

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : SYSTEME DE TELECOMMUNICATION NUMERIQUE

THEME

*Etude D'une Antenne Micro-ruban
Triangulaire A Bande Interdite Photonique
(BIP) 2D*

Proposé et dirigé par : Dr Benmeddour.F

Réalisé par : Belazzoug.F

N° D'ordre: 2016/STN17/89/385

PROMOTION: JUIN 2016

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 préambule à ce mémoire je remercie mon dieu qui m'a aidé et m'a donné la patience et le courage durant ces longues années d'études.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leurs aides et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif du département de l'électronique.

Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur Dr. benmeddour.F directrice de ce mémoire, elle était toujours à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer et sans elle ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous.

Dédicace

*Je dédie ce travail à la source de tendresse que sont
mes très chers parents.*

*Tout en étant convaincue que mon succès est une
récompense pour tous leurs sacrifices, qu'ils trouvent
ici l'expression de ma plus profonde gratitude.*

A ma fiancée qui était toujours à mes côtés.

A mes sœurs.

A mon cousin Khaled.

*A mes grands-parents, et toute la famille
Belazzoug et Daadouche.*

*A mes meilleurs amis, Issam, Younes, oussama,
Fateh les 2 Imad, Dadah, Ibrahim, Lehib, Saleh,
Lotfi...*

*A mes camarades les étudiants de l'électronique
, génie civile et nos frères de Sahara Elgharbia et de
Yaman.*

A tous ceux que je connais de près ou de loin.

Fares Belazzoug

Table Des Matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Table Des Figures	viii
Table Des Tableaux	xi
Liste Des Abréviations	xii
Résumé	xiii

Introduction Générale

Introduction Générale.....	15
----------------------------	----

Chapitre I

I.1 Introduction	19
I.2 Historique	19
I.3 Définition Général D'une antenne.....	20
I.4 Présentation De La Structure De L'antenne Microruban	20
I.5 Caractéristiques des antennes microrubans.....	21
I.5.1 Caractéristiques des matériaux diélectriques.....	23
I.5.1.1 Les matériaux céramiques:.....	23
I.5.1.2 Les matériaux semi-conducteurs:	23
I.5.1.3 Les matériaux ferrimagnétiques:	23
I.5.1.4 Les matériaux synthétiques:	23
I.5.1.5 Les matériaux photoniques:	24
I.5.1.6 Les matériaux chiraux	24
I.5.1.7 Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material)	24
I.5.1.8 Les matériaux RO3000	24
I.5.1.9 Les matériaux composites:	24
I.5.2 Critères de choix du substrat	25
I.5.3 Les Matériaux Diélectriques Utilisés	25

I.6 Fonctionnement D'une antenne Microruban	25
I.7 Techniques d'alimentation	26
I.7.1 Alimentation avec la ligne microruban	26
I.7.2 Alimentation par câble coaxiale	27
I.7.3 Alimentation couplée par ouverture	28
I.7.4 Alimentation couplée par proximité	28
I.8 Méthodes d'analyse	30
I.8.1 La Méthode D'intégration Finie (FIT).....	31
I.8.2 Méthode analytiques	31
I.8.3 Méthodes numériques	31
I.8.4 Méthode des éléments finis.....	31
I.8.5 Méthode des différences finies	31
I.8.6 Méthode des moments	32
I.8.7 Méthodes d'optimisation	32
I.9 Avantages et inconvénients des antennes microruban	32
I.10 Applications des antennes microruban	33
I 11 Conclusion.....	34
Bibliographie	35

Chapitre II

II.1 Introduction	37
II.2 Bref Historique:.....	38
II.3 Définitions et propriétés:	39
II.3.1 Description des matériaux BIP diélectriques:.....	39
II.3.1.1 Réseaux unidimensionnels:	40
II.3.1.2 Réseaux bidimensionnels:	41
II.3.1.3 Réseaux tridimensionnels:.....	42
II.4 Bande interdite photonique	44

II.5 Notions De Défaut Dans Les Structures Periodiques:.....	45
II.5.1 Introduction d'un défaut dans les structures BIP :	45
II.6 Application Des Cristaux Photonique.....	45
II.6.1 Applications des cristaux photoniques bidimensionnels	45
II.6.1.1 Cristaux photoniques bidimensionnels passifs	46
II.6.1.2 Cristaux photoniques bidimensionnels actifs	47
II.6.2 Applications et utilisations des structures BIP à défaut:	47
II.6.4 Application Des Cristaux Photonique en général.....	48
II.6.4.1 Substrats Cristaux Photonique pour les Antennes :	48
II.6.4.2 Application Cristaux photoniques dans le domaine micro-onde :	48
II.6.4.3 Guides d'onde à cristaux photoniques.....	49
II.7 Conclusion:	50
Bibliographie	51

Chapitre III

III.1. Introduction	54
III.2.Principe De Simulateur CST.....	54
III.3 La Méthode D'intégration Finie (FIT).....	56
III.4 Aperçu De La Structure De L'interface Utilisateur	57
III.5 Exemple D'un Projet En CST.....	58
III.5.1.Demarrer Le Logiciel.....	58
III.5.2 Créer Le Plan De Masse	60
III.5.3 Créer Un Substrat Diélectrique	61
III.5.4 Créer Les Trous	62
III.5.5 Créer L'antenne Microruban Triangulaire.....	62
III.6 L'optimisation.....	65
III.7 Conclusion.....	66
Bibliographie	67

Chapitre IV

IV.1 Introduction	69
IV.2 Présentation de la structure de base	69
IV.3 Influence Des Paramètres De L'antenne Sur La Fréquence De Résonance, La Bande Passante Et La Directivité	70
IV.3.1 Comparaison entre Un Substrat Normal Et Substrat Cristal Photonique	70
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	71
b) La Directivité	71
IV.3.2 L'effet De La Forme Du Réseau Des Trous (Carré, Triangulaire, Hexagonal)	72
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	72
b) La Directivité	73
IV.3.3 L'effet Des Dimensions Du Patch	74
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	74
b) La Directivité	75
IV.3.4 L'effet Du Diamètre Des Trous	75
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	76
b) La Directivité	77
IV.3.5 L'effet De L'Épaisseur Du Substrat	77
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	78
b) La Directivité	78
IV.3.6 L'effet De la variation de la constante diélectrique ϵ_r1	79
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	80
b) La Directivité	80
IV.3.7 L'effet De la variation de la constante diélectrique ϵ_r2	81
a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante.....	82
b) La Directivité	83

IV.4 Conclusion	84
Résultats Pour La Fréquence De Résonance	84
Résultat Obtenu Pour La Bande Passante	84
Résultats Obtenu Pour La Directivité.....	85

Conclusion Générale

Conclusion générale.....	87
Résultats Obtenu Pour La Fréquence De Résonance	87
Résultats Obtenu Pour La Bande Passante.....	88
Résultats Obtenu Pour La Directivité.....	88

Table Des Figures

Chapitre I

Figure.I.1 Structure D'une Antenne Microbande.....	20
Figure.I.2 Antenne A Eléments Imprimés.	21
Figure.I.3 (a) Représentation En Quadripôle (b) Graphe De Transfert Associé	22
Figure.I.4 Alimentation Par Ligne Micro Ruban	27
Figure.I.5 Antenne Micro-Ruban Alimentée Par Sonde	27
Figure.I.6 Alimentation Couplée Par Ouverture.	28
Figure.I.7 Alimentation Couplée Par Proximité.....	29

Chapitre II

Figure.II.1 Principe Du Miroir De Bragg.	39
Figure.II.2 Exemples De Structures Périodiques 1D, 2D et 3D.	40
Figure.II.3 Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.	40
Figure.II.4 Exemples De Différents Réseaux 2D.....	41
Figure.II.5 Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation.	42
Figure.II.6 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) ..	43
Figure.II.7 Différents Types De Défauts Basés Sur La Rupture De La Périodicité Du Motif	45
Figure.II.8 Exemple De Dimension Du Défaut.	45
Figure.II.9 Yablonovite	48
Figure.II.10 Différents Composants A Base De Défauts Linéaires a) Guide Droit, b) Virage A 120 et c) Jonction Y.....	49

Chapitre III

Figure.III.1 Interface Graphique De CST MICROWAVE STUDIO	55
Figure.III.2 Maille Elémentaire D'une Simulation FIT.	56

Figure.III.3 Fenêtre Principale Du Logiciel CST	57
Figure.III.4 La Fenêtre D'accueil	58
Figure.III.5 La Fenêtre De Créer Le Domaine De Travaille	58
Figure.III.6 Fenêtre De Choisir Le Composant qu'on Va Le Traiter	59
Figure.III.7 Liste Des Paramètres Et Unités	59
Figure.III.8 La Gamme De Fréquence	60
Figure.III.9 Introduire Le Plan De Masse	61
Figure.III.10 Substrat Diélectrique	61
Figure.III.11 Créer Un Troue	62
Figure.III.12 La 1 ^{ème} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire	63
Figure.III.13 Boite De Dialogue	63
Figure.III.14 La 2 ^{ème} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire	63
Figure.III.15 La 3 ^{ème} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire	64
Figure.III.16 La 4 ^{ème} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire.....	64
Figure.III.17 La Dernière Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire.....	65
Figure.III.18 Création De Port D'alimentation	65
Figure.III.19 La Fenêtre D'optimisation	66
Figure.III.20 Le Coefficient De Réflexion s_{11}	66

Chapitre IV

Figure.IV.1 La Structure De Base	69
Figure.IV.2 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Une Antenne Patch Triangulaire.....	70
Figure.IV.3 Coefficient De Déflection s_{11} Pour Une Antenne Micro-Ruban Triangulaire A Substrat CP Et Une Antenne A Substrat Normal.....	71
Figure.IV.4 La Directivité En 3D: a) Substrat Cristal Photonique b) Substrat Normal.	71
Figure.IV.5 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du	

Substrat CP: Carré, Triangulaire, Hexagonal.	72
Figure.IV.6 La Directivité En 3D: a) Réseau Carré b) Réseau Triangulaire c) Réseau Hexagonal.....	73
Figure.IV.7 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Les Différents Surfaces Du Patch.....	74
Figure.IV.8 La Directivité En 3D a) $S= 242.25 \text{ mm}^2$ b) 256.5 mm^2 c) 270.75 mm^2	75
Figure.IV.9 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Les Différents Diamètres Des Trous.....	76
Figure.IV.10 La Directivité En 3D De Différents Diamètre Des Trous a) $R=3\text{mm}$ b) $R= 5\text{mm}$ c) $R= 7\text{mm}$	77
Figure.IV.11 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP ..	78
Figure.IV.12 La Directivité En 3D pour Différents Epaisseurs Du Substrat a) $H= 075\text{mm}$ b) $H= 1\text{mm}$ c) $H= 1.25$ d) $H= 1.5\text{mm}$	79
Figure.IV.13 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r1}) Du Substrat CP	80
Figure.IV.14 La Directivité En 3D De Différents Constants Die Electricque a) $\epsilon_{r1}= 2.55$ b) $\epsilon_{r1}= 2.7$ c) $\epsilon_{r1}= 3$ d) $\epsilon_{r1}= 3.3$	81
Figure.IV.15 Coefficient De Réflexion s_{11} Pour Les Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r2}) Du Substrat CP	82
Figure.IV.16 La Directivité En 3D pour Différents Constantes Diélectrique a) $\epsilon_{r2}= 1$ b) $\epsilon_{r2}= 2.2$ c) $\epsilon_{r2}= 3.2$ d) $\epsilon_{r2}= 4$	83

Table Des Tableaux

Tableau.I.1 Les Caractéristiques Des Différentes Techniques D'alimentation	30
Tableau.IV.1 La Bande Passante Et La Fréquence De Résonance D'antenne avec Substrat Normal Et Substrat CP	71
Tableau.IV.2 La Directivité D'un Substrat Normal Et Substrat CP.....	72
Tableau.IV.3 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du Substrat CP: Carre, Triangulaire, Hexagonal.	73
Tableau.IV.4 La Directivité Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du Substrat CP: Carré, Triangulaire, Hexagonal.....	74
Tableau.IV.5 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Surfaces Du Patch	74
Tableau.IV.6 La directivité Pour Les Différents Surfaces Du Patch.....	75
Tableau.IV.7 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Diamètres Des Trous	76
Tableau.IV.8 La Directivité Pour Les Différents Diamètres Des Trous.....	77
Tableau.IV.9 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP	78
Tableau.IV.10 La Directivité Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP	79
Tableau.IV.11 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r1}) Du Substrat CP	80
Tableau.IV.12 La Directivité Pour Différents Constants Diélectrique (ϵ_{r1})	81
Tableau.IV.13 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r2}) Du Substrat CP.....	82
Tableau.IV.14 La Directivité Pour Différents Constants Die Electric (ϵ_{r2})	83

Liste Des Abréviations

BIP: Bande Interdite Photonique.

CP: Cristaux Photonique.

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

CST: Computer Simulation Tecnology.

SMA: SubMiniature version A.

AL₂O₃: Doute d'alumine.

GaAs: Gallium.

SI : Silicium.

MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit.

TMM: Thermoset Microwave Material.

FIT: Finite Integration Technique.

FDTD: Finite Difference Time Domain.

FEM: Finite Element Method.

MOM : Moment Method.

FVM: Finite Volume Integral.

TLM: Transmission Line Matrix.

GPS: Global Positing system.

HF: Height frequency.

CFC : Cubique à Face Centrée.

WDM: Wavelenght Divison Multiplexing.

CWDM: Coase Wavelenght Divison Multiplexing.

SHI : Surface Haute Impedance.

SI: Signal Integrity

EMC: Electro-Magnetic Compatibility.

PEC: Perfect Electric Conducting.

Résumé

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'une antenne micro-ruban triangulaire à bande interdite photonique 2D.

Nous étudions l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : les dimensions du patch, la hauteur et la permittivité du substrat, les différents réseaux, et le diamètre des trous, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST est basée sur la méthode d'intégration finie.

Abstract

The main objective of our work is to study a micro-strip antenna forms triangular 2D photonic band gap.

We study the influence of geometric parameters of the antenna on the resonance frequency, bandwidth and directivity. The parameters that we studied: the dimensions of the patch, substrate height and permittivity, the diameter of holes and the different networks, by using electromagnetic simulation tool in the frequency domain based on CST is based on the finite integration method.

المخلص

الهدف الرئيسي من عملنا هذا هو دراسة هوائي مدقق مثلثي الشكل ذو بلورات فوتونية (ثنائي الأبعاد). نقوم بدراسة تأثير المتغيرات الهندسية للهوائي على : تردد الرنين ، عرض النطاق الترددي ، والاتجاهية. المعلومات التي تمت دراستها : أبعاد الهوائي ، ارتفاع وسماحية الركيزة، وقطر الثقوب و مختلف الشبكات. باستخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية في مجال التردد *CST* الذي يعتمد على نظرية التكاملات المنتهية



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Une antenne alimentée et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace.

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur.

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexe mais nécessaire pour dimensionner un système de transmission sans fils.

Le concept d'antennes imprimées (ou antennes micro-rubans) fait son apparition dans les années 50, mais c'est au cours des années 70 qu'elles ont été développées. Une antenne micro-ruban est composée d'un élément rayonnant de forme géométrique variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire, etc...). Cet élément rayonnant est aussi appelé patch conducteur. Dans la pratique, les formes de l'élément rayonnant souvent utilisées sont le rectangle et le disque, triangle et d'un substrat diélectrique sur lequel se dépose l'élément rayonnant et d'un plan de masse. Elles seront réservées à des applications militaires, aéronautiques et aérospatiales, par exemple. Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, les antennes imprimées sont implantées dans de nombreux dispositifs électroniques par exemple : les téléphones portables, les ailes des avions, etc... Ces antennes possèdent deux atouts majeurs à savoir leur faible coût de réalisation et leur capacité d'intégration, parmi les substrats utilisés dans les antennes patch les cristaux

photoniques (matériaux à bandes photoniques interdites).

Les matériaux à bandes photoniques interdites sont des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de la constante diélectrique dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions. Ces matériaux ont été découverts par Eli *Yablonovitch* à la fin des années 80.

Ils présentent des bandes de fréquences pour les quelles la propagation des ondes électromagnétiques est interdite.

Des travaux tirant profit des propriétés des BIP ont alors vu le jour. Ainsi dans le domaine des antennes on a réussi à réduire le niveau des lobes secondaires en évitant de piéger le champ électromagnétique dans le plan de masse arrière de l'antenne.

En exploitant les propriétés de réflexions des cristaux photoniques dans le gap, nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériau BIP comme substrat d'antenne ou comme réflecteur dans le but d'augmenter la directivité des antennes.

Le travail développé dans ce mémoire a pour objectif l'étude d'une antenne micro-ruban triangulaire à bande interdite photonique 2D 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 quatre chapitres Il est présenté comme suit :

-Dans le premier chapitre introductif, nous avons présenté les antennes patches, les différents matériaux et substrat utilisés pour ces types d'antennes. Ainsi que les différentes méthodes d'alimentation rencontrées dans la littérature. Enfin nous présentons les méthodes d'analyse utilisées pour traiter ce genre d'antenne.

- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les concepts de base liés aux cristaux photoniques. Nous avons cité les différents types de cristaux photoniques, en insistant sur la notion de bande interdite photonique, avant d'entrer un peu plus dans les détails pour la structure qui va nous intéresser tout particulièrement : les cristaux bidimensionnels.

- Dans le troisième chapitre nous montrons comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO.

Dans le quatrième chapitre nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure à antenne micro-ruban de forme triangulaire à substrat cristaux photonique 2D sur la fréquence de résonance, la bande

passante, et la directivité.

Et nous terminons par une conclusion générale.



CHAPITRE I

-Généralité sur les antennes micro-ruban

I.1 Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser de dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique.

Les systèmes micro-ondes à structure microruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (plaques, patch, microrubane...) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un historique concernant les antennes microrubans et en citant les différentes structures d'antennes microrubans et nous présentons les techniques d'alimentation, leurs domaines d'utilisation et méthodes d'analyse de ces antennes.

I.2 Historique

L'utilisation du câble coaxial ou les deux fils parallèles comme des lignes de transmission remonte au 19^{ème} siècle. La réalisation des composants en radiofréquences ou en micro-ondes, en utilisant ces lignes de transmission nécessite des efforts mécaniques considérables. L'apparition des techniques des circuits imprimés dans le milieu du 20^{ème} siècle a conduit à la réalisation de la version imprimée de ces lignes de transmission qui pouvait être élaborée et permettre une production beaucoup plus simple de la masse des composants micro-ondes. Avec l'image du plan de masse offrant un second conducteur, le circuit équivalent de la ligne de transmission bifilaire est connu sous le nom de microruban [1].

Les antennes microrubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) sont apparues dans les années cinquante et ont été développées au cours des années soixante-dix. Cependant plusieurs recherches ont été menées pour arriver à une antenne microruban optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications aéronautiques, aérospatiales et militaires [1].

I.3 Définition Général D'une antenne

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception. L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants [2] :

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

I.4 Présentation De La Structure De L'antenne Microruban

Sous sa forme la plus fondamentale, une antenne microruban se compose d'une pièce métallique rayonnante sur un côté (patch), du substrat diélectrique et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la (Figure I.1) Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et il peut prendre n'importe quelle forme possible. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photo gravées sur le substrat diélectrique [3].

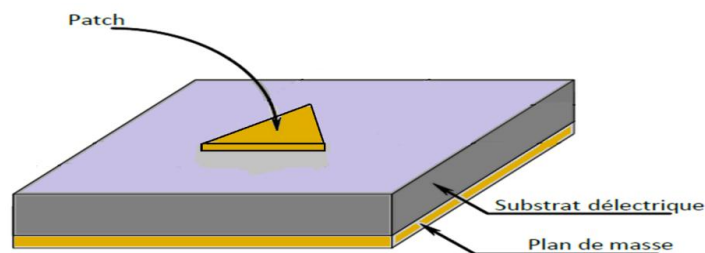


Figure.I.1 Structure D'une Antenne Microbande

Comme montré, dans la (Figure I.2), la configuration de base d'une antenne microbande, communément appelée antenne patch, est une ligne microbande de forme particulière. Elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques.

Puisqu'on a proposé la configuration de base (originale), il faut noter que des douzaines de variations de formes du patch, de techniques d'alimentation, de configuration du substrat et des géométries de réseau d'antennes ont été développés par des chercheurs dans le monde entier. La variété dans la conception des antennes microbandes excède probablement celle de n'importe quel autre type d'antenne [4].

