optique Les fibres optiques

Les fibres à cristaux d'électromagnétique sont déjà rentrées dans le domaine des applications industrielles. Elles ont été proposées pour la première fois dans les années 1995. Ces fibres sont obtenues par empilement de plusieurs tubes de silices pour obtenir une "préforme". Ensuite cette préforme est chauffée à une très haute température de l'ordre de 1800°C puis étirée afin qu'elle obtienne un diamètre d'environ 125µm, pour être similaire à une fibre classique. La fibre est ensuite protégée par une gaine plastique.

Comme on le voit sur le graphique de **Figure II. 20** :

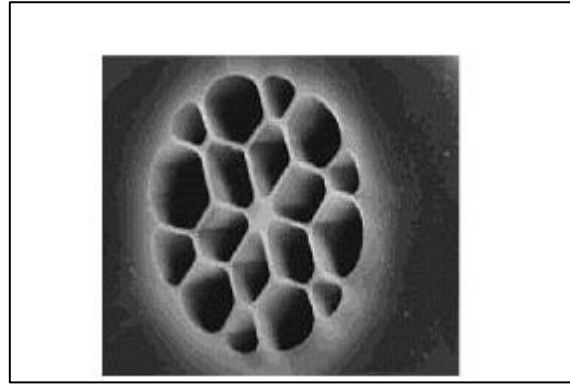


Figure II. 20 : photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de $1\mu\text{m}$

Ces fibres à cristaux électromagnétique possèdent aussi des propriétés de dispersion qu'on pourra contrôler à travers leurs paramètres géométriques.

Les micro-résonateurs

L'utilisation des défauts ponctuels et linéaires permettent de faire des micro-résonateurs et des guides d'ondes respectivement. La réalisation des micro-résonateurs est obtenue par inclusion des défauts ponctuels dans une structure à cristaux électromagnétique. Les premières études sur les micros résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par labilloy. Les guides d'onde : l'idée de réaliser les guides d'onde est apparu en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes. Il existe un autre type de guide qu'on appelle guide coudé 'guide avec virage' Filtres et multiplexeurs : Une fonction importante qu'on peut réaliser avec des cristaux électromagnétiques :

Le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises. Plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Par exemple, la réalisation de permet l'extraction ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde bien précise.

II.9.2. Dans le domaine micro-onde

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIE aux fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables dans ce domaine de fréquence. Le secteur des Télécommunications avec notamment les antennes, est très concerné. En effet, on peut utiliser des matériaux à bandes photoniques interdites pour la réalisation de :

- substrats d'antennes : les premières expériences visant à exploiter les cristaux électromagnétiques diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par ER. Brown et al.

- surfaces à hautes impédances : peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes

Les BIE peuvent aussi être utilisés dans la réalisation de circuits micro-ondes tels que :

- filtres planaires ;

-guides ;

-multiplexeurs,

- Amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des cristaux électromagnétique ultra réfractifs

II.10. Conclusion

Les antennes à bandes interdites électromagnétique (BIE) sont bien connues pour leur capacité à fournir un rayonnement plus directif sans avoir besoin d'un système d'alimentation compliqué. L'évolution de ces antennes, à partir des matériaux BIE périodiques, a été présentée dans ce chapitre. Le principal inconvénient de l'antenne imprimée à BIE est sa faible bande passante de rayonnement, ou le principal avantage d'un réseau c'est d'améliorer cet inconvénient (élargir la bande passante).

Bibliographie

- [1] L. Rayleigh. “On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure”. *Philosophical Magazine*, 24 :145–159, Augst, 1887.
- [2] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. “Meade *Molding the Flow of Light*”. Princeton University Press, 2008
- [3] Y. Rahmat-Samii and F. Yang. “Applications of EBG in low profile antenna designs: What have we learned? In Saïd Zouhdi, Ari Sihvola, and Alexey P. Vinogradov, editors, *Metamaterials and plasmonics : Fundamentals, Modelling, Applications*. Springer, 2008.
- [4] V. G. Veselago and E. E. Narimanov. The left hand of brightness: past, present and future of negative index materials. *Nature Materials*, 5 :759–762.
- [5] Viktor G Veselago. “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”. *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4) :509, 1968.
- [6] Alain Priou. Matériaux composites en électromagnétisme. *Techniques de l’Ingénieur*, (E 1165).
- [7] Mohamed Farhat, Sebastien Guenneau, and Stefan Enoch. “Ultrabroadband elasticcloaking in thin plates”. *Phys. Rev. Lett.*, 103(2) :024301, July 2009.
- [8] P. de Maagt, R. Gonzalo, Y.C. Vardaxoglou, and J.-M. Baracco. “Electromagnetic band gap antennas and components for microwave and (sub)millimeter wave applications”. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 51(10) :2667 – 2677, Oct. 2003.
- [9] A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. M. abdelghani and T. A. Denidni, "Wideband and high-gain EBG resonator antenna based on dual layer PRS", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 1, 98–101, 2017
- [10] H. Liu, S. Lei, X. Shi and L. Li , "Study of antenna superstrates using metamaterials for directivity enhancement based on Fabry-Perot resonant cavity", *International Journal of Antennas and Propagation*, article ID 209741, 1–10, 2013
- [11] L. Li, S. Lei and C. H. Liang, "Metamaterial-based Fabry-Perot resonator for ultralow profile high-gain antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 11, 2620–2623, 2012.
- [12] A. R. Vaidya, R. K. Gupta and S. K. Mishra, "Efficient, high gain with low side lobe level antenna structures using parasitic patches on multilayer superstrate " *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 6, 1488–1493, 2012
- [13] A. R. Weily, T. S. Bird and Y. J. Guo, "A reconfigurable high-gain partially reflecting

surface antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 11, 3382–3390, 2008.

[14] N. Wang, Q. Liu, C. Wu, L. Talbi, Q. Zeng and J. Xu, "Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two complementary FSS layers", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 16, no. 5, 2463–2471, 2014

[15] L. Moustafa, "Conception d'antennes à bande interdite électromagnétique large bande et multi bandes à base de méta surfaces", Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges, France, 2009

[16] HAMDIKEN .N "Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna.2010.

[17] A.BOUFRIOUA"Contribution à l'étude des antennes a patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Novembre 2006.



CHAPITRE III

Résultats & discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, en premier, nous avons conçu une antenne patch rectangulaire à substrat BIE alimentée par une ligne micro ruban avec encoches que nous l'avons utilisée pour les réseaux d'antennes à deux patches alimentées en série, et pour le réseau à deux patches mais alimentées en parallèle. Nous avons comparé les différentes structures dans le but d'avoir les meilleures caractéristiques de ces antennes, après nous avons étudié l'influence des paramètres d'un réseau d'antennes patches à 2 éléments de forme rectangulaire à substrats **BIE** à ID sur la fréquence de résonance, la bande passante ainsi que la directivité de cette antenne, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel *CST MICROWAVE STUDIO*.

III.2. Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique à trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences [1].

Il simplifie le processus de saisie de la structure et la définition des équipements en fournissant une interface graphique de modélisation puissante et solide *Figure III-1*. Après la modélisation du composant, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant que la procédure de simulation ne soit lancée.

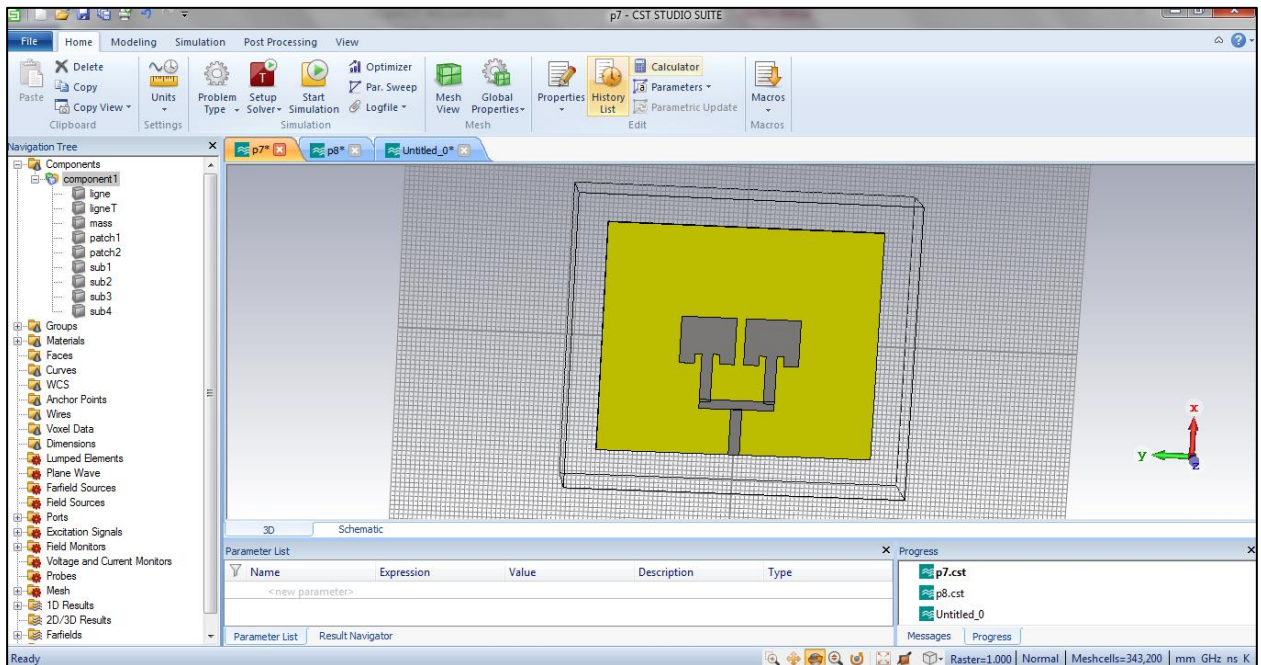


Figure III.1 : Interface graphique de *CST MICROWAVE STUDIO*.

CST MICROWAVE STUDIO est un module qui fait partie du logiciel CST STUDIO SUITE et propose un certain nombre de solveurs pour différents types d'application. Le logiciel contient quatre techniques différentes de simulation (solveur transitoire, solveur fréquentiel,

solveur d'équation intégrale, et solveur de mode propre), pour mieux répondre aux applications particulières. L'outil le plus flexible est le solveur transitoire, qui peut obtenir le comportement fréquentiel pour une large bande de fréquence par une seule et unique simulation (contrairement à l'approche fréquentielle de nombreux autres simulateurs).

Il est basé sur la technique **FIT** (en anglais : Finite Integration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant. Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes etc... [1].

III.2.1. La méthode d'intégration finie [2]

La combinaison de propriétaire PERFECT BOUNDARY APPROXIMATION (PBA) à l'efficacité inégalée de la méthode des intégrales finies est la base de CST MICROWAVE Studio succès.

FIT a été proposé en (1977) par Thomas Weiland et a été amélioré continuellement au fil des ans. Cette méthode s'applique à l'ensemble de l'électromagnétisme (à partir de l'électricité statique à haute fréquence) et des applications optiques constituent la base pour les outils de simulation commerciale.

En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel numérique efficacité et précision, la FIT a été utilisé dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, de DC à THz. Par ailleurs, la méthode d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numérique, telles que la méthode des éléments finis.

III.2.2. Aperçu de la structure de l'interface utilisateur

L'image suivante montre une capture d'écran du CST Microwave Studio comme un exemple.

