

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

*FACULTE DE TECHNOLOGIE*

*DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE*

*N° : STC03*



*DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES*

*FILIERE : ELECTRONIQUE*

*OPTION : SYSTEME DE TELECOMMUNICATION (STLC)*

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par : *MANSOUR RAZIK***

***HADJI MOHAMMED KHALIL***

**Intitulé**

***Étude d'une antenne micro-ruban à  
Bande interdite Électromagnétique(BIE) 1D  
à défauts***

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. KENANE Elhadi	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	Université de M'sila	Rapporteur
Mme. CHABANE Rayene	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**

# Remerciements

*Avant tout, j'adresse mes remerciement sen premier lieu , à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'lima donné durant toutes ces longues années de formation.*

*Je tiens à remercier sincèrement **Dr.F.BENMEDDOUR**, pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour les conseils qu'elle m'prodiguée pour les efforts qu'elle a consenti tout au long de la réalisation de ce travail, qu'elle trouve ici toute ma gratitude et ma reconnaissance. Mes remerciements vont également à tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de mon mémoire et examiner ce travail.*

*Merci...*

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents.

Mes frères et sœurs.

Tous mes amis.

Tous mes proches.

Toute personne ayant contribué de près ou de loin à

l'accomplissement de ce travail.

*MANSOUR RAZIK*

*A mes très chers parents qui sont la bougie qui illumine ma vie*

*A Mes frères abederahmen et chokri et ommar*

*A Ma soeuranissa*

*A tous mes cousins et A tous mes amis*

*A toute ma grande famille*

*Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment*

**KHALIL**

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	i
<b>DEDICACES</b> .....	ii
<b>TABLEMATIERES</b> .....	iv
<b>LISTE DE FIGURES ET LISTE DE TABLEAUX</b> .....	vii
<b>LISTEABREVIATIONS</b> .....	xii
<b>RESUME</b> .....	xiii
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	2

### **CHAPITRE I: Généralité sur les matériaux BIE**

I.1.Introduction.....	6
I.2.Historique.....	6
I.3.Définition et propriétés.....	8
I.3.1.Les périodes.....	8
I.3.2.Le facteur de remplissage f .....	8
I.3.3.Description des matériaux BIE diélectriques.....	8
I.3.3.1.Réseaux unidimensionnels.....	9
I.3.3.2.Réseaux Bidimensionnels.....	9
I.3.3.3.Réseaux tridimensionnels.....	11
I.4.Description des structures BIE métalliques.....	12
I.4.1.Matériaux BIE à défaut.....	12
I.4.2.Comportements électromagnétiques.....	12
I.4.3.Structure diélectriques.....	12
I.5.Méthodes numériques pour l'analyse des réseaux BIE.....	14
I.6.Application les matériaux BIE.....	14
I.6.1. Fréquence optique.....	15
I.6.2.domaine des fréquence.....	15
I.7.application les matériaux BIE dans le domaine micro-onde.....	16
I.8.caractéristiques des matériaux BIE.....	16
I.9.ouverture d'une bande interdite complète.....	17
I.10.bande interdite complète.....	17
I.11.modèle de défaut à BIE ou méthode image.....	18
I.12.conclusion .....	18
<b>REFERENCES</b> .....	19

### **CHAPITRE II**

#### **Généralités sur les antennes imprimées BIE**

II .1. Introduction.....	22
II.2. Historique des antennes imprimées BIE.....	22
II.3. Définition générale d'une antenne.....	23
II.4.Structure d'une antenne imprimée.....	24
II.5. Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	25
II.6.Fonctionnement d'une antenne .....	26
II.7. Applications des antennes imprimées BIE.....	26
II.8. Caractéristiques des antennes imprimées BIE.....	27
II.8.1. Représentation en quadripôles.....	27
II.8.2. Coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	28

II.8.3. Rendement de l'antenne.....	28
II.8.4. Directivité.....	28
II.8.5. Gain.....	28
II.8.6.Ouverture.....	28
II.8.7. Impédance d'entrée.....	28
II.8.8. Fréquence de résonance .....	29
II.8.9. Adaptation et condition d'adaptation.....	29
II.8.10. Bande passante et facteur de qualité.....	30
II.8.11. Diagramme de rayonnement.....	31
II.8.11.1. Lobe principal.....	31
II.8.11.2. Lobes secondaires .....	32
II.9. Techniques d'alimentation .....	32
II.9.1. Alimentation par ligne microruban.....	33
II.9.2. Alimentation par sonde coaxiale.....	33
II.9.3. Alimentation couplée par ouverture.....	34
II.9.4. Alimentation par proximité.....	34
II.10. Méthodes d'analyse.....	35
II.10.1. Méthode analytiques.....	35
II.10.1.1. Modèle de la ligne de transmission.....	35
II.10.1.2. Modèle de la cavité .....	36
II.10.2. Méthodes numériques .....	36
II.10.2.1. Méthode des éléments finis .....	36
II.10.2.2. Méthode des différences finies .....	37
II.10.2.3. Méthode des moments .....	37
II.10.3. Méthodes d'optimisation .....	38
II.10.4. La méthode d'intégration finie.....	38
II.11. Conclusion.....	39
<b>REFERENCES.....</b>	<b>40</b>

### **CHAPITRE III: Résultats et discussions**

III.1. Introduction .....	43
III.2. Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO.....	43
III.3. La méthode d'intégration finie .....	44
III.4. Exemple d'un projet en CST.....	46
III.4.1. Démarrer le logiciel.....	46
III.4.2. Créer le plan de masse.....	47
III.4.3. Créer le substrat BIE 1D.....	48
III.4.4. Créer le patch.....	48
III.4.5. Définir le port.....	49
III.4.6. Définir le domaine de fréquence.....	49
III.4.7. Définir les conditions au bord.....	50
III.4.8. La simulation .....	50
III.4.9. Résultats .....	51
III.5. Présentation de la structure .....	52

III.5.1.Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal.....	53
III.6.Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante.....	54
III.6.1.Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r1}$ ).....	54
III.6.2.Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r2}$ ).....	55
III.6.3.Effet de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	56
III.6.4.Effet de l'épaisseur du substrat $h_2$ .....	57
III.6.5. Effet de la variation des dimensions du longueur du coté patch carrée.....	58
III .7.Influence des paramètres de l'antenne sur la directivité.....	59
III.7.1.Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r1}$ ).....	59
III.7.1.Effet de la variation de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	60
III.7.3.Effet de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	61
III.7.4.Effet de l'épaisseur du substrat $h_2$ .....	62
III.7.5. Effet de la variation des dimensions du longueur du coté patch carrée.....	63
III .8.Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonanceet la bande passante avec à défauts .....	64
III.8.1.Effet de l'épaisseur de la couche insérée (défaut) $h_3$ du substrat BIE.....	64
III.8.2.Effet de la variation de la permittivité de la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) du substrat BIE....	65
III .9.Influence des paramètres de l'antenne sur la directivité à défauts.....	66
III.9.1.Effet de l'épaisseur de la couche insérée (défaut) $h_3$ du substrat BIE.....	66
III.9.2.Effet de la variation de la permittivité de la couche insérée (défaut)( $\epsilon_{r3}$ )du substrat BIE.....	68
III.10.conclusion.....	69
<b>REFERENCES</b> .....	71
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	73

## **Chapitre I :les matériaux a bandes interdites électromagnétiques(BIE)**

Figure (I-1) : Principe du miroir de Bragg [2].....	7
Figure(I-2) : Les périodes d'un matériau unidimensionnel.....	8
Figure (I -3) : Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D [7].....	9
Figure (I -4) : Structure 1D et son diagramme de dispersion [2].....	9
Figure (I-5) : Exemples de différents réseaux 2D .....	10
Figure (I-6) : Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation [2].....	10
Figure (I-7) : 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) [2].....	11
Figure (I-8) : Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D [16].....	13
Figure (I-9) : Propagation à travers une structure BIE 1D [2].....	13
Figure (I-10) : Bande interdite et diagramme de dispersion pour des structures 1D [2].....	14

## **Chapitre II : généralités sur les antennes imprimées**

Figure (II.1) : Présentation d'une antenne micro ruban.....	24
Figure (II.2): Divers types d'éléments rayonnants.....	24
Figure (II.3): Antenne imprimée fonctionnant sur son mode fondamental.....	26
Figure (II.4) : Représentation en quadripôle.....	27
Figure (II.5) :Adaptation et condition d'adaptation.....	29
Figure (II.6) Bande passante et coefficient de réflexion.....	30
Figure (II-7) : Ouverture à -3 dB.....	32
Figure (II-8): Digramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.....	32
Figure (II-9) : Alimentation par ligne microruban.....	33
Figure (II-10) : Alimentation par sonde coaxiale.....	34

## **Chapitre III: Résultats et discussions**

Figure (III-1) Interface graphique de CST MICROWAVE STUDIO.....	44
Figure III-2 La fenêtre principale du logiciel CST(20117).....	45
Figure (III-3) La fenêtre d'accueil.....	46
Figure III-4(a-b-c-d) Les fenêtres pour créer un nouveau projet.....	47
Figure (III-5) Créer un plan de masse.....	47

Figure (III-6) : Créer des substrats diélectriques.....	48
Figure (III-7) Créer le patch.....	49
Figure (III-8) Définir le port.....	49
Figure (III-9) Définir le domaine de fréquence.....	50
Figure (III-10): Définir les conditions au bord.....	50
Figure( III-11) choisir la précision.....	51
Figure (III-12) : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour une antenne patch.....	51
Figure (III-13) : directivité en 3D d'une antenne patch.....	52
Figure (III-14) : La Structure de l'antenne microruban.....	52
Figure( III-15) : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour une antenne patch carrée.....	53
Figure (III-16) : Structure des antennes : a) à substrat à BIE b) à substrat normal.....	53
Figure (III-17) : La directivité en 3D : a) Substrat à BIE b) Substrat normal.....	54
Figure (III-18) Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ ).....	55
Figure (III-19) : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r2}$ ).....	56
Figure (III-20) Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ (mm).....	57
Figure ( III-21) Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_2$ (mm).....	57
Figure (III- 22) : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes variation de longueur et la largeur du patch carrée.....	58
Figure (III-23) : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité $\epsilon_{r1}$ .....	59
Figure (III-24) : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	60
Figure (III-25) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation l'épaisseur $h_1$ .....	61
Figure (III-26) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur $h_2$ (mm).....	62
Figure (III-27) : la directivité en 3D pour une variation du longueur coté (L) du patch carrée.....	64
Figure (III-28) Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ (mm).....	65
Figure (III-29) : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r3}$ ).....	66
Figure (III-30) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur $h_1$ (mm).....	67
Figure (III-31) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de la permittivité.....	68

## Liste des tableaux

Tableau (III-1) : Comparaisons entre un substrat BIE et un substrat normal.....	54
Tableau(III-2)La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la( $\epsilon_{r1}$ )..	55
Tableau (III-3) : Variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de valeur de la constante diélectrique ( $\epsilon_{r2}$ ).....	56
Tableau (III-4) : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	57
Tableau (III-5) : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_2$ .....	58
Tableau (III-6) : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de lalongueur du côté du patch carré.....	59
Tableau (III-7) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité $\epsilon_{r1}$ .....	60
Tableau (III-8) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	61
Tableau (III-9)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch $h_1$ (mm).....	62
Tableau (III-10)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch $h_2$ (mm).....	63
Tableau (III-11) : Variation de la directivité pour une variation du longueur du côté(L) du patch carré.....	64
Tableau (III-12) : Fréquence de résonance et bande pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	65
Tableau(III-13)La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la( $\epsilon_{r1}$ )	66
Tableau (III-14)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch $h_3$ (mm).....	67
Tableau (III-15) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité $\epsilon_{r3}$ .....	68

## Liste Des Abréviations

**BIE:** Bande Interdite Electromagnétique.

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

**CST:** Computer Simulation Technology.

**TMM:** Thermo set Microwave Material.

**MLT:** Modèle de la ligne de transmission .

**FIT:** Finite Integration Technique.

**FDTD:** Finite Difference Time Domain.

**FEM:** Finite Element Method.

**MOM :** Moment Method.

**FVM:** Finité Volume Intégral.

**TLM :** transmission Line Matrix.....etc

**SSF:** Surfaces Sélectives en Fréquence

**SMM:** Scattering Matrix Method

## Résumé

L'objectif principal de notre travail est d'étudier le patch microruban de différence électromagnétique 1D (BIE).

Nous étudions l'effet des paramètres techniques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la largeur de bande et la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés: substrat, Dimensions de l'antenne carrée.

L'utilisation de l'instrument de simulation de champ électromagnétique pour la bande de fréquence dépend de la méthode d'intégration limitée.

Mots-clés: antenne micro-ruban circulaire, BIE, miroir de Bragg .

## Abstract

The main objective of our work is to study the microstrip patch of 1D electromagnetic difference (BIE).

We study the effect of the technical parameters of the antenna on the resonant frequency, the bandwidth and the directivity. The parameters we studied: substrate, square, patch.

The use of the electromagnetic field simulation instrument for the frequency band depends on the limited integration method.

Keywords: circular micro-ribbon antenna, BIE, Bragg mirror.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة هوائي مدقق مربع الشكل ذو طبقات عازلة كهرومغناطيسيا احادية البعد. قمنا بدراسة تأثير المعايير الأساسية للهوائي على التردد الرنان وعرض النطاق الترددي والاتجاهية, المعايير التي قمنا بدراستها هي:

ابعاد الهوائي و السماحية للطبقة العازلة. و ذلك باستعمال برنامج CST الذي يعتمد علي طريقة التكاملات المنتهية .

**كلمات مفتاحية:** هوائي مدقق مربع الشكل, طبقات عازلة كهرومغناطيسيا , مرآة براغ.

INTRODUCTION  
GÉNÉRALE

### 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. une antenne de réception est un dispositif qui assure de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace .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, 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[1].

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 microruban est composée d'un élément rayonnant de forme géométrique variable (circulaire,carrée, triangulaire, rectangulaire, etc...). Cet élément rayonnant est aussi appelé patch conducteur.

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 [2].

Les matériaux à bandes électromagnétique 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 BIE à une, deux ou trois dimensions. Ces matériaux ont été découverts par Eli Yablonovitch à la fin des années 80 [3].

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

Des travaux tirant profit des propriétés des BIE 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 [4].

En exploitant les propriétés de réflexions des BIE dans le gap, nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériau BIE 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'analyse d'une antenne imprimée carrée à bande interdite électromagnétique (BIE) 1D alimentée par câble coaxiale en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO.

Nous avons étudié l'influence des paramètres de l'antenne imprimée à BIE sur la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité.

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

- Le premier chapitre nous présentons les concepts de base liés aux matériaux à BIE. Nous étudions les différents types de ces matériaux, particulièrement : les BIE unidimensionnels (1D).
- Dans le deuxième de ce mémoire est une présentation générale des antennes micro rubans (imprimées), 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 troisième chapitre nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure de l'antenne microruban de forme carrée à BIE 1D sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Et à la fin une conclusion sur notre travail est présentée.

### Références

- [1] Azi Oussama 'Etude d'une antenne microruban rectangulaire à bande interdite photonique 1D' mémoire de master, Institut d'électronique, Université de M'sila; Juin 2015.
- [2] **S. Massaoudi** "Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels en micro-onde : application à l'ultra réfraction", thèse de Doctorat, Institut d'électronique, université paris XI, Février 2005.
- [3] **A. Ourir** "Applications de Matériaux Bandes Interdites Photoniques et de méta matériaux en Télécommunications ", thèse de Doctorat, Université de Paris XI d'Orsay, décembre 2006.
- [4] **K. Boulelli** " Simulation des effets géométrique des cristaux Photoniques bidimensionnels ", mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.

# CHAPITRE I:

## *Les Matériaux A Bandes Interdites Electromagnétiques (BIE)*

## I.1. Introduction

Pendant les dernières dizaines d'année, les matériaux BIE, également connus sous le nom de structures à bandes interdites électromagnétique, ont été sujets de plusieurs travaux des recherches.

Les BIE sont des systèmes très prometteurs pour des applications dans le domaine des ondes électromagnétiques, pour de réelles réalisations dans le domaine des micro-ondes, l'optoélectronique et les télécommunications optiques. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les semi-conducteurs profitant des avancées technologiques en microélectronique.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux les matériaux BIE. Le cas des matériaux BIE sera tout d'abord présenté pour apporter les principales notions concernant les structures périodiques, en insistant sur la notion de bande interdite électromagnétique. Nous terminerons par une présentation de quelques exemples d'applications dans lesquelles sont utilisées les structures périodiques.