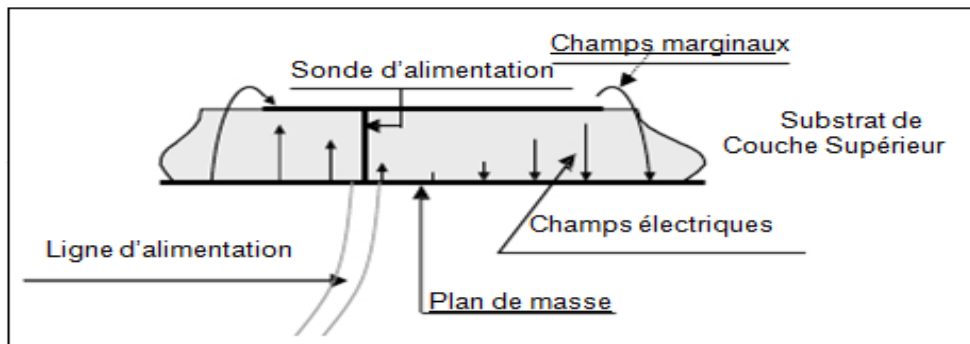


Figure.I.2 Antenne A Eléments Imprimés.

Les antennes microrubans rayonnent principalement en raison des champs marginaux entre le bord du patch et le plan de masse. Pour la bonne performance d'antenne, un substrat diélectrique épais ayant une faible constante diélectrique est souhaitable, puisque ceci fournit une meilleure efficacité, une largeur de bande plus grande et un meilleur rayonnement [4].

Cependant, une telle configuration mène à une taille d'antenne plus grande. Afin de concevoir une antenne microbande moins encombrante, on doit employer des constantes diélectriques plus élevées mais on va avoir une largeur de bande plus étroite. Par conséquent un compromis doit être fait entre les dimensions de l'antenne [3].

I.5 Caractéristiques des antennes microrubans

Les antennes microrubans possèdent plusieurs caractéristiques. Ces dernières varient selon l'application dans laquelle l'antenne est utilisée. On distingue les caractéristiques suivantes:

- a) **La représentation en quadripôle:** le schéma ci-dessous montre la représentation d'une

antenne en quadripôle et définit par les paramètres S, en présence des ondes de puissance (a_1 , a_2 , b_1 et b_2).

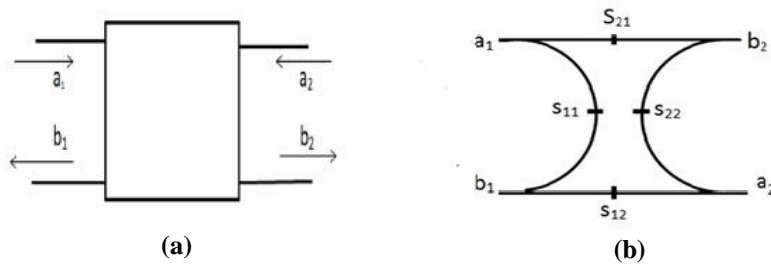


Figure.I.3 (a) Représentation En Quadripôle (b) Graphe De Transfert Associé

On a: $b_1 = s_{11} a_1 + s_{12} a_2$

$$b_2 = s_{21} a_1 + s_{22} a_2$$

s_{11} , s_{12} , s_{21} et s_{22} sont des coefficients :

- s_{11} est le coefficient correspondant à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $a_2 = 0$.
- s_{12} est un coefficient représentant la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque $a_1 = 0$.
- Les coefficients s_{21} et s_{22} désignent respectivement le gain du quadripôle lorsque $a_2 = 0$ et la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $a_1 = 0$.

b) Le rendement de l'antenne: est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne [5].

c) Le gain : Le gain est un rapport entre deux valeurs de puissance. Nous classons le gain en trois types possibles: le gain réalisé, le gain intrinsèque et la directivité. La différence dépend de la puissance prise en référence.

- Gain réalisé : La puissance de référence est ici la puissance totale délivrée par le générateur qui alimente la structure.

- Gain intrinsèque : La puissance de référence est ici la puissance totale acceptée par la structure.

- Directivité : La puissance de référence est ici la puissance totale rayonnée par la structure. La directivité correspond à une normalisation du gain par rapport à son maximum.

d) L'impédance d'entrée de l'antenne: est l'impédance vue dans le plan de la ligne d'alimentation au niveau du connecteur SMA (SubMiniature version A) [5].

e) Le coefficient de réflexion S_{11} : Met en évidence le transfert d'énergie par l'antenne.

Dans un système électrique caractérisé par les paramètres S, lorsque le coefficient S_{11} connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance, il y a un maximum de transfert de puissance entre le générateur et la charge. C'est sur ce paramètre que l'on se base pour optimiser l'antenne.

I.5.1 Caractéristiques des matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories, et le détail des caractéristiques de chacune de ces familles de matériaux est donné ci-dessous [6] :

I.5.1.1 Les matériaux céramiques:

Couramment employés pour les circuits microrubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine (Al_2O_3) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité, mais sont cassants et donc fragiles. Leurs permittivités sont pour la plupart élevées et ils présentent de faibles pertes ($\tan \delta = 10^{-3}$).

I.5.1.2 Les matériaux semi-conducteurs:

De type Arséniure de Gallium ($GaAs$) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits *M.M.I.C* (*Monolithic Microwave Integrated Circuit*). La surface disponible, généralement réduite pour réaliser des antennes, destinées à des applications dans le domaine millimétrique.

I.5.1.3 Les matériaux ferrimagnétiques:

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

I.5.1.4 Les matériaux synthétiques:

La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, une permittivité proche de "2" avec de faibles pertes ($\tan \delta = 0.003$).

À ceux-ci viennent s'ajouter aujourd'hui les mousses *ROHACELL* dont la

permittivité relative est proche de l'air ($r \approx 1$), cependant les pertes deviennent vite importantes lorsque l'on monte en fréquence ($\tan \delta > 0.01$ à 26.5 GHz) un exemple de ces matériaux: le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène, etc...

I.5.1.5 Les matériaux photoniques:

Depuis le début des années soixante, 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 micro-ondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface.

I.5.1.6 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, font depuis plusieurs années l'objet d'intenses recherches. Récemment, A. Bossavit prédit qu'on peut construire des matériaux chiraux en incluant périodiquement dans une matrice de matériau diélectrique des inclusions de matériau fortement conducteur. Le comportement souhaité s'obtient alors à la limite 0 où désigne la taille de la cellule de périodicité.

I.5.1.7 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 ($\tan \delta < 0,0018$) pour des permittivités respectivement égales à 3,25 ; 4,5 ; 6,5 ; 9,8. Rigides et moins cassants que les céramiques, ils conservent leurs dimensions et leurs permittivités à des températures élevées.

I.5.1.8 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).

I.5.1.9 Les matériaux composites:

Ce type de matériaux s'obtient en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d'un substrat. En ajoutant aux matériaux plastiques de la fibre de verre (*cas du DUROID*

5870, du TLC, ARLON 320) ou de la poudre de céramique (ARLON 340) les propriétés mécaniques sont améliorées et l'on peut, suivant le dosage, ajuster la permittivité. Des produits comme le *DUROID* sont couramment utilisés pour réaliser des antennes imprimées.

I.5.2 Critères de choix du substrat

La conception des antennes microrubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat [6]:

- (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.5.3 Les Matériaux Diélectriques Utilisés

Le substrat joue un rôle double dans la technologie microruban. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h \ll \lambda$), le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan \delta < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible (< 3) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée [6].

I.6 Fonctionnement D'une antenne Microruban

Dans son fonctionnement usuel, une antenne imprimée sur substrat diélectrique peut être considérée en première approximation comme une cavité résonante imparfaite, présentant des

murs magnétiques verticaux à pertes et des murs électriques horizontaux pour des fréquences appelées de résonance, cette cavité emmagasine de l'énergie électromagnétique selon un ensemble de modes de type TM_{mn} .

Le rayonnement résultant de cette structure se traduit par des pertes qui s'opèrent au niveau des murs magnétiques. Une partie du signal émis est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. La forme et l'orientation des lignes de champs entre les bords de la plaque rayonnante et le plan de masse caractérisent les directions privilégiées du champ rayonné [7].

En général, le mode fondamentale est considéré comme étant le mode de fonctionnement de ce type d'antennes. Ce mode emporte le maximum d'énergie et se caractérise par une répartition du champ électrique en dessous de l'élément rayonnant dont une dimension au moins est égale à une demi-longueur d'onde. Les courants surfaciques qui sont produits sur l'élément métallique sont dirigés selon l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [7].

I.7 Techniques d'alimentation

Les antennes microbandes peuvent être alimentées par une variété de méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories: avec contact et sans contact. Dans les méthodes avec contact, la puissance de RF est alimentée directement au patch rayonnant en utilisant un élément de connexion telle qu'une ligne microruban. Dans les techniques sans contact, le couplage de champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne microruban et le patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus populaires utilisées sont la ligne microruban, la sonde coaxiale (techniques avec contact), le couplage par ouverture et le couplage par proximité (technique sans contact) [4].

I.7.1 Alimentation avec la ligne microruban

Dans ce type de technique d'alimentation, un ruban conducteur est connecté directement au bord du patch rayonnant comme montré dans la (Figure I.9). La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch et ce genre d'alimentation a l'avantage qu'elle peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure planaire.

Le but de l'encart coupé dans le patch est d'adapter l'impédance de la ligne d'alimentation au patch sans avoir besoin d'un élément d'adaptation additionnel. Ceci est achevé par un contrôle correct de la position de l'encart. Par conséquent c'est une technique d'alimentation

facile, puisqu'elle fournit la facilité de fabrication et la simplicité de modélisation, ainsi que l'adaptation d'impédance. Cependant, certaines applications nécessitent un substrat épais, ce qui engendre l'augmentation des ondes de surface et le rayonnement parasite, entraînant une dégradation de la bande passante [4].

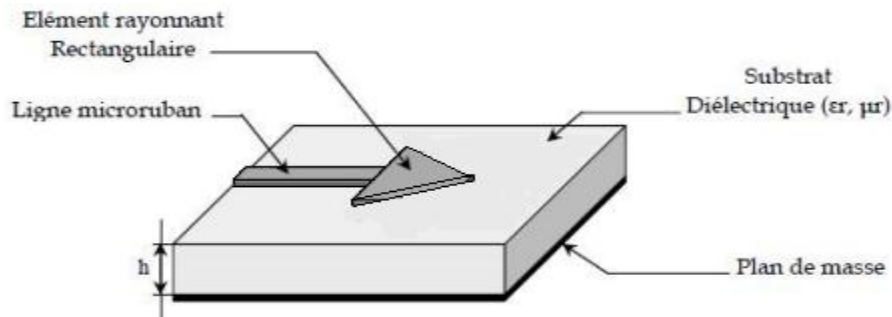


Figure.I.4 Alimentation Par Ligne Micro Ruban

I.7.2 Alimentation par câble coaxiale

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation par sonde est une technique très connue utilisée pour alimenter les antennes plaques. Le conducteur intérieur du connecteur coaxial s'étend à travers le diélectrique et il est soudé au patch, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse (Figure I.10) [4].

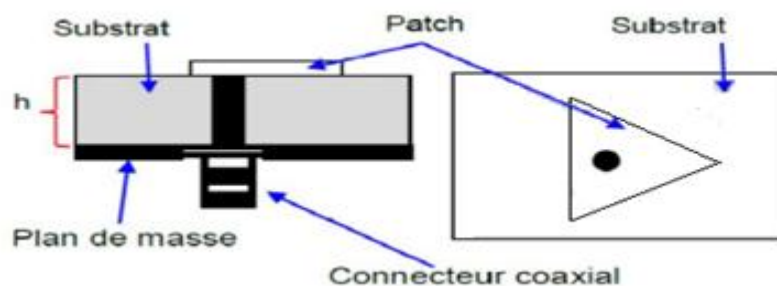


Figure.I. 5 Antenne Micro-Ruban Alimentée Par Sonde

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être placée à n'importe quel endroit désiré du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance.

Cette méthode d'alimentation est facile à fabriquer et a un rayonnement parasite faible.

Cependant, son inconvénient principal est qu'elle fournit une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser puisqu'un trou doit être foré dans le substrat et le connecteur sort en dehors du plan de masse, cela ne la rend pas complètement plane pour les substrats

épais ($h > 0.002 \lambda_0$) [4].

En outre, pour des substrats plus épais, l'accroissement de la longueur de sonde rend l'impédance d'entrée plus inductive, menant aux problèmes d'adaptation. Il est clair, à partir de ce qu'on a vu, qu'avec un substrat diélectrique épais, ce qui fournit une large bande passante, les alimentations, par lignes microrubans et par câble coaxial, souffrent de plusieurs inconvénients. Les techniques d'alimentation sans contact, que nous allons discuter ci-dessous, résolvent ces problèmes [4].

I.7.3 Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch rayonnant et la ligne microruban d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme représentée dans la (Figure I.6). Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [4].

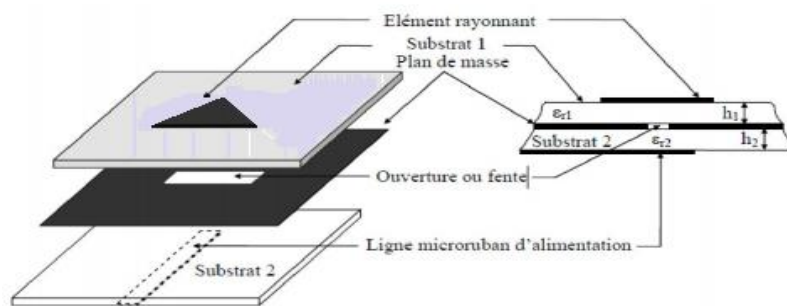


Figure.I.6 Alimentation Couplée Par Ouverture.

L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. D'une façon générale, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est employé pour le substrat inférieur, alors qu'un matériau épais et ayant une constante diélectrique faible est employé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle présente des difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples qui augmentent également l'épaisseur d'antenne. Cette technique d'alimentation fournit aussi une largeur de bande étroite [4].

I.7.4 Alimentation couplée par proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de

couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés de sorte que la ligne d'alimentation soit située entre les deux substrats et le patch soit imprimé sur le substrat supérieur comme il est montré dans la (Figure I.7). L'avantage principal de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine le rayonnement parasite dû à l'alimentation et fournit une largeur de bande très élevée (plus que 13%), en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [4].

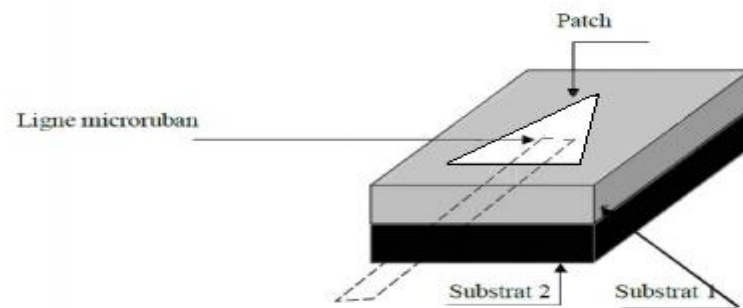


Figure.I.7 Alimentation Couplée Par Proximité.

L'adaptation peut être réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation. L'inconvénient principal de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des deux couches diélectriques qui nécessitent un alignement approprié. En outre, il y a une augmentation de l'épaisseur globale de l'antenne [4].

Le tableau (Tableau I.1) ci-dessous, récapitule les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<p><u>Alimentation par contact</u></p> <p><i>Sonde coaxiale</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - pas de pertes par rayonnement de ligne. - sélection possible d'un mode privilégié. - obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde. - prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur. - technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> - rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire. - partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. - technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. - rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.
<p><i>Ligne microruban</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. - adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant. 	<ul style="list-style-type: none"> - rayonnement parasite de la discontinuité ligne – aérien. - rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique - structure figée après gravure
<p><u>Alimentations par proximité</u></p> <p><i>Ligne microruban en circuit ouvert</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. 	<ul style="list-style-type: none"> - rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique. - structure figée après gravure - paramétrage du positionnement relatif de la ligne nécessaire pour adapter l'antenne.
<p><i>Ligne micro-ruban en sandwich</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens - bande passante plus large par augmentation de la hauteur ($h_1 + h_2 > h_1$) 	<ul style="list-style-type: none"> - deux couches de substrat requises - difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur

Tableau.I.1 Les Caractéristiques Des Différentes Techniques D'alimentation

I.8 Méthodes d'analyse

Les antennes microrubans, généralement constituées d'un élément rayonnant à deux dimensions imprimées sur un substrat de faible permittivité, sont principalement analysées par les méthodes dédiées aux circuits planaires.

Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories les méthodes analytiques

simples, tels que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité et les méthodes numériques rigoureuses telles que la méthode des moments, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Depuis les années quatre-vingt dix de nouvelles méthodes dites d'optimisation basées sur les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques ont été introduites avec succès [8].

I.8.1 La Méthode D'intégration Finie (FIT)

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.

I.8.2 Méthode analytiques

Ces méthodes sont basées sur la distribution du courant magnétique autour du patch, les principales méthodes de cette catégorie sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité [8].

I.8.3 Méthodes numériques

Les techniques numériques, basées sur la détermination de la distribution du courant sur la surface de l'élément conducteur et le plan de masse dans le domaine fréquentiel pour certaines et temporel pour d'autres, peuvent analysées les formes les plus arbitraires et les multicouches. Toutefois, elles nécessitent toutes un temps de calculs, un espace mémoire et un effort très considérables et ne permettent que très peu d'interprétations physiques [8].

I.8.4 Méthode des éléments finis

La méthode aux éléments finis, très employée dans le domaine fréquentiel, consiste à discrétiser les équations de Maxwell en amont au niveau de la formulation aux dérivées partielles des équations de propagation [1]. La première étape consiste à mailler le domaine de calcul grâce à des éléments géométriques adaptés, les triangles pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels. La deuxième étape consiste à choisir une distribution de fonctions de test, respectant des conditions de dérivabilité et de continuité au bord du domaine de calcul.

I.8.5 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies dans le domaine temporel F.D.T.D (*Finite Difference Time Domain*) est une approche numérique permettant la résolution des équations

différentielles dans le domaine temporel dans une structure uniformément maillée.

I.8.6 Méthode des moments

La méthode des moments utilisée essentiellement dans le domaine fréquentiel est une technique numérique qui permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales en le transformant en un système matriciel résolu par ordinateur [8].

I.8.7 Méthodes d'optimisation

L'optimisation est le processus qui consiste à minimiser ou à maximiser une fonction objective ou de coût. Dans le cas d'une antenne microruban, l'optimisation consiste à approximer d'une manière précise un de ces paramètres tels que la fréquence de résonance, l'impédance d'entrée ou le paramètre S_{11} .

I.9 Avantages et inconvénients des antennes microruban

Actuellement, les antennes micro-rubans sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquence (MHz à $100 GHz$), leur configuration et dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (avion, voiture, missile,). Parmi les avantages de ces d'antennes, on peut citer:

- Profil plat;
- Faible poids;
- Volume réduit;
- La conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes ;
- Simplicité de leurs structures;
- Faible coût de fabrication donc la production en grandes quantités devient facile.;
- Plusieurs éléments radiants peuvent être placés sur la même plaque avec le réseau d'alimentation ou avec d'autres circuits imprimés (déphaseurs, commutateurs, etc.).

Cependant, elles présentent les inconvénients suivants:

- Faible bande passante (1 à 5 %), le facteur de qualité Q , va d'environ 50 jusqu'à 75;
- Faible puissance;

- Impureté de la polarisation;
- Faible gain ;
- Donc, la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performances et de complexité de réalisation [9].

I.10 Applications des antennes microruban

Pour de nombreuses applications, les avantages des résonateurs microrubans l'emportent largement face à leurs limitations. Initialement, cette technologie du résonateur s'est trouvée fortement répandue dans les systèmes militaires de haute technologie, tels que missiles, roquettes, fusées, avions et satellites...etc [10].

Cependant, les résonateurs microrubans sont aujourd'hui de plus en plus répandus dans le secteur commercial en raison de la réduction des coûts en matière de substrat diélectrique et de maturité des technologies de résonateurs imprimés. En effet, dans les satellites de communication, des polarisations circulaires sont requises et peuvent être réalisées à partir de plaque rayonnante de forme carrée ou bien circulaire en utilisant 1 à 2 points d'alimentation. Les systèmes mobiles utilisant ces résonateurs sont les véhicules, mais aussi les équipements de petite taille, tels que les téléphones portables, radars... etc [10].