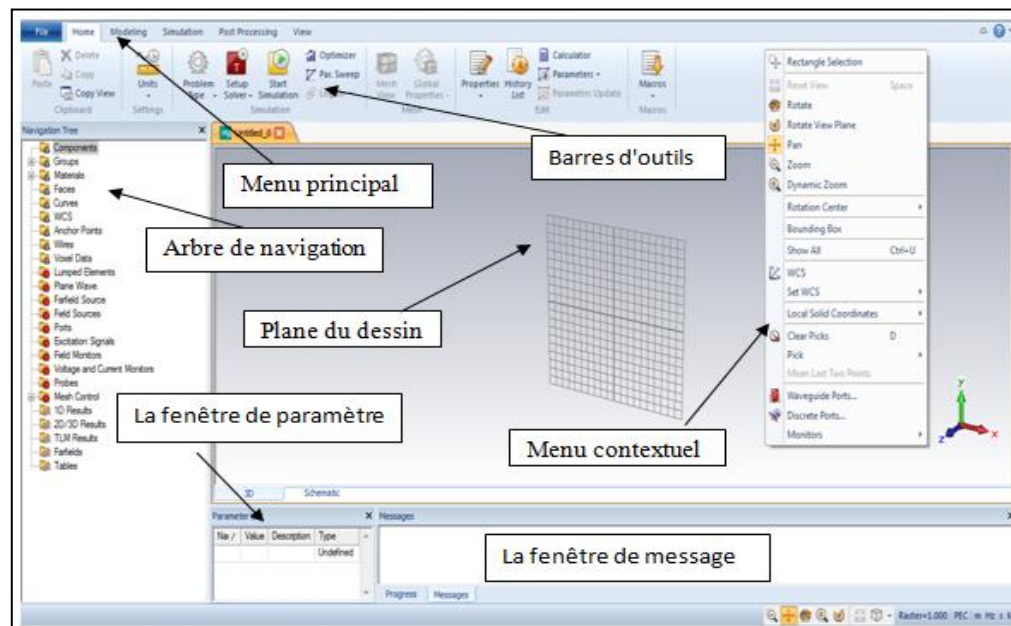


Figure III.2 : La fenêtre principale du logiciel CST.

- ❖ L'arbre de navigation est un élément essentiel de l'interface utilisateur. De là, nous pouvons accéder aux éléments structurels ainsi que les résultats de simulation. Les sections suivantes expliquent les différents articles dans cette fenêtre d'arbre.
- ❖ Les menus contextuels sont un moyen souple d'accéder à des commandes de menu les plus fréquemment utilisées pour le contexte actuel. Le contenu de ce menu qui peut être ouvert en appuyant sur le bouton droit de la souris.
- ❖ Le plan du dessin est le plan sur lequel nous allons dessiner des primitives de la structure. Comme la souris n'est qu'un localisateur 2D, même lors de la définition des structures 3D, les coordonnées doivent être projetées sur le plan du dessin, afin de spécifier un emplacement 3D. Comme on peut modifier l'emplacement et l'orientation du plan de dessin à l'aide de différents outils, cette caractéristique rend le modelleur très puissant.
- ❖ La fenêtre de paramètre affiche une liste de tous les paramètres précédemment définis avec leurs valeurs actuelles.
- ❖ La fenêtre de message affiche le texte de l'information (par exemple la sortie du solveur) le cas échéant
- ❖ Les autres éléments de l'interface utilisateur sont standards pour une application basée sur Windows.

III.3. Exemple d'un projet en CST

III.3.1. Démarrer le logiciel

Après le démarrage CST Studio Suite, vous serez invité à ouvrir un fichier existant ou à créer

un nouveau projet:

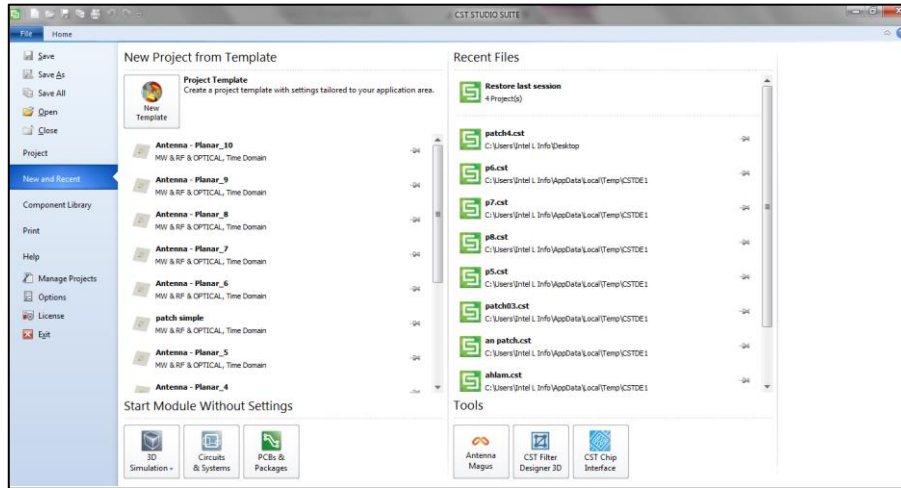
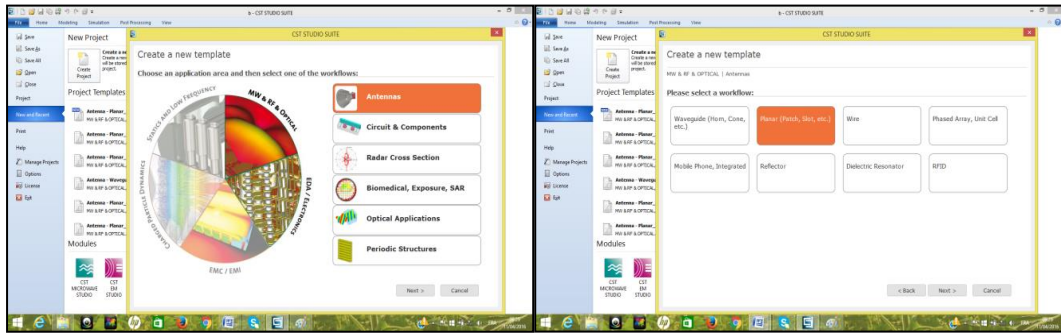
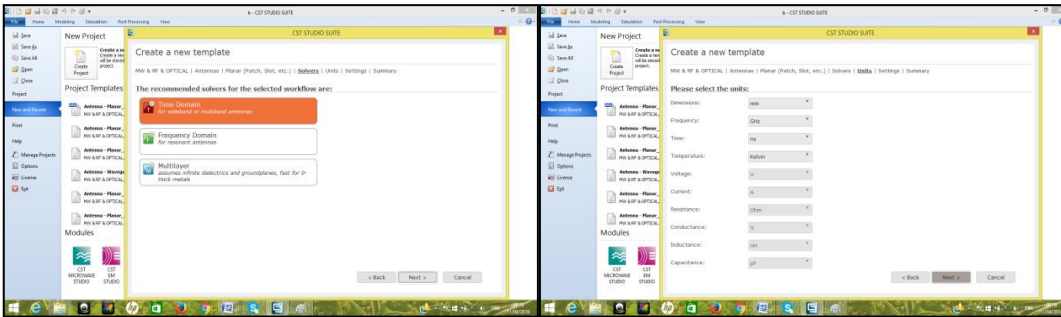


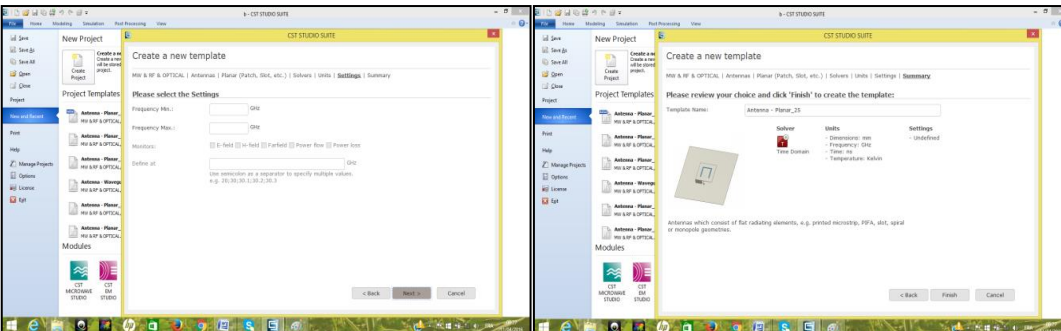
Figure III.3 : La fenêtre d'accueil.



(a) (b)




(c) (d)



(e) (f)

Figure III.4 (a-b-c-d-f) : Les fenêtres pour créer un nouveau projet.

III.3.2. Créer le plan de masse

1. Activez l'outil de briques en cliquant sur l'icône  correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
2. On peut définir un point de départ par un double-clic sur un emplacement sur le plan du dessin.
3. Maintenant, on peut sélectionner la base de la face de coin de la brique sur le plan du dessin par double-clic dessus.
4. Ensuite, définir la hauteur de la brique en faisant glisser la souris. Double-cliquez pour fixer la hauteur de la brique.
5. Enfin, une boîte de dialogue s'ouvre où on peut introduire les valeurs numériques de tous les coordonnées et choisir le matériau dans ce cas (PEC : perfect electric conductor) et cliquez sur OK.

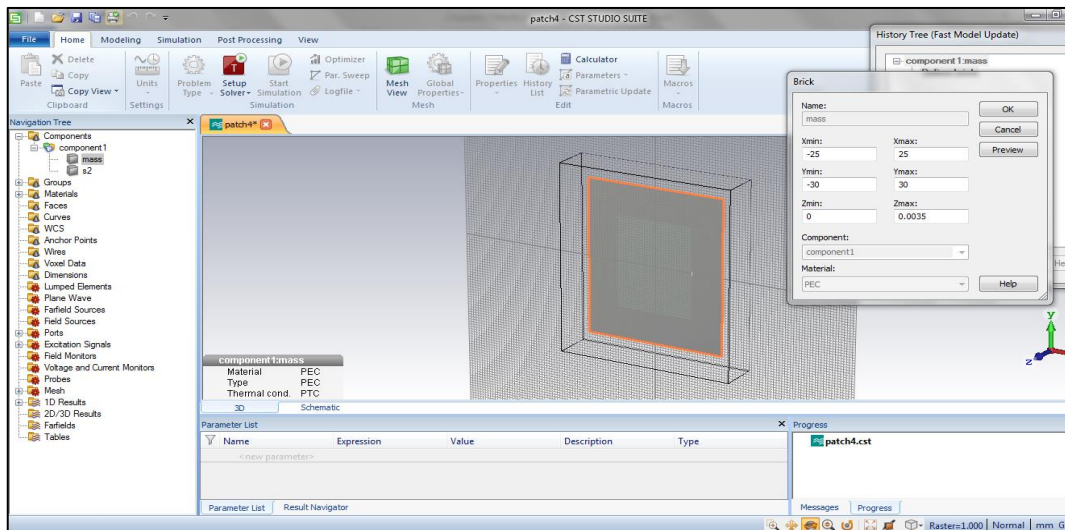



Figure III.5 : Créer un plan de masse.

III.3.3. Créer des substrats diélectriques

Le substrat est constitué de quatre couches diélectriques.

Pour créer les couches 1 et 3 il faut :

1. choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et les mêmes étapes que celles du plan de masse.
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas « **vacuum : air** » puis cliquez sur OK
3. Pour créer les couches 2 et 4 mêmes étapes de la création les couches 1 et 3, mais le matériau dans ce cas « **Epoxy resin** ».