Les matériaux BIE sont des structures artificielles dont la constante diélectrique est modulée de façon périodique dans une, deux ou trois directions avec une période de l'ordre des longueurs d'onde des photons optiques. Ces structures peuvent être obtenues par arrangement périodique de deux matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couches également appelé « miroir de Bragg », et ont la capacité d'inhiber la propagation des ondes électromagnétiques dans certaines directions pour une gamme de fréquences appelée la bande interdite électromagnétique [1].

## I.2. Historique [2][3]

Nous trouvons la trace d'utilisation des structures périodiques ou répétitives pour contrôler la propagation d'une onde aussi loin qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle avec les travaux de Lord Rayleigh en 1887. Lorsque nous alternons une succession de couches diélectriques transparentes d'indices de refraction différents, une lumière incidente à la surface de ces multicouches peut se trouver complètement réfléchi par des phénomènes d'interférences successives. La cause de ce phénomène : sur l'interface de chaque couche, la lumière est partiellement réfléchi, et si l'espacement entre chaque couche est périodique, les réflexions successives finissent par annuler la propagation de l'onde lumineuse au sein de ces couches. Le miroir de Bragg mis au point par William Lawrence Bragg est un parfait exemple de l'exploitation de ce phénomène en une dimension. Le concept du contrôle de l'onde par des structures périodiques comme nous venons de le décrire, et l'on parlait alors de matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE). Le principe s'est ensuite rapidement étendu aux longueurs d'ondes supérieures, donnant lieu aux cristaux

électromagnétiques, qui sont plus couramment appelés les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE). En effet, les équations de Maxwell obéissent à une loi d'échelle, et les mêmes propriétés peuvent par conséquent être observées quelle que soit la longueur d'onde. Actuellement, ces matériaux BIE sont classés sous une famille des matériaux plus large, de nommés métamatériaux.

Mises à part les structures BIE, les autres types de métamatériaux sont classés selon la propriété exotique qui est mise en avant :

- Les matériaux dits à main gauche (LHM) sont des métamatériaux qui possèdent un indice de réfraction négatif où la loi de Snell-Descartes est inversée.
- Les surfaces à haute impédance sont des métamatériaux qui annulent les ondes de surface car l'impédance de surface de la structure est plus importante que l'impédance en espace libre .
- Les métamatériaux BIE traitent des structures périodiques pour les ondes acoustiques, qui plus récemment encore, trouvent une application pour les ondes sismiques dans les travaux s'agit alors de créer une (cape d'invisibilité) pour protéger une bâtisse contre les ondes sismiques. Pour ces différents métamatériaux, nous distinguons dans la plupart des cas le régime d'homogénéisation où la structuration est de dimension très inférieure à la longueur d'onde (régime méta), et ou au contraire, elle est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Les structures BIE se classifient plutôt dans le dernier cas.

Dans le domaine des microondes et des hyperfréquences, les propriétés exotiques d'une structure à bande interdite électromagnétique (l'anisotropie, l'effet de réfraction négative, la bande interdite électromagnétique) reçoivent des attentions particulièrement importantes pour les applications dans les dispositifs de télécommunications (antennes, téléphones mobiles, GPS haute précision etc...)

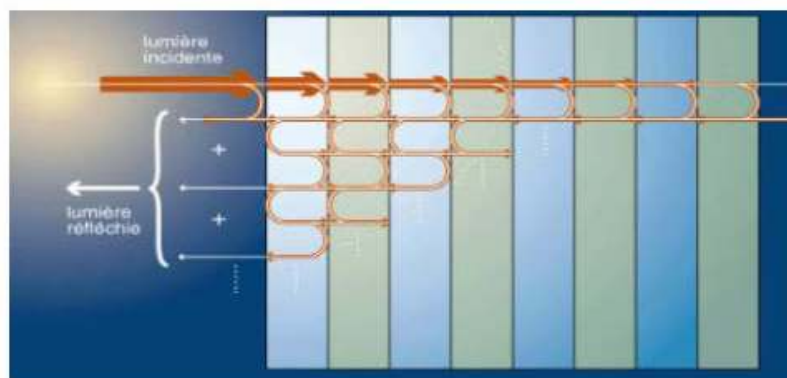


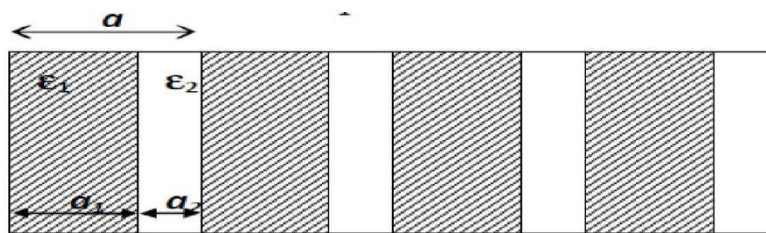
Figure (I.1) : Principe du miroir de Bragg [2].

### I.3. Définitions et propriétés

À présent, intéressons-nous brièvement aux propriétés générales pour les trois grandes catégories de matériaux BIE diélectriques caractérisées par leur nombre de périodicités [4].

#### I.3.1. Les périodes

Ces paramètres géométriques choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite électromagnétique. Par exemple pour un cristal photonique unidimensionnel, la période  $a = (a_1 + a_2)$  avec  $a_1$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_1$  et  $a_2$  l'épaisseur de la couche de permittivité  $\epsilon_2$ .



Figure(I.2) : Les périodes d'un matériau unidimensionnel

#### I.3.2 Le facteur de remplissage f

Peut être comparé à la largeur du potentiel périodique. S'il est pris pour le matériau de haut indice par exemple, il est défini comme le rapport entre le volume occupé par ce matériau dans la cellule élémentaire du cristal et le volume de cellule de cette dernière.

#### I.3.3. Description des matériaux BIE diélectriques

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

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques Figure (I-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 .

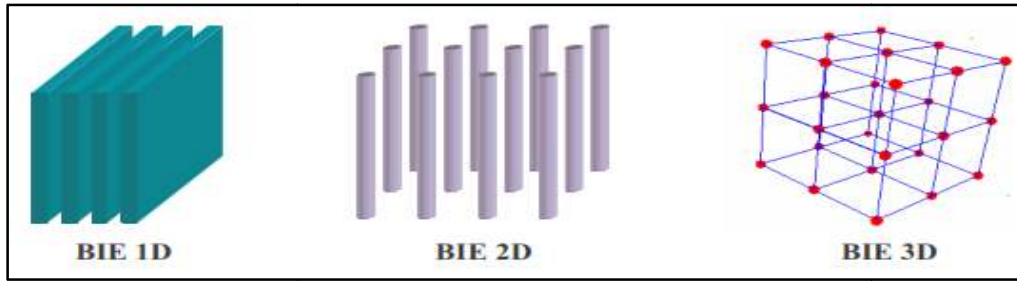


Figure (I -3) : Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D [7].

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

**I.3.3.1. Réseaux unidimensionnels**

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures BIE. En effet, elles ont été déjà longtemps étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques .

Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée [1] Figure (I-3).

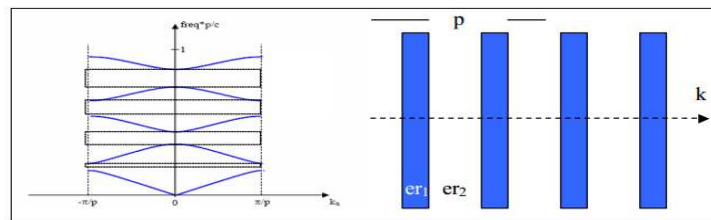


Figure (I -4) : Structure 1D et son diagramme de dispersion [2].

Lors des réalisations, la conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions [4].

**I.3.3.2. Réseaux bidimensionnels :**

Les matériaux 2D sont des matériaux BIE dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidentes 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 (I-5), plusieurs types des structures comme la structure carrée, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

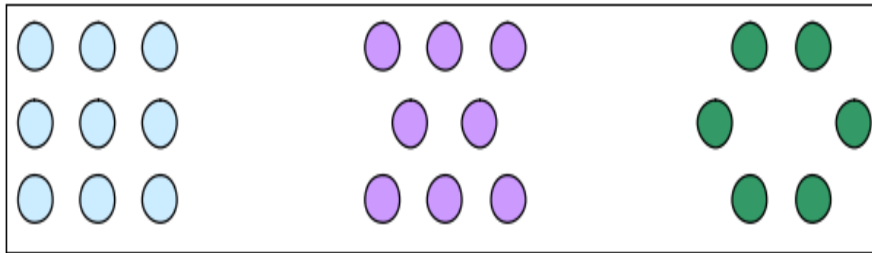


Figure (I-5) : Exemples de différents réseaux 2D .

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 (I-5) représentent :

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

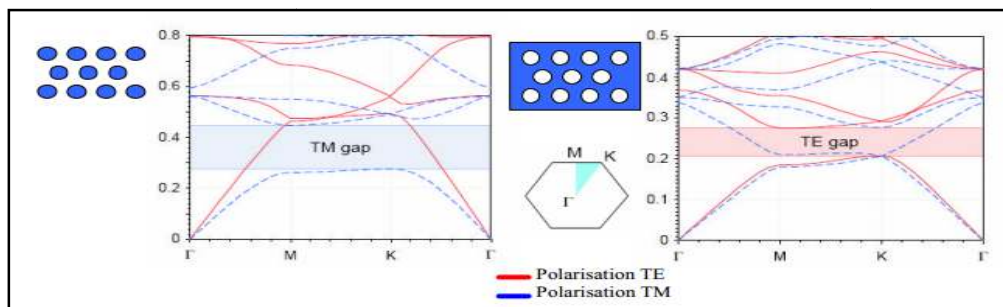


Figure (I-6) : Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation [2].

Dans les deux cas, nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites électromagnétique 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 [4].

### I.3.3.3. 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 électromagnétique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles [7]

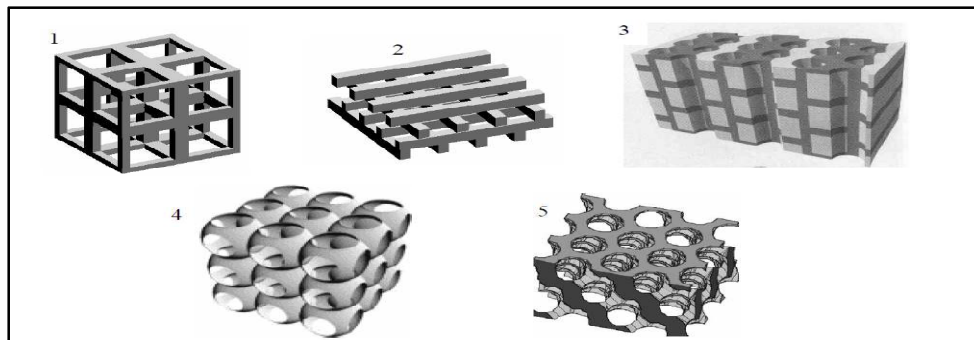


Figure (I-7) : Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5) [2]

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite électromagnétique complète. Ho, Chan et Soukoulis ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite électromagnétique dans une structure à symétrie Cubique à Face Centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant [7].

Les deux types de structures BIE 1D réalisées dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique sont la Yablonovite (un diélectrique percé de trous d'air) et la structure tas de bois.

Cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou carrée. 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  $90^\circ$  à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble [8].

Auguste Bravais a établi un classement des différentes familles des matériaux BIE. Il a montré qu'ils peuvent se répartir en 7 types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux [4].

Ceux-ci sont à la base des structures périodiques tridimensionnelles.

## I.4. Description des structures BIE métalliques

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du Gigahertz, l'épaisseur de peau  $d$  est très faible devant la longueur d'onde qui est bien en dessous des fréquences optiques [4].

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs 1D.

### I.4.1 Matériau BIE à défaut

#### a) Création de la bande permise

La création de la bande interdite est la résultante de l'insertion d'un défaut au sein du matériau périodique. Le principe des défauts est de modifier la périodicité du matériau. Il peut prendre la forme d'une épaisseur ou d'une permittivité relative différente par rapport au reste de la structure dans le cas de matériau diélectrique ou d'un changement du pas du réseau pour le matériau métallique. Le défaut le plus courant dans notre cas est l'insertion d'un espacement de longueur  $\lambda_0$  au sein de notre matériau. Pour voir les conséquences d'une telle rupture, une comparaison du coefficient de transmission des matériaux sans et avec défaut est faite. Le défaut a pour propriété de créer un « pic » de transmission au sein de la bande interdite. Cette remontée est maximale au milieu du puits à une fréquence  $f_0$  qui est directement liée à la dimension du défaut  $\lambda_0$ .

### I.4.2. Comportements électromagnétiques

Pour étudier les propriétés électromagnétiques des structures périodiques et leurs comportements fréquentiels, Le matériau doit être éclairé avec une onde plane en incidence normale et déduire les coefficients de réflexion et de transmission. Cette étude peut être réalisée par la méthode des impédances ramenées [4].

### I.4.3. Structures diélectriques

La principale caractéristique de ces structures est leur aptitude à fonctionner comme un miroir. Elles permettent de réfléchir partiellement ou quasi totalement les ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquences et cela pour des incidences particulières selon les types de

matériaux utilisés La Figure (II-8) montre le module du coefficient de transmission  $|S_{21}|$  et le module du coefficient de réflexion d'une structure 1D sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.

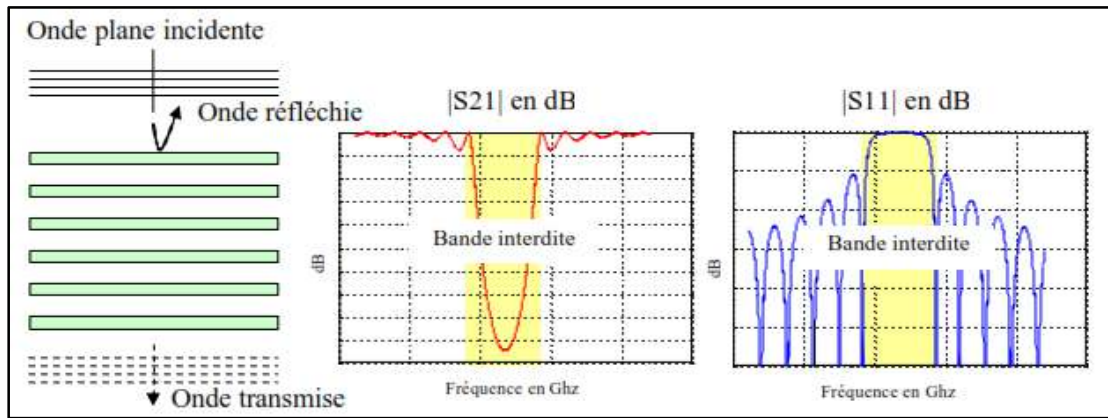


Figure (I-8) : Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D [16].

Ces structures réfléchissent les ondes grâce à un phénomène d'interférence constructive entre les différentes couches composant le matériau. L'onde incidente est partiellement réfléchiée à chaque interface entre deux couches. Du fait de la stratification périodique, les ondes ainsi réfléchies présentent un déphasage bien défini les uns par rapport aux autres. Elles interfèrent donc de manière constructive ou destructive selon la valeur du déphasage qui dépend entre autre de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence Figure (I-9) [4].

*Dans la bande interdite*

*Hors bande interdite*

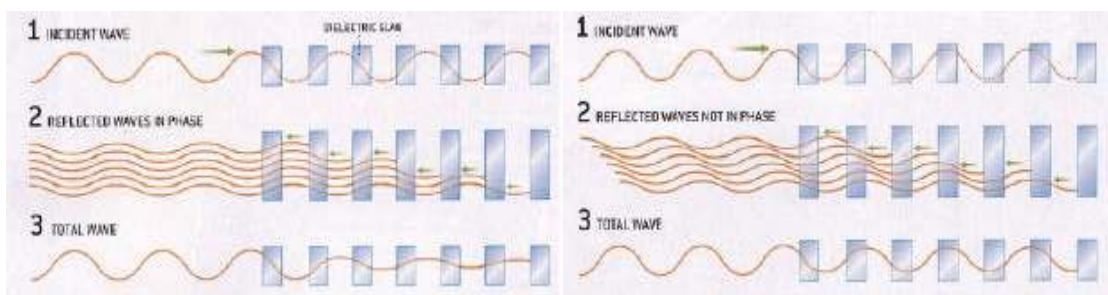


Figure (I-9) : Propagation à travers une structure BIE 1D [2]

Une autre méthode pour étudier les matériaux BIE consiste à calculer le diagramme de dispersion du matériau infini. Le réseau cristallin est transposé dans l'espace réciproque des vecteurs d'ondes. Un nouveau réseau orthogonal au réseau cristallin de l'espace direct est ainsi obtenu. Cela permet déduire la première zone de Brillouin qui représente le domaine élémentaire dans lequel doivent être recherchées les solutions des équations de propagation. Cette étude permet de

déterminer si le matériau possède une bande de fréquence interdite commune à tous les angles de propagation envisageables.