On retrouve principalement ces résonateurs dans les systèmes de haute technologie suivants:

- ✓ Les résonateurs spatiaux et radar embarqué;
- ✓ La liaison avec des mobiles (avions, fusées, missiles, navires, véhicules routiers...); Les systèmes portables de radiolocalisation par satellite (GPS);
- ✓ Les résonateurs pour la téléphonie mobile (stations de base); Les badges et étiquettes électroniques;
- ✓ Les applicateurs biomédicaux (hyperthermie) et capteurs pour contrôle non destructif.

Enfin, les réseaux d'éléments rayonnants imprimés sont fréquemment utilisés dans les satellites de communication et bien d'autres applications, telles que les radiocommunications avec les mobiles terrestres et aériens, les télécommunications, les radars, mais aussi les capteurs miniaturisés et les applicateurs médicaux. D'autre part, avec la recherche progressive, le développement et une utilisation plus fréquente, ces résonateurs microrubans finiront par

remplacer les résonateurs conventionnels dans la plupart des applications [10].

I 11 Conclusion

La technologie microruban en général, et les antennes microbandes en particulier connaissent un succès croissant auprès des industriels et des professionnels des télécommunications, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité de paramètres des antennes. Dans ce chapitre, nous avons montré le rôle et l'évolution technologique des antennes microrubans, leur fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients et leur domaine d'utilisation, certains paramètres sur le fonctionnement et le rendement de ce type d'antennes à savoir ; les paramètres constitutifs, le type d'alimentation. Nous avons évoqué l'influence de quelques paramètres, et les matériaux diélectriques utilisés. Nous avons également mis l'accent sur l'antenne à patch triangulaire et son mécanisme de rayonnement et les méthodes d'analyse de ces antennes.

Bibliographie

- [1] B.BACITA "Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques" thèse de master, Université de M'sila, 2014.
- [2] M. HASSAD," *Modélisation d'une antenne patch réalisée su un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux* " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2009.
- [3] L. Djouane " *Analyse rigoureuse d'une plaque microbande rectangulaire sur plan de masse avec ouverture rectangulaire par la méthode des moments et les dyades hybrides de Green* "thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2005.
- [4] N.HAMDIKEN " *Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale* " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna.
- [5] P.F. "Combes, Micro-ondes -1.lignes, guides et cavités ", 1996.
- [6] 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.
- [7] L Djouablia " *Contribution à l'etude des structures microbandes rayonnantes par la méthode des moments application a la forme triangulaire*" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine juillet 2012.
- [8] Y.TIGHILT " *Identification des antennes microrubans multicouches par la Méthode spectrale les réseaux de neurones* " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Setif. Juin 2011.
- [9] CHOUTI LEILA " *Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage* " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [10] F. BENMEDDOUR " *Etude et réalisation d'un résonateur microruban de forme circulaire (Application au cas particulier de l'alimentation par couplage)* " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Mars 2012.



CHAPITRE II

Les Cristaux Photonique

II.1 Introduction

Les matériaux à Bandes Interdites Photoniques (*BIP*) ont suscité un vif intérêt depuis leur invention par le Professeur "*Eli Yablonovitch*" à la fin des années quatre-vingts. Il a démontré théoriquement et expérimentalement que ces matériaux périodiques possédaient des fréquences pour lesquelles aucun mode de propagation n'existait. Il a d'ailleurs donné son nom à la plus célèbre des structures (*BIP 3D*): la Yablonovite. Ce matériau possède la plus large des bandes interdites quel que soit l'angle de l'onde électromagnétique et il se rapproche de la structure parfaite appelée diamant.

Par analogie avec la bande interdite caractérisant les réseaux cristallins atomiques, les structures (*BIP*) possèdent une bande de fréquence interdite où aucune onde électromagnétique ne peut se propager à travers le matériau.

Ce type de structure dont le rapport d'indice occupe une place importante est l'extension à plusieurs dimensions de structures périodiques bien connues comme les miroirs de Bragg, les diélectriques artificiels, les grilles métalliques ou encore les surfaces sélectives en fréquences. Ces matériaux présentent pour des ondes électromagnétiques des propriétés physiques intéressantes en terme de propagation à la fois dans le domaine de l'optique mais aussi dans le domaine des micro-ondes et plus particulièrement dans celui des antennes.

Quelques structures présentent dans certaines conditions des propriétés physiques innovantes comme une permittivité ou encore une perméabilité négative qui provoquent l'engouement pour ces nouveaux matériaux et relancent ainsi l'intérêt des physiciens pour l'électromagnétisme.

Nous parlons désormais de Bandes Interdites photonique (*BIP*) pour des structures dans le domaine des hautes fréquences. L'introduction d'un défaut au sein de ces structures périodiques permet de générer un pic de transmission à l'intérieur de la bande interdite photonique. A cette fréquence, les ondes électromagnétiques peuvent se propager à l'intérieur des structures (*BIP*) mais uniquement dans certaines directions. Cette propriété a permis d'aboutir à la création d'une antenne directive à faibles lobes secondaires: l'antenne (*BIP*) résonant à défaut. [1]

II.2 Bref Historique:

Ce nouveau type de structure a été développé par "E. Yablonovitch" ([2], [3]) à la fin des années quatre-vingts. En réalité, le tout premier matériau (BIP) ou cristal photonique a été réalisé sans le savoir par le physicien anglais "William Laurence Bragg" en 1915. Ce dernier a réussi par l'empilement périodique de couches transparentes à indices de réfraction différents à réfléchir (99,5%) de l'énergie incidente, ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce phénomène s'explique par de multiples réflexions à l'intérieur même de chaque interface. Elles sont constructives pour une épaisseur particulière des différentes couches.

Ces matériaux dont la constante diélectrique est structurée de manière périodique possèdent des fréquences pour lesquelles il n'existe aucun mode de propagation possible à l'intérieur du matériau, autrement appelé bande de fréquence interdite. Ces structures périodiques à une dimension sont déjà connues sous le nom de miroirs de Bragg. Depuis, "E. Yablonovitch" [4] a eu l'idée d'étendre leur fonctionnement à plusieurs dimensions. Pour simplifier les réalisations, un prototype a été défini avec des bandes interdites mesurables en micro-ondes. Depuis cette innovation, les études qui ont pour objet ces matériaux se sont considérablement accrues. Les domaines de fréquences où ces matériaux sont étudiés correspondent aux fréquences optiques de (1THz jusqu'à 1000THz) et aux fréquences micro-ondes ou hyperfréquences. La gamme de fréquences facilite la conception et la réalisation de ces matériaux.

L'analogie entre l'équation de "Schrödinger" et l'équation de propagation issue des équations de "Maxwell" dans les milieux diélectriques permet de rapprocher les propriétés des cristaux solides de celles des cristaux photoniques.

A l'image des semi-conducteurs, dont la régularité du paysage atomique entraîne l'existence d'une bande d'énergie interdite, nous pouvons donc obtenir des bandes de fréquences interdites pour des matériaux diélectriques périodiques. Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré selon la structure étudiée. Ces plages de fréquences ont pris le nom générique de Bande Interdite Photonique. Le principe du miroir de Bragg est présenté sur la (FigureII-1).

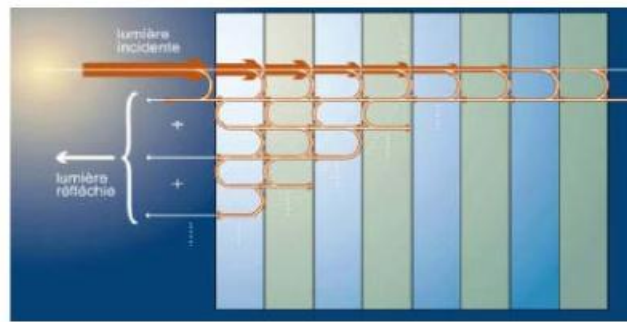


Figure.II. 1 Principe Du Miroir De Bragg.

Pour le domaine des hautes fréquences (*HF*) ou micro-ondes, nous utiliserons plutôt le terme de matériaux à Bande Interdite photonique ou (*BIP*) qui correspond aux bandes de fréquences étudiées. En effet, leurs propriétés fréquentielles sont transposables pour d'autres longueurs d'ondes car elles sont surtout induites par la ou les périodicités du matériau.

II.3 Définitions et propriétés:

A présent, intéressons-nous brièvement aux propriétés générales pour les trois grandes catégories de matériaux (*BIP*) diélectriques caractérisées par leur nombre de périodicités.

II.3.1 Description des matériaux BIP diélectriques:

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux (*BIP*), nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétiques [5].

Les matériaux (*BIP*) sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques (*FigureII-2*). Ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial.

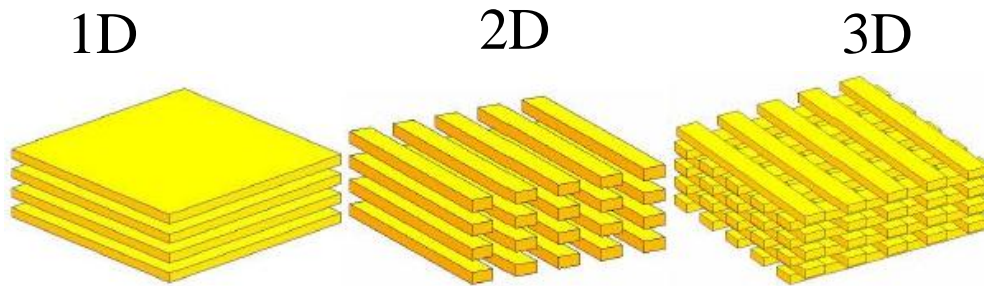


Figure.II. 2 Exemples De Structures Périodiques 1D, 2D et 3D.

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 (*BIP*) isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes.

II.3.1.1 Réseaux unidimensionnels:

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures (*BIP*). 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-3*).

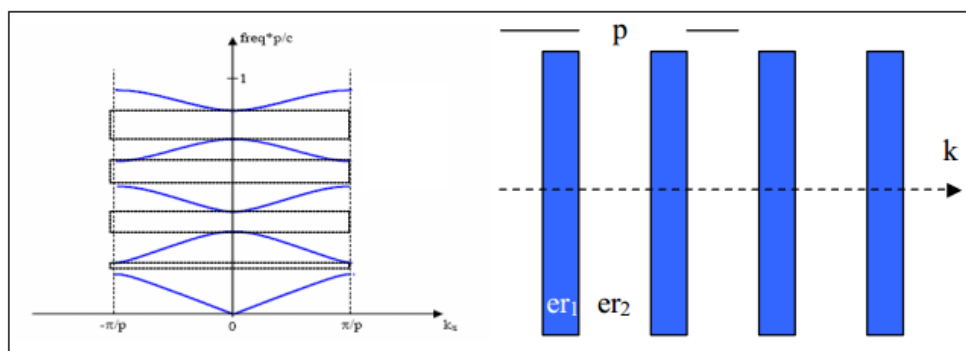


Figure.II. 3 Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.

Lors des réalisations, la conception de ce type de réseaux 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.

II.3.1.2 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) [6].

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.

Nous présentons sur la (*Figure II-4*), plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, et réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

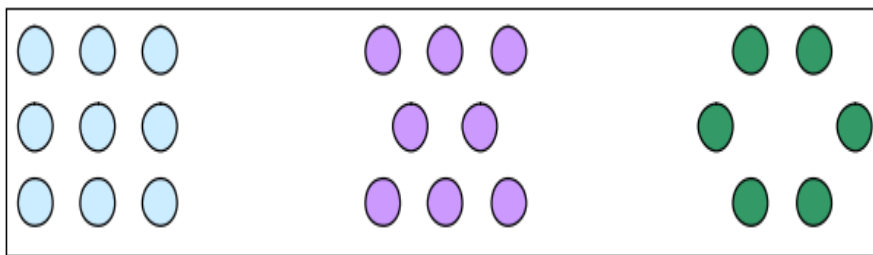


Figure.II. 4 Exemples De Différents Réseaux 2D.

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-5* représentent:

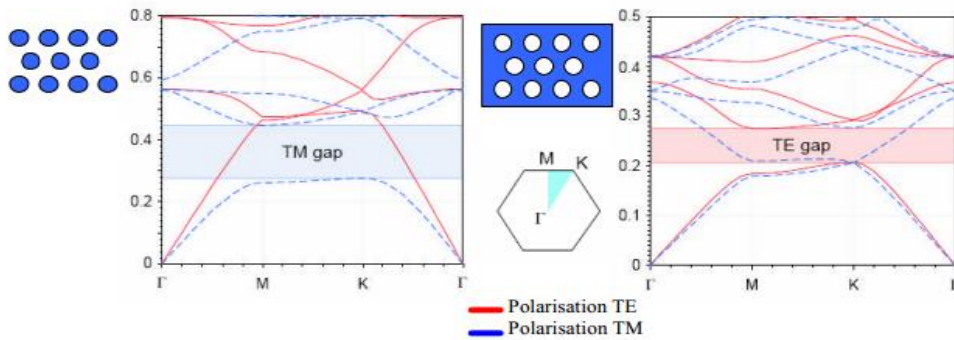


Figure.II. 5 Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation.

- 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.

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.

II.3.1.3 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 [7] (*Figure II-6*).

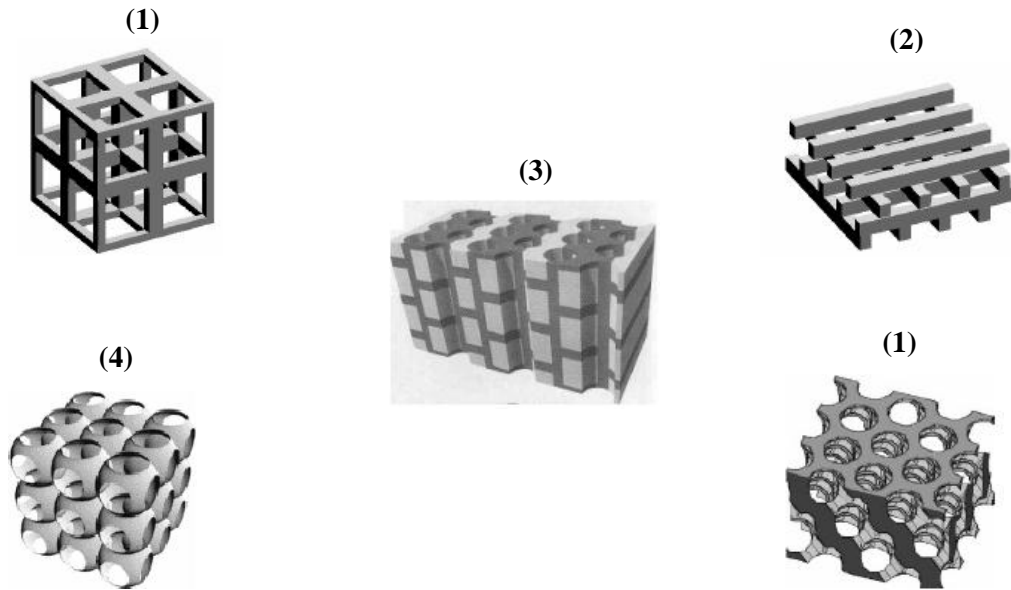


Figure.II. 6 Différentes Structures 3D Comme La Structure Cubique (1), Le Tas De Bois (2), La Structure Multicouches (3), Les Opales Ou Opales Inversées (4) Et La Yablonoite (5)

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 [8].

Les deux types de structures (BIP 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 Yablonoite (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 [9].

"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.4 Bande interdite photonique

Le cristal photonique est apparu relativement récemment dans la littérature scientifique et il a ainsi été baptisé par analogie avec les structures électroniques et leur bande électronique interdite. Dans un cristal atomique, l'énergie des électrons ne peut pas prendre des valeurs comprises dans la bande interdite électronique (ou gap). Dans un cristal photonique, ce sont les photons dont l'énergie (ou de manière équivalente la fréquence) ne peut être dans la bande interdite photonique. La propagation dans le cristal photonique de lumière dont la longueur d'onde se situe dans cette bande y est donc interdite. Un émetteur lumineux placé au sein d'un cristal photonique voit donc son émission fortement modifiée, si sa longueur d'onde fait partie de cette bande interdite. Il est ainsi possible de modifier et contrôler l'émission lumineuse d'une source couplée au cristal photonique. Pour exploiter ce phénomène, il s'agit de trouver un cristal photonique possédant des bandes interdites de propagation intéressantes appelées « gaps », autrement dit un matériau qui interdit à la lumière de se propager dans certaines gammes de longueurs d'onde, et ceci quelle que soit sa direction de propagation. Ce matériau, opaque aux longueurs d'onde interdites, doit redevenir transparent à l'extérieur de ces gaps. En utilisant les cristaux photoniques, on peut par exemple envisager la fabrication de cavités parfaites. Un photon placé dans cette cavité ne pourra s'en échapper, ou de manière plus réaliste sa probabilité d'en sortir sera très faible. Les applications pratiques de tels matériaux sont du plus grand intérêt. Parmi la très longue liste de ces applications, les cavités optiques de brique de base. En effet, les cavités optiques à cristaux photoniques de grand facteur de qualité ($\approx 10^6$) et de petit volume modal ($\approx 0,1 \mu\text{m}^3$) ont deux grands domaines d'application: la réalisation de composants sélectifs en longueur d'onde comme des filtres ainsi que des multiplexeurs / démultiplexeurs pour le traitement optique des signaux. L'autre domaine d'application, plus fondamental, concerne les expériences d'optique quantique où l'on cherche à contrôler l'émission spontanée d'émetteurs uniques (*effet Purcell*) ou à mettre en évidence le couplage fort entre un émetteur et le champ qui le manipule (*oscillations de Rabi*). Le contrôle accru par les cristaux photoniques de l'émission spontanée en plus du contrôle de l'émission stimulée permet la réalisation de lasers sans seuil ou à très faible seuil tout en présentant de grandes vitesses de modulation. Ces deux applications nécessitent la

réalisation de cavités de facteurs de qualité les plus élevés possibles.

II.5 Notions De Défaut Dans Les Structures Periodiques:

Les propriétés des structures *BIP* deviennent particulièrement intéressantes lorsque l'on introduit un ou plusieurs défauts dans la structure.

II.5.1 Introduction d'un défaut dans les structures BIP :

La création de défaut dans ces structures est engendrée par la rupture de la périodicité d'éléments périodiques. Cette rupture va créer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite. La position et la largeur de la bande passante sont gérées

Par les caractéristiques du défaut (*FigureII-8*).

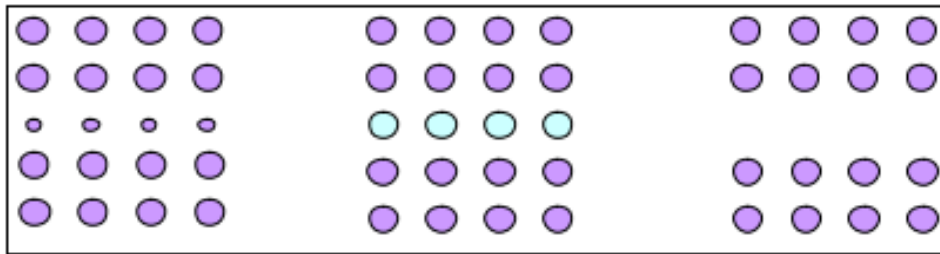


Figure.II. 7 Différents Types De Défauts Basés Sur La Rupture De La Périodicité Du Motif

Dans des structures *1D*, le défaut ne peut être envisagé que dans la direction de périodicité. En revanche pour les structures *3D*, nous pouvons créer des défauts dans une, deux ou trois directions (sous la forme de micro cavité). (*FigureII-9*)

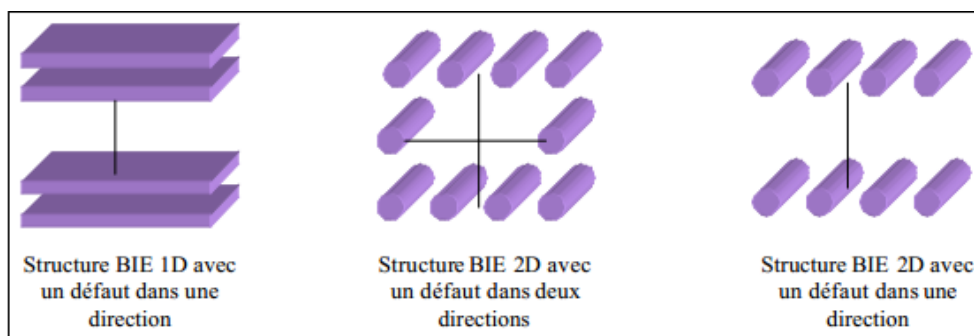


Figure.II. 8 Exemple De Dimension Du Défaut.