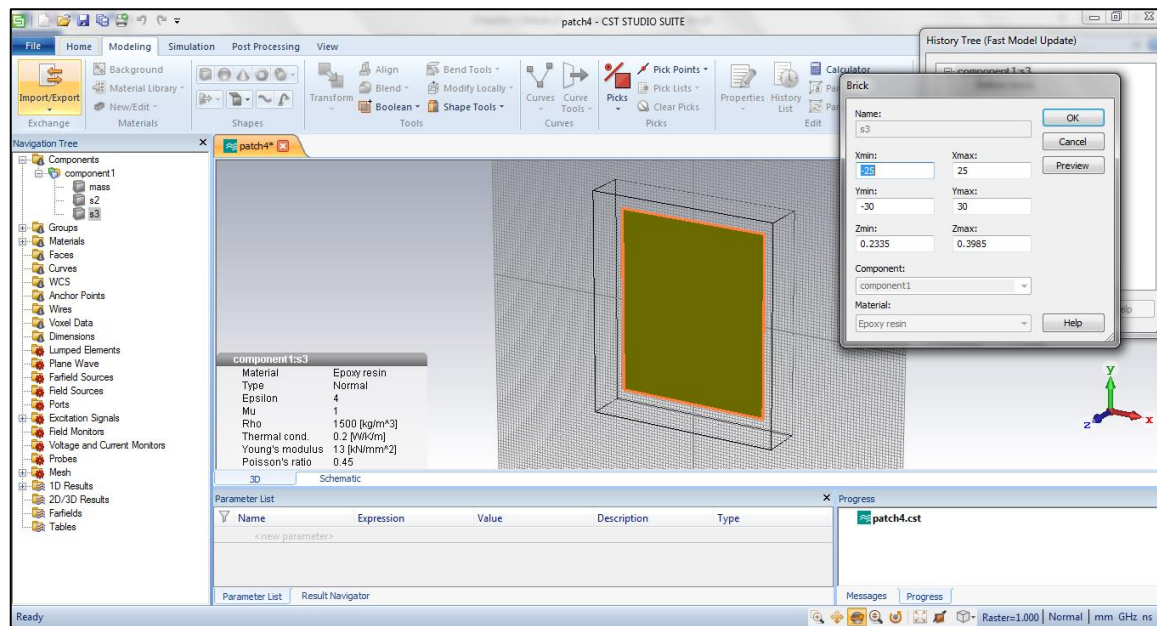



Figure III-6 : Créer des substrats diélectriques.

III.3.4. Créer les patches :

Pour créer les 02 éléments du réseau patches il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et les mêmes étapes du plan de masse.
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et cliquez sur OK.
3. on va le refaire ces étapes pour le deuxième élément du réseau.

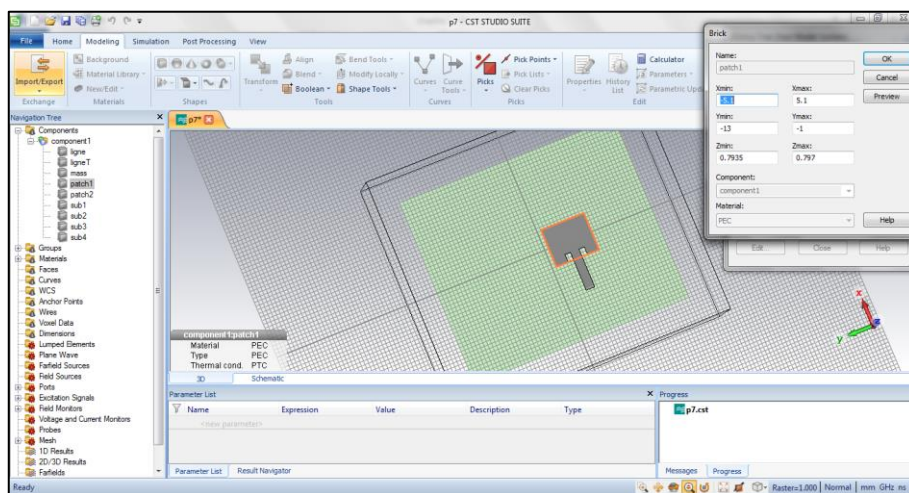


Figure III.7 : Créer le premier élément du réseau.

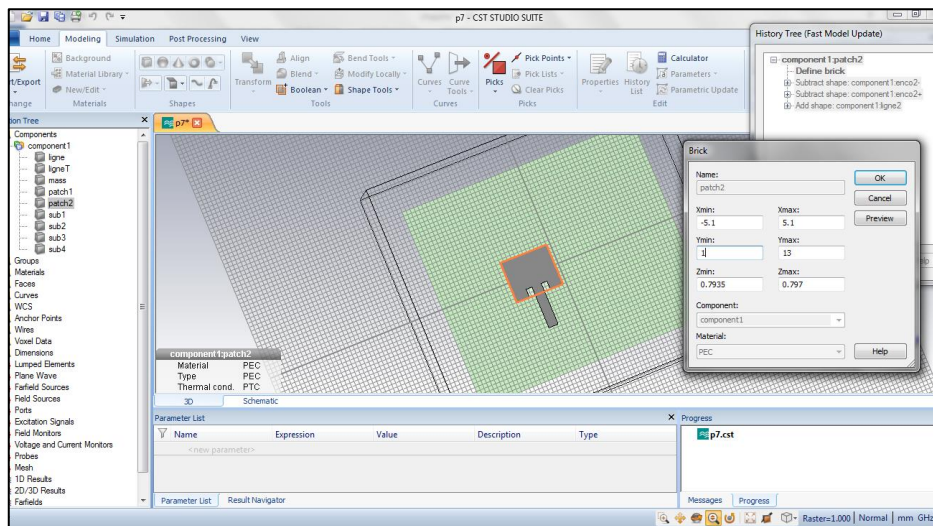




Figure III-8 : Créer le deuxième élément du réseau.

III.3.5. Créer les encoches de patch

Pour créer les 02 encoches de patch il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et les mêmes étapes du plan de masse ;
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et clique sur **OK** ;
3. On clique sur le patch, ensuite sur la barre d'outils on clique sur  et choisir « **subtract** », après un autre clique sur l'encoche qu'on a créé puis sur **Entrée** ;
4. Les mêmes étapes pour la deuxième encoche ;
5. On va refaire ces étapes pour le deuxième élément ;

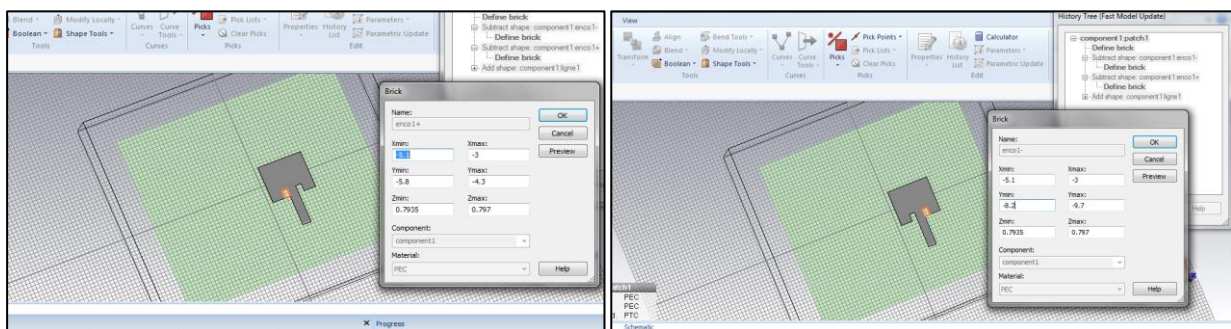




Figure III.9 : Créer les encoches des éléments rayonnants.

III.3.6. Créer la ligne microbande

Pour créer la ligne microbande de patch il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et les mêmes étapes du plan de masse ;
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et clique sur **OK** ;
3. On clique sur le patch, ensuite sur la barre d'outils on clique sur  Boolean et choisir « **add** », après un autre clique sur l'encoche que l'on a créé puis sur **Entrée** ;
4. On va refaire ces étapes pour le deuxième élément ;

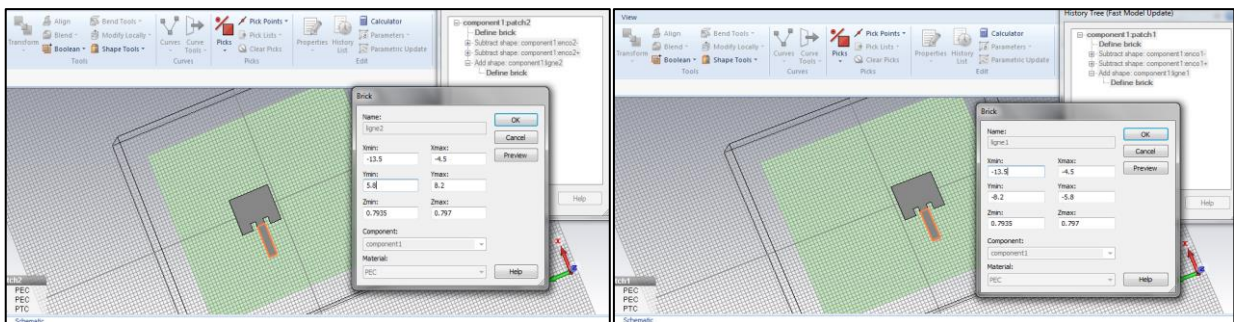



Figure III-10 : Créer les lignes microbandes.

III.3.7. Définir le port

1. Activez l'outil de PORT en cliquant sur l'icône  correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue s'ouvre on va entrer l'emplacement de ce port suivant x, y et z.

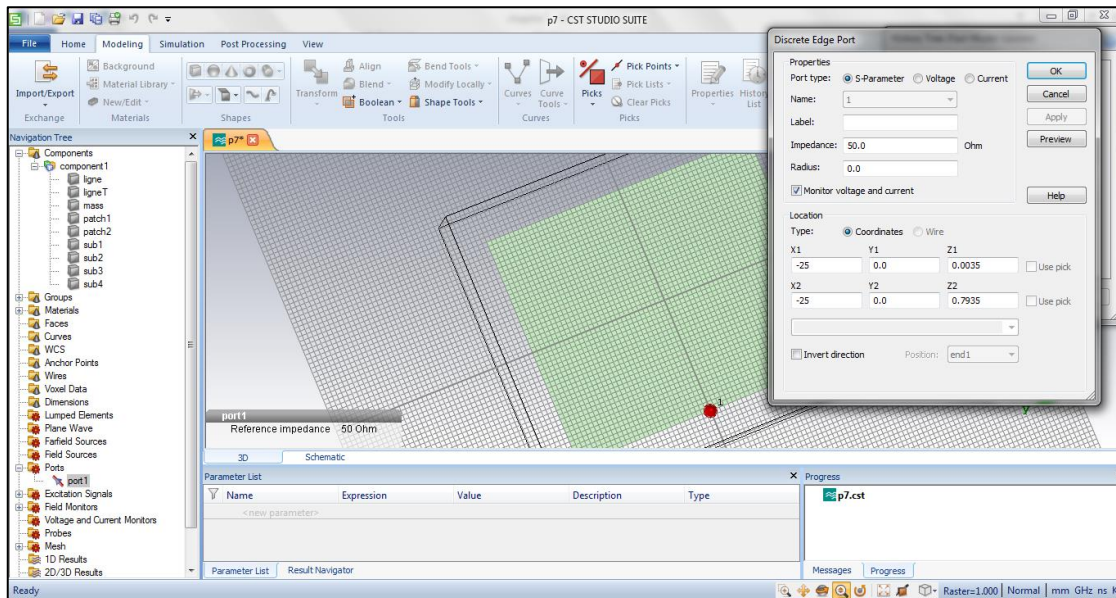



Figure III-11 : Définir le port.

III.3.8. Définir le domaine de fréquence

1. Activez l'outil de fréquence en cliquant sur l'icône correspondante  dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue on limite le domaine de fréquence et cliquez sur OK.

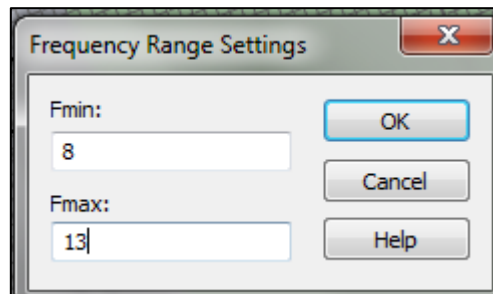
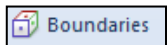


Figure III-12 : Définir le domaine de fréquence.

III.3.9. Définir les conditions au bord

1. Activez l'outil de condition au bord en cliquant sur l'icône correspondante  dans la barre d'outils de l'objet.
2. En utilisant la boîte de dialogue on choisit « **open add space** » sur tous les directions dans notre cas et cliquez sur **OK**.