Cette technique est particulièrement adaptée aux matériaux périodiques à plusieurs dimensions car elle considère l'ensemble des directions de propagation électromagnétique dans le matériau pour chaque fréquence étudiée.

Les propriétés du matériau infini sont représentées sous la forme d'un diagramme de bande ou d'un diagramme de dispersion [1] Figure (I-10).

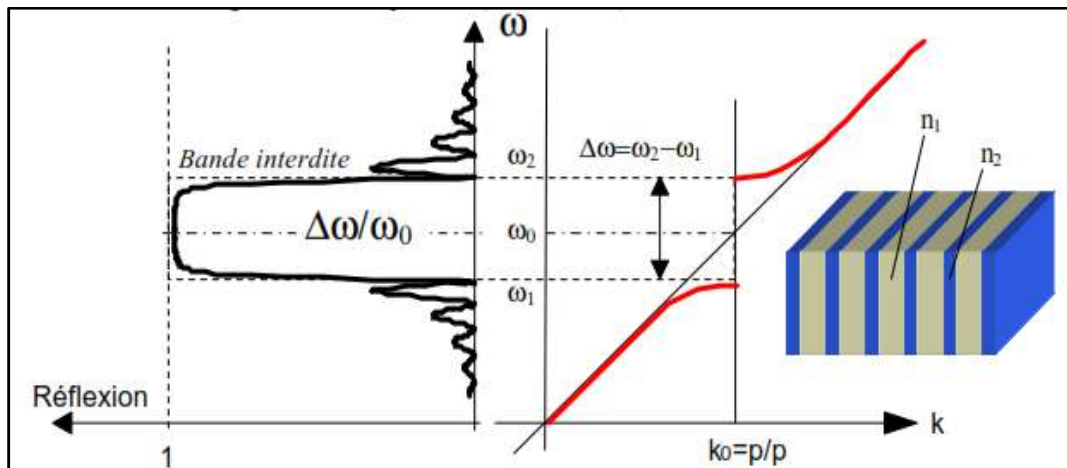


Figure (II-10) : Bande interdite et diagramme de dispersion pour des structures 1D [2].

Nous définissons la bande interdite selon sa largeur  $\Delta\omega$  et aussi sa fréquence centrale  $\omega_0$ . de Limoges, 2003.

### I.5. Méthodes numériques pour l'analyse des réseaux BIE

Nous pouvons citer six méthodes numériques couramment utilisées pour les analyses des structures BIE :

- (1) Méthode des ondes planes
- (2) Méthode FDTD
- (3) Méthode par éléments finis
- (4) Méthode de matrice de transfert
- (5) Méthode Scattering Matrix Method (SMM)
- (6) Méthode de réseaux de diffraction . [17].

### I.6. Application les matériaux BIE

L'application de la technologie BIE ou structures BIE (Bande Interdite Electromagnétique) ou EBG (Electromagnétique Band Gap, en anglais) est devenue un thème exaltant plus important

pour les ingénieurs spécialisée dans le domaine d'antennes et les chercheurs vu quelle porte des améliorations aux caractéristiques des petites antennes et leurs performances telles que l'augmentation du gain et de l'efficacité de rayonnement .

### **I.6.1. Fréquences optique**

Les intérêts portés aux matériaux à bande interdite électromagnétique ont tout d'abord été dans le domaine optique.

- **Les micro-résonateurs**

L'utilisation des défauts ponctuels et linéaires permettent d'obtenir des micro-résonateurs et des guides d'ondes respectivement.

La réalisation des micro-résonateurs est obtenue par inclusion des défauts ponctuels dans une structure à périodique des matériaux BIE. Les premières études sur les micros résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par Labilloy [11].

Les guides d'onde: l'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999 [12]. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes. Il existe un autre type de guide qu'on appelle guide (coudé guide avec virage).

- **Filtres et multiplexeurs**

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

- **Les fibres optiques [16]**

Les fibres dites sont apparues en 1996 aux universités de Bath et de Southampton. Elles sont constituées d'un cœur de silice pure entouré d'un arrangement régulier de canaux d'air de dimensions microscopiques, disposés parallèlement à l'axe .

Cette fibre à cristal photonique a la faculté de guider un mode fondamental sur une très large bande spectrale.

Des fibres monomodes possédant un effet de bande interdite électromagnétique grâce à une gaine optique périodique, sont également étudiées pour annuler la dispersion chromatique [13].

### **I.6.2. Domaine des fréquences**

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIE aux fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables dans ce domaine de fréquence. Le secteur des télécommunications avec notamment les antennes, est très impliqué. En

effet, on peut utiliser des matériaux à bandes interdites électromagnétiques pour la réalisation de :

- Substrats d'antennes: les premières expériences visant à exploiter les BIE diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par E.R. Brown et al. Surfaces à hautes impédances, qui peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes.
- Peuvent aussi être utilisés dans la réalisation des circuits microondes tels que: filtres planaires, guides, multiplexeurs et amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des matériaux BIE ultraréfractifs [14].

### I.7. Application les matériaux BIE 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 interdites 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 des matériaux. La rupture de la périodicité dans les matériaux BIE 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 [16].

Enfin, des surfaces planes à bases de matériaux BIE 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.

### I.8. Caractéristiques des matériaux BIE

Les matériaux BIE sont caractérisés par : les différents matériaux qui le composent, les systèmes cristallins selon lesquels ces matériaux sont:

- Le contraste d'indice

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique de solide.  $\delta = \eta_p / \eta_j$

Avec :

$n_h$ : l'indice de réfraction du matériau de haut indice.

$n_l$ : l'indice de réfraction du matériau de bas indice.

### I.9. Ouverture d'une bande interdite 1D

Prenons une onde plane électromagnétique de vecteur d'onde  $k$  selon la direction de l'empilement. L'onde va se réfléchir à chaque interface de cellule périodique élémentaire pour donner une onde de vecteur d'onde  $-k$ . Le déphasage  $\Delta\phi$  entre deux ondes réfléchies séparées par une cellule élémentaire de la structure périodique est  $2ak$ . Pour  $k = \pi/a$  les ondes réfléchies interfèrent constructivement. Les ondes propagatrices et réfléchies de même énergie  $w_0$  ainsi couplées par le milieu donnent naissance à deux ondes stationnaires de fréquences distinctes  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . La dégénérescence des fréquences ouvre une bande interdite électromagnétique  $\Delta\omega$  entre  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Cette bande est d'autant plus étroite que le contraste d'indice de réfraction entre les couches est faible, mais existe dès que  $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ . Lorsque les épaisseurs optiques des différentes couches sont égales ( $n_1 a_1 = n_2 a_2$ ), la largeur  $\Delta\omega$  de cette bande interdite ne dépend que du contraste d'indice, elle peut être approchée par :

$$\Delta\omega = \frac{4}{\pi} \omega_0 \sin^{-1} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)$$

Où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des deux matériaux diélectriques avec:  $n = \sqrt{\epsilon}$ .

De part et d'autre de la bande interdite, les modes optiques propres de la structure sont stationnaires: la puissance du mode de fréquence  $\omega_1$  se concentre dans le matériau de fort indice, tandis que celle du mode de fréquence  $\omega_2$  se concentre dans le matériau de faible indice. Pour cette raison, les bandes de transmission correspondantes sont désignées respectivement par bande diélectrique et bande d'air.

### I.10. Bande interdite complète

Une bande interdite électromagnétique est dite complète (ou totale) lorsque, pour le domaine de fréquences considéré, le cristal ne supporte aucun mode électromagnétique de propagation; c'est-à-dire qu'une onde dont la fréquence est dans la bande interdite totale ne peut pas se propager dans les BIE quelle que soit sa polarisation et sa direction de propagation.

Seule une structure dont l'indice est périodique dans les trois directions de l'espace est susceptible de posséder des bandes interdites complètes. Mais souvent, le caractère total d'une bande interdite s'entend par rapport au nombre de directions de périodicité que le cristal possède. Ainsi, pour un cristal à deux dimensions une bande est dite complète si, dans le domaine de fréquences considéré, le cristal ne supporte aucun mode pour une propagation dans le plan perpendiculaire aux

tiges. Un cristal à une dimension possède une bande interdite pour une propagation dans la direction de périodicité si quelle que soit la fréquence considérée, il est impossible de trouver un mode supporté par la structure.

### **I.11. Modèle de défaut à BIE ou méthode image**

Généralement, la méthode BIE à défaut est la plus utilisée pour interpréter le fonctionnement de l'antenne BIE. Cette méthode consiste à créer une bande permise dans la bande interdite par l'insertion d'un défaut dans la structure BIE. A la fréquence défaut, altère la distribution des champs électromagnétiques selon certaines directions et augmente l'ouverture en améliorant ainsi la directivité et le gain de l'antenne.

Pour les structures à 1D, le défaut ne peut être créé que dans la direction de périodicité, par contre pour les structures 2D et 3D les défauts peuvent être créés dans une, deux ou trois directions comme le montre. [10].

### **I.12. Conclusion**

Ce chapitre consacré brièvement l'état de l'art sur les matériaux périodiques BIE 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 des matériaux BIE nécessite de tenir compte de la géométrie de la structure. Selon le nombre des directions périodiques et la nature du matériau, En effet, une telle structuration en réseau permet d'introduire des conditions de résonance dans les mécanismes de propagation des ondes électromagnétiques. Cela se traduit alors par l'existence d'une succession de bandes interdites et permises dans les diagrammes .

L'utilisation d'un défaut dans les structures BIE, qu'il soit périodique ou local, modifiera le fonctionnement du matériau à cette fréquence puisqu'un seul mode pourra se propager.

## REFERENCES

- [1]. J. D. JOANNOPOULOS, R. D. Meade, et J. N. Winn, "Photonic Crystals- Molding the Flow of Light", Princeton University Press, 1995.
- [2]. J. TANGYU "Caractérisation Des Matériaux A Bande Interdite Electromagnetique Multipériodiques Et Leurs Applications Aux Antennes " Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2005.
- [3]. JUSLAN LO "Étude De La Reconfigurabilité D'une Structure À Bande Interdite Électromagnétique (Bie) Métallique Par Plasmas De Décharge" Doctorat De L'université De Toulouse 2012.
- [4]. E. YABLONOVITCH, "Photonic Band-Gap structure", J. Opt. Society Vol 10, p.283-293, Feb 1993.
- [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 / pp 8565 – vol 44 1991.
- [7]. L. LEGER, " Nouveaux développements autour des potentialités de L'antenne BIE planaire ", Thèse de doctorat - Université de Limoges- 2004.
- [8] G. KIRIAKIDIS, N. KATSARAKIS, "Fabrication of 2-D and 3-D PBG crystals in the GHz and THz regions", Mater. Phys. Mech (2000).
- [9]. H-YANNICK MERLE. " Étude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels. " PhD thesis, Université de Limoges, 2003.
- [10]. KANSO AHMED, "Étude, conception et réalisation d'antennes BIE bi-bande (Application au développement d'une structure focale pour des applications spatiales multimédia et multifaisceaux. " Thèse de doctorat. Décembre 2010.
- [11] M. LONCAR, D. NEDELJKOVIC, T. Pearsall, J. Vuckovic, A. Scherer, S. Kuchinsky, et D.C. Allan, "Experimental and theoretical confirmation of Bloch-mode light propagation in planar photonic crystal waveguides", Appl. Phys. Lett. , vol.80, p. 1689-1691, 2002.
- [12] T. BABA, N. FUKAYA, et J. Yonekura, "observation of light propagation in photonic crystal optical waveguides with bends", Electron. Lett. , vol. 35, p. 654-655, 1999.

- [13] S. ROWSON, A. CHELNOOV, et J. M. Lourtioz, "Two dimensional photonic crystals in macroporous silicon photonic crystals: from mid-infrared to telecommunication wavelengths (1.3-1.55 $\mu\text{m}$ )", J. Lightwave Technol., vol. 17, p.1989-1995, 1999.
- [14] S. ROWSON A. CHELNOOV, et J. M. Lourtioz, "Macroporous silicon photonic crystals: photonic crystal substrates at 1.55 $\mu\text{m}$ ", 25th European Conference On Optical Communication ECOC'98, Nice, 1999.
- [15] M. THÉVENOT, A. REINEIX, B. JECKO, "F.D.T.D. approach for modelling P.B.G. structure", IOP Publishing Ltd1999.
- [16] ABDELWAHEB OURIR •applications de matériaux bandes interdites photoniques et de métamatériaux en télécommunications " thèse de doctorat, université de paris xi d'orsay, december 2006.
- [17] M. SOUMIA , " Étude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes : Application à l'ultraréfraction ",PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 2005.

## CHAPITRE II:

# *Généralités Sur Les Antennes imprimées BIE*

## II .1. Introduction

Les antennes micro rubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) sont apparus 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 micro ruban optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications aéronautiques, aérospatiales et militaires.

Ce type d'antennes s'adapte facilement aux surfaces planes et non planes et présentent une grande robustesse et flexibilité lorsqu'ils sont montées sur des surfaces rigides. Les antennes micro rubans sont également très performantes en termes de résonance. Les inconvénients majeurs des antennes Micro rubans résident dans et une bande passante étroite [1].

Dans ce chapitre nous présentons la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, et inconvénients des antennes micro rubans, ainsi que les différents types d'alimentation. En effet, nous détaillons le principe des méthodes d'analyse les plus utilisées dans le domaine des antennes microrubans.

## II.2. Historique des antennes imprimées BIE

Le concept des antennes microrubans a été proposé la première fois en 1953 par Deschamps, mais ce n'est qu'aux années soixante dix que les premières applications de ce type d'antennes ont vu le jour . les premières réalisations étaient essentiellement réservées à des applications militaires, un peu plus tard, dans les années 1990 des antennes pratiques ont été développées par Howel et Munson [2].

L'apparition des techniques des circuits imprimés dans le milieu du 20<sup>ème</sup> 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 micro ruban [2].

La géométrie micro ruban, qui rayonne des ondes électromagnétiques, a été envisagée initialement dans les années 1950. La réalisation des résonateurs compatibles avec les lignes de transmission micro ruban date des années 1952 (Grieg et Englemann). La première réalisation des microrubans sous forme d'une antenne imprimée, liée à la très utilisées dans

les appareils téléphoniques, les ordinateurs portables, les systèmes embarqués (missiles, fusées, satellites etc.) ;

La ligne microruban de transmission, a été développée en 1953 par Deschamps, et en 1955 Gutton et Baissinot ont proposé la conception du résonateur micro ruban [2].

En 1987, la parution des deux articles majeurs de EliYablonovitch et Sajeev John a rendu possible la production des structures à deux ou trois dimensions possédant des bandes interdites. Les structures unidimensionnelles étudiées en 1987 sont constituées par un empilement multicouche similaire à un « miroir de Bragg ». Comme Lord Rayleigh l'a montré en 1887. Ces structures présentent une bande interdite unidimensionnelle avec une grande réflectivité. Elles sont utilisées à nos jours dans des applications diverses en l'occurrence des surfaces réfléchissantes. Bykov fit aussi des hypothèses sur l'emploi des structures 2D ou 3D et en 1991 Yablonovitch a conçu le premier cristal photonique tridimensionnel possédant une bande interdite dans les micro-ondes [3].

### II.3. Définition générale 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 [4].

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants [4] :

- 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.

## II.4. Structure d'une antenne imprimée

L'antenne patch ou microbande, appelée aussi micro-ruban, est un élément transducteur. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique évoluant avec une fréquence compatible à celle de l'antenne.