II.6 Application Des Cristaux Photonique

II.6.1 Applications des cristaux photoniques bidimensionnels

La majorité des échanges de données à grande distance s'effectue par propagation d'un

signal optique à l'intérieur d'une fibre optique. Les fonctions de traitement du signal se font en revanche toujours sur des signaux électriques: ils nécessitent donc une conversion du signal optique en signal électrique. Les interconnexions électriques constitueront une limitation sévère à l'augmentation du débit des informations échangées. L'objectif à terme est de parvenir à un traitement tout optique de l'information, en s'affranchissant ainsi des étapes de conversion optique-électrique et électrique-optique [10].

C'est le domaine de l'optique intégrée, qui forme le vaste champ d'applications des cristaux photoniques. La miniaturisation des composants existants, ainsi que l'exploitation de propriétés nouvelles, sont les principales motivations des recherches dans le domaine des cristaux photoniques. Comparée à l'optique intégrée classique, la promesse d'un moindre encombrement est liée à l'absence de perte par rayonnement dans le plan. On peut classer les cristaux photoniques suivants leur applications en deux grandes secteurs les cristaux photoniques passifs et actifs [10].

II.6.1.1 Cristaux photoniques bidimensionnels passifs

Les cristaux photoniques bidimensionnels étant d'excellents miroirs dans la bande interdite photonique, ils peuvent guider à volonté un signal lumineux, fonctionnalité de base de l'optique intégrée, les pertes dans des guides à cristaux photoniques sont du même ordre que celles de très honorables guides à contraste d'indice. L'émergence du concept de cristal photonique bidimensionnel avait soulevé notamment de grands espoirs pour la réalisation de virages compacts, c'est-à-dire à l'échelle de la longueur d'onde optique. Cet espoir a été quelque peu déçu par les premiers résultats théoriques et expérimentaux. L'heure est maintenant à l'optimisation généralisée, et la solution finale n'est pas nécessairement un cristal photonique [10].

Hormis la fonction simple du guidage, l'autre grande fonctionnalité passive intervenant dans des circuits intégrés optiques est celle du filtrage des longueurs d'onde. L'information lumineuse est en effet véhiculée sur plusieurs longueurs d'onde, typiquement une trentaine entre (1530 nm et 1560nm) pour la bande "C" du WDM ("*Wavelength Division Multiplexing*") dans des réseaux locaux, ou les distances entre utilisateurs n'excèdent pas (50km) et où les débits restent modestes, on préfère souvent le CWDM ("*Coarse-Wavelength Division Multiplexing*") aux nœuds du réseau, il faut être en mesure d'extraire ou d'insérer certaines longueurs d'onde, pour leur contrôle ou pour leur routage.

De nombreuses solutions à base de cristaux photoniques bidimensionnels sur niobate

de lithium ont été proposées. En plus de la propriété de confinement, les cristaux photoniques possèdent des propriétés de diffraction très spécifiques dans les bandes permises, il existe notamment des modes de faible vitesse de groupe et de forte dispersion qui donnent lieu à l'effet super prisme.

Dans la bande interdite photonique, les modes de défauts présentent également des propriétés diffractives spécifiques [10].

II.6.1.2 Cristaux photoniques bidimensionnels actifs

Du côté des fonctionnalités actives, les cristaux photoniques sont également très intéressants pour leurs propriétés de confinement et de diffraction. Ces deux propriétés assurent en effet un contrôle modal des émetteurs pour redistribuer l'énergie dans des directions privilégiées, et éventuellement pour la redistribuer spectralement [10].

II.6.2 Applications et utilisations des structures BIP à défaut:

Dans le domaine de l'optique, de nombreuses applications ont été développées puis ce fut dans celui des fréquences centimétriques et millimétriques. Les réalisations sont en effet plus simples compte tenu des dimensions à ces fréquences.

Quelle que soit la structure photonique étudiée, les variations des champs dépendent des motifs choisis. On peut classer les structures qui utilisent les structures *BIP* en deux familles:

- Celles qui utilisent la périodicité des motifs:
 - Les antennes : les champs électromagnétiques ne sont plus piégés dans le plan de masse arrière, nous obtenons ainsi moins de lobes secondaires [11], [12].
 - Les filtres : la défection dans le plan de masse d'une ligne permet d'éliminer les ondes de surface en introduisant une importante impédance de surface. Plus le nombre de motifs est grand, plus la bande rejetée est profonde et large [13].
 - Les structures cristallines artificielles : le but est d'empêcher la propagation de l'onde quel que soit l'angle d'incidence de l'onde excitatrice [14].
- Celles qui utilisent la périodicité des motifs et des ruptures de périodicité :
 - Les filtres très sélectifs : la rupture de la périodicité permet la transmission de l'onde dans la bande interdite à une fréquence précise, fonction de cette rupture [15].

- Les guides : un « couloir » est créé au milieu du réseau périodique, l'onde le suit comme dans le cas d'un guide [16] [17].
- Les coupleurs : en ajoutant à deux guides parallèles une jonction commune, associée à des éléments actifs, nous pouvons orienter l'onde dans les guides voulus [18].
- Les antennes : les champs électromagnétiques sont piégés dans le défaut, nous obtenons ainsi une antenne résonante et directive [19].

II.6.4 Application Des Cristaux Photonique

II.6.4.1 Substrats Cristaux Photonique pour les Antennes

C'est en (1993) que les matériaux (CP) ont été utilisés comme substrat pour des antennes planaires. Les auteurs se sont intéressés au rayonnement d'une antenne papillon lorsque celle-ci est implémentée sur un cristal photonique (CP) 3D de type Yablonovite, dont la géométrie est montrée sur la (Figure II.10).

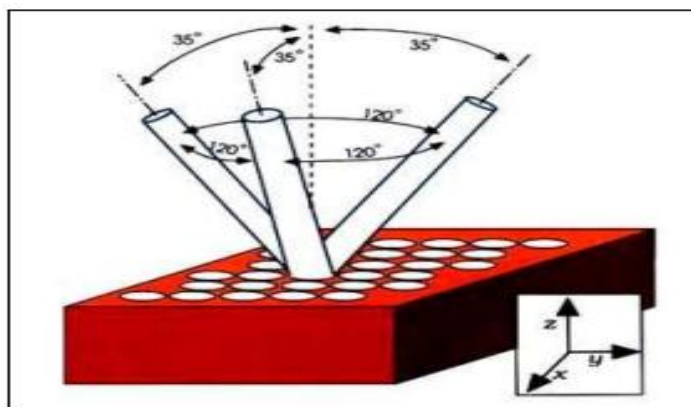


Figure.II. 9 Yablonovite

Bien que le diagramme de rayonnement dans le plan E de l'antenne laisse apparaître des lobes secondaires, ils ont montré que le rayonnement est principalement concentré dans l'air et non pas dans le substrat. Cela étant, la fabrication du cristal reste complexe du fait d'un usinage 3D. C'est pourquoi d'autres géométries ont été proposées pour réaliser des substrats d'antennes à (CP). Ces nouvelles structures entrent dans la famille des surfaces haute impédance SHI.

II.6.4.2 Application Cristaux photoniques dans le domaine micro-onde :

Très vite après l'introduction du concept par Yablonovitch, les chercheurs ont montré un important intérêt pour ces matériaux et pour leurs applications dans le

domaine des composants micro-ondes.

Des filtres à bandes interdite larges et profondes ont été réalisés par l'utilisation d'un grand nombre de motifs. En effet, l'introduction d'une impédance de surface importante au niveau du plan de masse grâce à ces matériaux permet d'éliminer les ondes de surface et surtout de réduire le profil des antennes. De plus, des recherches ayant pour but d'empêcher la propagation de l'onde quel que soit l'angle d'incidence de l'onde excitatrice ont abouti à de nouvelles structures cristallines artificielles. La rupture de la périodicité dans les CP permettent la **transmission** de l'onde dans la bande interdite à une fréquence précise, fonction de cette rupture. Des travaux ont utilisé ce principe pour réaliser des guides d'ondes et des filtres très sélectifs [21].

Enfin, des surfaces planes à bases de matériaux CP ont été proposées afin d'améliorer la directivité des antennes. Ainsi, en utilisant le principe des cavités de type Fabry-Pérot, Thévenot et al, ont augmenté la directivité d'une antenne imprimée fonctionnant en bande.

II.6.4.3 Guides d'onde à cristaux photoniques

En introduisant un défaut linéaire (omission d'une ou de plusieurs rangées de trous) dans le cristal photonique, il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. Un photon restera confiné dans le guide si son énergie est située à l'intérieur de la bande interdite.

Des composants divers sont réalisables à partir de défauts linéaires (Figure II.13). La transmission au travers de ces dispositifs peut être optimisée en modifiant la taille ou la forme des trous au niveau du virage ou de la jonction, afin de minimiser le couplage entre le mode guidé et les modes rayonnés au niveau des courbures [20].

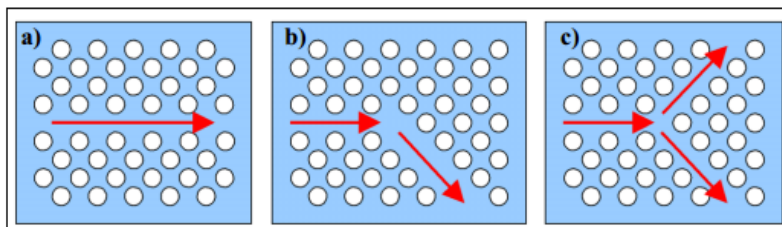


Figure.II. 10 Différents Composants A Base De Défauts Linéaires a) Guide Droit, b) Virage A 120 et c) Jonction Y

II.7 Conclusion:

Ce chapitre rappelle brièvement l'état de l'art sur les matériaux périodiques (*BIP*) aussi bien leur histoire que leurs propriétés. Ces dernières intéressent de nombreux chercheurs qui continuent de démontrer l'intérêt d'utiliser ces matériaux soit pour remplacer des systèmes déjà existants mais plus contraignants, soit pour apporter une innovation toute particulière dans un domaine précis. L'étude de ces matériaux reste un sujet très riche, tout comme le choix de leurs applications. Pour comprendre leur fonctionnement, elles requièrent de nombreuses notions.

La conception de matériaux (*BIP*) nécessite de tenir compte de la géométrie de la structure. Selon le nombre de directions périodiques et la nature du matériau, nous ne modéliserons pas la structure de la même manière.

L'utilisation d'un matériau hors de sa bande interdite permet de sélectionner un mode de propagation parmi les modes possibles de la structure infinie, le choix de la taille du matériau et de son excitation sont des facteurs importants.

L'utilisation d'un défaut dans les structures (*BIP*), qu'il soit périodique ou local, modifiera le fonctionnement du matériau à cette fréquence.

Bibliographie

- [1] TANGYU JAFFRE " *Caracterisation Des Materiaux A Bande Interdite Electromagnetique Multiperiodiques Et Leurs Applications Aux Antennes* " Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2005.
- [2] E. YABLONOVITCH " *Photonic Band-Gap crystals* " Phys.: Condens. Matter 5, No 16, April 1993, pp. 2443-2460
- [3] E. YABLONOVITCH " *Photonic Band-Gap structure* " J. Opt. Society Vol 10, p.283-293, Feb 1993
- [4] E. YABLONOVITCH " *Photonic crystals semi conductors of light* " Scientific American December 2001
- [5] A. POLMAN, P. WITZIUS " *Materials science aspects of photonic crystals* " Guest editors MRS bulletin August 2001.
- [6] M.PLIHAL, A.A MARADUDIN " *Photonic band structure of two dimensional systems: the triangular lattice* " Phys .Rev B / vol 44 1991 – pp 8565
- [7] G.S SMITH, M.P KESLER, J.G MALONEY " *Dipole antennas used with all dielectric photonic band gap reflector: gain, field, patterns and input impedance crystals* " M.O.T.L / Vol 21, N 3, May 5 1999 –pp191-196
- [8] M.M SIGALAS, R.BISWAS , Q.LI ,D.CROUCH, W. LEUNG, R . JACKOB SWOODBURY, B.LOUGH, S.NIELSEN , S. McCALAMONT, G. TUTTLE, K.M. HO " *Dipole antennas on photonic band gap crystals- Experiment and simulation* " M.O.T.L / Vol 15, N 3, June 20 1997 – pp153-158
- [9] G. KIRIAKIDIS, N. KATSARAKIS " *Fabrication of 2-D and 3 D PBG crystals in the GHz and THz regions* " Mater. Phys. Mech (2000).
- [10] Robert Michaël FARHA " *Etude d'une structure à cristal photonique « LOM » gravée dans un guide Ti:LiNbO₃ dopé erbium pour l'émission de la lumière à 1,55µm* " thèse de Doctorat, Ecole Doctorale EDITE Université Paris, septembre 2010.
- [11] E. R. BROWN, C. D. PARKER, E. YABLONOVITCH « *Radiation properties of a planar antenna on a photonic–crystal substrate* » J. Opt. Soc. Am. B., vol. 10, No 2, February 1993.
- [12] H-Y. D. YANG , N. G. ALEXOPOULOS, E. YABLONOVITCH " *Photonic Bandgap Materials for High-Gain Printed Circuit Antennas* " IEEE Trans. On Antennas and Prop., vol. 45, No 1, January 1997.
- [13] I. RUMSEY, M. PIKET-MAY, P. KEITH KELLY « *Photonic Bandgap Structures Used as filters in Microstrip Circuits* » IEEE Microwave and Guided Wave Letter, vol. 8, No 10, October 1998.
- [14] C. A. KYRIAZIDOU, H. F. CONTOPPANAGOS, W. M. MERILL, N. G. ALEXOPOULOS " *Artificial versus Natural Crystals: Effective Wave Impedance of Printed Photonic Bandgap Materials* ", IEEE Trans. On Antennas and Prop., vol. 48, No 1, January 2000.

- [15] B. LENOIR, D. BAILLARGEAT, S. VERDEYME, P. GUILLON « *Finite element method for rigorous design of microwave bandpass filter device using periodic metallic lattice* » 29th European Microwave Conference, Munich 1999.
- [16] M. KOSHIBA, Y. TSUJI, S. SASAKI « *High-Performance Absorbing Boundary Conditions for Photonic Crystal Waveguide Simulations* » IEEE Microwave and wireless components letters, vol. 11, No 4, April 2001.
- [17] VANBESIEN, DANGLLOT, LIPPENS
"Structures guide d'onde actives par ingénierie de BIP" Congrès JNM Arcachon 2001.
- [18] O. VANBESIEN, J. DANGLLOT, D. LIPPENS « *a smart K-band resonant switch based on photonic band gap engineering* » 29th EuMC, Munich 1999.
- [19] M. THEVENOT "Analyse comportementale et conception des matériaux diélectriques à BIP. Application à l'étude et à la conception de nouveaux types d'antennes." Thèse de doctorat- n 34-1999- Université de Limoges- 1999.
- [20] Delphine NEEL "Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI " thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Novembre 2006.
- [21] Abdelwaheb Ourir " Applications de Matériaux Bandes Interdites Photoniques et de matériaux en Télécommunications " thèse de Doctorat, Université de Paris XI d'Orsay, décembre 2006.



CHAPITRE III

Présentation Du Logiciel CST

III.1. Introduction

L'analyse théorique impliquée dans la conception de quelques types d'antennes, peut devenir tout à fait complexe, et dans beaucoup de cas une solution exacte peut être impossible. Dans l'électromagnétique informatique, les logiciels de simulation ont facilité l'analyse des problèmes et la conception des structures de plus en plus complexes. *Le CST-Simulation Computer Technology [1]* est l'outil de pointe pour la simulation 3D rapide et précise des dispositifs à haute fréquence et le leader du marché de la simulation dans le domaine temporel. Il permet l'analyse rapide et précise des antennes, filtres, coupleurs, planes et multicouches et structures SI (signal integrity) et EMC (electromagnetic compatibility) effets ...etc.

IL existe plusieurs simulateurs des circuits électromagnétiques qui sont basés sur une des méthodes:

FDTD: finite difference time domain;

FEM: finite element method;

MOM: moment method;

FIT: Finite Integration Technique ;

FVI: finite volume integral ;

TLM : transmission Line Matrix.....etc

Dans ce chapitre nous allons présenter le logiciels *CST* et montrer comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception *CST MICROWAVE STUDIO*.

III.2.Principe De Simulateur CST

CST MICROWAVE STUDIO est un logiciel complet pour l'analyse et la conception électromagnétique dans la gamme haute fréquence. Il simplifie l'insertion des structures en fournissant un solide en 3D pour modélisé à la fin chaque élément ou « Component ». (*Figure III.1*) Après cette modélisation, une procédure entièrement automatique de maillage est appliquée avant que la simulation soit lancée.

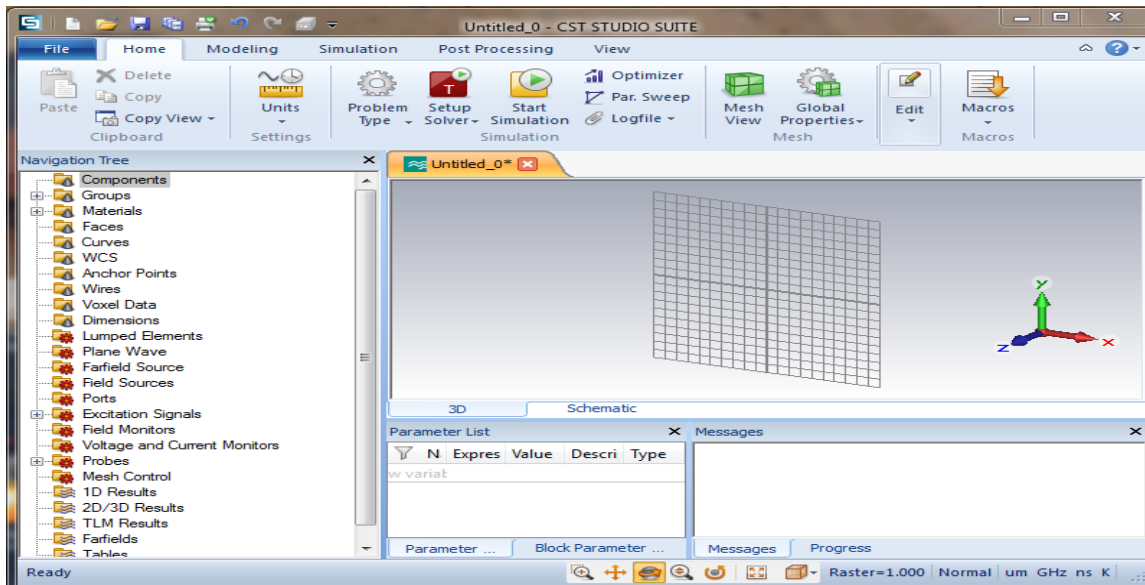


Figure.III. 1 Interface Graphique De CST MICROWAVE STUDIO

Le *CST MICROWAVE STUDIO* est basé sur la technique d'intégration finie (FIT), présenté en électrodynamique plus de trois décennies, cette technique consiste à échantillonner spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Le calcul des dérivées spatiales et temporelles s'effectue grâce à l'approximation dite des différences centrées. La région modélisée est représentée par deux grilles de points discrets intercalées d'une demi-maille. Une grille contient les points où sont calculés les champs électriques et l'autre grille contient les points où sont calculés les champs magnétiques. Ainsi chaque composante de champ magnétique est entourée de quatre composantes du champ électrique comme le montre la maille élémentaire sur la (Figure III.2). Ce formalisme implique d'une part un maillage parallélépipédique et d'autre part que la taille mémoire nécessaire et le temps de calcul d'une simulation FIT, sont directement dépendants du volume borné de la structure simulée, de la dimension de la maille élémentaire et donc du pas spatial choisi.

Il est donc possible par ce logiciel de calculer des champs électriques, des champs magnétiques, mais aussi les paramètres "S" d'un dispositif et de visualiser en trois dimensions les champs rayonnés par ce dernier.

Les points importants pour la réalisation d'une simulation exploitable sont principalement le réglage du maillage lequel est déterminé par la maille élémentaire, le réglage de la précision de convergence du calcul ainsi que le choix des ports pour l'injection du signal d'excitation de la structure.