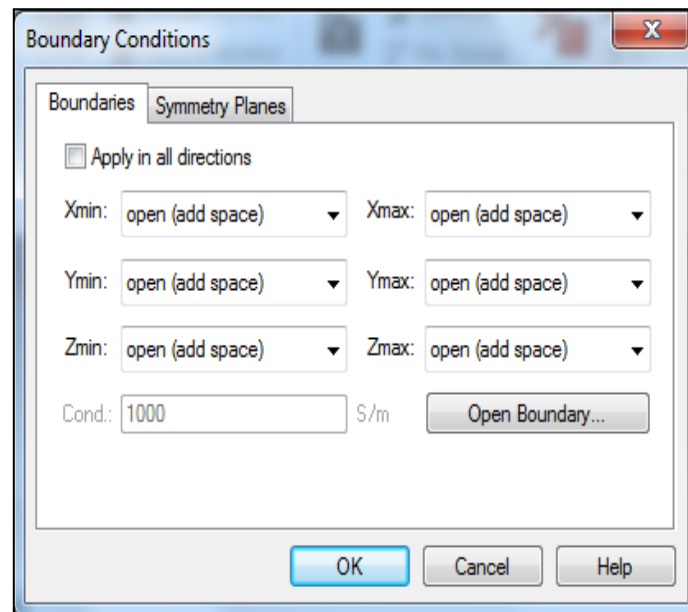



Figure III-13 : Définir les conditions au bord.

III.3.10. La simulation

Pour lancer la simulation il faut :

1. Activez l'outil de simulation en cliquant sur l'icône  correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
2. En utilisant la boîte de dialogue on peut choisir la précision
3. cliquez sur <Start>

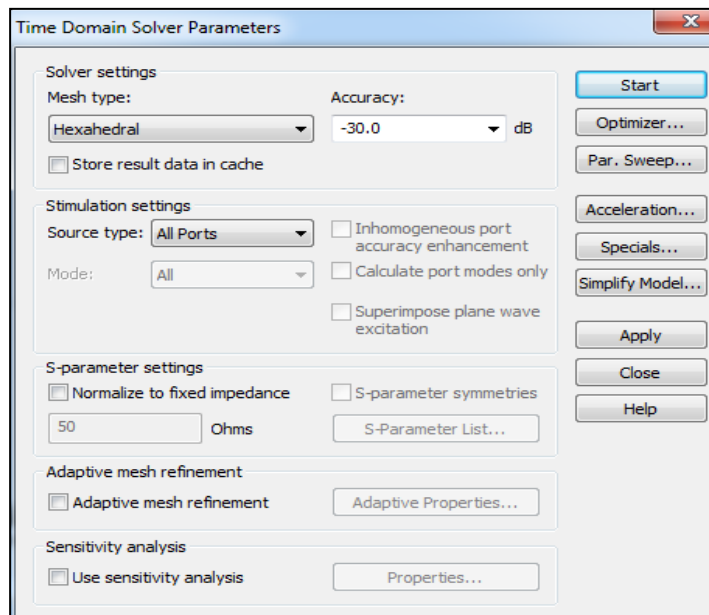


Figure III-14 : choisir la précision.

III.4. Présentation de la structure d'un seul élément

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat BIE de type 1D qui est constitué de quatre couches: deux couches diélectriques d'une permittivité de $\epsilon_{r1}=1$ « vacuum », d'épaisseur $h_1=0.23\text{mm}$ et deux autres couches diélectriques d'une permittivité de $\epsilon_{r2}=4$ « Epoxy resin », d'épaisseur $h_2=0.165\text{mm}$, la longueur et la largeur d'élément rayonnant sont $L_p=10.2\text{mm}$, $W_p=12\text{mm}$ et les dimensions du substrat $L_s=50\text{mm}$, $W_s=60\text{mm}$. Cette antenne est alimentée par une ligne microbande.

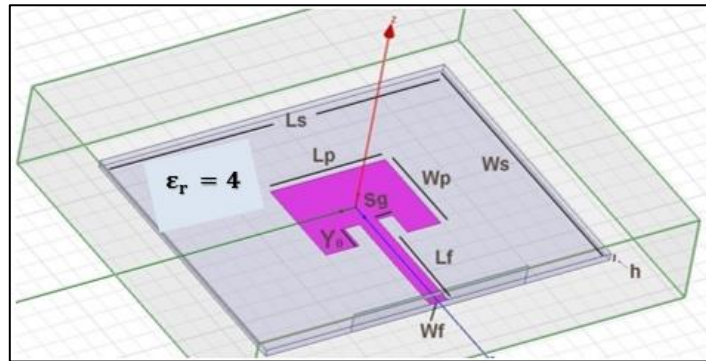


Figure III-15 : La structure d'antenne 1 patch.

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
Longueur patch, L_p	10.2
Largueur patch, W_p	12
Longueur ligne alimentation, L_f	11.46
Largueur ligne alimentation, W_f	2.408
Position d'alimentation Y_0	1.5
Largueur de l'encoche S_g	2.196
Largueur substrat, W_s	27.93
Longueur substrat, L_s	35.58
Hauteur de couche 1 et 3, $\epsilon_{r1}=1$	0.23
Hauteur de couche 2 et 4, $\epsilon_{r2}=4$	0.165

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch rectangulaire

III.5. Structure d'antenne réseau à deux patches rectangulaires :

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et un espacement de $\lambda/2$ entre les deux patches, un réseau d'antenne à deux patches rectangulaires est conçu. Nous optons pour deux méthodes d'alimentation, la première est une alimentation série utilisant un transformateur quart

d'onde et la deuxième est une alimentation parallèle par le biais d'un réseau d'alimentation sous forme d'une **jonction T** (diviseur de puissance) excité par une source 50 Ω . **Figure.III.16** montre la géométrie des antennes proposées.

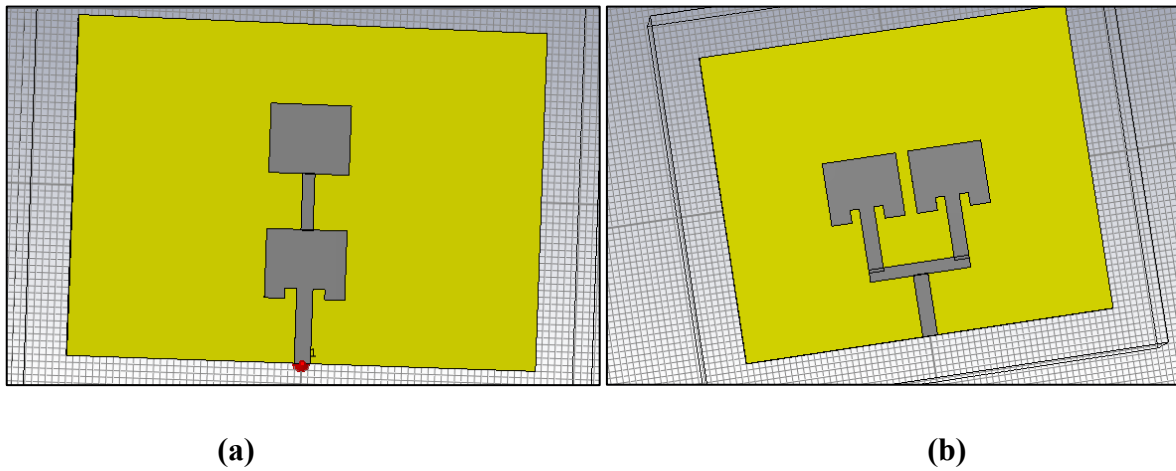


Figure III.16 : Antenne réseau de 2 patches rectangulaires alimentés : **a)** en série et **b)** en parallèle

III.6. Influence des paramètres de l'antenne sur ses caractéristiques

Dans cette partie on étudie l'effet des paramètres de l'antenne sur la variation de la directivité, la fréquence de résonance et de la bande passante.

Premièrement on compare un réseau d'antenne à 2 patches (pour une alimentation série et parallèle) avec une antenne 1 patch, ensuite on compare une structure à substrat simple avec une structure avec substrat à **BIE** pour un seul élément (patch), après l'influence des paramètres géométriques (épaisseurs des substrats, la longueur et la largeur du patch) et la permittivité des différentes couches sur la directivité, la fréquence de résonance et la bande passante pour un réseau d'antenne à 2 patches et avec un substrat à BIE.

III.6.1. Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle) et une antenne d'un seul élément

Les résultats sont obtenus en cliquant sur l'icône  dans l'arbre navigation.

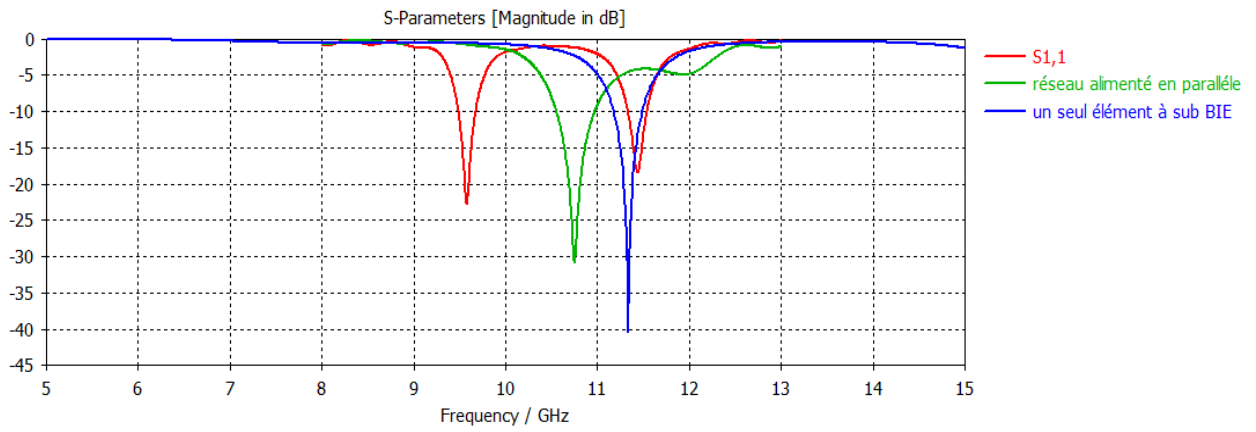
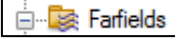


Figure III-17 : Coefficient de réflexion S_{11} pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne d'un seul élément.

Les résultats de la directivité sont obtenus en cliquant sur l'icône  dans l'arbre navigation.

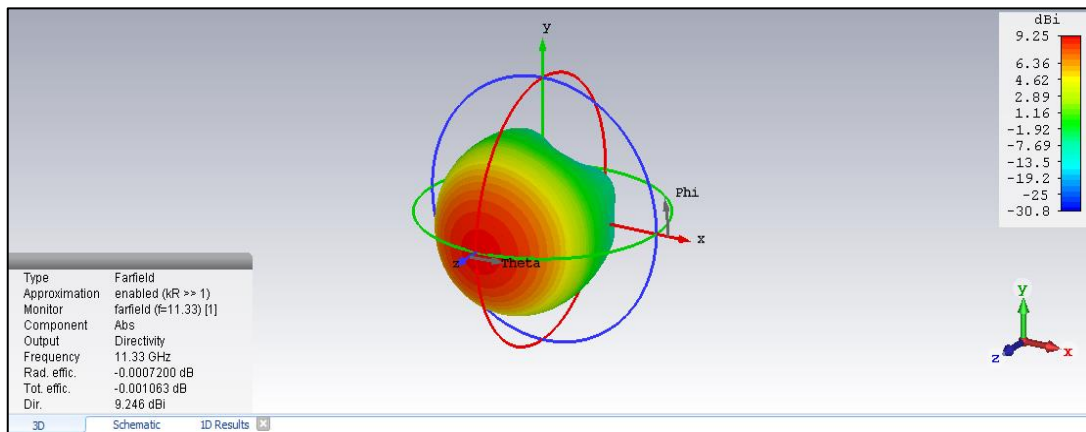


Figure III-18 : Directivité en 3D d'une antenne 1 patch rectangulaire.