Sa configuration basique se compose d'un plan de masse conducteur et d'un diélectrique appelé substrat sur lequel est imprimée une forme conductrice (Cuivre, Or etc.) qui représente l'élément rayonnant ou le patch. Le substrat est défini comme étant un diélectrique caractérisé par sa permittivité relative (Figure II.1)

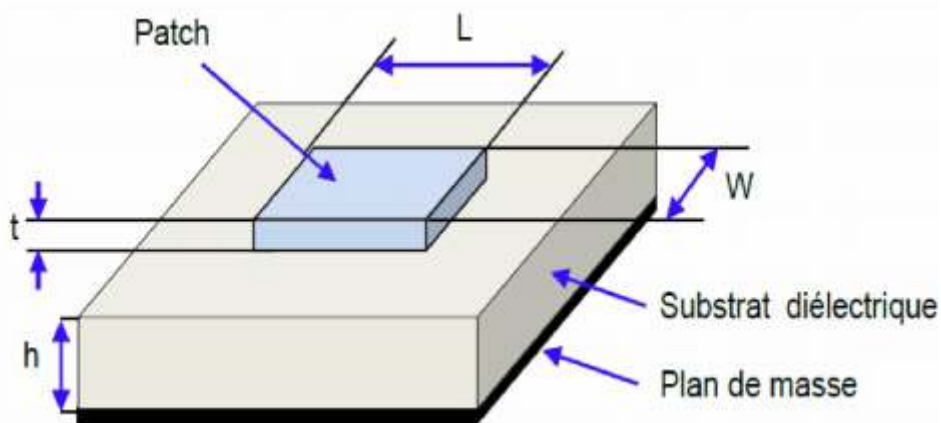
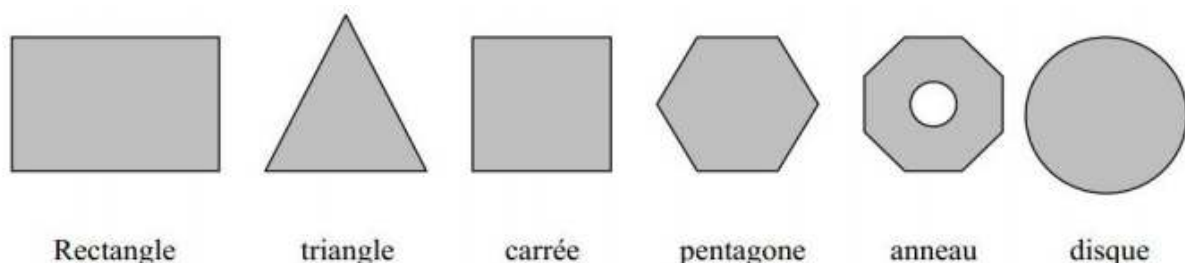


Figure (II.1) :Présentation d'une antenne micro ruban

En pratique, les formes des éléments rayonnants les plus utilisés sont montrés sur la Figure II.2, leurs dimensions sont faibles de l'ordre de  $\lambda/2$  à  $\lambda$ .



Figure(II.2): Divers types d'éléments rayonnants

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro rubans [5].

Les performances d'une antenne patch dépendent étroitement de la géométrie et des dimensions de tous ses composants. Les paramètres intervenant dans la caractérisation de l'antenne sont :

➤ **Le substrat**

- ✓ Hauteur du substrat  $h$  .
- ✓ Permittivité relative du diélectrique  $\epsilon_r$  .
- ✓ Tangente des pertes  $\tan(\delta)$

➤ **Le conducteur**

- ✓ La forme géométrique (carré, cercle, triangle etc.)
- ✓ Les dimensions (largeur( $W$ ), longueur ( $L$ ) pour la forme rectangle et rayon pour la forme circulaire).

## II.5. Avantages et inconvénients des antennes BIE [6]

Les antennes microrubans sont devenues de plus en plus populaires grâce à leurs applications qui couvrent un large domaine de fréquence : 100MHz à 100 GHz . Une caractéristique qui les rend extrêmement demandées dans les téléphones portables.

Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids.
- Volume réduit.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- La tendance à grouper plusieurs patches identiques pour construire des antennes réseaux.
- Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro- ondes intégrés (MIC).
- Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Toutefois, les antennes microrubans ont également des limitations telles que :

- Bande passante étroite.
- Généralement faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi- plan.

□ Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouches et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes .

## II.6. Fonctionnement d'une antenne

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 .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. 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 (figure II.3). Les courants surfaciques qui sont produits sur l'élément métallique sont dirigés selon l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [7] [16]

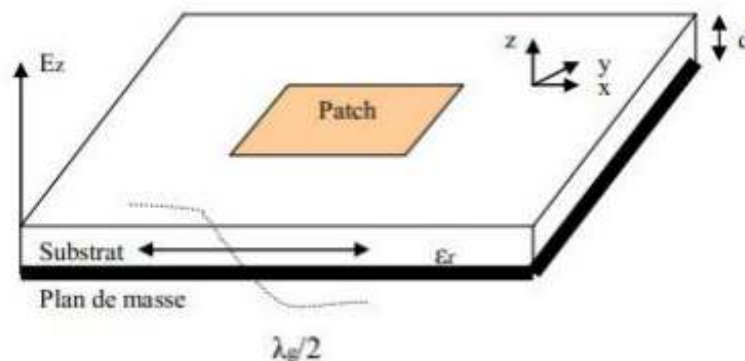


Figure (II.3): Antenne imprimée fonctionnant sur son mode fondamental

### II.7.Applications antennes imprimées BIE

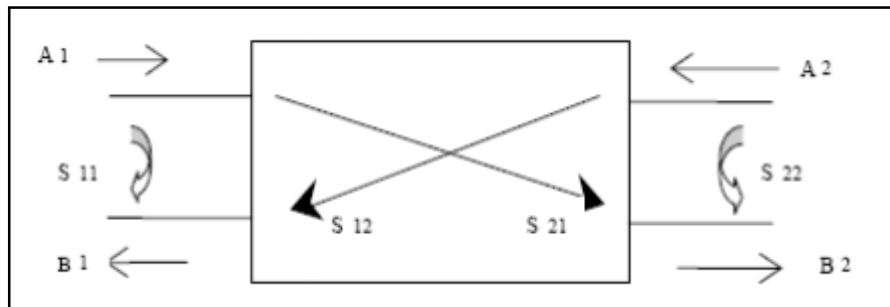
Les premières applications pour les antennes microrubans ont été celles pour lesquelles la minceur était requise. Les antennes de télémétrie et de communication pour les missiles sont souvent faites en technologie microruban. Des petits réseaux d'antennes sont utilisés pour les radars d'altitude. À cause des conditions d'efficacité imposées pour ces antennes, des techniques spéciales d'alimentation sont employées pour minimiser les pertes. Les antennes imprimées sont aussi présentes dans les liens entre les satellites ou les bateaux,... etc. Les systèmes GPS (Global Positioning System) d'aujourd'hui utilisent aussi des antennes imprimées [8].

### II.8.Caractéristiques des antennes imprimées BIE[8]

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

#### II.8.1- Représentation en quadripôles [8]

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (Figure II.4), défini par les paramètres S :



Figure( II.4) : Représentation en quadripôle

A1, A2, B1, B2 Sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

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

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

✓ Le coefficient S 11 correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque

$A_2=0$ .

- ✓ Le coefficient  $S_{12}$  représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée

Lorsque  $A_1=0$ .

- ✓ Le coefficient  $S_{21}$  est le gain du quadripôle lorsque  $A_2=0$ .
- ✓ Le coefficient  $S_{22}$  est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque  $A_1=0$ . [8]

**II.8.2. Coefficient de réflexion  $S_{11}$**

- ✓ Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation [8].

**II.8.3. Rendement de l'antenne**

- ✓ Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée ( $P_r$ ) et la puissance fournie ( $P_f$ ), à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \dots \dots \dots (I - 3)$$

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

**II.8.4. Directivité :**

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

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

**II.8.5. Gain :**

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

Si G est le gain, alors [8] :

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

**II.8.6. Ouverture :**

Si  $G_m$  est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à  $-3$  dB), soit  $G_m/2$  [7][16].

**II.8.7. Impédance d'entrée**

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

Cette impédance est donnée par la formule :

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

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

**N.B** : Comme  $S_{11}$  est fonction de la fréquence, alors  $Z_{in}$  varie aussi avec la fréquence [8].

**II.8.8. Fréquence de résonance**

Une antenne s'utilise en général avec des signaux autour d'une fréquence donnée pour laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés [9].

**II.8.9. Adaptation et condition d'adaptation :**

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $Z_c$  (en général,  $Z_c = 50 \Omega$ ). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre alimentation et l'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion  $\Gamma_{in}$  ou  $S_{11}$  en entrée de l'antenne [10].

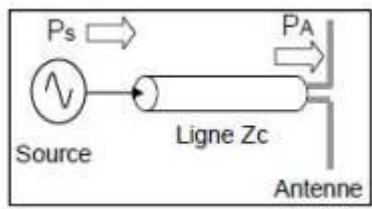


Figure (II.5) : Adaptation et condition d'adaptation

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchi en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique

$$P_A = P_s(1 - |\Gamma_{in}|^2) \dots \dots \dots (I - 7)$$

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \dots \dots \dots (I - 8)$$

Condition d'adaptation  $S_{11} = 0 \Leftrightarrow Z_{in} = Z_c$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance ( $P_{mismatch} = \Gamma^2 \cdot P_A$ ) est renvoyée vers la source (ou re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception), appelée en anglais mismatch loss (pertes de désadaptation). En pratique, soit on cherchera à concevoir l'antenne de telle manière à ce qu'elle présente une impédance égale à  $Z_c$  à la fréquence de travail, soit on disposera en entrée de l'antenne un circuit de transformation d'impédance qui modifiera l'impédance d'entrée de l'antenne vue depuis la source et assurera l'adaptation d'impédance[10].

**II.8.10. Bande passante et facteur de qualité :**

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

Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.

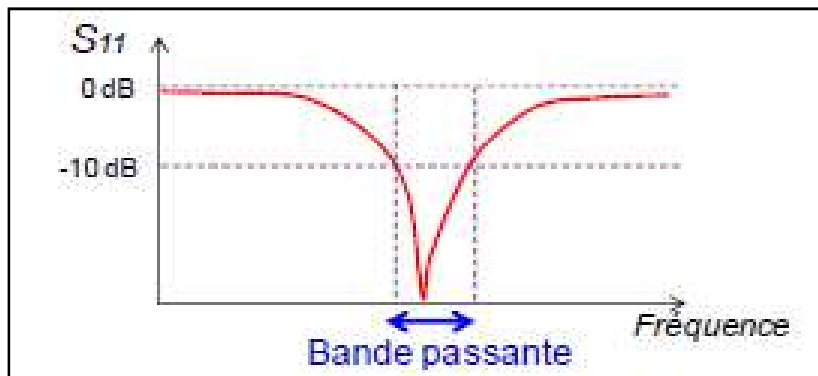


Figure (II.6): Bande passante et coefficient de réflexion

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonnant RLC. La bande passante  $BW$  (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité  $Q$  du circuit RLC à la fréquence de résonance  $f_{Res}$ .

Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série équation [10]).

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \dots\dots\dots(I - 9)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}} \dots\dots\dots(I - 10)$$

$R_{ant}$  =résistance d'antenne.

$Q$ =facteur de qualité du circuit RLC.

$BW$ =bande passante à 3 dB.

$f_{Res}$ =la fréquence de résonance.

$L_{ant}$ =longueur d'antenne.

### II.8.11. Diagramme de rayonnement :

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée par une antenne est caractérisée par son diagramme de rayonnement. On définit le diagramme de rayonnement d'une antenne par la représentation polaire du champ électrique de sa fonction caractéristique. Il est cependant, plus intéressant de considérer le carré de la puissance rayonnée, normalisée par rapport à son maximum: c'est le digramme de rayonnement en puissance de l'antenne[11].

Les digrammes de rayonnement sont généralement mesurés dans les plans de symétrie, s'il y en a, ou dans les plans principaux nommés *plan E et plan H*. Ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales [11].

Avec une source polarisée parallèlement à l'axe (Ox), le plan E est caractérisé par  $\varphi=0^\circ$  et  $\theta$  variable tandis que pour une source polarisée parallèlement à l'axe (Oy), le plan H est caractérisé par  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\theta$  variable. Les diagrammes de rayonnement sont représentés en coordonnées cartésiennes, en coordonnées polaires ou en coordonnées sphériques.

### II.8.11.1. Lobe principal

La quasi-totalité de la puissance est concentrée dans la direction du maximum de rayonnement, formant ce qu'on appelle le lobe principal. La caractéristique qu'on associe à celui-ci est sa largeur à mi- puissance, également appelée ouverture à -3dB. Il arrive parfois de mesurer la largeur à -10dB, lorsque l'antenne présente un lobe principal très étroit[11].

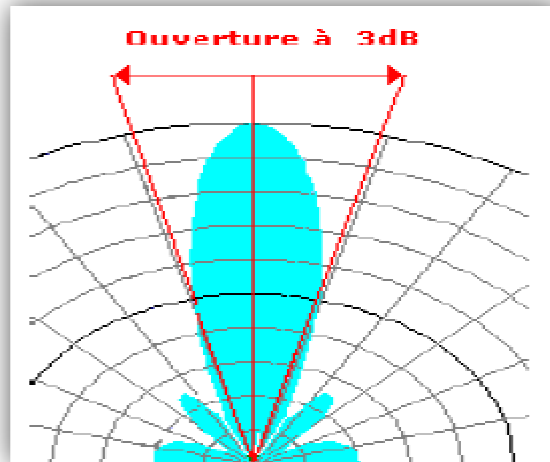


Figure (II.7) : Ouverture à -3 dB

### II.8.11.2. Lobes secondaires

En dehors du lobe principal, la puissance rayonnée est répartie dans l'espace, formant ce qu'on appelle les lobes secondaires ou latéraux Figure (II-8). Ces derniers sont caractérisés par leurs niveaux et leurs positions par rapport au maximum de rayonnement[11].

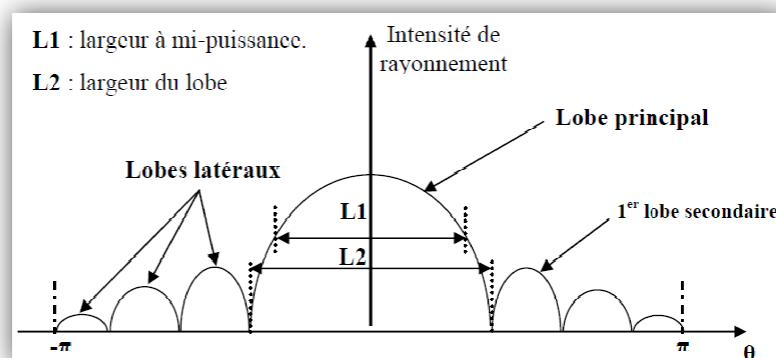


Figure (II.8): Digramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes

## II.9. Techniques d'alimentation

L'excitation est un point très important pour étudier les antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif [12].

Les résonateurs microrubans peuvent être alimentés selon plusieurs méthodes, que l'on peut classer en deux catégories:

- **Avec contact:** où l'alimentation est liée directement à la plaque rayonnante en utilisant un élément de connexion tel qu'une ligne microruban.
- **Sans contact:** où le couplage du champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne microruban et l'élément rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microruban, la sonde coaxiale, le couplage par ouverture et le couplage par proximité [13].

### II.9.1 Alimentation par ligne microruban

Faite par une ligne microbande de largeur plus petite par rapport au patch, cette ligne est gravée avec le patch en même temps( Figure II-9). Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes. Il existe cependant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite [14].

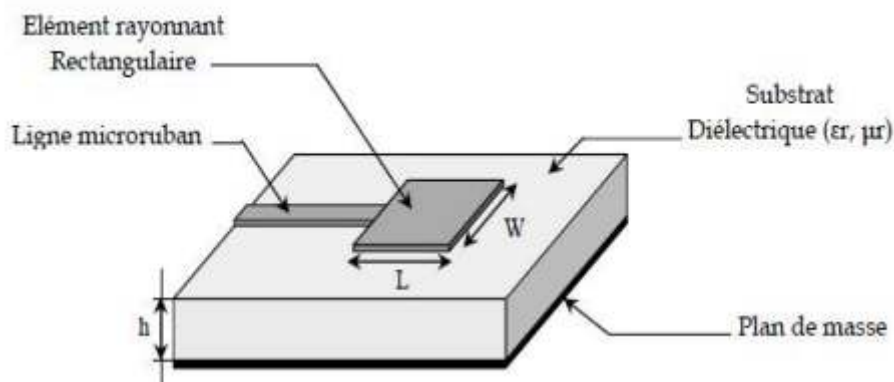


Figure (II.9): Alimentation par ligne microruban

### II.9.2 Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans (Figure II-10) Dans ce cas le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, alors que le conducteur externe est relié au plan de masse, Cette alimentation est facile à mettre en œuvre et à adapter. Son rayonnement parasite est faible, et son inconvénient principal est qu'elle fournit une bande passante étroite [14].