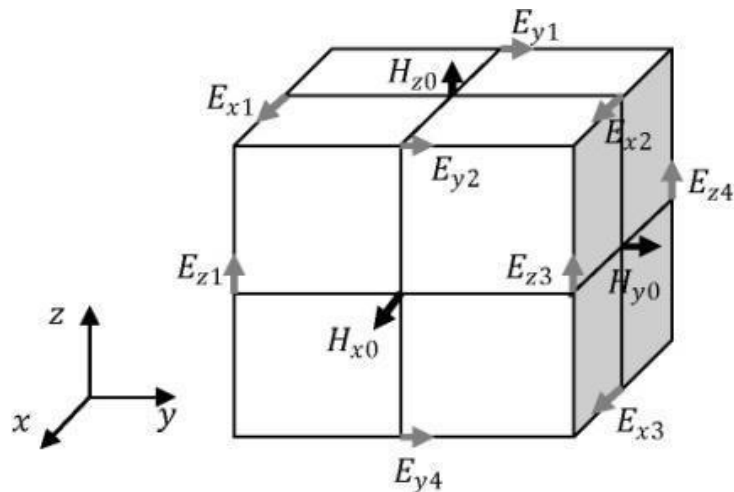


Figure.III. 2 Maille Élémentaire D'une Simulation FIT.

Le choix du maillage est primordial et peut s'il est mal réglé donner des résultats complètement erronés. Plus le pas est petit, meilleur sera le résultat de simulation mais au détriment d'un temps de calcul plus long.

Le signal d'excitation du CST simulé peut être injecté via deux types de ports, un port « *waveguide* », ou un port « *discrete port* ». Le port noté « *waveguide* » correspond à l'injection d'une onde électromagnétique dont l'impédance dépend des dimensions du port et dont la polarisation peut être choisie. Le port noté « *discrete port* » est semblable à une source de tension permettant l'injection d'un signal haute fréquence. La polarisation de l'onde injectée n'est pas réglable, au contraire de l'impédance du port. Ce dernier port peut être utilisé tant que sa dimension reste négligeable devant la longueur d'onde du signal injecté.

III.3 La Méthode D'intégration Finie (FIT)

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.

La méthode d'intégration finie, c'est probablement la méthode numérique pour électromagnétique simulation sur le terrain avec le développement le plus dynamique.

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. 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 [2].

III.4 Aperçu De La Structure De L'interface Utilisateur

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

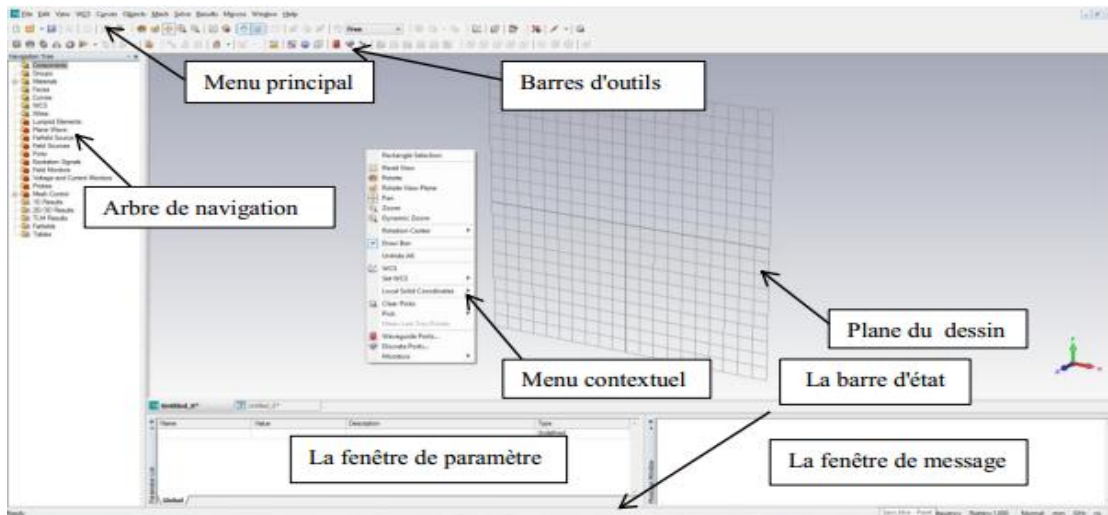


Figure.III. 3 Fenêtre Principale Du Logiciel CST

➤ 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.

➤ Le menu contextuel est un moyen souple d'accéder à des commandes du 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 modeler 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.5 Exemple D'un Projet En CST

III.5.1.Demarrer Le Logiciel

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

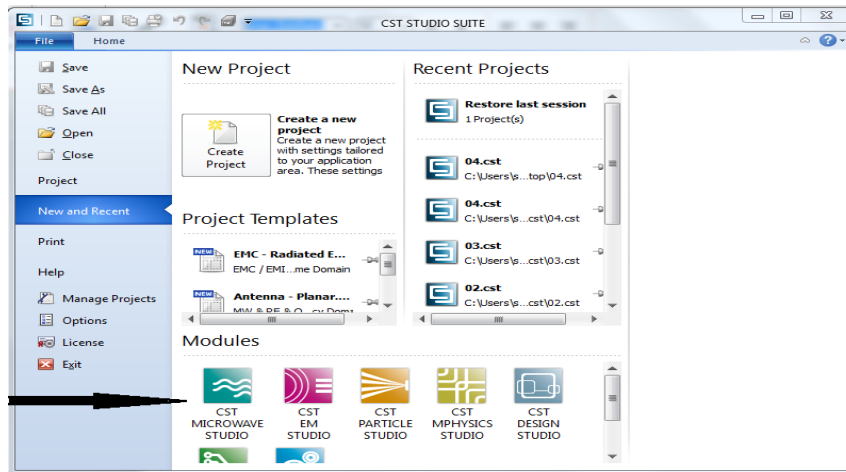


Figure.III. 4 La Fenêtre D'accueil

Dans cette boîte de dialogue, sélectionnez *CST MICROWAVE STUDIO* et cliquez sur OK.

Une fois le module correspondant est initialisé, vous verrez une fenêtre similaire à la suivant:

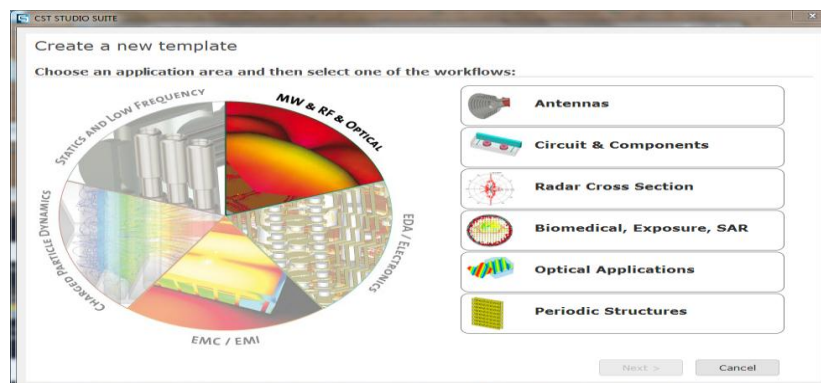


Figure.III. 5 La Fenêtre De Créer Le Domaine De Travail

Sélectionner <MW&RF&OPTICAL> ,cliquez sur la case <ANTENNAS> et bouton *NEXT*.

Une autre fenêtre a été ouverte

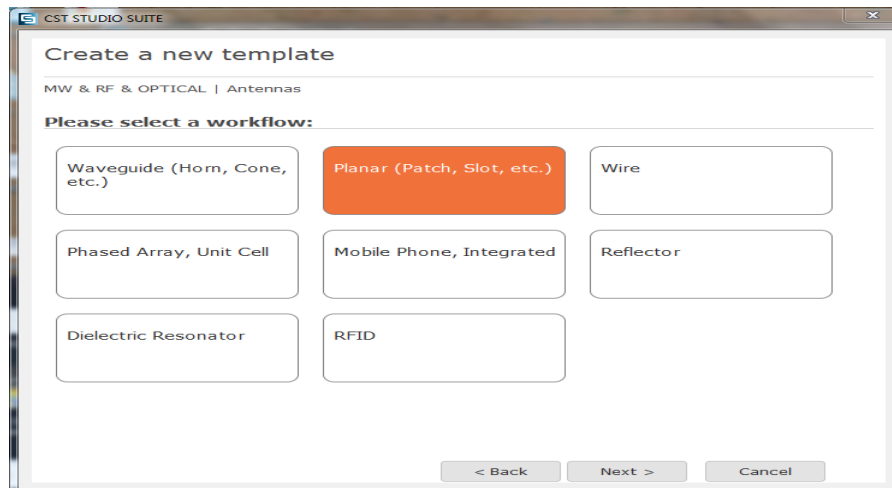


Figure.III. 6 Fenêtre De Choisir Le Composant qu'on Va Le Traiter

Après cette étape sélectionner *<TIME DOMAIN>* ,une nouvelle liste s'apparaitre

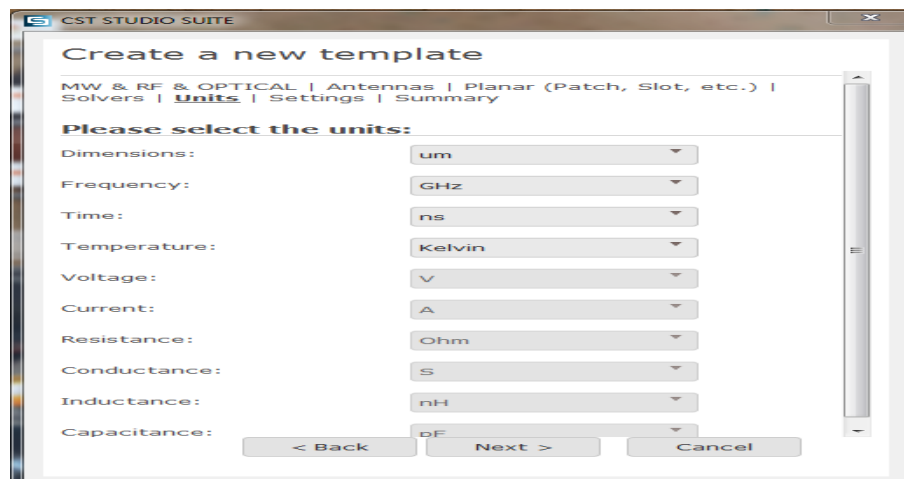


Figure.III. 7 Liste Des Paramètres Et Unités

Cette fenêtre permet de changer les unités utilisées pour la structure d'une 'antenne micro-ruban (les dimensions, fréquence, temps, température, ...), en suite cliquez sur *<Next>*.

Une autre fenêtre apparaît pour définir un intervalle de fréquences.

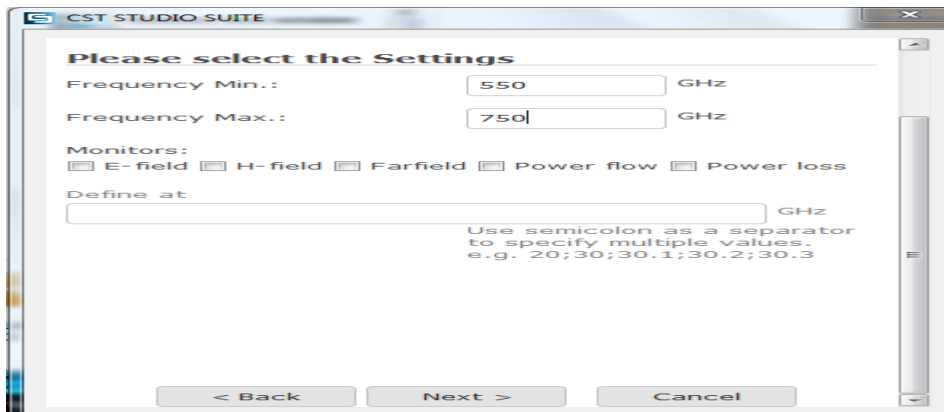



Figure.III. 8 La Gamme De Fréquence

Après on peut démarrer notre structure : l'antenne micro-ruban.

III.5.2 Créer Le Plan De Masse

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

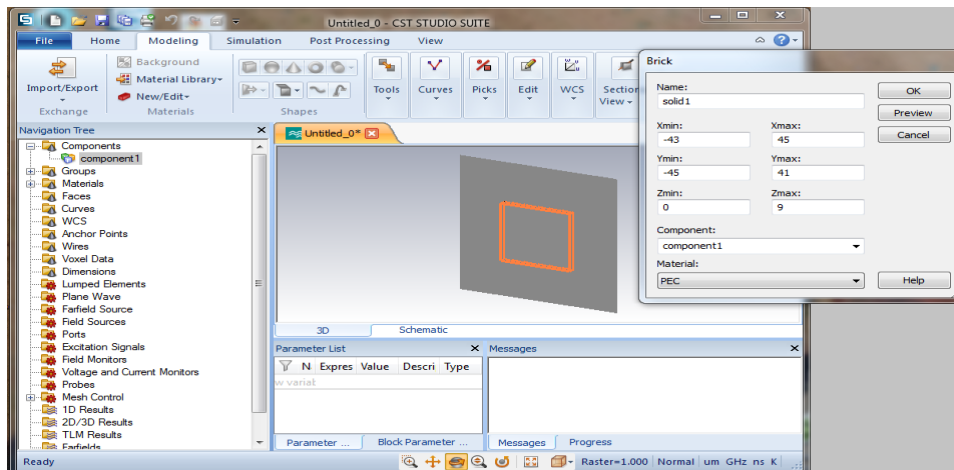


Figure.III. 9 Introduire Le Plan De Masse

III.5.3 Créer Un Substrat Diélectrique

Pour créer le substrat il faut :

- Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et suivre les mêmes étapes De plan de masse.
- En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (*Heraeus CT2000 (loss free)*) et cliquez sur *OK*.

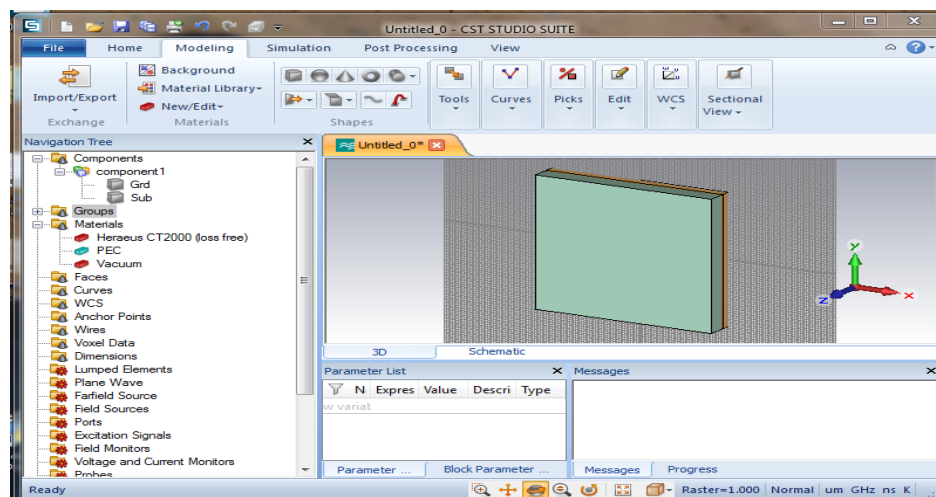



Figure.III. 10 Substrat Diélectrique

III.5.4 Créer Les Trous

Pour créer les trous il faut :

- Activez l'outil de *cylinder* en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet .
- En utilisant la boîte de dialogue on introduit les valeurs numériques et choisi le matériau dans ce cas (vacuum : vide).
- Une nouvelle boîte de dialogue s'ouvre et on choisi (cut away highlighted shape), et cliquez sur OK.

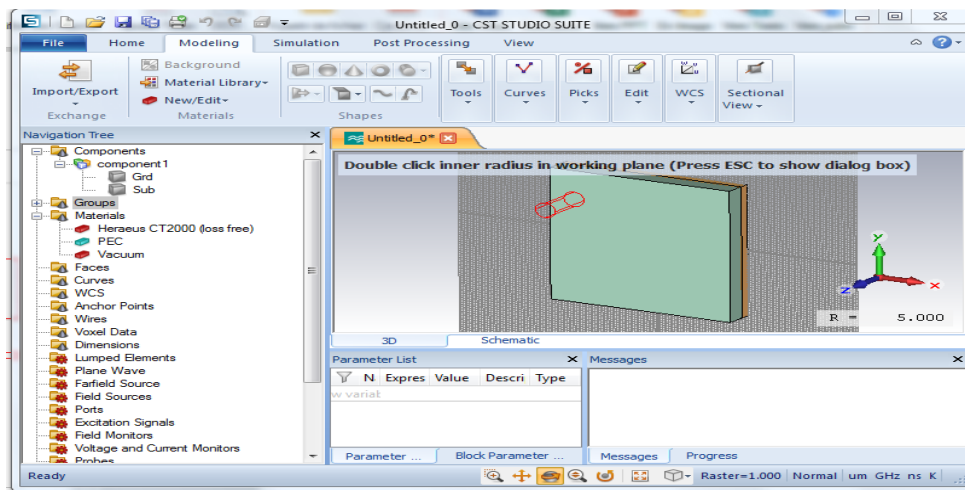


Figure.III. 11 Créer Un Trou

III.5.5 Créer L'antenne Microruban Triangulaire

Pour créer le patch il faut :

- Choisir dans le menu principal la case *<modeling>*
- Cliquer sur l'icône *<curves 2D>* et sélectionner *<poligon>*.
- Définir un point de départ par un double-clic sur un emplacement sur le substrat et glisser la souris, un autre double clic pour le deuxième et le troisième point.

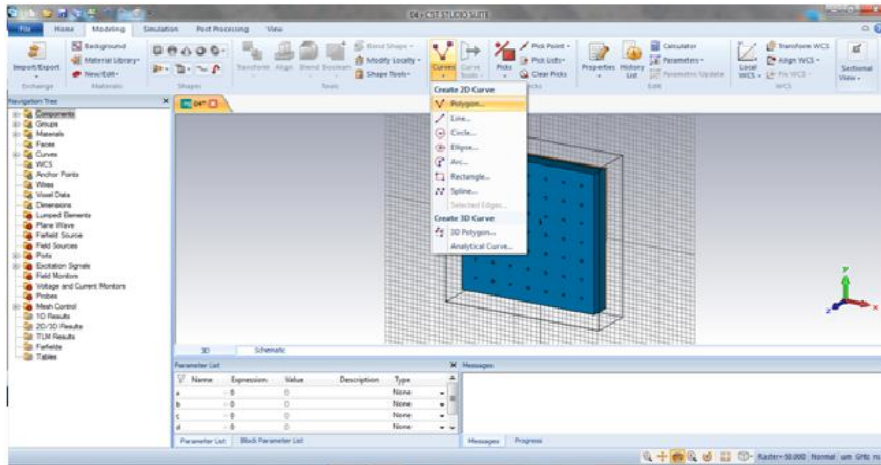


Figure.III. 12 La 1^{er} Etape Pour Créer L’antenne Micro-ruban Triangulaire

➤ En utilisant la boîte de dialogue on va introduire les valeurs numériques des emplacements des 3 points pour construire l’antenne triangulaire.

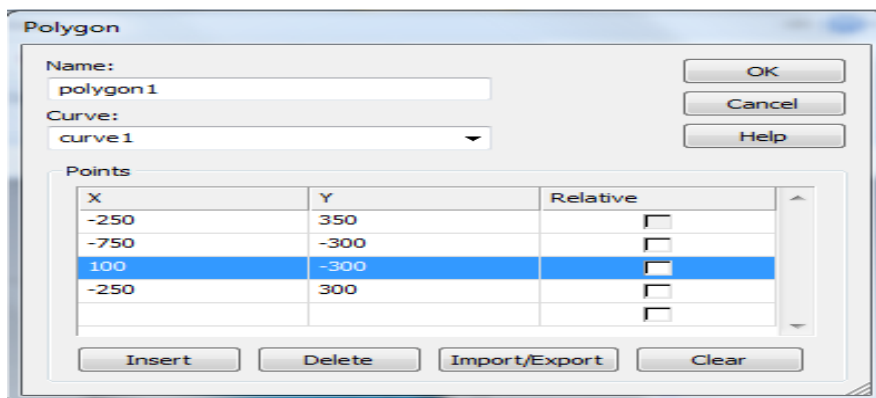


Figure.III. 13 Boîte De Dialogue

- Choisir dans l’arbre de navigation la structure <curves> puis <curve 1>.
- Dans la barre d’outils on va cliquer sur <curve tools> puis <cover curve>.