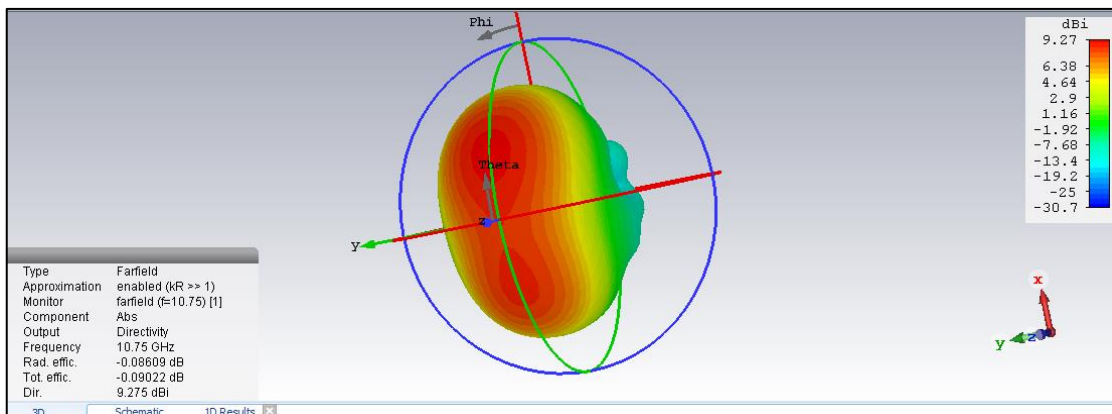


Figure III-19 : Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation parallèle.

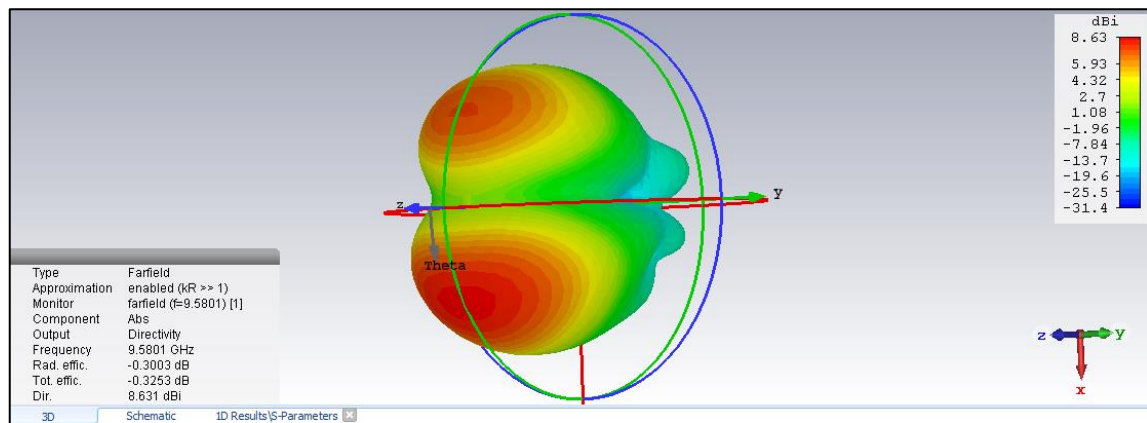


Figure III-20 : Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation en série.

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S_{11}	La fréquence de résonance	La bande passante
Antenne 1 patch	9.25	-40.42	11.33	0.30 GHZ
Réseau 02patch en série	8.63	-22.66	9.58	0.186 GHZ
Réseau 02patch parallèle	9.27	-30.89	10.75	0.41 GHZ

Tableau III-2 : Les résultats pour les différentes structures d'antennes.

A partir des figures (III-17, III-18, III-19, III-20) du coefficients de réflexion S_{11} et de la directivité d'un antenne d'un seul élément patch et d'un réseau à 2 éléments rayonnants avec les 02 types d'alimentations : série et parallèle, et les résultats indiqués dans le tableau III-2 des fréquences de résonances et les bande passantes des 03 structures, et on remarque que :

- La fréquence de résonance pour un réseau a diminué par rapport à un seul élément ;
- La bande passante pour un réseau est plus large par rapport à un seul élément ;
- La directivité pour un réseau à alimentation parallèle est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément.

III.6.2. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal

On étudie la variation de la directivité et le coefficient de réflexion S_{11} de deux antennes patches rectangulaires: le premier à substrat à BIE, la permittivité du substrat qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques de permittivité $\epsilon_{r1}=1$, d'épaisseur $h_1=0.23\text{mm}$ et les deux autres couches diélectriques « Epoxy resin » de permittivité $\epsilon_{r2}=4$, d'épaisseur $h_2=0.165\text{mm}$, et une antenne à substrat normal dans ce cas on utilise le diélectrique « Arlon Iso 917 (loss free) » de permittivité $\epsilon_r = 2.2$ d'épaisseur $h=0.79\text{mm}$.

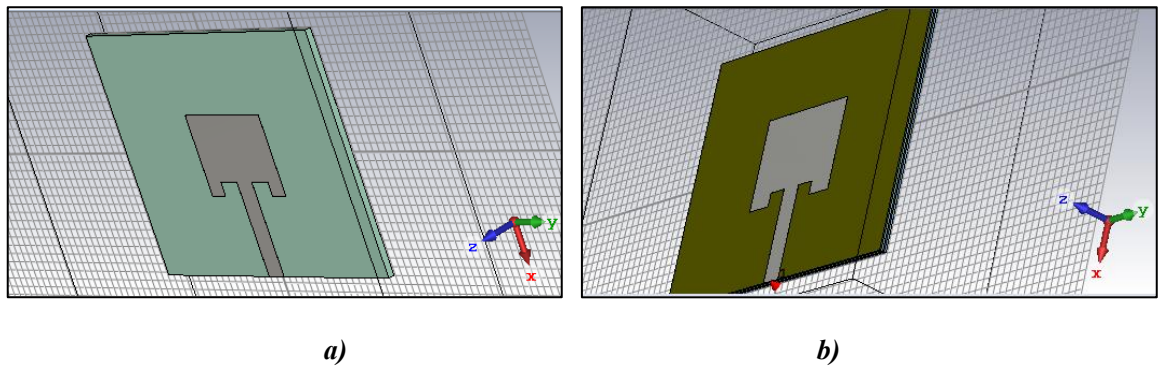


Figure III-21 : Structure des antennes : a) à substrat normal b) à substrat à BIE.

On obtient les résultats suivants pour les 02 antennes :

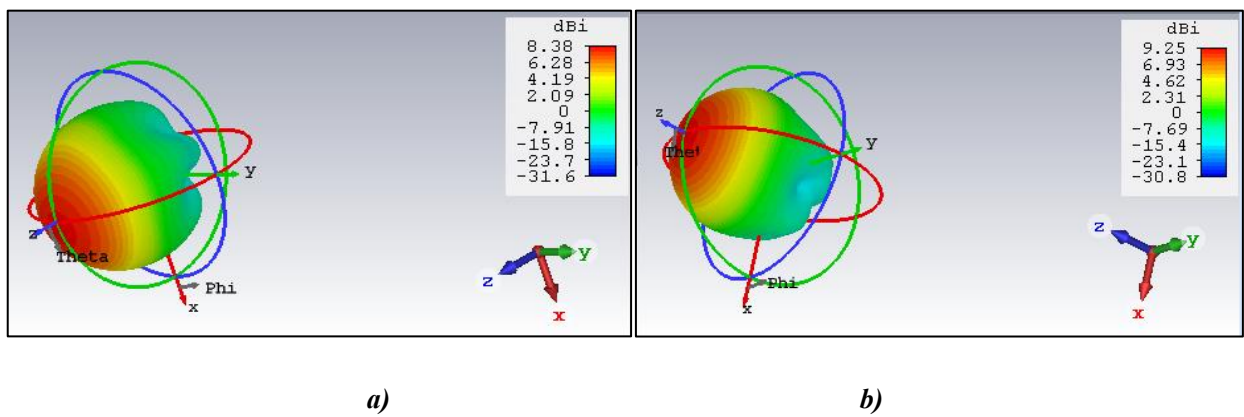


Figure III-22 : La directivité en 3D : a) Substrat normal b) Substrat à BIE.

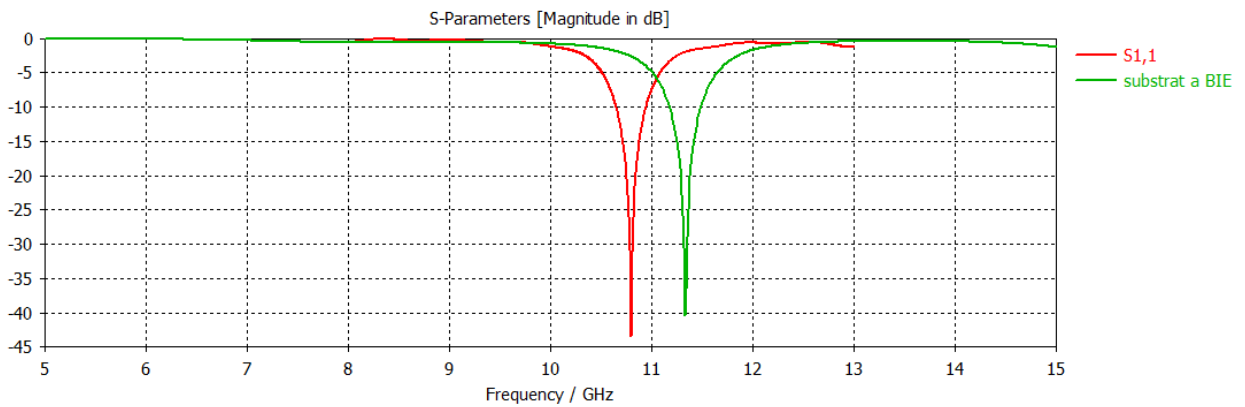


Figure III-23 : Le coefficient de réflexion S_{11} : Substrat normal et Substrat à BIE.

Substrat	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S_{11}	La fréquence de résonance	La bande passante
Normal	8.38	-43.50	10.8	0.29 GHZ
BIE	9.25	-40.42	11.33	0.30 GHZ

Tableau III-3 : les résultats pour différents substrats.

D'après les figures III-22 et III-23 et le tableau III-3, on remarque que :

Pour la directivité, la fréquence de résonance, et la bande passante pour une antenne à substrat à BIE sont plus importantes que celles d'une antenne à substrat simple.

III.6.3. Effet de la variation de longueur du patch rectangulaire

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction des différentes valeurs de longueur du patch rectangulaire à bande interdite photonique 1D, la largeur du patch $W=12$ mm, les deux couches diélectriques ont les permittivités : $\epsilon_{r1}=1$, et $\epsilon_{r2}=4$ leurs épaisseurs $h_1=0.23$ mm et $h_2=0.165$ mm, la longueur et la largeur du substrat $L=50$ mm et $W=60$ mm.

a) Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

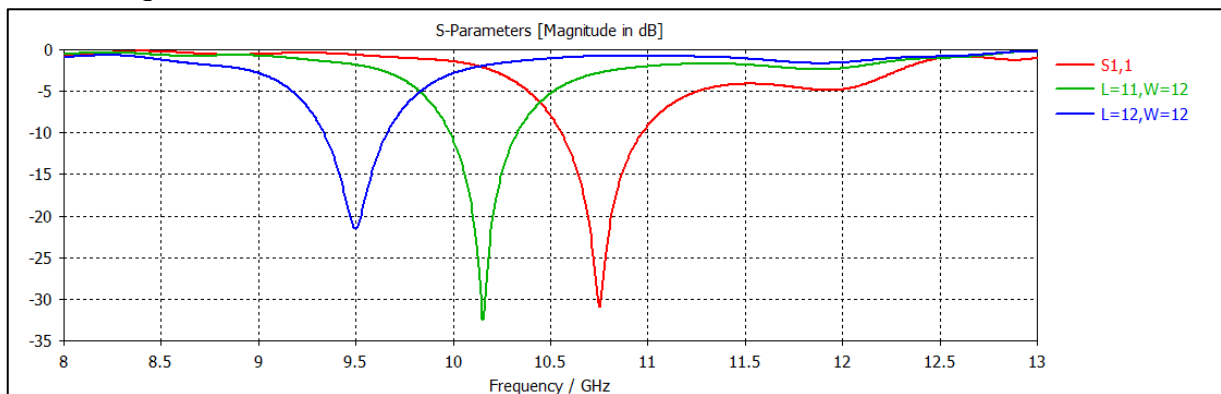


Figure III-24 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la longueur du patch rectangulaire pour une alimentation parallèle.