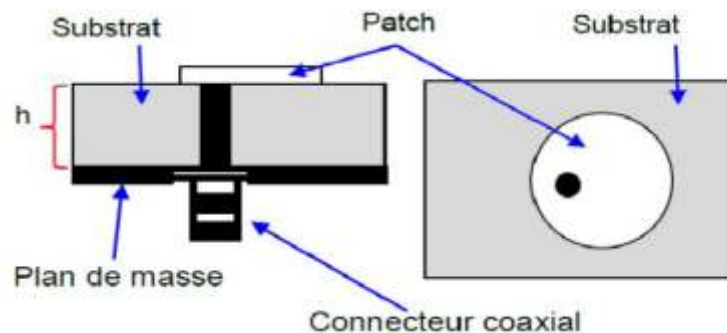


Figure (II.10):Alimentation par sonde coaxiale

### II.9.3.Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme .La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch. Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante Mais elle apporte divers avantages [14] :

- Isolation du circuit d'alimentation de l'antenne ;
- Diminution des rayonnements parasites au niveau de l'élément rayonnant ;
- Faible bande passante;

Mais également des inconvénients :

- Difficile à mettre en œuvre ;
- Apparition d'un rayonnement arrière du faite que la fente se comporte comme un élément rayonnant. Pour éliminer cet inconvénient, on peut disposer sous la ligne,

une plaque de substrat avec une partie métallisée sur sa face inférieure pour créer un nouveau plan de masse[14].

### II .9.4 Alimentation par proximité

Une autre solution pour exciter le patch par couplage est de disposer celui-ci ainsi que la ligne d'alimentation telle que le montre . Ces deux éléments sont situés au-dessus du plan de masse et la ligne d'alimentation est prise en sandwich entre deux diélectriques. La source rayonnante est excitée par couplage électromagnétique Parmi les avantages de ce type d'alimentation, nous citons [14]:

- Élargissement de la bande passante ;
  - Simplicité d'adaptation en fonction de la hauteur du substrat et de longueur du stub
- Néanmoins elle présente quelques inconvénients :
- Difficile à réaliser ;
  - Possède une grande sensibilité au couplage ;
  - Difficultés de plaquage des couches diélectrique.

## II.10.Méthodes d'analyse

Les antennes microrubans, généralement constituées d'un élément rayonnant à deux dimensions imprimé 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 [15].

### II.10.1.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 [15].

**II.10.1.1. Modèle de la ligne de transmission :**

Le traitement théorique basé sur le modèle de la ligne de transmission (MLT) était le premier et le plus simple modèle utilisé pour l'analyse et la synthèse des antennes microrubans. Dans ce modèle l'élément rayonnant est vu comme un prolongement d'une ligne de transmission. Malgré son caractère empirique, le modèle de la ligne de transmission peut être comparable en précision aux modèles les plus complexes sur tout pour les substrats électriquement minces, il permet une bonne interprétation physique mais modélisé difficilement le couplage.

Développé en premier lieu pour les patchs rectangulaires, ce modèle a été amélioré pour permettre la modélisation d'autres formes de patch, le couplage, les substrats multicouches et les surfaces non planaires telle que la surface cylindrique [16].

**II.10.1.2. Modèle de la cavité :**

Le modèle de la cavité offre la simplicité et la visibilité physique dans l'analyse des antennes microrubans. Une antenne imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques (le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux. Une longueur et une largeur effective sont introduites pour prendre en compte les débordements des lignes des champs sur les bords de l'élément rayonnant

Les champs à l'intérieur de la cavité peuvent être exprimés en fonction de modes discrets satisfaisant individuellement des conditions aux limites appropriées. [16].

Ce modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage.

**II.10.2. Méthodes numériques :**

Les techniques numériques, basées sur la détermination de la distribution du ourlant 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 [15].

**II.10.2.1.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 [16].

La première étape consiste 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.

À chacun de ces éléments géométriques est associé un certain nombre de nœuds auxquelles sont attribuées des fonctions de base linéairement indépendantes les unes des autres et sont une approximation continue de la solution du problème. 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. Le cas particulier où les fonctions de test et d'essai sont identiques est appelé procédure de Galerkin. L'avantage d'une telle technique réside dans la simplicité de traitement pour les géométries les plus complexes et les matériaux inhomogènes tout en tenant compte des dispersions. Cependant elle reste inefficace comparée à la méthode des moments pour le traitement des conducteurs rayonnants[15].

**II.10.2.2.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. La méthode consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées.

Les composantes des champs électrique et magnétique sont décalées d'une demi-cellule spatiale et calculées d'une manière alternative et itérative, à des multiples pairs et impairs du demi- pas temporel.

Cette technique à l'avantage de permettre une caractérisation dans une large bande de fréquence d'une structure en une seule simulation, les paramètres de propagation et l'impédance caractéristique peuvent être déterminés en appliquant la transformée de Fourier [16].

### **II.10.2.3.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. La procédure de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de test identiques aux fonctions de base est applicable aussi dans cette méthode. La méthode des moments est très précise, très souple, peut traiter un élément seul ou plusieurs éléments en réseau ou empilés, les formes arbitraires et le couplage.

Cependant, elle est très complexe, permet moins l'interprétation physique et nécessite un temps de calculs considérable.[16]

### **II.10.3.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 S11. Les principales méthodes de cette catégorie sont les algorithmes génétiques pour l'optimisation globale et les réseaux de neurones pour l'optimisation locale [15].

### **II.10.4.La méthode d'intégration finie**

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

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

En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel numérique efficacité et précision, la FIT a été utilisé dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, de DC à THz. Par ailleurs, la méthode

d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis[17]. Cette méthode est utilisée pour le logiciel de simulation CST.

### **II.11.Conclusion**

Technologie microstrip en général, les antennes microstrip sont connues. Succès croissant chez les industriels et les professionnels des télécoms la fois spatial et terrestre.

Il est nécessaire de spécifier tous les paramètres antennes dans ce chapitre, nous avons montré le rôle des antennes et leur évolution technologique microrubans, leur travail. En plus de certains paramètres sur le fonctionnement et les performances de ce type d'antennes, ce sont les paramètres de composant, le type d'alimentation.

Nous avons parlé de l'effet de certains paramètres incluent les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des antennes, ainsi que les différentes méthodes d'analyse utilisées dans ce domaine.

**REFERENCES**

- [1] M. HASSAD," Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux" thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2009.
- [2] R. Bancroft, "Microstrip and Printed Antenna», by SCITECH publishing, INC Design 2nd Edition, (2009).
- [3] K. BOUFELDJA" Modélisation et Synthèse de réseaux périodiques et non périodiques d'antennes microrubans par l'application d'un Algorithme Génétique-Flou" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen, Février 2011.
- [4] Chouti Leila; " Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bande tenant compte de l'effet de couplage "; Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magister en Electronique, Département d'Électronique, Université Mentouri – Constantine, 13 janvier 2009.
- [5] A. Dada " Antenne microruban de forme circulaire à substrats cristaux photoniques" mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.....
- [6] D. Khedrouche " Modélisation des antennes microbandes par une analys tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.
- [7] Radiations from a Right Triangular Patch Antenna with and without Air Gap  
Aradhana Kimothi, Vijay Tiwari , V. K. Saxena, J.S. Saini and D. Bhatnagar Microwave Lab,  
Department of Physics, University of Rajasthan Jaipur- 302004 (India)
- [8] A. Kamil, "Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 Ghz-10.6 Ghz)", thèse grade du Maître ès sciences (M.Sc), Institut National de la recherche scientifique, Université du Québec, 2011.
- [9] A. Boyer, "Antennes support de cours énonce de travaux dirigés", Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011.
- [10] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", Third Edition by John Wiley & Sons, New Jersey, 2005

- [11] L. CHOUTI " 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.
- [12] A. AICHE" Étude de l'alimentation par ouverture d'une antenne microstrip circulaire", mémoire de Master, Institut d'électronique, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014
- [13] H. MESSAI "Analyse et conception d'une antenne patch microstrip en utilisant le simulateur électromagnétique HFSS" , Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [14] K. BOUFELDJA" Modélisation et Synthèse de réseaux périodiques et non périodiques d'antennes microrubans par l'application d'un Algorithme Génétique-Flou" thèse de Doctorat, Institut d'électronique ,Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen, Février 2011.
- [15] Yamina Tighilt, " Identification des antennes microrubans multicouchespar laméthode spectrale les réseaux de neurones ", thèse de Doctorat, Institut d'électronique,Université de Setif. juin 2011.
- [16] B. BECITA" Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques"mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [17] 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 III:

## *Résultats et discussions*

### III.1.Introduction

Durant ces dernières années, le développement de techniques rigoureuses permettant de résoudre les équations de Maxwell a introduit et imposé des outils informatiques en électromagnétisme. Ces outils sont de plus en plus utilisés dans l'analyse et la conception des dispositifs hyperfréquences utilisés dans les applications micro-ondes et de communications sans fil. Des logiciels de simulation disponible dans le commerce utilisant différentes méthodes numériques, dans notre étude nous avons utilisé le CST : Microwave Studio avec la méthode FIT finit intégration technique [1][2].

Dans Microwave-studio, chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles par des différentielles  $\Delta t$ . L'utilisation d'un outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageuses termes de temps de calcul pour la simulation d'antenne à large bande passante [3].

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: Finité Intégration Technique ;
- FVI: finité volume intégral ;
- TLM : transmission Line Matrix.....etc

Dans ce chapitre nous montrons comment créer, simuler et analyser une antenne microruban (patch) triangulaire en utilisant l'environnement de conception CSTMICROWAVE STUDIO.

### III.2.Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences [3].Il simplifie le processus de saisie de la structure et la définition des équipements en fournissant une interface graphique de modélisation puissante et solide (Figure III.3). Après la modélisation du composant, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant que le moteur de simulation ne soit lancé [3].

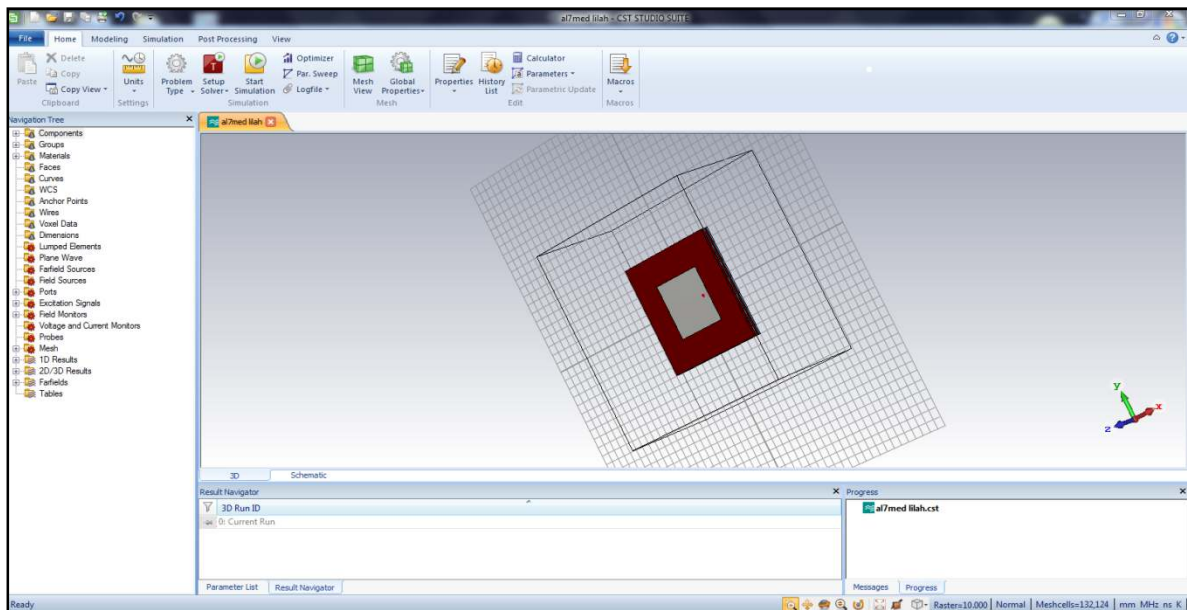


Figure III-1 Interface graphique de CST MICROWAVE STUDIO.

**CST MICROWAVE STUDIO** est un module qui fait partie du logiciel CST STUDIOSUITE et propose un certain nombre de solveurs pour différents types d'application. Comme aucune méthode ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'application, le logiciel contient quatre techniques différentes de simulation (solveur transitoire, solveur fréquentiel, solveur d'équation intégrale, et solveur de mode propre) pour mieux répondre aux applications particulières. L'outil le plus flexible est le solveur transitoire, qui peut obtenir le comportement fréquentiel pour une large bande de fréquence par une seule et unique simulation (contrairement à l'approche fréquentielle de nombreux autres simulateurs) [4][3]. Il est basé sur la technique FIT (en anglais : Finité Intégration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant. Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes, ...etc[4].

### III.3. La méthode d'intégration finie

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

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

En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel efficacité et précision, la FIT a été utilisée dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, de DC à THz. Par ailleurs, la méthode d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis[5][2].

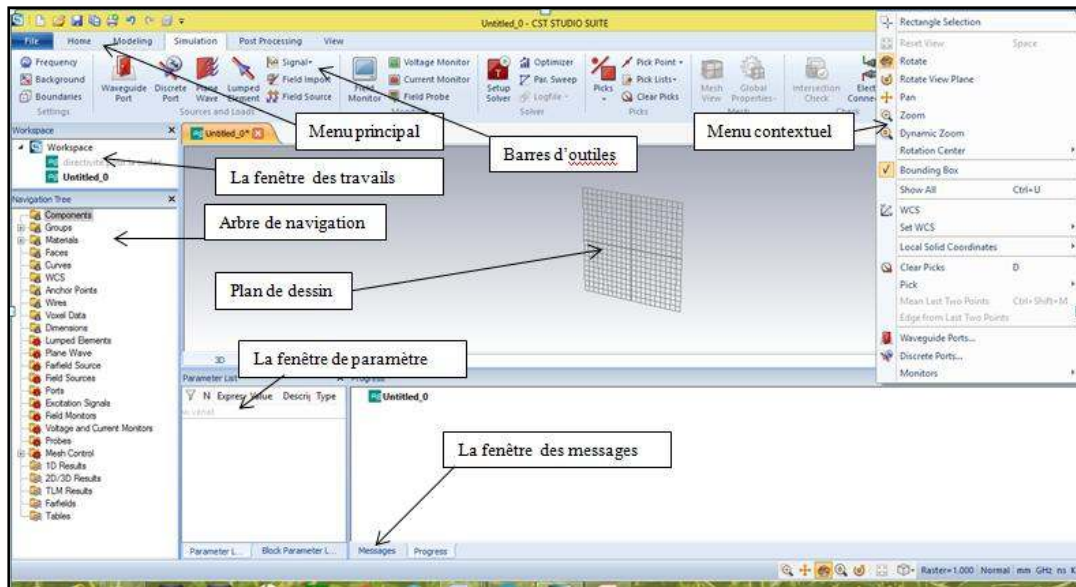


Figure III-2 La fenêtre principale du logiciel CST(20117).

L'arbre de navigation est un élément essentiel de l'interface utilisateur. De là, nous pouvons accéder aux éléments structurels ainsi que les résultats de simulation. Les sections suivantes expliquent les différents articles dans cette fenêtre d'arbre.

Les menus contextuels sont un moyen souple d'accéder à des commandes de menu les plus fréquemment utilisées pour le contexte actuel. Le contenu de ce menu qui peut être ouvert en appuyant sur le bouton droit de la souris.