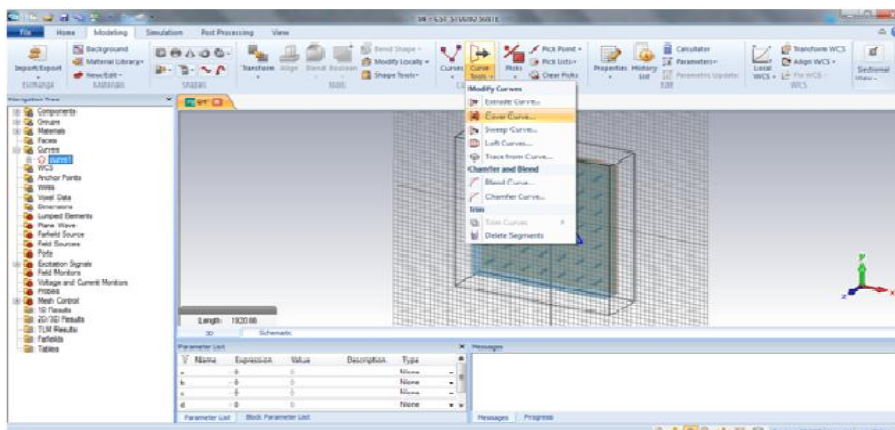


Figure.III. 14 La 2^{ème} Etape Pour Créer L’antenne Micro-ruban Triangulaire

- Un double clique sur le triangle et utilisé la boîte de dialogue pour indiqué ces paramètres (matériaux, composants...etc)

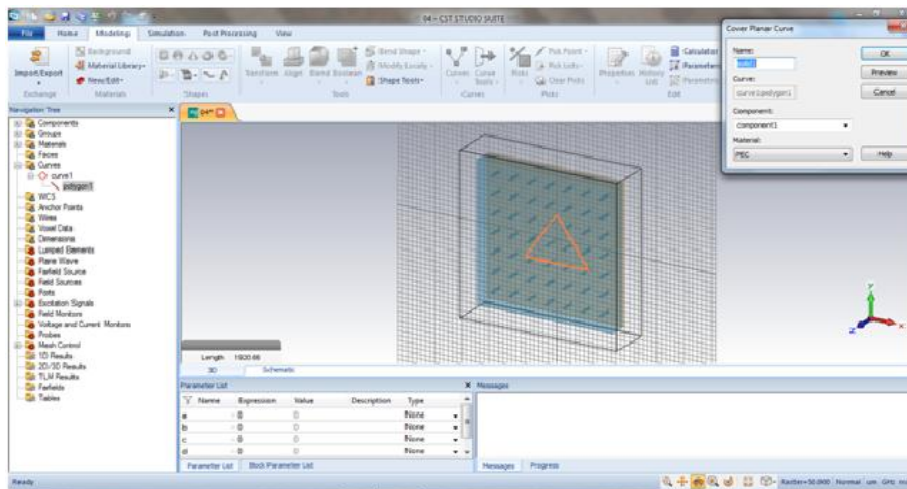


Figure.III. 15 La 3^{ÈME} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire

- Cliquer dans l'arbre de navigation sur <components 1> et sélectionner le nom de triangle.
- Chercher la structure <shell solid or thicken sheet> qui permet de remplir le triangle.

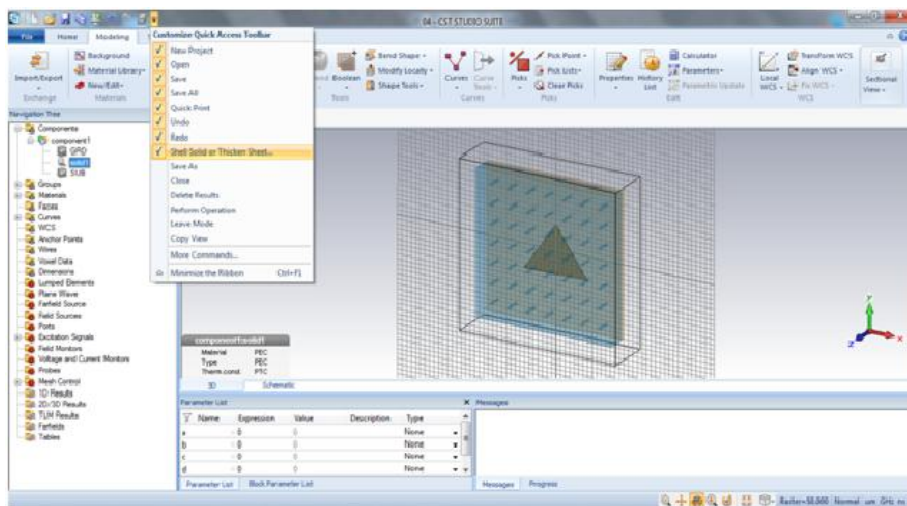


Figure.III. 16 La 4^{ÈME} Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire

- Sélectionner maintenant le patch et cliquer sur <Ctrl+T> pour le déplacer au dessus de substrat

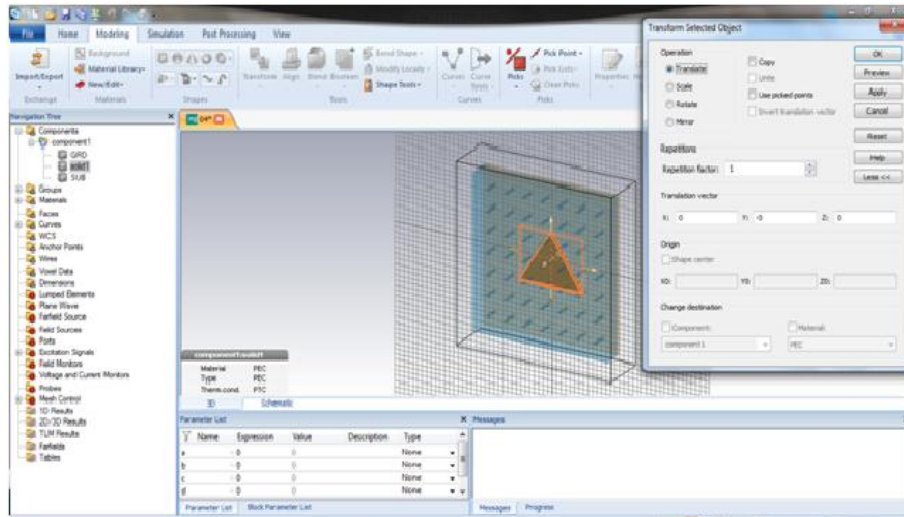


Figure.III. 17 La Dernière Etape Pour Créer L'antenne Micro-ruban Triangulaire

- Voilà maintenant notre antenne micro ruban triangulaire.
- Pour commencé la simulation il faut alimenter l'antenne , on utilisant la case de <simulation> et choisi l'icône de <discrete port>

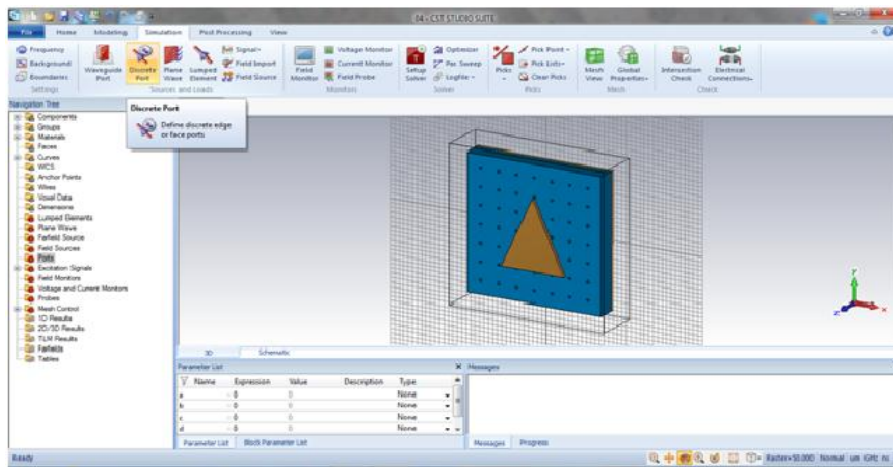


Figure.III. 18 Création De Port D'alimentation

III.6 L'optimisation

Le mot optimisation est employé dans plusieurs matières :

- En mathématiques, l'optimisation traite de la recherche d'un extremum d'une fonction, dont les entrées peuvent être soumises à des contraintes ;
- En informatique, l'optimisation de code permet d'améliorer les performances d'un logiciel.

Pour ce but en utilise l'optimisation pour améliorer les resultats de paramètre S_{11}

- pour optimiser n'importe quel paramètre il faut indiquer ses coordonnées comme des variables et indiquer l'intervalle de recherche.

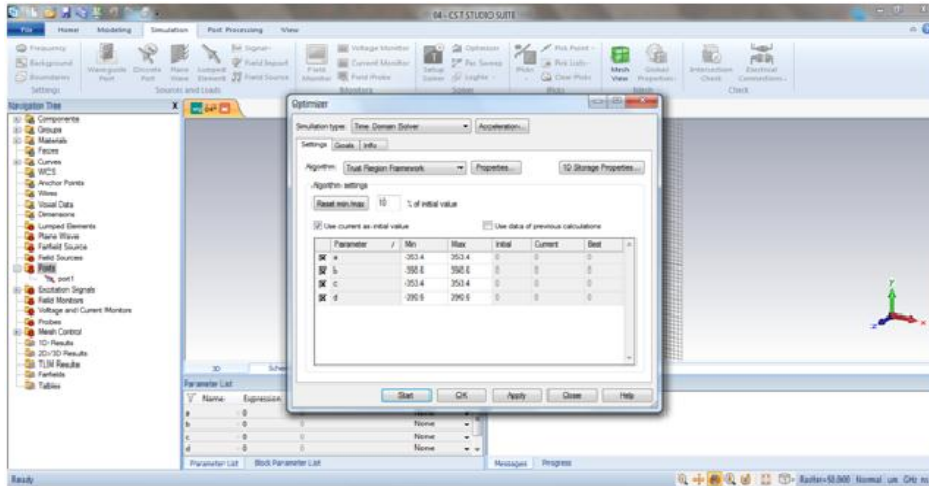


Figure.III. 19 La Fenêtre D'optimisation

Après l'optimisation on obtenir des bons resultats de paramètres s_{11} .

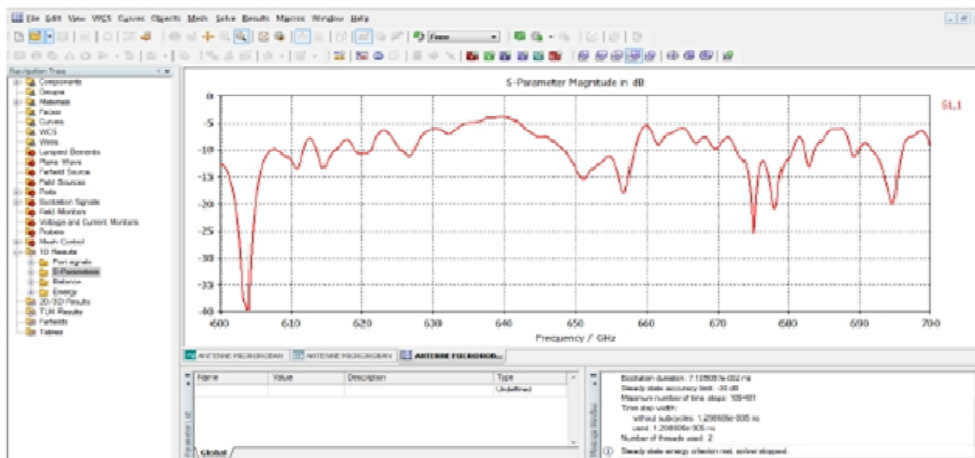


Figure.III. 20 Le Coefficient De Réflexion s_{11}

III.7 Conclusion

Le logiciel CST intègre, la simulation, la visualisation et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement 3D avec une bonne précision comparé à des différents types de logiciels de simulation.

Bibliographie

[1] G. F. Pedersen, J. Bach Andersen, "*Handset antennas for mobile communication, integration, diversity and performance*", URSI Review of radio science, pp 119-139, 1996.

[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



CHAPITRE IV

Analyse D'une Antenne Micro-ruban Triangulaire & Résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres d'une antenne micro-ruban de forme triangulaire à substrats cristaux photoniques 2D 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*.

IV.2 Présentation de la structure de base

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat à cristaux photoniques d'une permittivité de $\epsilon_{r1}=2.7$ (*Arlon AD 270 (loss free)*), $\epsilon_{r2}=1$ (l'air) et d'un patch supérieur de forme triangulaire qui constituera l'élément rayonnant.

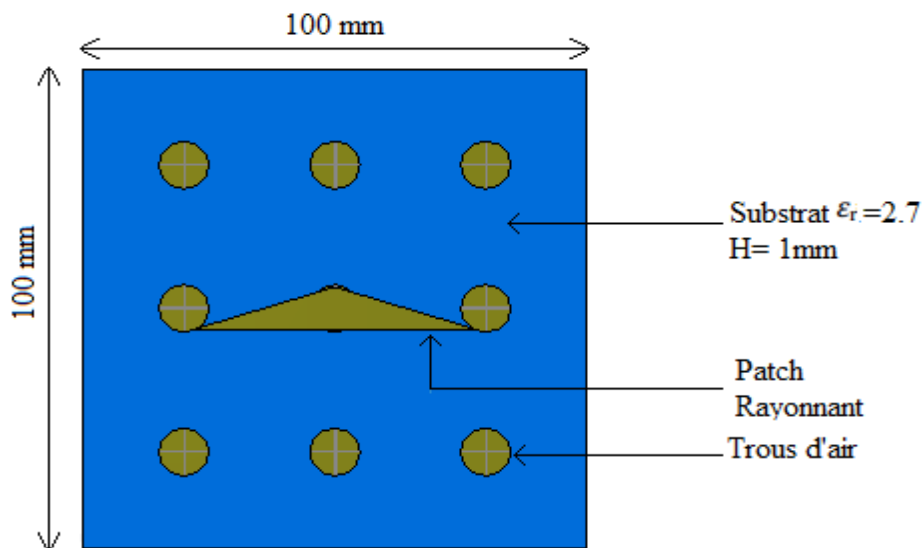


Figure.IV. 1 La Structure De Base

Les dimensions adoptées de substrat lors de cette première simulation sont :

- ✓ Longueur = 100 mm.
- ✓ Largeur = 100 mm.
- ✓ Epaisseur du substrat = 1 mm.

Les caractéristiques adoptées aux trous lors de cette première simulation sont :

- ✓ La forme : Cylindrique
- ✓ Rayon = 5 mm
- ✓ Hauteur = 1 mm

Les dimensions adoptées aux patch lors de cette première simulation sont :

- ✓ Longueur de base = 57 mm.
- ✓ Hauteur = 9 mm.
- ✓ Epaisseur du patch=35 μ m.

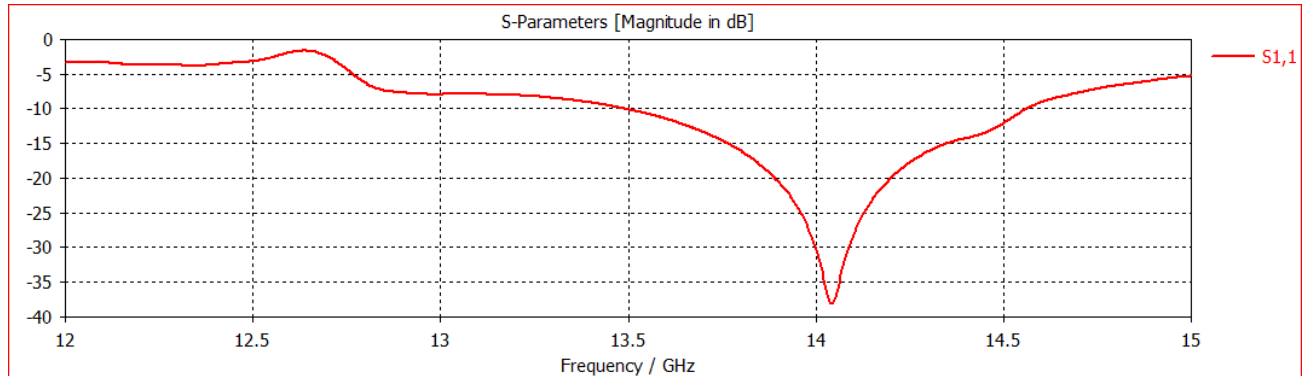


Figure.IV. 2 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Une Antenne Patch Triangulaire

IV.3 Influence Des Paramètres De L'antenne Sur La Fréquence De Résonance, La Bande Passante Et La Directivité

IV.3.1 Comparaison entre Un Substrat Normal Et Substrat Cristal Photonique

Considérons une antenne microruban sur un substrat cristal photonique caractérisé par ϵ_{r1} , et ϵ_{r2} , on étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité en fonction de la présence et l'absence des trous du substrat d'une antenne pour une longueur de base du patch $L = 57$ mm, la hauteur $H = 9$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1} = 2.7$, $\epsilon_{r2} = 1$ (l'air) la longueur et la largeur de substrat $a = b = 100$ mm et la hauteur du substrat $H_1 = 1$ mm, le diamètre des trous dans le substrat $d_r = 5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

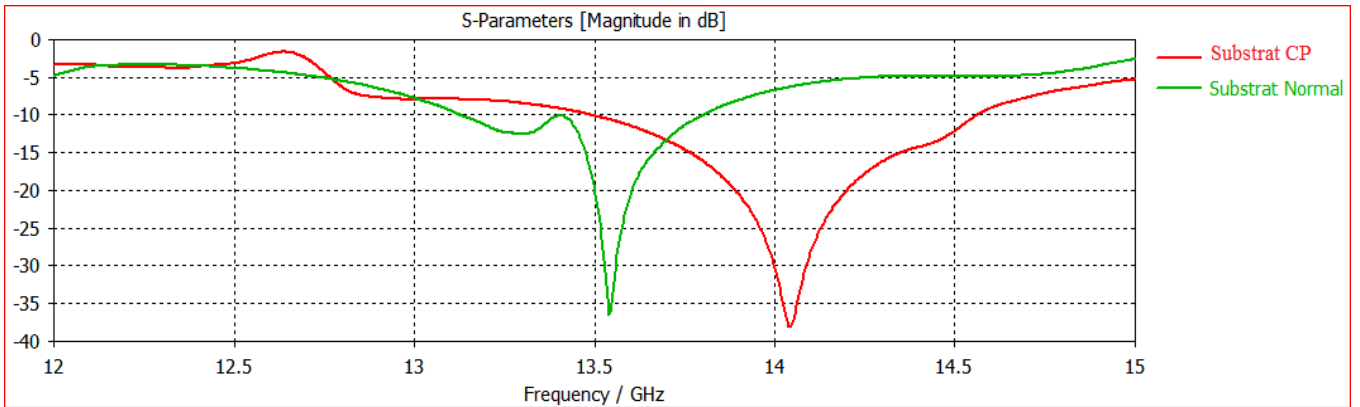


Figure.IV. 3 Coefficient De Déflexion S_{11} Pour Une Antenne Micro-Ruban Triangulaire A Substrat CP Et Une Antenne A Substrat Normal

Type D'antenne	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
Substrat normal	13.55	0.67
Substrat C P	14.04	1.06

Tableau.IV. 1 La Bande Passante Et La Fréquence De Résonance D'antenne avec Substrat Normal Et Substrat CP

A partir des courbes Figure IV.3 des coefficients de reflexion S_{11} d'une antenne à substrat normal et à substrat cristal photonique, et les résultats indiqués dans le tableau IV 1, on déduit les fréquences de résonances et les bande passantes des deux structures, et on remarque que :

La fréquence de résonance et la bande passante augmente pour un substrat cristal photonique par rapport au substrat normal.

b) La Directivité

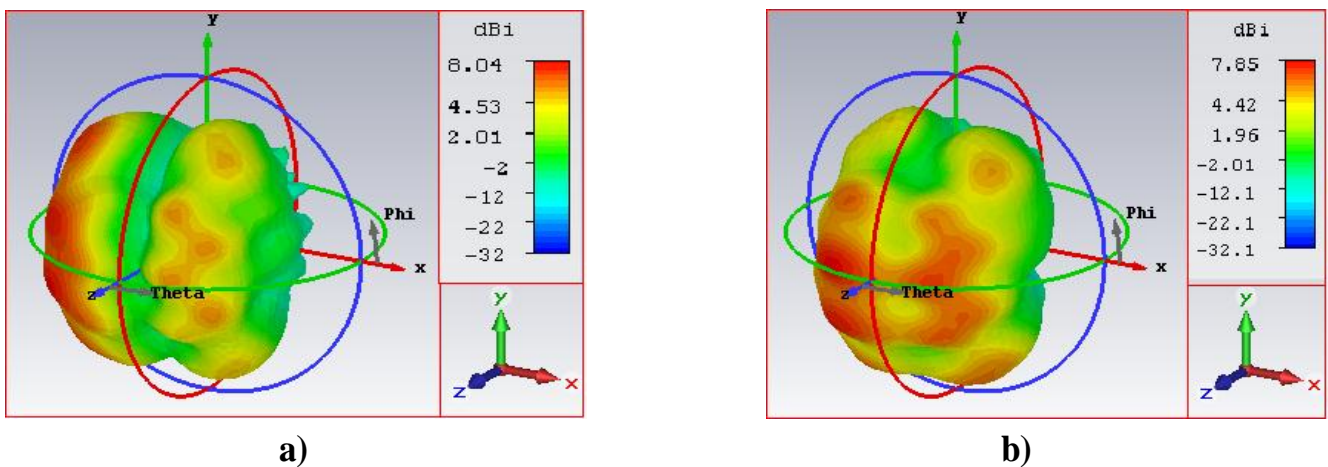


Figure.IV. 4 La Directivité En 3D: a) Substrat Cristal Photonique b) Substrat Normal.