Largeur (w) (mm)	Longueur (L) (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
12	10.2	10.75	0.41
12	11	10.155	0.34
12	12	9.499	0.32

Tableau III-4 Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la longueur du patch rectangulaire.

D'après la Figure III-24 et Tableau III-4, qui représente la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de la longueur de patch, on observe que :

- ✓ La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la longueur du patch (inversement proportionnelle).

b) La Directivité

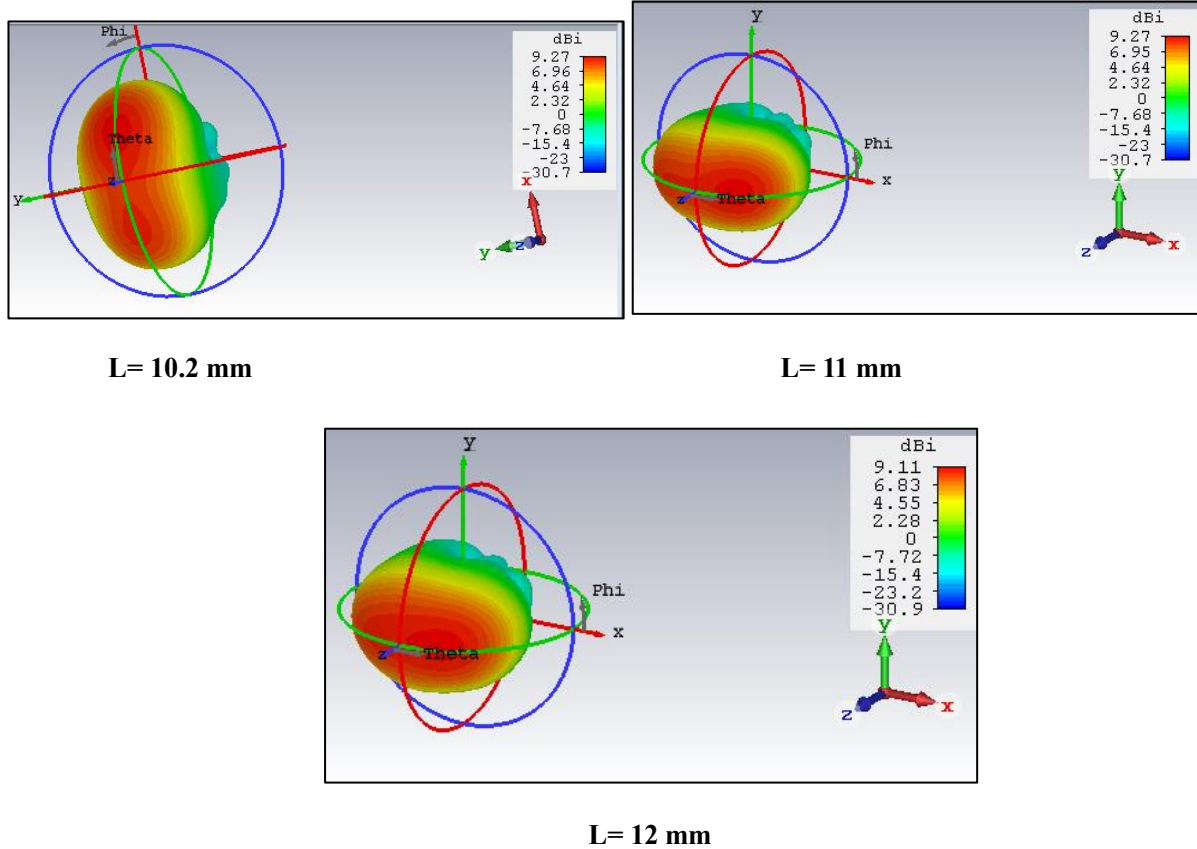


Figure III-25 : la directivité en 3D pour une variation de la longueur du patch.

On déduit la directivité sur le **Tableau III-5**.

La largeur du patch W mm	La longueur du patch L mm	Directivité (dBi)
12	10.2	9.27
12	11	9.27
12	12	9.11

Tableau III-5 : Variation de la directivité en fonction de la longueur du patch.

D’après **Tableau III-5** et **Figure III-25** pour différentes valeurs de longueur du patch, on remarque que la directivité dépend de la longueur du patch mais cette variation n’est pas sensible.

III.6.4. Effet de la variation de largeur du patch rectangulaire

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction des différents valeurs de la largeur du patch rectangulaire à bande interdite électromagnétique 1D, la longueur du patch **L= 10.2 mm**, les deux couches diélectriques ont les permittivités : $\epsilon_{r1}=1$, et $\epsilon_{r2}=4$ leurs épaisseurs **h₁=0.23 mm** et **h₂=0.165 mm**, la longueur du substrat **L=50mm**.

a) Fréquence de résonance et la bande passante

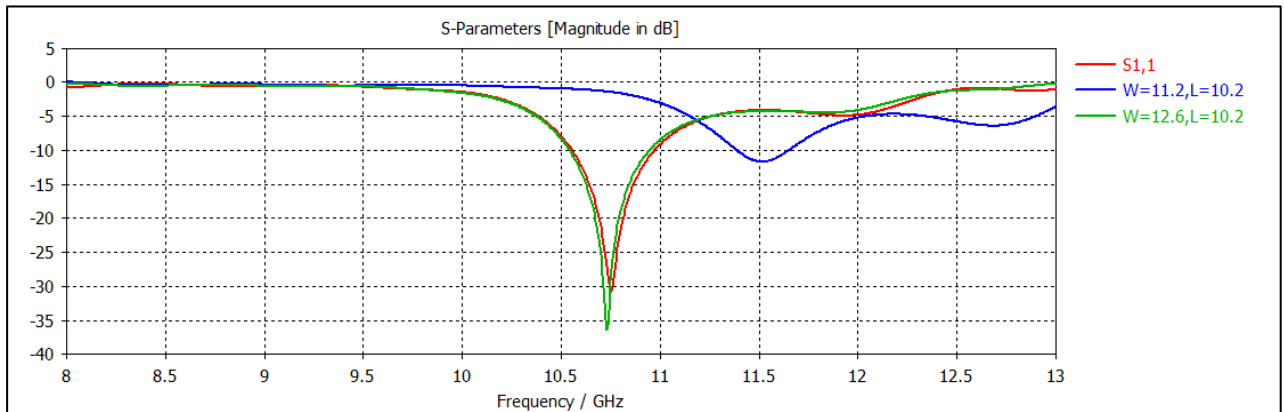


Figure III-26 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la largeur du patch rectangulaire pour une alimentation parallèle.

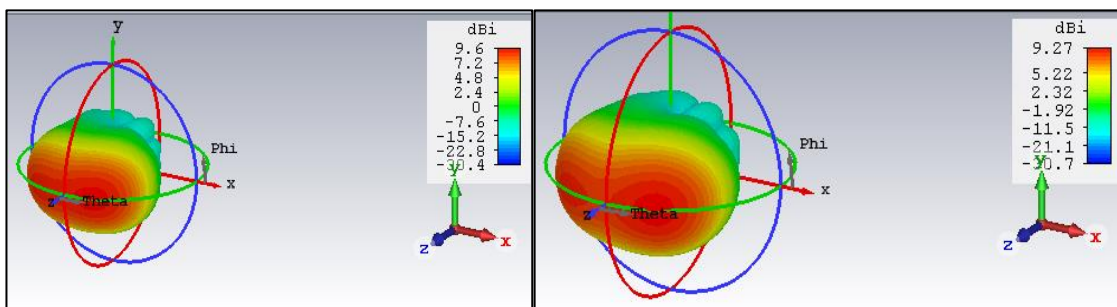
Longueur (L) (mm)	Largeur (w) (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
10.2	11.2	11.514	0.26
10.2	12	10.75	0.41
10.2	12.6	10.73	0.40

Tableau III-6 Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la largeur du patch rectangulaire.

D’après la Figure III-26 et Tableau III-6, qui représente la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de la largeur du patch, on observe que :

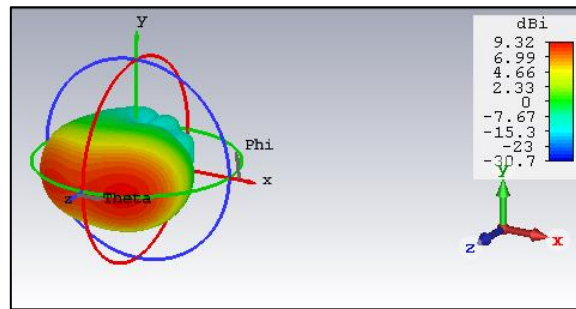
- ✓ la bande passante dépend du longueur du patch ,mais sa variation est non uniforme.
- ✓ L’augmentation de la largeur mène à une augmentation de la fréquence de résonance.

b) La Directivité



W= 11.2 mm

W= 12 mm



W= 12.6 mm

Figure III-27 : la directivité en 3D pour une variation de la largeur du patch.

On déduit la directivité sur le Tableau III-7.

La longueur du patch L mm	La largeur du patch W mm	Directivité (dBi)
10.2	11.2	9.6
10.2	12	9.27
10.2	12.6	9.32

Tableau III-7 : Variation de la directivité en fonction des dimensions du patch.

D’après Tableau III-7 et Figure III-27 pour différentes valeurs de largeur du patch, on remarque que la directivité dépend de la largeur du patch mais d’une manière non uniforme.

III.6.5. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r1}

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la permittivité ϵ_{r1} d’un réseau d’antenne à 02 patch rectangulaires : **L=10.2mm** et **W=12mm** alimenté en parallèle, les deux couches diélectriques ont une permittivité $\epsilon_{r2}=4$ « Epoxy resin », et leurs épaisseurs $h_1=0.23\text{mm}$ et $h_2=0.165\text{ mm}$, la longueur et la largeur du substrat sont : **L=50mm, W=60mm**.

a) Fréquence de résonance et la bande passante

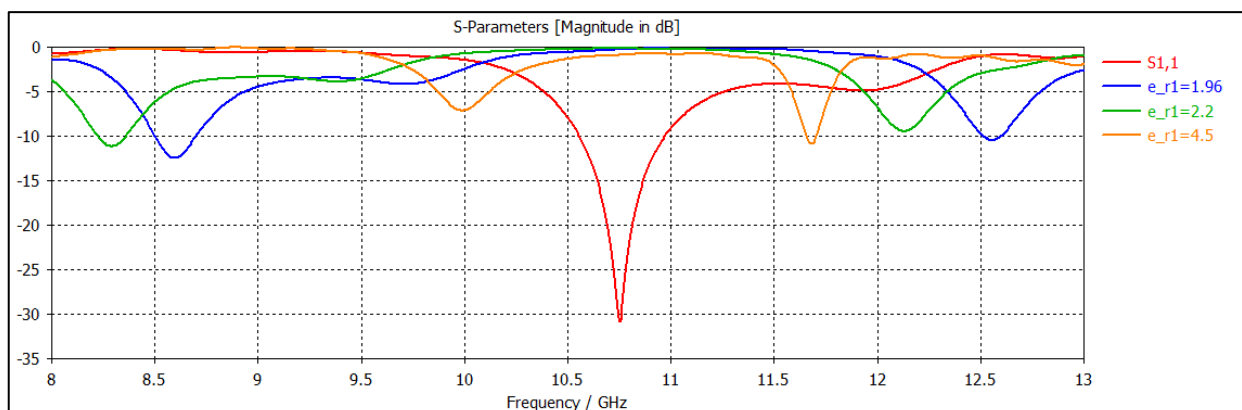


Figure III- 28 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1}).

ϵ_{r1}	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
1	10.75	0.40
1.96	8.59	0.20
2.2	8.28	0.14
4.5	9.99	-

Tableau III-8 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1}).