Le plan du dessin est le plan sur lequel nous allons dessiner des primitives de la structure. Comme la souris n'est qu'un localisateur 2D, même lors de la définition des structures 3D, les coordonnées doivent être projetées sur le plan du dessin, afin de spécifier un emplacement 3D. Comme on peut modifier l'emplacement et l'orientation du plan de dessin à l'aide de différents outils, cette caractéristique rend le modéleur 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 .4. Exemple d'un projet en CST

#### III.4.1.Démarrer le logiciel

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

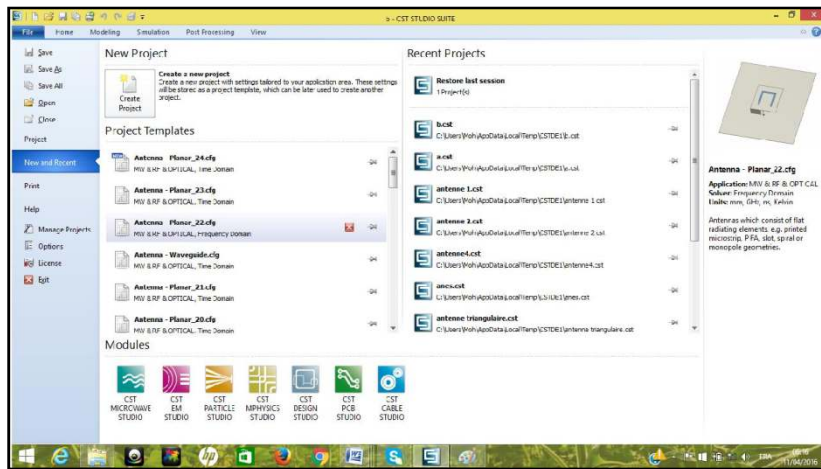
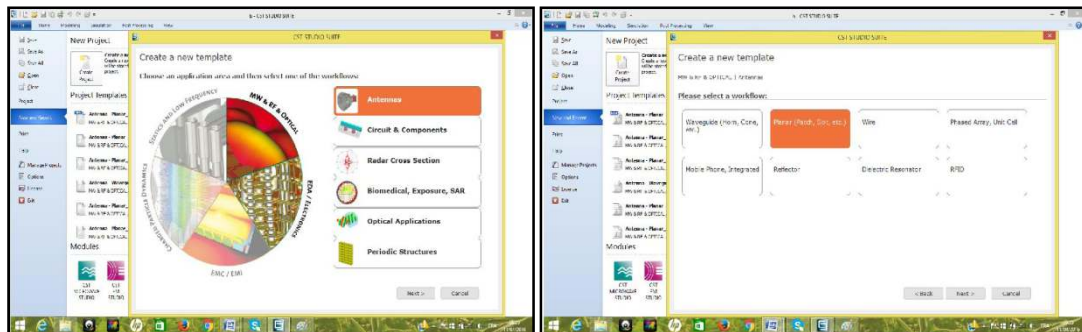
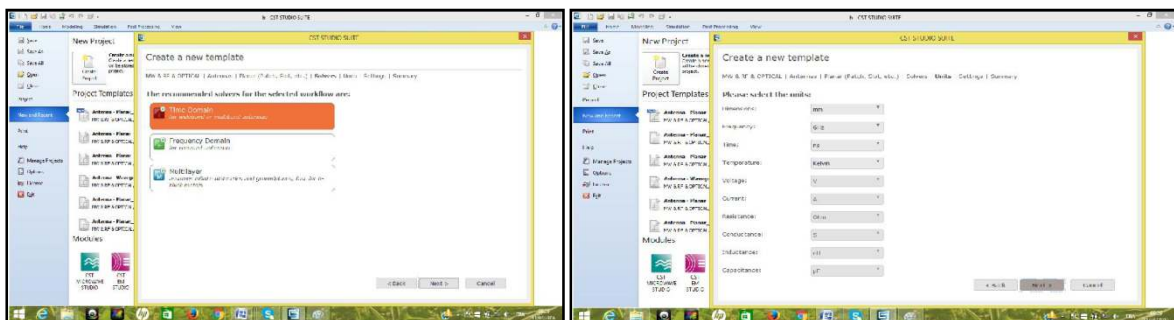


Figure III-3 La fenêtre d'accueil.



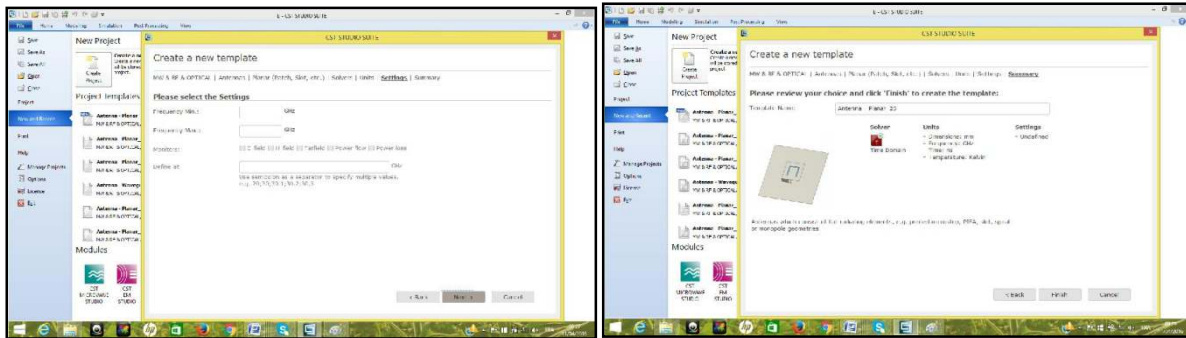
(a)

(b)



(c)

(d)




(e)

(f)

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

### III .4.2.Créer le plan de masse

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

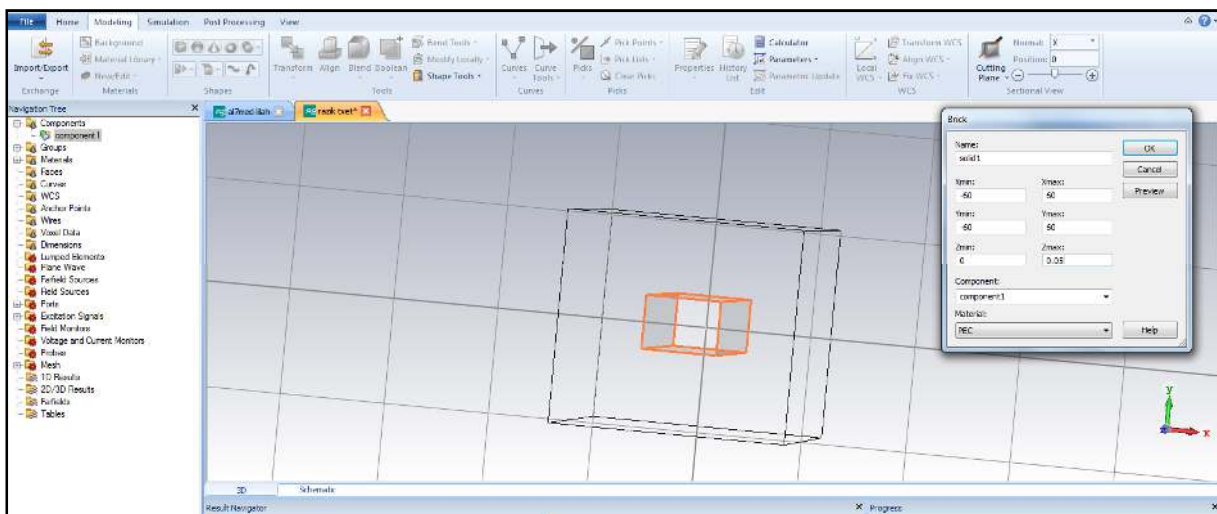



Figure III-5 Créer un plan de masse.

### III. 4.3. Créer le substrat BIE 1D

Le substrat BIE 1D est constitué de quatre couches diélectriques. Pour créer les couches 1 et 3 il faut :

- 1- Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante  et les mêmes étapes que celles du plan de masse.
- 2- En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (vacuum : air) cliquez sur OK
- 3- Pour créer les couches 2 et 4 mêmes étapes de la création les couches 1 et 3, mais le matériau dans ce cas (paper (oil impregnated))

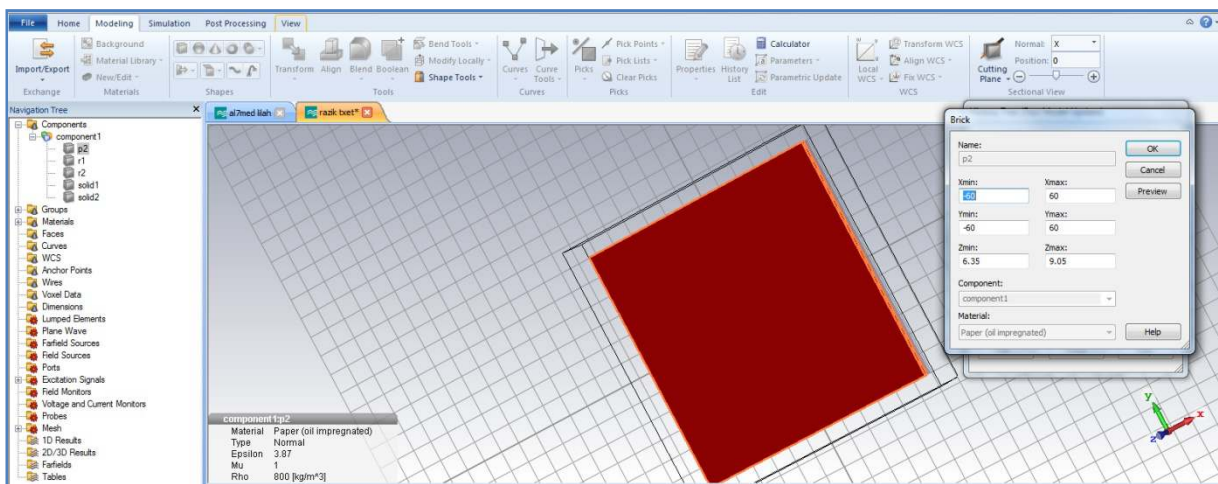



Figure (III-6) : Créer des substrats diélectriques

### III.4.4. Créer le patch

Pour créer le patch il faut :

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

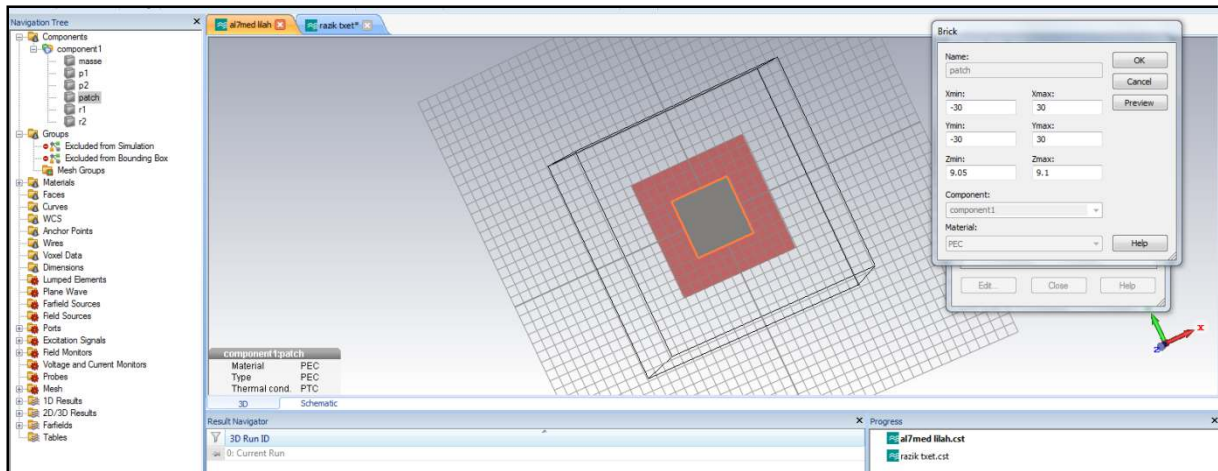



Figure (III-7) Créer le patch

### III.4.5. Définir le port

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

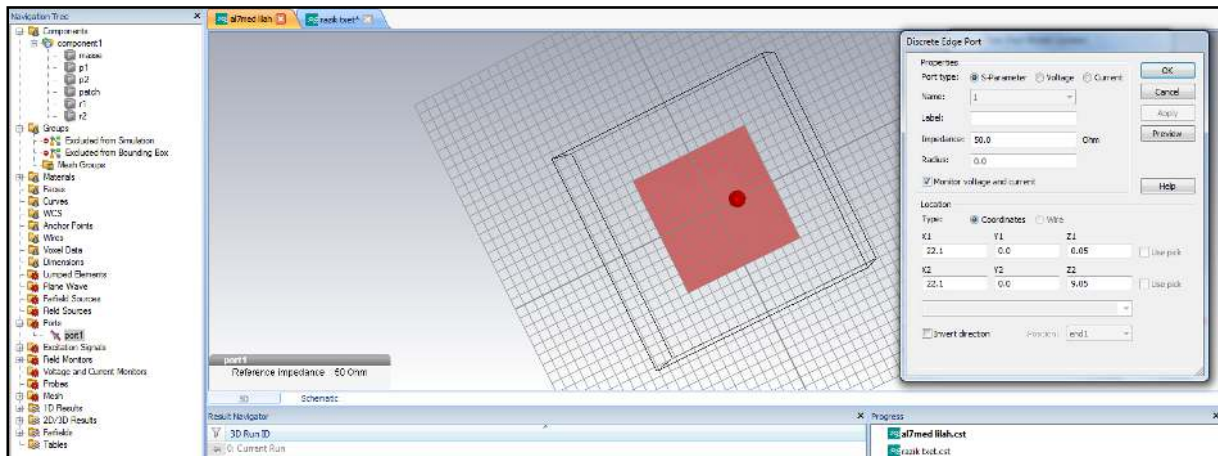



Figure (III-8) Définir le port

### III.4.6. Définir le domaine de fréquence

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

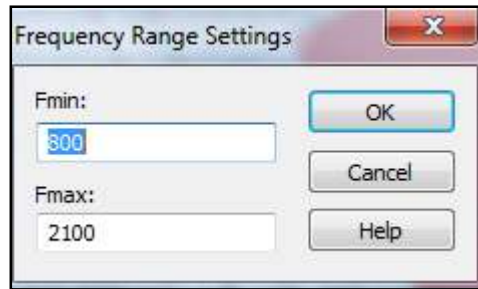
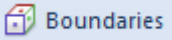


Figure (III-9) Définir le domaine de fréquence.

### III.4.7 Définir les conditions au bord

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

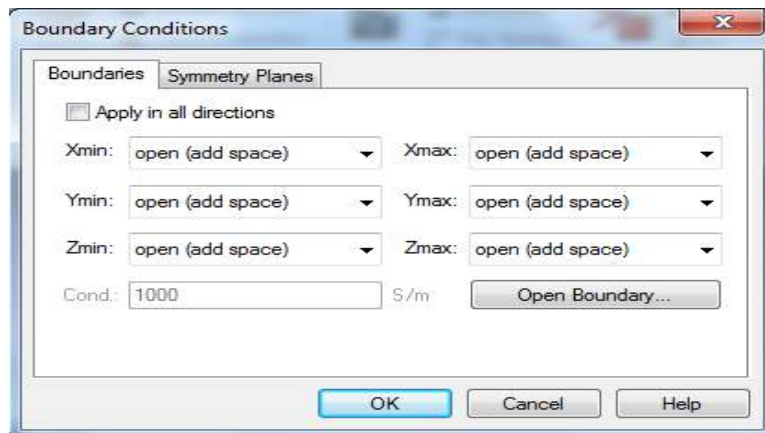



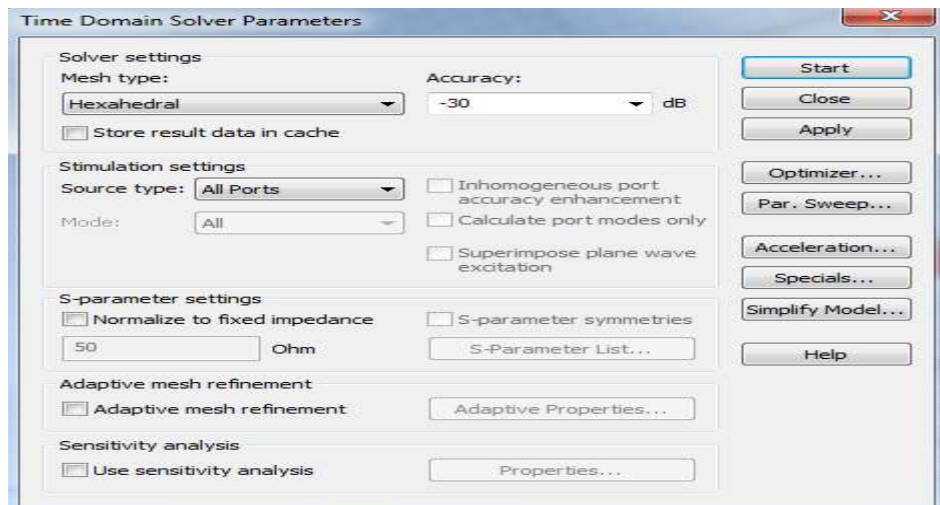
Figure (III-10):Définir les conditions au bord.

### III.4.8. La simulation

Pour lancer la simulation il faut :

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

3- cliquez sur <Start>



Figure( III-11) choisir la précision.