Substrat	La Directivité (dBi)
Normal	7.85
Cristal Photonique	8.04

Tableau.IV. 2 La Directivité D'un Substrat Normal Et Substrat CP

A partir du tableau IV 2 et la Figure IV-4 pour différent substrat on remarque que la directivité est plus importante pour le substrat à cristaux photonique par rapport au substrat normal comme nous avons indiqué dans les chapitres précédents, ce qui prouve qu'avec les substrats CP on peut guider l'onde électromagnétique.

IV.3.2 L'effet De La Forme Du Réseau Des Trous (Carré, Triangulaire, Hexagonal)

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat cristal photonique. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction du réseau des trous du substrat, pour une longueur de base du patch $L=57$ mm, et une hauteur de $H=9$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=2.7$, $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur et la largeur de substrat $a=b=100$ mm et la hauteur de substrat $H_1=1$ mm diamètre des trous dans le substrat $d_r=5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

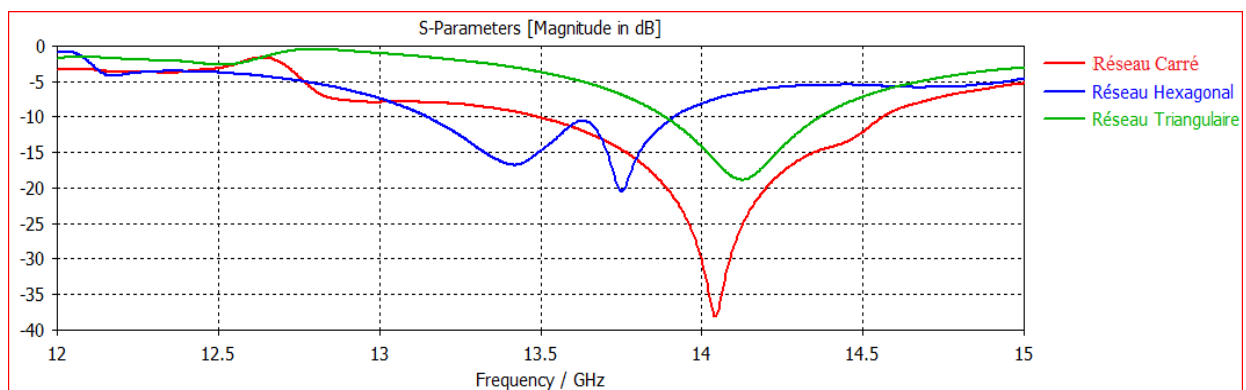


Figure.IV. 5 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du Substrat CP: Carré, Triangulaire, Hexagonal.

Type De Réseau	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
Carré	14.04	1.06
Triangulaire	13.4	0.84
Hexagonale	13.55	0.38

Tableau.IV. 3 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du Substrat CP: Carre, Triangulaire, Hexagonal.

A partir du Tableau IV 3 et la Figure IV.4 qui représente les coefficients de réflexions S_{11} en fonction de la fréquence.pour trois différentes formes du réseaux des trous du substrat cristal photonique.

On remarque, un décalage entre les trois courbes, la fréquence de résonance prend la valeur minimal pour le réseau hexagonal, alors pour la forme du réseau hexagonal la fréquence de résonance est la plus grande.

La grande valeur de la bande passante on la trouve dans le réseau carré et est plus petite dans le réseau hexagonal.

b) La Directivité

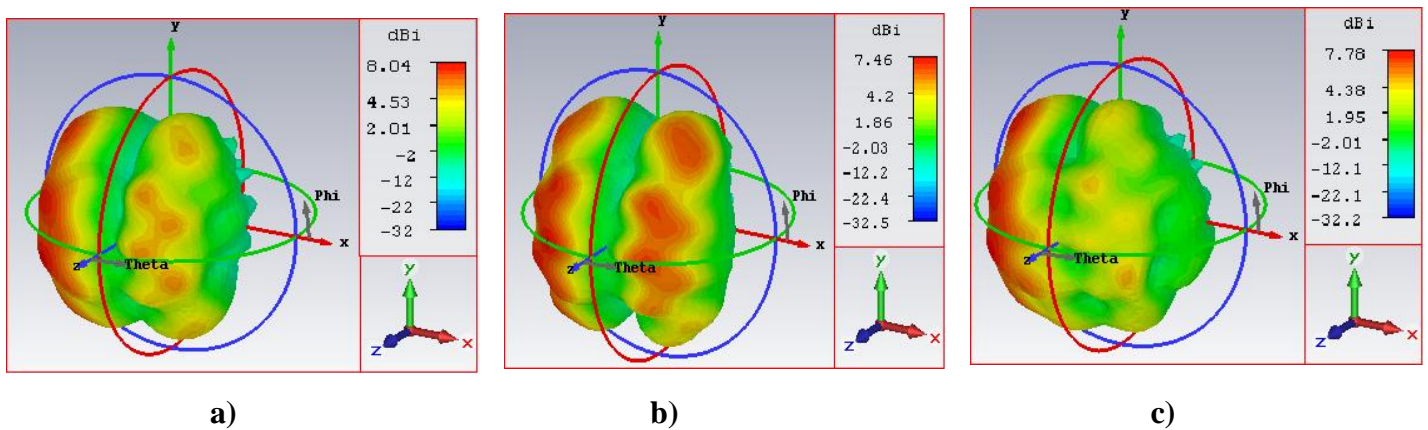


Figure.IV. 6 La Directivité En 3D: a) Réseau Carré b) Réseau Triangulaire c) Réseau Hexagonal

Type De Réseau	La Directivité (dBi)
Carré	8.04
Triangulaire	7.46
Hexagonale	7.78

Tableau.IV. 4 La Directivité Pour Trois Formes Du Réseau Des Trous Du Substrat CP: Carré, Triangulaire, Hexagonal.

A partir du Tableau IV 1 et la Figure IV.6 on remarque que le changement du réseau a un effet sur à la directivité de l'antenne , dans notre exemple la meilleure directivité c'est celle du réseau carré .

IV.3.3 L'effet Des Dimensions Du Patch

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat cristal photonique.On étudie la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction de différents dimensions du patch (surfaces), pour une permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=2.7$, $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur et la largeur de substrat $a=b=100$ mm et la hauteur de substrat $H_1=1$ mm diamètre des trous dans le substrat $d_r=5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

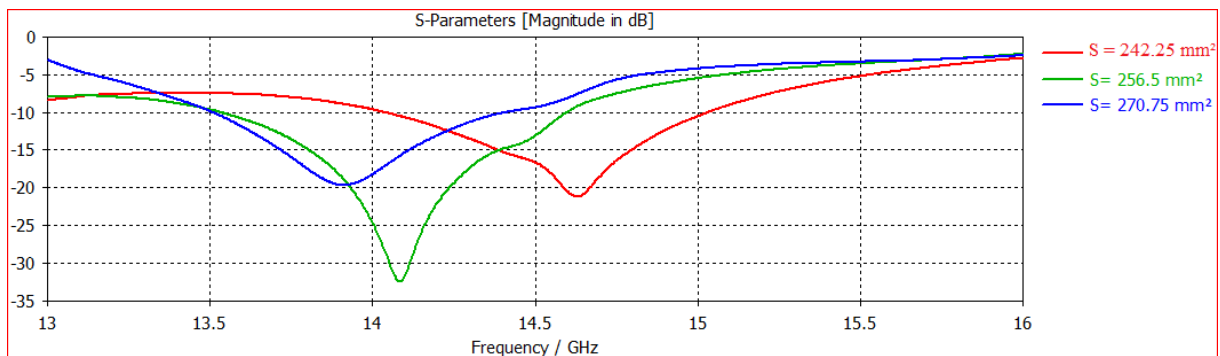


Figure.IV. 7 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Les Différents Surfaces Du Patch

La Surface Du Patch (mm ²)	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
242.25	14.63	0.99
256.5	14.04	1.06
270.75	13.9	0.9

Tableau.IV. 5 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Surfaces Du Patch

A partir du Tableau IV 5 et la Figure IV.7) qui représente les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence.pour trois surfaces différentes du patch, on remarque que la

relation entre la surface du patch et la fréquence de résonance est inversement proportionnelle, d'une autre manière la diminution de la surface mène à une augmentation de la fréquence de résonance.

La bande passante prend sa valeur maximal à la surface $S= 256.5 \text{ mm}^2$ et elle diminuée pour les autre surface d'une manière non uniforme.

b) La Directivité

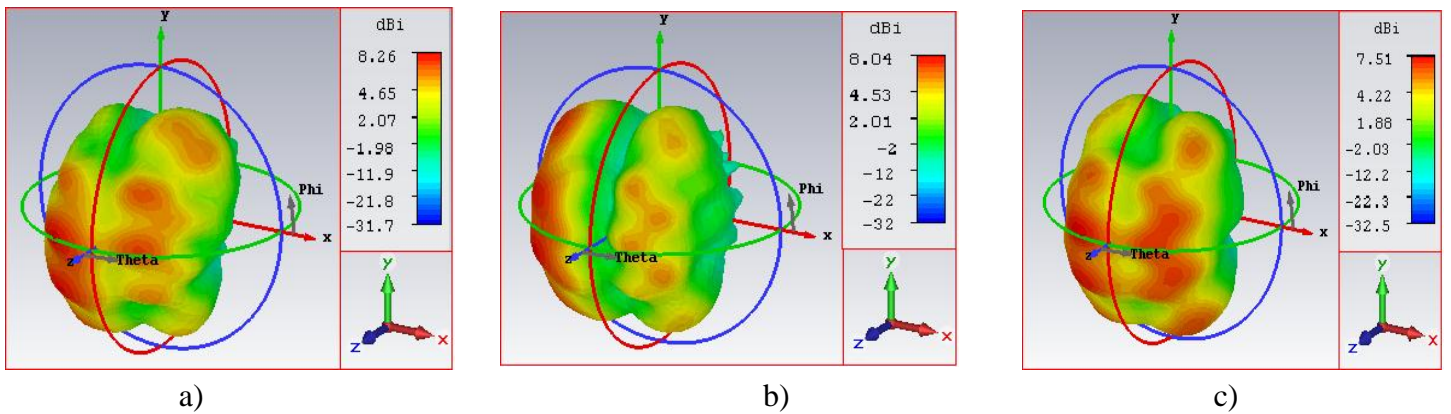


Figure.IV. 8 La Directivité En 3D a) $S= 242.25 \text{ mm}^2$ b) 256.5 mm^2 c) 270.75 mm^2

La Surface Du Patch (mm^2)	La Directivité (dBi)
242.25	8.26
256.5	8.04
270.75	7.51

Tableau.IV. 6 La directivité Pour Les Différents Surfaces Du Patch

A partir du Tableau IV 6 et la Figure IV-9 pour différentes surfaces du patch, on remarque que la relation entre la surface du patch et la directivité est inversement proportionnelle, et on remarque que l'antenne qui a la surface la plus petite est l'antenne le plus directive.

IV.3.4 L'effet Du Diamètre Des Trous

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat cristal photonique. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction du diamètre des trous du substrat, pour une longueur de base du patch $L=57 \text{ mm}$, et une hauteur de $H=9 \text{ mm}$, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=2.7$, $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur et la largeur de substrat $a=b=100 \text{ mm}$ et la hauteur de substrat $h=1 \text{ mm}$ diamètre des trous dans le substrat $d_r=5 \text{ mm}$.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

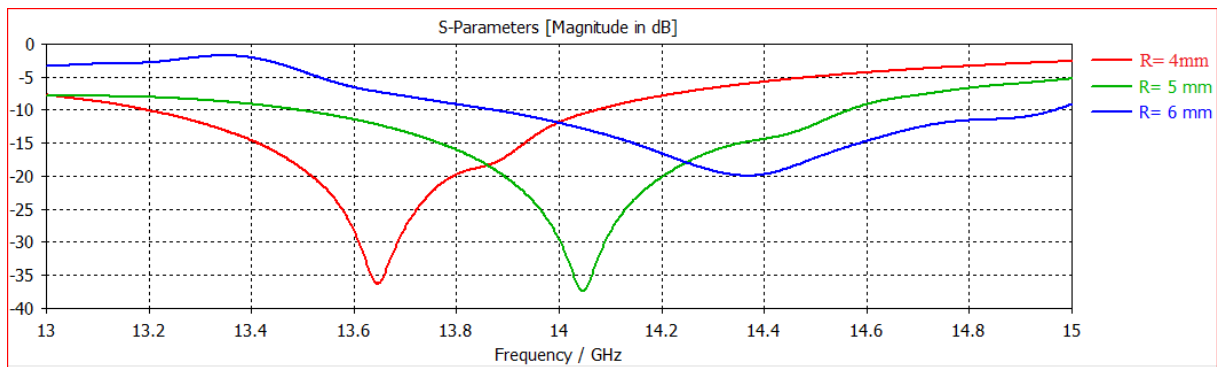


Figure.IV. 9 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Les Différents Diamètres Des Trous

Diamètre Des Trous (mm)	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
R= 4	13.65	0.88
R= 5	14.04	1.06
R= 6	14.35	1.09

Tableau.IV. 7 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Diamètres Des Trous

A partir du Tableau IV 7 et la Figure IV.9 qui représente les coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents diamètres des trous du substrat CP, on remarque que l'augmentation de diamètre des trous entraîne une augmentation de la fréquence de résonance, d'autre façon si on augmente la surface du diélectrique (ϵ_{r2}) qui est l'air la fréquence de résonance augmente.

Il y a une relation proportionnelle entre le diamètre des trous et la bande passante.

b) La Directivité

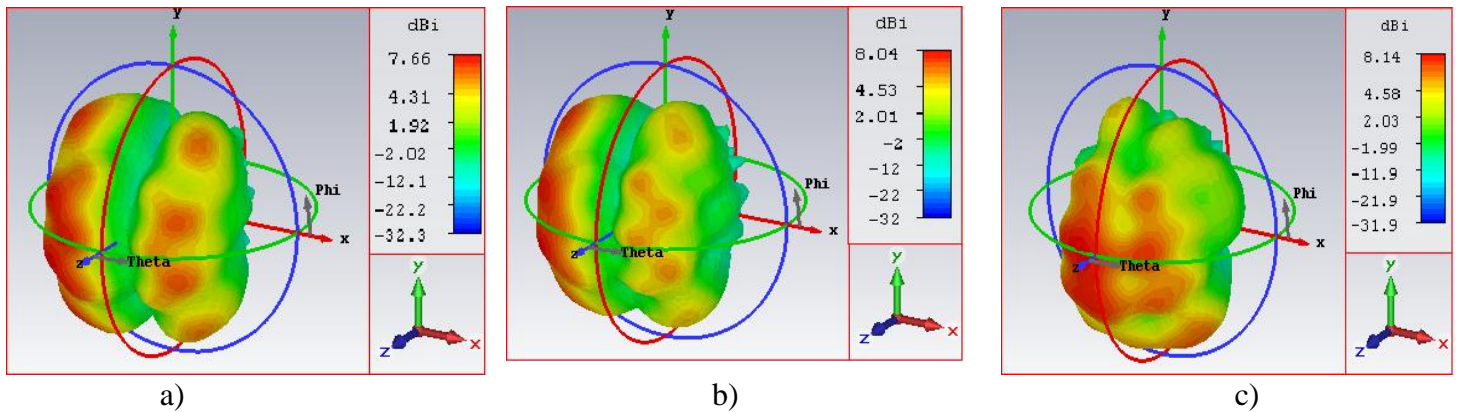


Figure.IV. 10 La Directivité En 3D De Différents Diamètre Des Trous a) R=3mm) R= 5mm C) R= 7mm

Le Diamètre Du Trous (mm)	La Directivité (dBi)
R= 4	7.66
R= 5	8.04
R= 6	8.14

Tableau.IV. 8 La Directivité Pour Les Différents Diamètres Des Trous

A partir du Tableau IV 8 et la Figure IV-10 pour différents diamètres des trous, on remarque qu'il y a une relation proportionnelle entre le diamètre des trous R et la directivité.

IV.3.5 L'effet De L'Epaisseur Du Substrat

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat cristal photonique. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction de l'épaisseur du substrat, pour une longueur de base du patch $L=57$ mm, et une hauteur de $H=9$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=2.7$, $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur et la largeur de substrat $a=b=100$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $d_r=5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

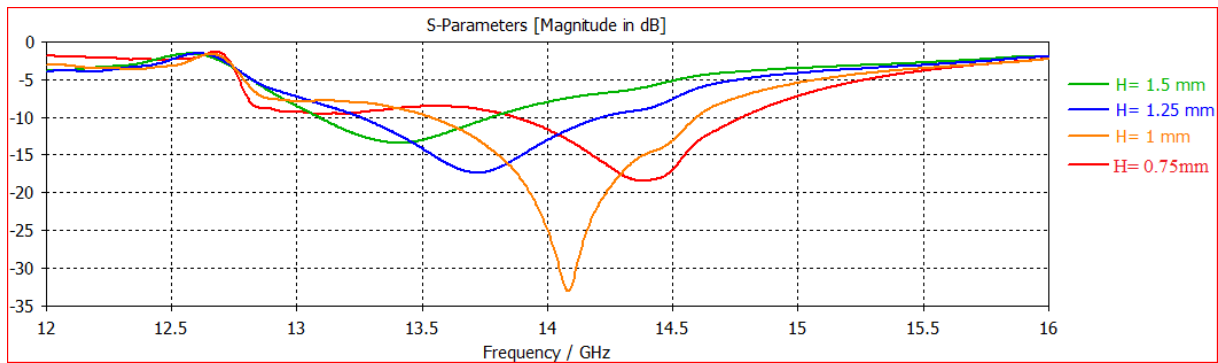


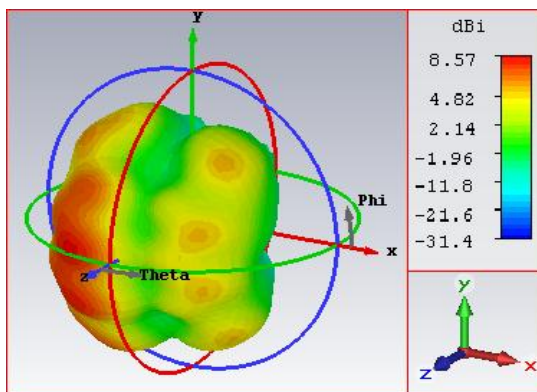
Figure.IV. 11 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP

Epaisseur Du Substrat CP (mm)	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
H= 0.75	14.37	0.9
H= 1	14.08	1.06
H= 1.25	13.72	0.96
H= 1.5	13.41	0.69

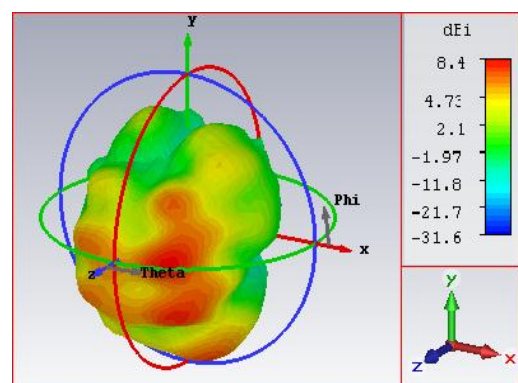
Tableau.IV. 9 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP

A partir du Tableau IV 9 et la Figure IV.11 qui représente les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents épaisseur du substrat CP, on remarque que la fréquence de résonance diminue quand l'épaisseur de substrat CP augmente, La bande passante change pour la variation de l'épaisseur du substrat mais ce changement n'est pas uniforme.

b) La Directivité



a)



b)

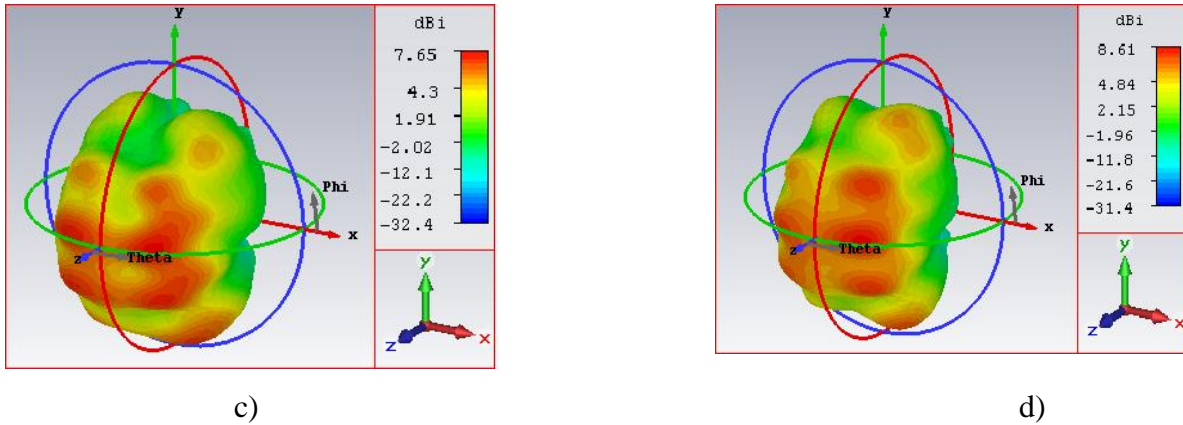


Figure.IV. 12 La Directivité En 3D pour Différents Epaisseurs Du Substrat a) H= 075mm b) H= 1mm c) H= 1.25 d) H= 1.5mm

Epaisseur Du Substrat CP (mm)	La Directivité (dBi)
H= 0.75	8.56
H= 1	8.04
H= 1.25	7.65
H= 1.5	8.61

Tableau.IV. 10 La Directivité Pour Les Différents Epaisseur Du Substrat CP

A partir du Tableau IV 10 et la Figure IV-12 pour différentes épaisseurs du substrat, on remarque qu'il y a un changement de la directivité pour les différentes épaisseurs H du substrat et ce changement n'est pas uniforme.