D’après le **Tableau III-8** et la **Figure III-28** : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} on remarque : l’augmentation de la permittivité ϵ_{r1} entraîne une décroissance de la fréquence de résonance et la bande passante. On remarque aussi qu’il y a une grande influence sur l’adaptation.

b) La Directivité

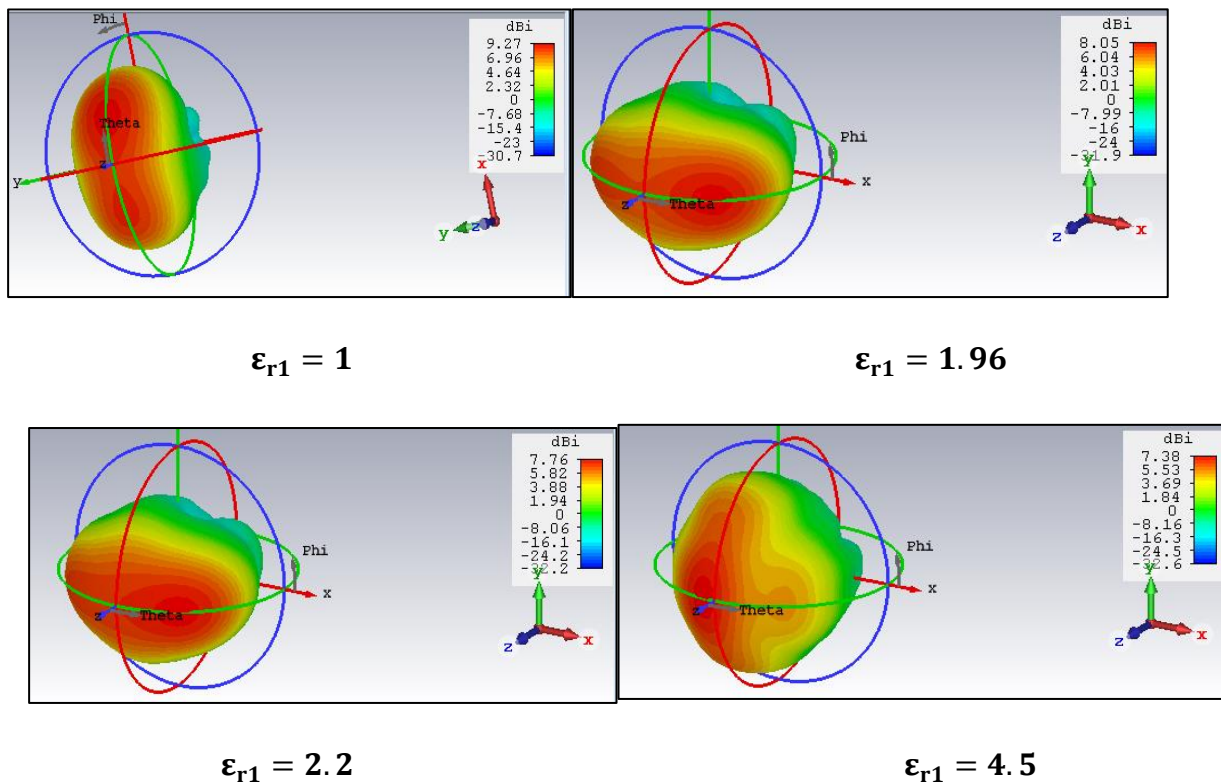


Figure III-29 : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité ϵ_{r1} .

On déduit : le **Tableau III-9**.

Permittivité	Directivité
1	9.27

1.96	8.05
2.2	7.76
4.5	7.38

Tableau III-9 : Variation de la directivité pour différents valeurs de la permittivité ϵ_{r1} .

A partir du **Tableau III-9** et la **Figure III-29** : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} , on remarque que la directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} .

III.6.6. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r2}

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} d'un réseau d'antenne à 02 patch rectangulaires de longueur $L=10.2\text{mm}$ et de largeur $W=12\text{mm}$, alimentés en parallèle, les deux couches diélectriques ont une permittivité $\epsilon_{r1}=1$ « Vacuum », et leurs épaisseurs des couches sont $h_1=0.23\text{mm}$ et $h_2=0.165\text{ mm}$, la longueur et la largeur du substrat $L=50\text{mm}$, $W=60\text{mm}$.

a) Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

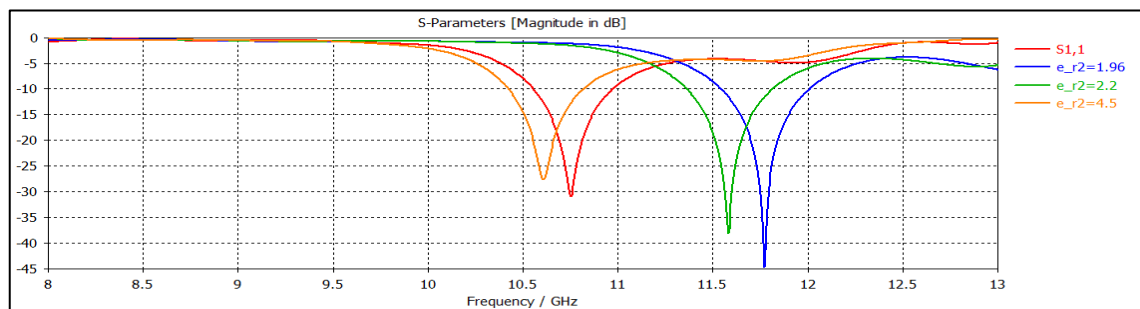


Figure III- 30 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).

ϵ_{r2}	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
4.5	10.61	0.39
4	10.75	0.40
2.2	11.58	0.45
1.96	11.77	0.46

Tableau III-10 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).

D'après le **Tableau III-10** et la **Figure III-30** : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} ,

on remarque que :

- ✓ La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} .
- ✓ Plus la permittivité ϵ_{r2} diminue, l'adaptation du réseau d'antennes est mieux.

b) La Directivité

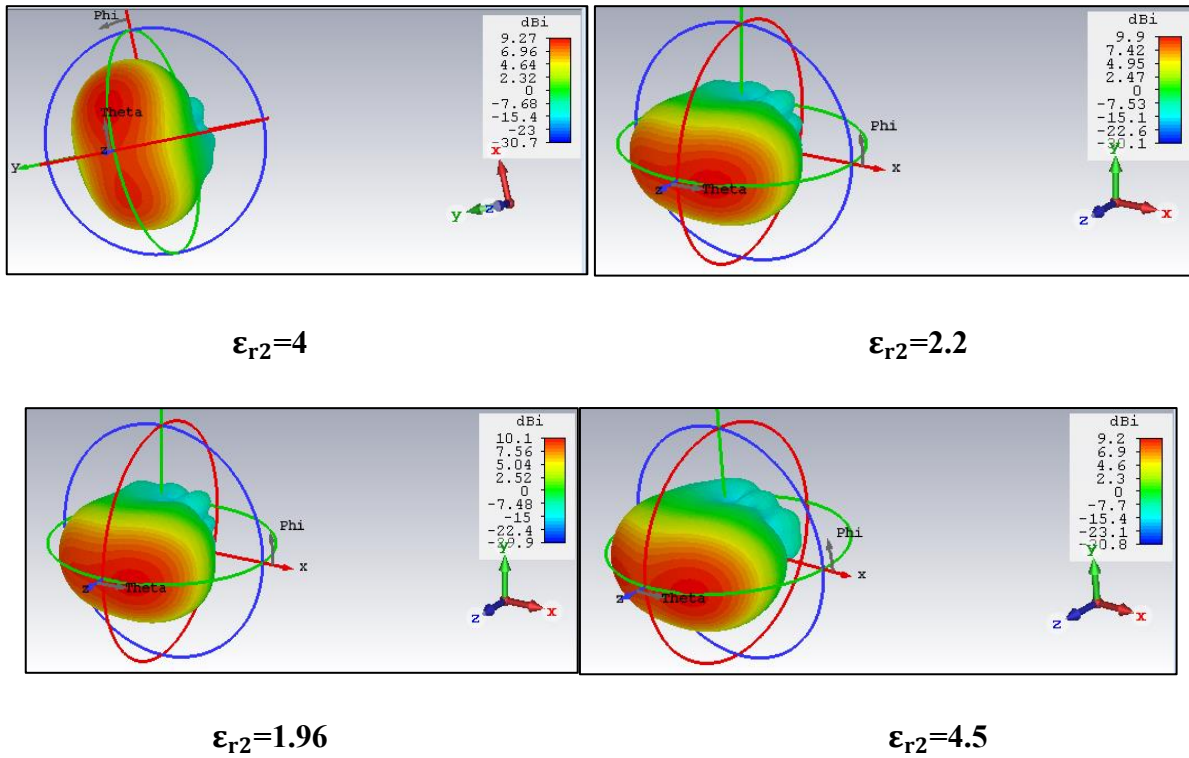


Figure III-31 : la directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} .

On déduit la directivité sur le **Tableau III-11**.

La constante diélectrique ϵ_{r2}	Directivité (dBi)
4.5	9.2
4	9.27
2.2	9.9
1.96	10.1

Tableau III-11 : La directivité en fonction de la permittivité ϵ_{r2} .

A partir du **Tableau III-11** et la **Figure III-31** : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} du substrat on note que :

- ✓ la directivité dépend de la permittivité ϵ_{r2} .
- ✓ On remarque que la directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} .

III.6.7. Effet de l'épaisseur de la couche du substrat h_2

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche du substrat h_2 d'un réseau d'antenne à 02 patch rectangulaires de $L=10.2\text{mm}$ et $W=12\text{mm}$ alimentés en parallèle, les deux couches diélectriques ont une permittivité $\epsilon_{r1}=1$ « Vacuum » d'épaisseur $h_1=0.23\text{mm}$ et $\epsilon_{r2}=4$ « Epoxy resin », la longueur et la largeur du substrat $L=50\text{mm}$, $W=60\text{mm}$.

a) La fréquence de résonance et la bande passante

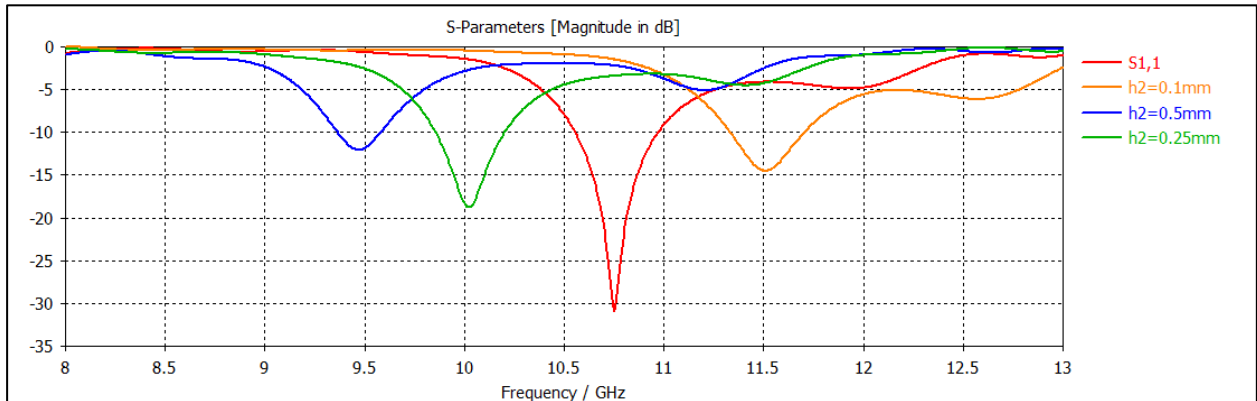


Figure III-32 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h_2 .

épaisseur de h_2 (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
0.10	11.508	0.37
0.165	10.75	0.40
0.25	10.023	0.34
0.5	9.4691	0.21

Tableau III-12 : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h_2 .