### III.4.9. Résultats

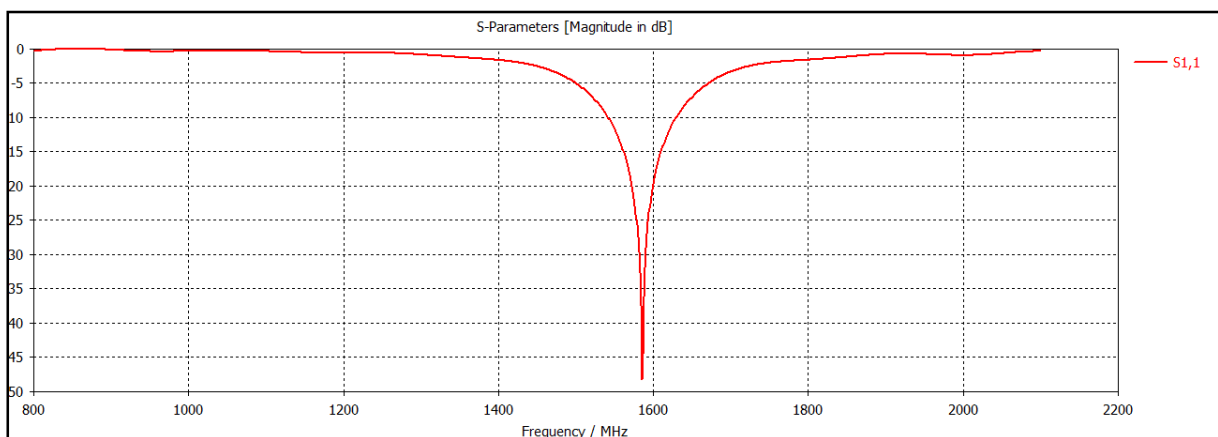


Figure (III-12) : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch

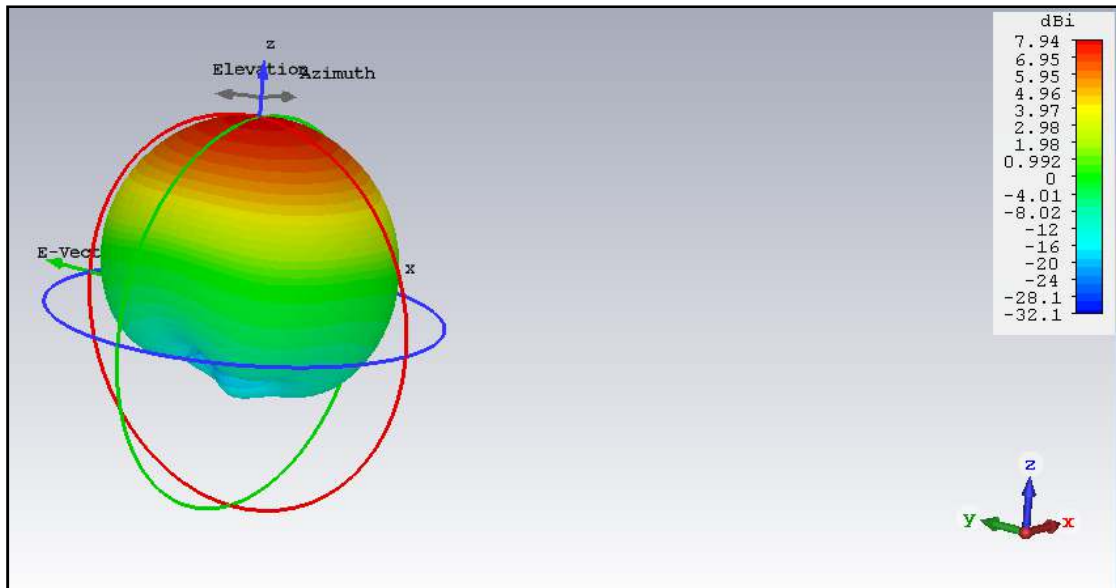


Figure (III-13) : directivité en 3D d'une antenne patch

### III.5. Présentation de la structure

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat à BIE de type 1D qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques d'une permittivité de  $\epsilon_{r1} = 1$  (vacuum), d'épaisseur  $h_1 = 2.7\text{mm}$  et les deux couches diélectriques d'une permittivité de  $\epsilon_{r2} = 3.87$  (paper (oilimpregnated)), de l'épaisseur  $h_2 = 1.8\text{mm}$ , la longueur du côté patch carré  $L = 30\text{mm}$  et les dimensions du substrat  $a = b = 60\text{mm}$ . Cette antenne est alimentée par une sonde coaxiale.

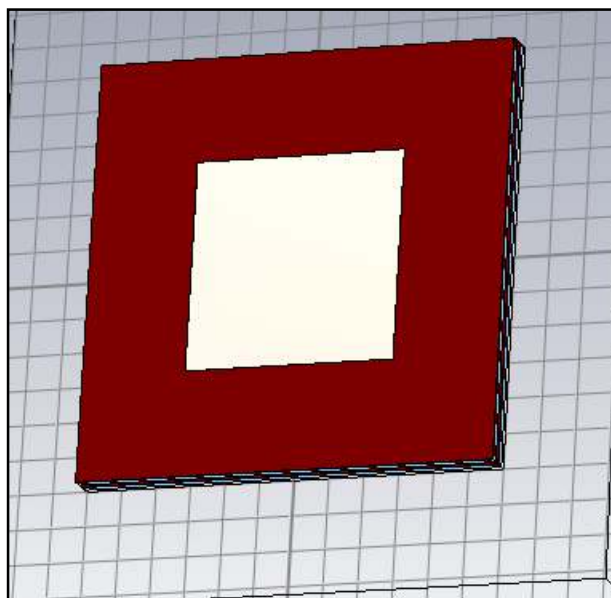
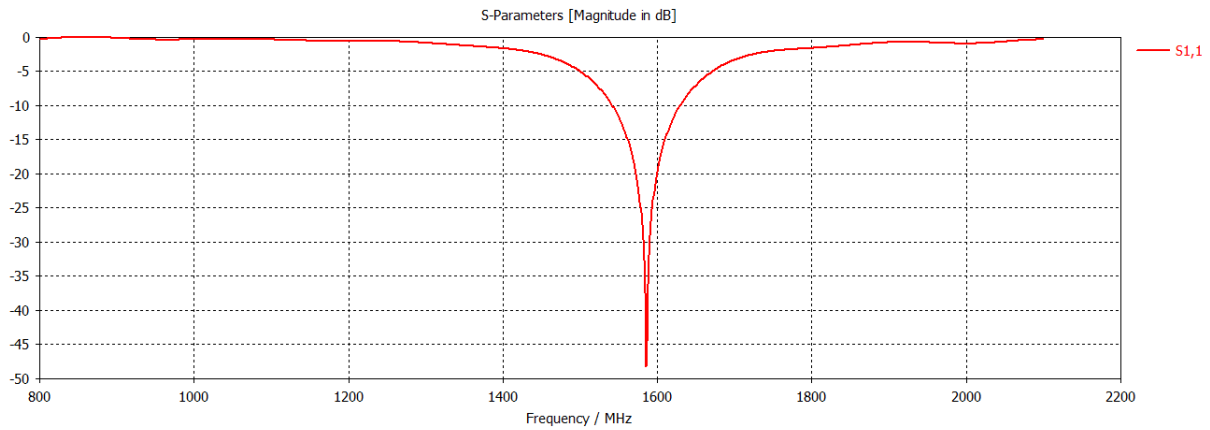


Figure (III-14) : La Structure de l'antenne microruban.



Figure( III-15) : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch carré

À partir du Figure (III-15) qui représente le coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch carré, on remarque que la fréquence de résonance est 1585.2 MHz.

### III.5.1.Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal

On étudie la variation de la directivité de deux antennes microrubans de forme carré: et les dimensions de la longueur du côté du substrat BIE  $a=60\text{mm}$ , la permittivité du substrat qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et leurs épaisseur  $h_1=1.8\text{mm}$  et les deux autres couches diélectriques de et  $\epsilon_{r2}=3.87$ , d'épaisseur  $h_2=2.7\text{mm}$ , et une antenne à substrat normal dans ce cas on utilise le diélectrique vacuum d'épaisseur  $h=9\text{mm}$ , et les dimensions de la longueur du côté substrat normal  $a=60\text{mm}$

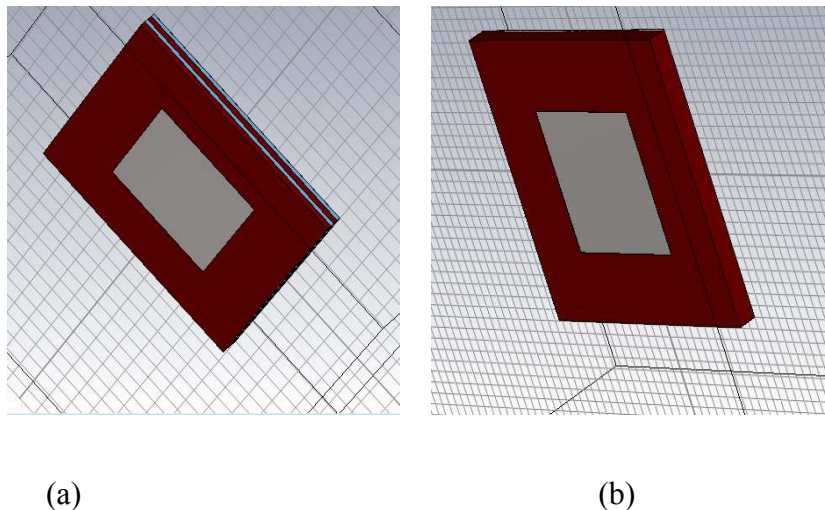


Figure (III-16) : Structure des antennes : a) à substrat à BIE b) à substrat normal.

La Figure (III-17) permet une visualisation en 3D la directivité pour les deux antennes.

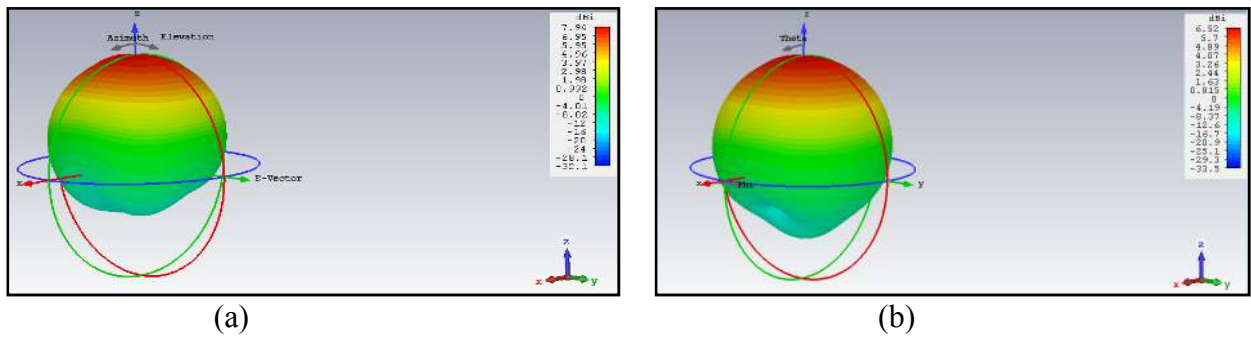


Figure (III-17) : La directivité en 3D : a) Substrat à BIE b) Substrat normal.

Substrat	Directivité (dBi)
Normal	6.52
BIE	7.94

Tableau (III-1) : Comparaisons entre un substrat BIE et un substrat normal

À partir du Tableau (III-1) et la Figure(III-17) pour LES deux différents substrats, on remarque que la directivité est plus importante pour le substrat BIE par rapport au substrat normal.

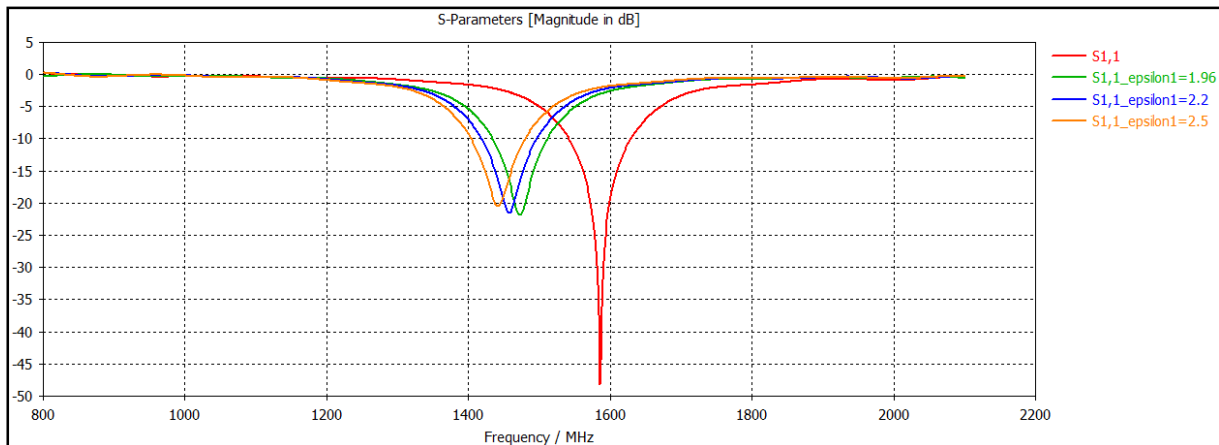
### III.6.Influence des paramètres de l’antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante

Nous allons étudier l’effet de la variation des paramètres physique : les permittivités des différentes couches du substrat à BIE, et les paramètres géométriques tels que la surface sur la fréquence de résonance et la bande passante.

On a utilisé les matériaux suivants :  $\epsilon_{r1}$ =(1 : vacum, 1.96 :Rogers RT 5880LZ(loss free), 2.2:Arlon Di 880 (loss free),2.5 :Arlon AD 250 (loss free)) et  $\epsilon$ =(3.6 : Arlon AD 360 (loss free),3.87 : paper (oilimpregnated),4.1 :Getek ML200M (loss free),4.5 :Arlon AR 450 (loss free), $\epsilon_{r3}$ =(4:epxyresin, 3.6 : Arlon AD 360 (loss free),4.5 :Arlon AR 450 (loss free),Rogers Ro 4360G2(loss free)).

#### III.6.1.Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r1}$ ).

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  d'une antenne pour une la longueur côté du patch carré L=30mm,les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r2}$  =3.87 (Paper (Oil Impregnated)), et leurs épaisseur  $h_1$ =2.7mm et  $h_2$ =1.8 mm, la longueur du côté substrat a=60mm.



**Figure (III-18) Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ )**

À partir des courbes du coefficient de réflexion  $S_{11}$  Figure (III-18), on déduit la fréquence de résonance et la bande passante de la structure étudiée en fonction la constante diélectrique ( $\epsilon_{r1}$ ) Tableau (III-2).

Permittivité( $\epsilon_{r1}$ )	Fréquence de résonance(MHz)	Bande passante(MHz)
1	1558.2	88.311
1.96	1472.1	77.9
2.2	1457.8	77.9
2.5	1442.2	76.621

**Tableau(III-2)La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la ( $\epsilon_{r1}$ ).**

D'après le tableau(III-2)et les courbes de la Figure du(III-18)pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ ), : la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$ .

### III.6.2. Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r2}$ )

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$  d'une antenne pour une longueur du côté du patch carré  $L=30\text{mm}$  ,Les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ ,  $h_1 = 1.8\text{ mm}$ , et l'épaisseur  $h_2 = 2.7\text{mm}$  et la longueur du côté du substrat sont  $a=60\text{mm}$ .

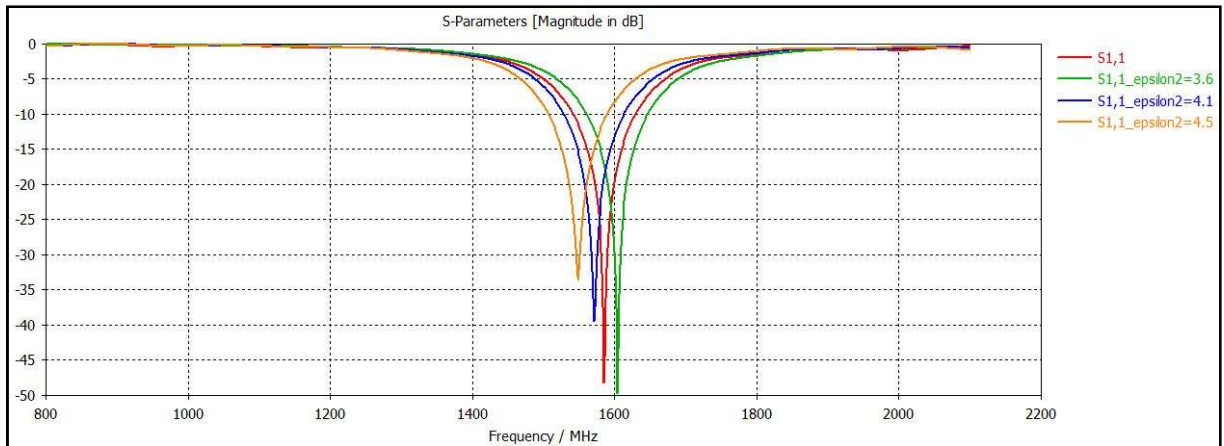


Figure (III-19) : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r2}$ ).