IV.3.6 L'effet De la variation de la constante diélectrique ϵ_{r1}

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat cristal photonique. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction de la constante diélectrique ϵ_{r1} , pour une longueur de base du patch $L=57$ mm, et une hauteur de $H=9$ mm, la longueur et la largeur de substrat $a=b=100$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $d_r=5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

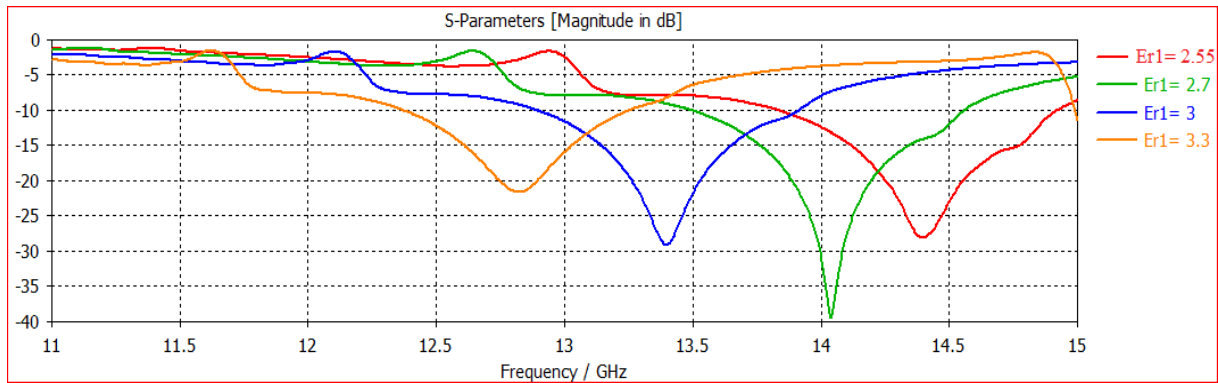


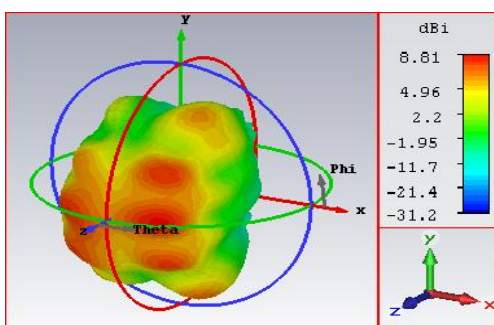
Figure.IV. 13 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r1}) Du Substrat CP

Le Constant Diélectrique (ϵ_{r1})	La Fréquence De Résonance (GHZ)	La Bande passante (GHZ)
2.55	14.4	1.08
2.7	14.08	1.06
3	13.4	1.02
3.3	12.82	0.88

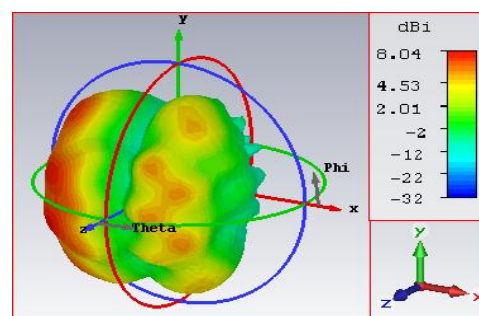
Tableau.IV. 11 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r1}) Du Substrat CP

A partir du Tableau IV 11 et la Figure IV.13 qui représente les coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence.pour les différents constant diélectrique ϵ_{r1} du substrat on remarque il y a une relation inversement proportionnelle entre la fréquence de résonance et la constante diélectrique ϵ_{r1} et la bande passante, c'est à dire l'augmentation de la constante diélectrique entraine une décroissance de la fréquence de résonance et la bande passante.

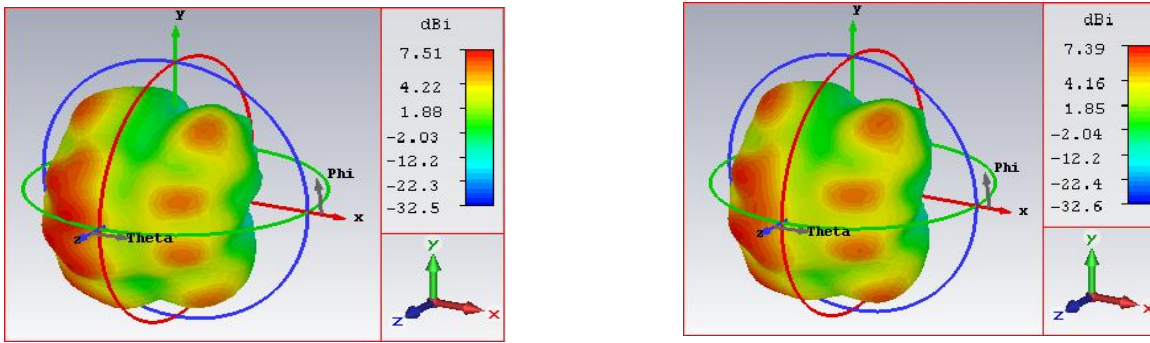
b) La Directivité



a)



b)



c)
d)

Figure.IV. 14 La Directivité En 3D De Différents Constants Die Electric a) $\epsilon_{r1} = 2.55$ b) $\epsilon_{r1} = 2.7$
c) $\epsilon_{r1} = 3$ d) $\epsilon_{r1} = 3.3$

Le Constant die électrique (ϵ_{r1})	La Directivité (dBi)
$\epsilon_{r1} = 2.55$	8.81
$\epsilon_{r1} = 2.7$	8.04
$\epsilon_{r1} = 3$	7.51
$\epsilon_{r1} = 3.3$	7.39

Tableau.IV. 12 La Directivité Pour Différents Constants Die Electric (ϵ_{r1}) Du Substrat CP

A partir du Tableau IV 12 et la Figure IV-14 pour différentes constantes diélectriques on remarque que la directivité diminue lorsque la constante diélectrique ϵ_{r1} augmente.

IV.3.7 L'effet De la variation de la constante diélectrique ϵ_{r2}

Considérons une antenne microruban sur un substrat cristal photonique. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction de la constante diélectrique ϵ_{r2} , pour une longueur de base du patch $L=57$ mm, et une hauteur de $H=9$ mm, la longueur et la largeur de substrat $a=b=100$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $d_r=5$ mm.

a) La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante

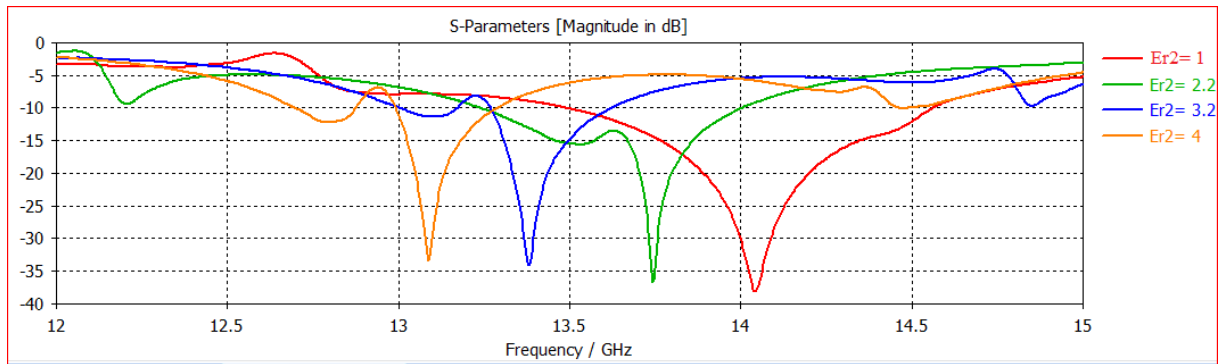


Figure.IV. 15 Coefficient De Réflexion S_{11} Pour Les Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r2}) Du Substrat CP

La Constante Diélectrique (ϵ_{r2})	La Fréquence De Résonance (GHz)	La Bande passante (GHz)
1	14.04	1.06
2.2	13.74	0.76
3.2	13.38	0.35
4	13.09	0.29

Tableau.IV. 13 La Fréquence De Résonance Et La Bande Passante Pour Différent Constantes Diélectriques (ϵ_{r2}) Du Substrat CP

A partir du Tableau IV 13 et la Figure IV.15 qui représentent les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents valeurs de la constante diélectrique ϵ_{r2} on remarque que l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r2} mène à une décroissance de la fréquence de résonance et la bande passante, c'est à dire qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre la variation de constant diélectrique ϵ_{r2} et les deux caracteristiques d'antenne (la fréquence de résonance et la bande passante).

b) La Directivité

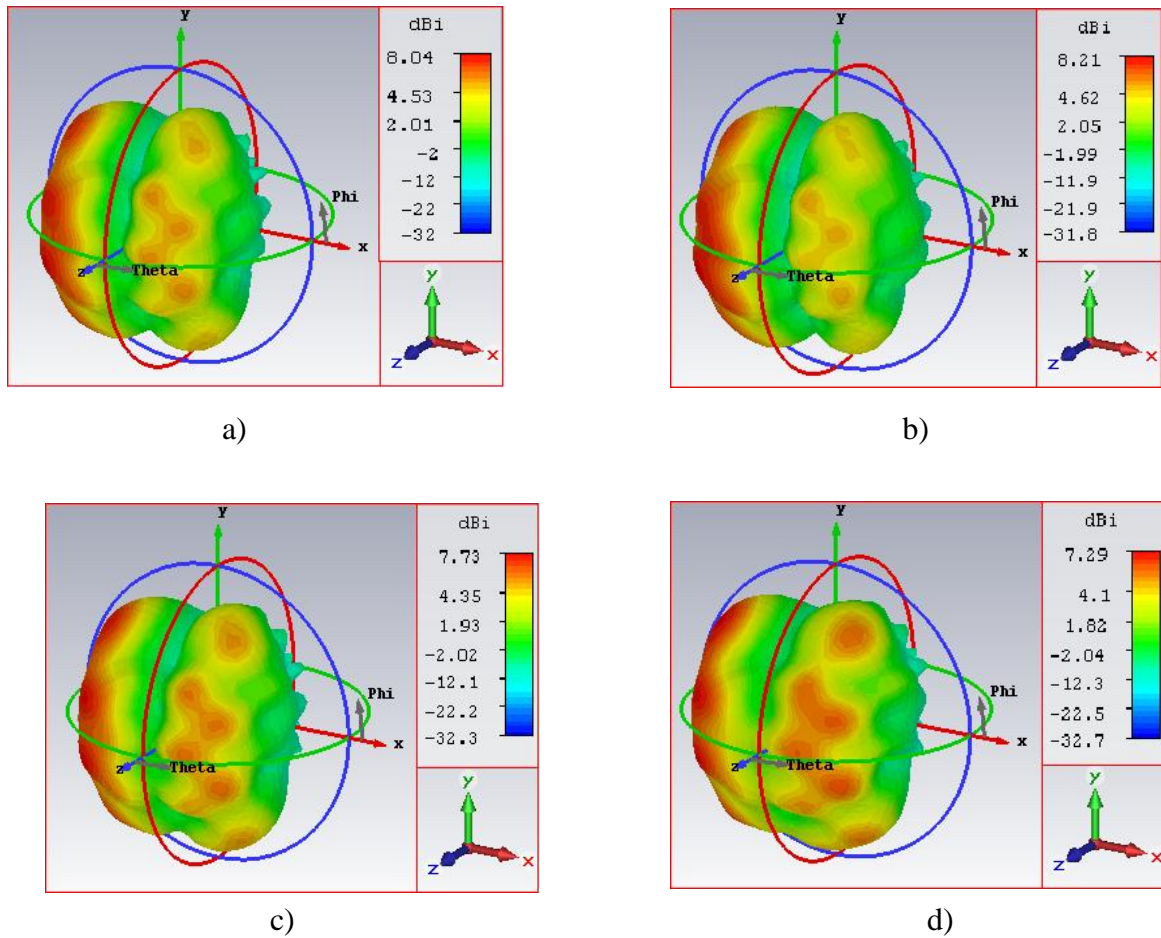


Figure.IV. 16 La Directivité En 3D pour Différents Constantes Diélectrique a) $\epsilon_{r2}=1$ b) $\epsilon_{r2}=2.2$ c) $\epsilon_{r2}=3.2$ d) $\epsilon_{r2}=4$

Le Constant die électrique (ϵ_{r2})	La Directivité (dBi)
$\epsilon_{r2}=1$	8.04
$\epsilon_{r2}=2.2$	8.21
$\epsilon_{r2}=3.2$	7.73
$\epsilon_{r2}=4$	7.29

Tableau.IV. 14 La Directivité Pour Différents Constants Die Electric ($\epsilon_{r2}=\text{=}$) Du Substrat CP

A partir du Tableau et la Figure IV-16 pour différentes valeurs de la constante diélectrique, on remarque que la variation de constant diélectrique ϵ_{r2} entraine une variation de la directivité mais d'une façon non uniforme.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié une antenne micro-ruban de forme triangulaire avec un substrat cristal photonique 2D, et nous avons étudié l'influence des paramètres de cette antenne et les permittivités du substrat sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés : les dimensions du patch (surface), la permittivité des deux matériaux du substrat CP, l'épaisseur du substrat, le diamètre des trous et ses différents réseaux et nous avons montré que les cristaux photoniques sont plus importants pour les antennes au point de vue de directivité.

En utilisant 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.

A partir de ces expériences nous avons conclu les résultats suivantes :

Résultats Pour La Fréquence De Résonance

- La fréquence de résonance augmente pour un substrat CP par rapport à un substrat normal.
- La fréquence de résonance change pour le changement de la forme du réseau des trous.
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de la surface du patch (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance augmente pour l'augmentation du diamètre des trous
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat cristal photonique (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroît pour l'augmentation de la constante diélectrique ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroît pour l'augmentation de la constante diélectrique ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

Résultat Obtenu Pour La Bande Passante

- La bande passante est plus large pour un substrat CP par rapport à un substrat normal.
- La bande passante change pour le changement de la forme du réseau des trous.

- La bande passante varie pour la variation de la surface du patch mais cette variation est non uniforme.
- La bande passante augmente pour l'augmentation du diamètre des trous.
- La bande passante varie pour la variation de l'épaisseur du substrat CP mais cette variation est non uniforme.
- La bande passante diminue pour l'augmentation de la constante diélectrique ϵ_{r1} .
- La bande passante diminue pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r2} .

Résultats Obtenus Pour La Directivité

- La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat CP à une antenne avec un substrat normal.
- La directivité varie pour la variation de la forme du réseau des trous du substrat CP.
- La directivité diminue pour l'augmentation de la surface du patch (relation inversement proportionnelle).
- La directivité augmente pour l'augmentation du diamètre des trous (relation proportionnelle).
- La directivité varie pour la variation de l'épaisseur du substrat CP mais cette variation est non uniforme.
- La directivité diminue pour l'augmentation de la constante diélectrique ϵ_{r1} .
- La directivité diminue pour l'augmentation de la constante diélectrique ϵ_{r2} .



CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était l'étude paramétrique d'une antenne micro-ruban de forme triangulaire à substrats cristaux photonique et voir l'influence des paramètres sur la fréquence de résonance, la bande passante ainsi que la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés dans ce travail, la nature du substrat (CP et normal), les dimensions du patch, l'épaisseur du substrat, le diamètre des trous, le constant diélectrique ϵ_{r1} et ϵ_{r2} .

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

Dans le premier chapitre nous avons présenté un historique concernant les antennes micro-rubans, leurs caractéristiques, ensuite les différentes structures et les matériaux diélectriques. Ainsi les différentes techniques d'alimentation et les méthodes d'analyse de ces antennes. Ainsi leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un contexte général les matériaux à bandes interdites photoniques (BIP) ou Photonic BandGap (PBG). Dans un premier temps, nous rappellerons les propriétés générales des matériaux BIP par un bref historique et quelques définitions. Nous aborderons ces matériaux diélectriques ou dans des configurations diverses : sans défaut ou avec défauts, dans une ou plusieurs dimensions. Nous approfondirons l'utilisation de ces matériaux comme substrat d'antennes qui constituent le principal domaine de cette étude.

Dans le troisième chapitre nous avons donné une présentation de logiciels *CST* et montré comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO.

Le dernier chapitre contient l'étude d'une antenne micro-ruban de forme triangulaire avec un substrat CP on utilisant pour ça le logiciel CST MICROWAVE STUDIO, les résultats obtenus sont :

Résultats Obtenus Pour La Fréquence De Résonance

- La fréquence de résonance augmente pour un substrat CP par rapport à un substrat normal.
- La fréquence de résonance varie pour le changement de la forme de réseaux des trous.
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de la surface du patch

Conclusion générale

(relation inversement proportionnelle).

- La fréquence de résonance augmente pour l'augmentation de diamètre des trous (la surface de constant diélectrique ϵ_{r2})
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat cristal photonique, (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroissant pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance décroissant pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

Résultats Obtenus Pour La Bande Passante

- La bande passante est plus large pour un substrat CP par rapport à un substrat normal.
- La bande passante varie pour le changement de la forme de réseaux des trous.
- La bande passante varie pour la variation de la surface du patch mais cette variation est faite d'une manière non uniforme.
- La bande passante augmente pour l'augmentation de diamètre des trous (la surface de constant diélectrique ϵ_{r2}).
- La bande passante change pour la variation de l'épaisseur du substrat CP mais cette variation est faite d'une manière non uniforme.
- La bande passante diminue pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r1} .
- La bande passante diminue pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r2} .

Résultats Obtenus Pour La Directivité

- La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat CP par rapport à une antenne avec un substrat normal.
- La directivité varie pour la variation de la forme de réseaux des trous du substrat CP.
- La directivité diminue pour l'augmentation de la surface du patch (relation inversement proportionnelle).
- La directivité augmente pour l'augmentation de diamètre des trous (relation proportionnelle).
- La directivité varie pour la variation de l'épaisseur du substrat CP mais cette variation est non uniforme.
- La directivité diminue pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r1} .
- La directivité diminue pour l'augmentation de constant diélectrique ϵ_{r2} .

Conclusion générale

Remarque :

Les caractéristiques de l'antenne micro-ruban sont liées directement à ses paramètres dimensionnels de celle-ci, on peut obtenir la fréquence de résonance, la bande passante, la directivité en changeant ces paramètres.

تم بفضل الله