A partir du Tableau III-12 et la Figure III-32 qui représente les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents épaisseur de substrat h_2 , on remarque que :

- ✓ La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche du substrat h_2 .
- ✓ La bande passante change pour la variation de l'épaisseur du substrat mais ce changement n'est pas uniforme.

b) La directivité

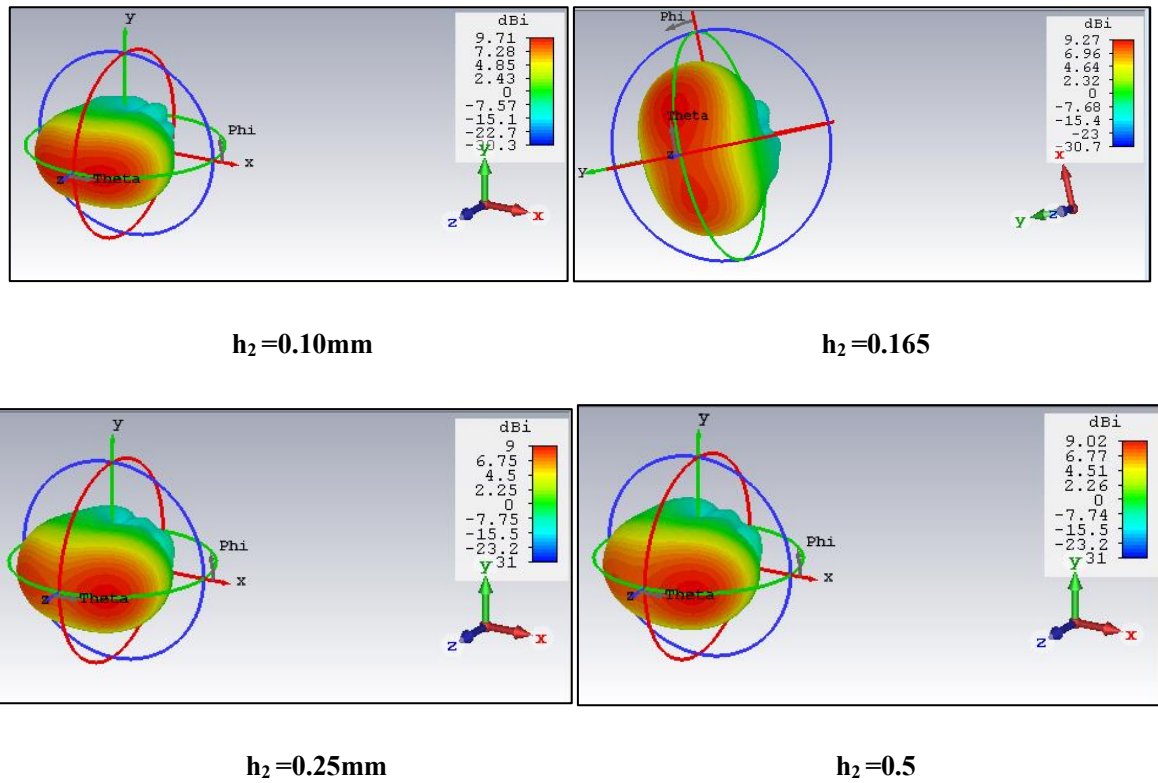


Figure III-33 : La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur h_2 .

À partir de *Figure III-33* on déduit la directivité sur le **Tableau III-13**

Épaisseurs du substrat du patch h_2 (mm)	Directivité (dBi)
0.10	9.71
0.165	9.27
0.25	9
0.5	9.02

Tableau III-13 : Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur des couches du substrat du patch h_2 (mm).

A partir du **Tableau III-13** et la *Figure III-33* pour différentes valeurs de l'épaisseur des couches du substrat à BIE h_2 , on note que la directivité dépend de l'épaisseur des couches du substrat h_2 mais la variation de la directivité n'est pas uniforme.

III.7 conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un réseau d'antenne patch à 2 éléments de forme

rectangulaires avec un substrat BIE unidimensionnelle, et nous avons étudié l'influence des paramètres de ce réseau d'antennes (géométrique et physique) sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés sont : les dimensions du patch, la permittivité des deux matériaux du substrat BIE, l'épaisseur des couches du substrat.

Nous avons montré que la directivité d'une antenne à substrat à BIE est plus importante comparé à celle d'une antenne à substrat simple.

Nous avons utilisé pour notre travail l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel (CST) qui intègre la simulation, la visualisation, et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement (3D) avec une bonne précision.

À partir des résultats :

Pour la fréquence de résonance :

- La fréquence de résonance augmente pour un substrat BIE par rapport à un substrat simple.
- La fréquence de résonance pour un réseau à deux éléments diminue par rapport à un seul élément.
- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle présente des résultats meilleurs que celle du cas de l'alimentation série.
- La fréquence de résonance augmente avec la diminution de longueur et la largeur du patch, cette variation est plus sensible dans le cas de la variation de la longueur.
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat h_2 (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroît pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroît pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

Pour la bande passante :

- La bande passante est plus large pour une antenne à un substrat à BIE par rapport à celle d'un substrat simple.
- La bande passante pour un réseau est plus large par rapport à un seul élément.

- La bande passante pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle est importante par rapport à celle d'alimentation série.
- La bande passante diminue pour l'augmentation de longueur et la largeur du patch (relation inversement proportionnelle).
- La bande passante varie pour la variation de l'épaisseur de la couche du substrat h_2 mais cette variation n'est pas uniforme.
- La bande passante diminue pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- La bande passante diminue pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

Pour la directivité:

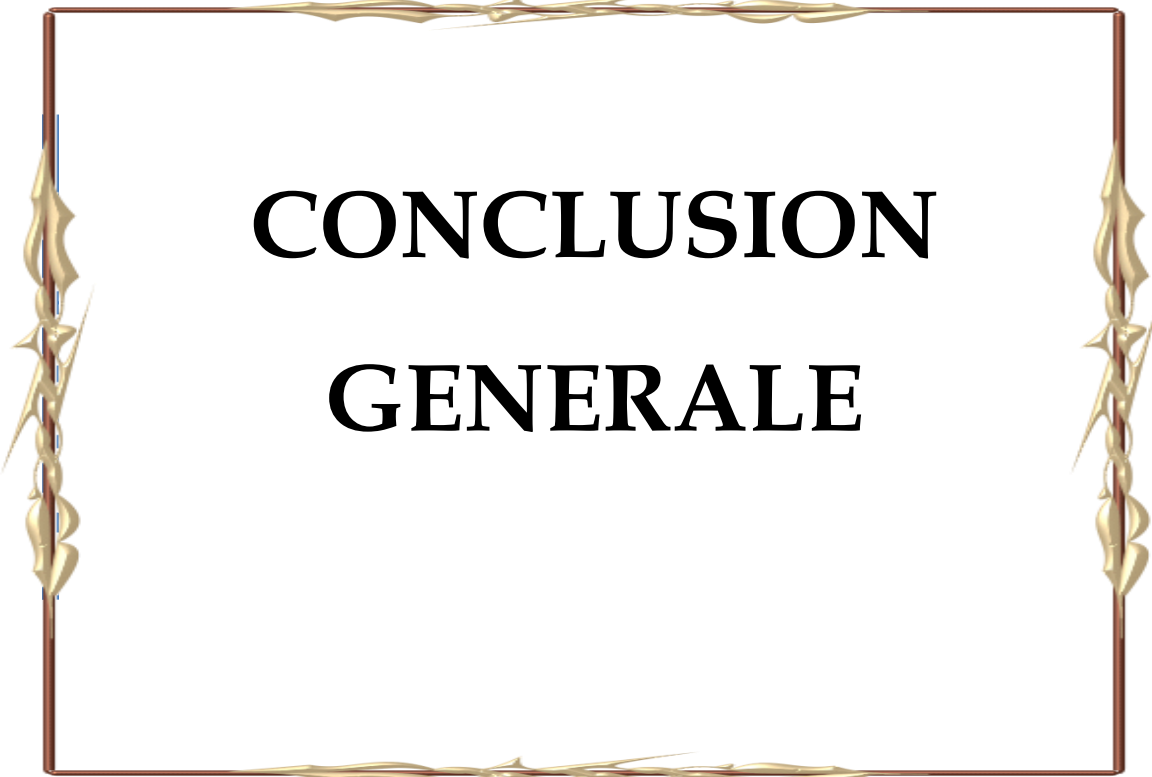
- La directivité est plus importante pour une antenne à un substrat **BIE** que celle d'une antenne à un substrat simple.
- La directivité pour un réseau à deux éléments est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément.
- Les résultats de la directivité pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle est meilleurs par rapport à celle d'une alimentation série.
- La directivité varie pour la variation de la longueur et la largeur du patch mais cette variation n'est pas uniforme.
- La directivité varie avec la variation de l'épaisseur du substrat h_2 mais cette variation est non uniforme.
- La directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- La directivité diminue pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

Bibliographie

[1] CST MICROWAVE STUDIO Web page

<http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.

[2] G. Poitau "Contribution au développement d'un isolateur coplanaire à résonance par la méthode des différences finies dans le domaine temporel", thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées Lyon, juillet 2002.



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était d'étudier un réseau d'antennes patches à deux éléments de forme rectangulaires à substrats BIE (1D) opérant dans la bande X, selon la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST basé sur la méthode d'intégration finie.

Les paramètres que nous avons étudiés dans ce travail sont : le matériau du substrat (matériau à BIE ou diélectrique simple), les types d'alimentation d'un réseau d'antennes patches (série et parallèle), les dimensions des patches, l'épaisseur du substrat, la permittivité des couches du substrat à BIE ϵ_{r1} et ϵ_{r2} .

Dans le premier chapitre nous avons présenté brièvement le réseau d'antennes imprimées, où on a cité quelques applications de ce type d'antennes, ainsi leurs caractéristiques, le choix des paramètres et substrat, les avantages, les inconvénients et leurs applications, on s'est intéressé par la suite aux techniques utilisées pour son alimentation.

Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un contexte général la structure à Bande Interdite Electromagnétique (BIE). Débutant par un historique, une définition des matériaux à BIE et leurs caractéristiques, une description pour les matériaux BIE et leurs structures, aussi leurs domaines d'application.

Dans le troisième et le dernier chapitre, nous avons donné une simple présentation du logiciel *CST* et présenté comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO. Après nous avons étudié un réseau d'antennes patches à 2 éléments de forme rectangulaire avec un substrat BIE opérant dans la bande X [8 GHz-12 GHz], où les résultats obtenus sont :

- ✓ Le nombre d'élément (patch) dans le réseau et la méthode d'alimentation sont deux facteurs importants qui influent directement sur la performance de l'antenne.
- ✓ Les caractéristiques d'un réseau d'antennes patches sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques.
- La fréquence de résonance est plus importante pour une antenne à substrat BIE par rapport à celle d'un substrat simple.
- La bande passante est plus large pour une antenne à substrat à BIE par rapport à celle d'un substrat simple.
- La bande passante pour un réseau est plus large par rapport à un seul élément

Conclusion générale

- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes a diminuée par rapport à celle d'un seul élément.
- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle présente des résultats meilleurs que ceux d'une alimentation série.
 - ❖ Pour un réseau d'antennes (à deux éléments) alimentées en parallèle les résultats obtenus sont :
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation des épaisseurs des couches du substrat (h_1, h_2).
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de longueur et la largeur du patch.
- La fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la décroissance des permittivités des couches du substrat ($\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$) ;
- La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche du substrat h_2 (relation inversement proportionnelle) ;
- La bande passante varie avec la variation de l'épaisseur de la couche du substrat h_2 mais cette variation n'est pas uniforme ;
 - ❖ Un matériau à BIE du substrat a une influence sur la directivité :
- la directivité est importante pour un substrat BIE par rapport à un substrat normal.
- La directivité pour un réseau d'antennes est améliorée par rapport à celle d'un seul élément ;
- Les résultats de la directivité pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle est améliorée par rapport à l'alimentation série ;
- la directivité dépend de la longueur du patch mais cette variation n'est pas uniforme.
- La directivité varie en variant l'épaisseur de la couche du substrat h_2 ;
- La directivité est inversement proportionnelle avec les permittivités des couches du substrat à BIE ϵ_{r1} et ϵ_{r2} .

Comme perspectives nous proposons l'étude des réseaux d'antennes microrubans à BIE : 2D et 3D et à défauts, ainsi augmenter le nombre des éléments de ces réseaux.

تَعْمَلُ بِفَضْلِ

اللَّهِ