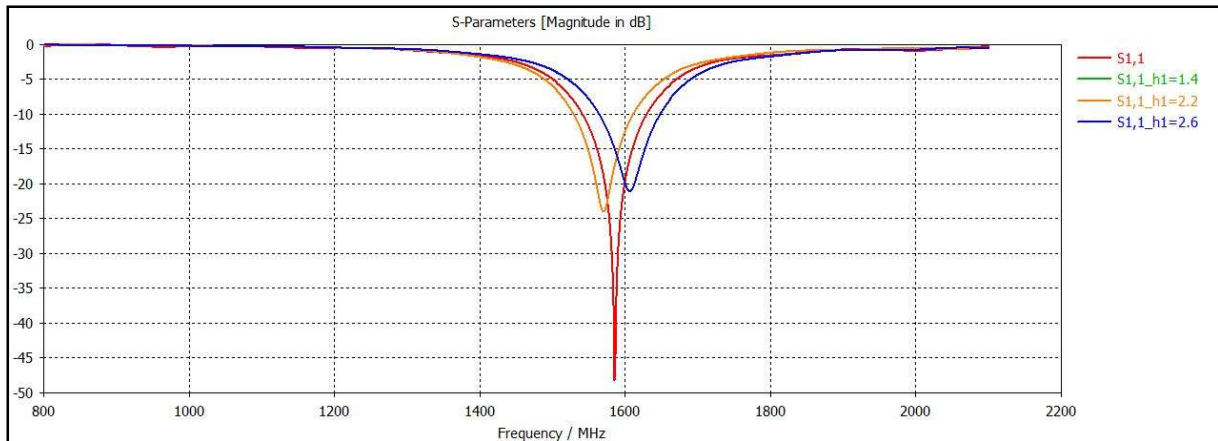
Permittivité ( $\epsilon_{r2}$ )	Fréquence de résonance (MHz)	Bande passante (MHz)
3.6	1603.4	88.311
3.87	1585.2	88.311
4.1	1570.9	87.032
4.5	1548.8	83.196

Tableau (III-3) : Variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de valeur de la constante diélectrique ( $\epsilon_{r2}$ ).

À partir du Tableau (III-3) et les courbes de la Figure (III-19) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ , on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .

### III.6.3. Effet de l'épaisseur du substrat $h_1$

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur de substrat  $h_1$  d'une antenne patch carré et la longueur du côté  $L=30\text{mm}$ , les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  leurs épaisseurs  $h_2=2.7\text{ mm}$ , la longueur du côté du substrat  $a=b=60\text{mm}$ .



Figure(III-20) Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_1$ (mm)

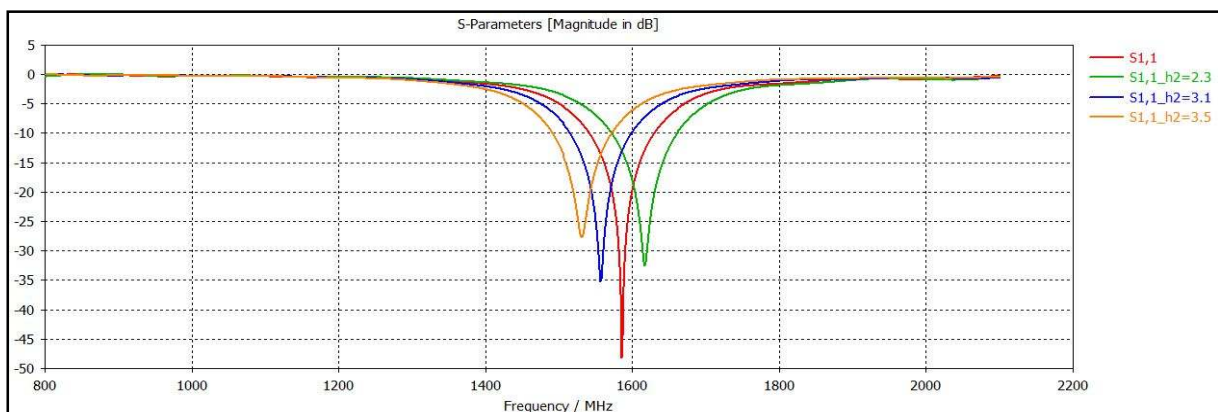
épaisseur de $h_1$ (mm)	Fréquence de résonance(MHZ)	Bande passante(MHZ)
1.4	1570.9	83.014
1.8	1585.2	88.128
2.2	1596.9	89.406
2.6	1606	89.892

Tableau (III-4) : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_1$ .

À partir du Tableau (III-4) et les courbes de la Figure (III-20) pour différentes valeurs de l'épaisseur de substrat  $h_1$ , on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat.

### III.6.4.Effet de l'épaisseur du substrat $h_2$

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur de substrat  $h_2$ d'une antenne patch carré longueur du côté  $L=30$ mm,les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} =1$ , et  $\epsilon_{r2} =3.87$  leur épaisseur  $h_2=2.7$  mm, la longueur du côté du substrat  $a=60$ mm.



Figure(III-21) Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_2$ (mm).

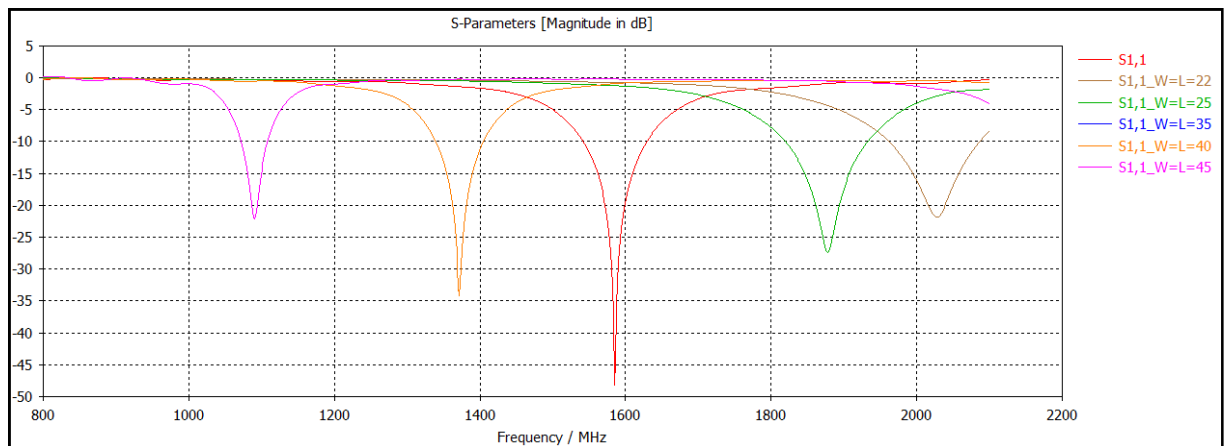
épaisseur $deh_2$ (mm)	Fréquence de résonance (MHz)	Bande passante (MHz)
2.3	1616.4	89.406
2.7	1585.2	88.128
3.1	1556.6	84.292
3.5	1531.9	81.735

**Tableau (III-5) : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_2$ .**

À partir du Tableau (III-5) et les courbes de la Figure (III-21) pour différentes valeurs de l'épaisseur de substrat  $h_2$ . La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur  $h_2$  du substrat.

### III.6.5. Effet de la variation des dimensions de la longueur du côté patch carré

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de la longueur du côté du patch carré  $L$ (mm), les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1}=1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$  leurs épaisseurs  $h_1=1.8$  mm et  $h_2=2.7$ mm, la longueur du côté du substrat  $a=60$ mm.



**Figure (III- 22) : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes variations de longueur et de largeur du patch carré.**

À partir des courbes du coefficient de réflexion  $S_{11}$  Figure (III-22), on déduit la fréquence de résonance et la bande passante de la structure étudiée en fonction de la variation de longueur et de la largeur du patch carré Tableau (III-6).

longueur du côté (L)du patch carré(mm)	Fréquence de résonance(MHZ)	Bande passante(MHZ)
L=22	2027.2	126.4
L=25	1877.7	114.85
L=30	1585.2	88.962
L= 35	1372	67.077
L=40	1372	65.75
L=45	1089.9	36.556

Tableau (III-6) : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de lalongueur du côté du patch carré.

A partir du Tableau (III-6) et les courbes de la Figure (III-22) pour différentesvaleurs dulongueur du côté du patch carré .On remarque que la fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la diminution de lalongueur du côté du patch carré.

### III .7.Influence des paramètres de l’antenne sur la directivité

#### III.7.1.Effet de la variation de la permittivité( $\epsilon_{r1}$ )

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  d'une antenne pour lalongueur du côté du patch carré  $L = 30mm$ ,les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r2} = 3.87$  (Paper (OilImpregnated)), et leurs épaisseur  $h_1 = 2.7mm$  et  $h_2 = 1.8 mm$ , la longueur du côté du substrat  $a = 60mm$ .

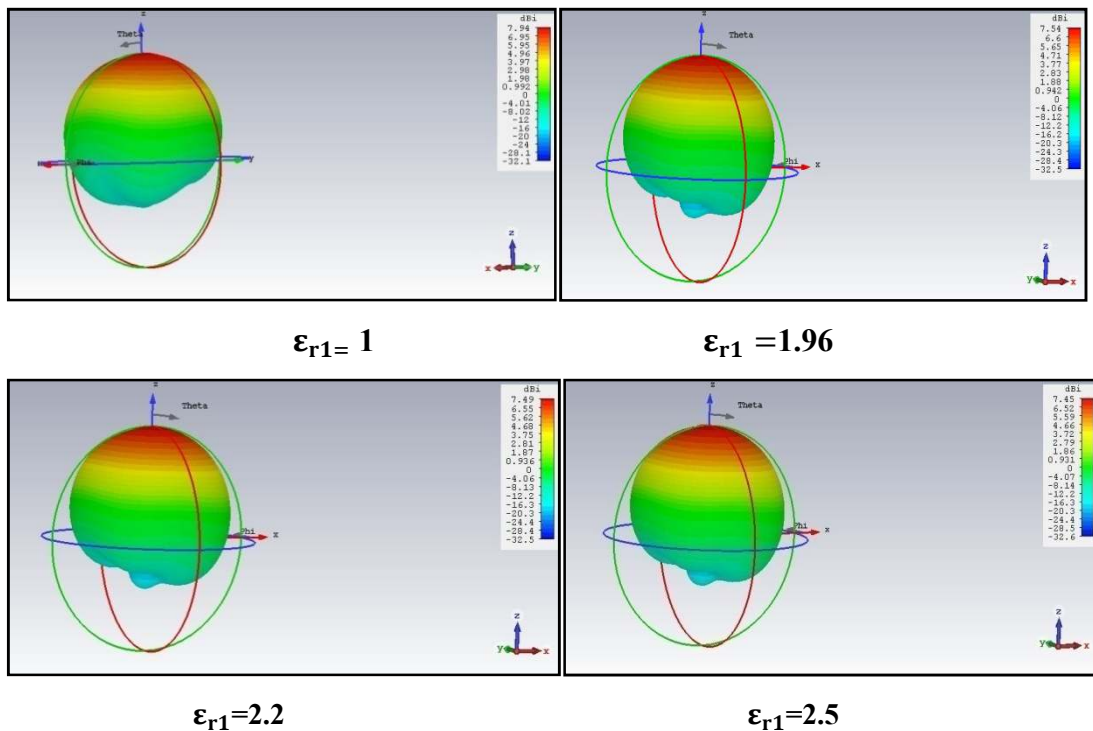


Figure (III-23) : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$ .

À partir de Figure (III-23) on déduit la directivité sur le Tableau (III-7)

La constante diélectrique $\epsilon_{r1}$	Directivité (dBi)
1	7.94
1.96	7.54
2.2	7.49
2.5	7.45

Tableau (III-7) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité  $\epsilon_{r1}$ .

À partir du Tableau (III-7) et la Figure (III-23) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  du substrat on note que: la directivité dépend de la permittivité  $\epsilon_{r1}$ , et la variation de la directivité diminue avec l'augmentation de  $\epsilon_{r1}$ .

### III.7.2. Effet de la variation de la permittivité $\epsilon_{r2}$

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$  d'une antenne pour une longueur du côté du patch carré  $L=30\text{mm}$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et leurs épaisseurs  $h_2=2.7\text{mm}$  et  $h_1=1.8\text{mm}$ , la longueur du côté du substrat  $a=60\text{mm}$ .

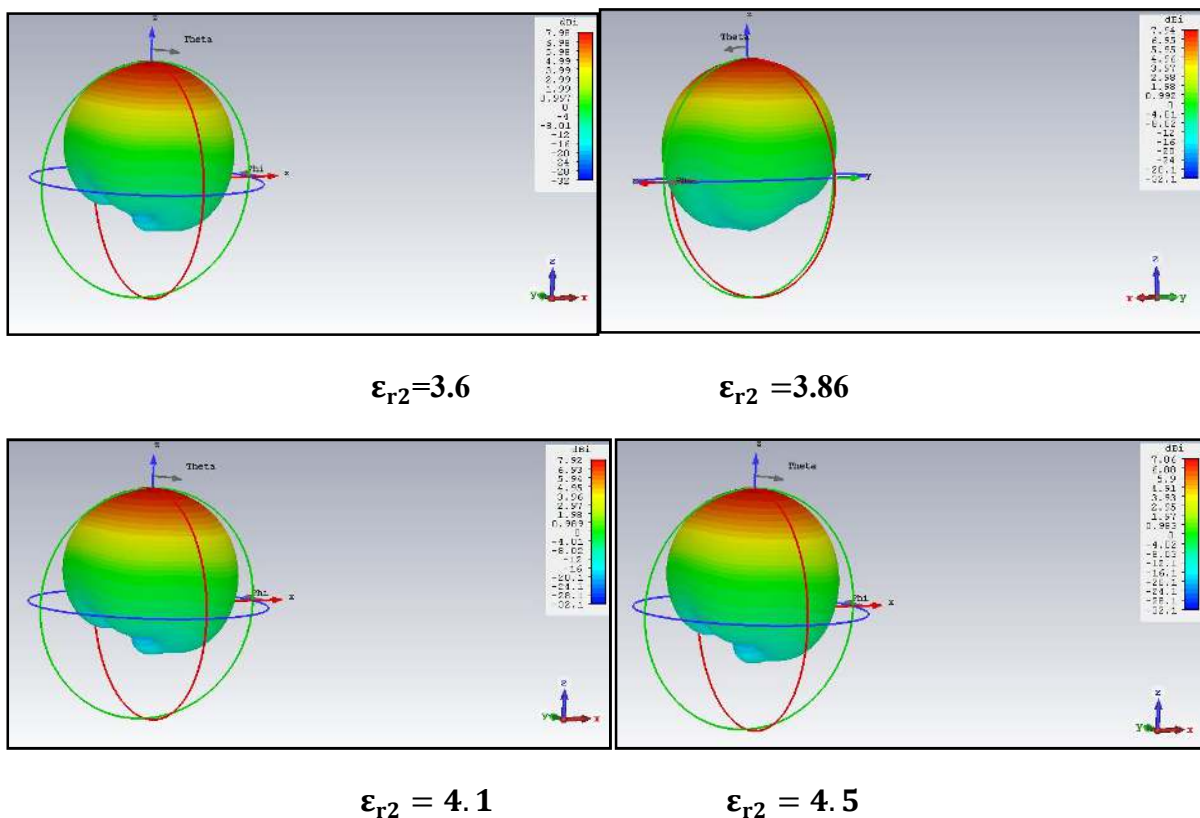


Figure (III-24) : La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .

À partir de Figure (III-24) on déduit la directivité du Tableau (III-8).

La constante diélectrique $\epsilon_{r2}$	Directivité (dBi)
3.6	7.98
3.87	7.94
4.1	7.92
4.5	7.86

Tableau (III-8) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .

À partir du Tableau (III-8) et la Figure (III-24) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$  du substrat on note que: la directivité dépend de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ , elle diminue avec l'augmentation de  $\epsilon_{r2}$ .

### III.7.3.Effet de l'épaisseur du substrat $h_1$

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur de substrat  $h_1$  d'une antenne patch carrée de longueur du côté  $L = 30\text{mm}$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  leur épaisseur  $h_2 = 2.7\text{ mm}$ , la longueur du côté du substrat  $a = 60\text{mm}$ .

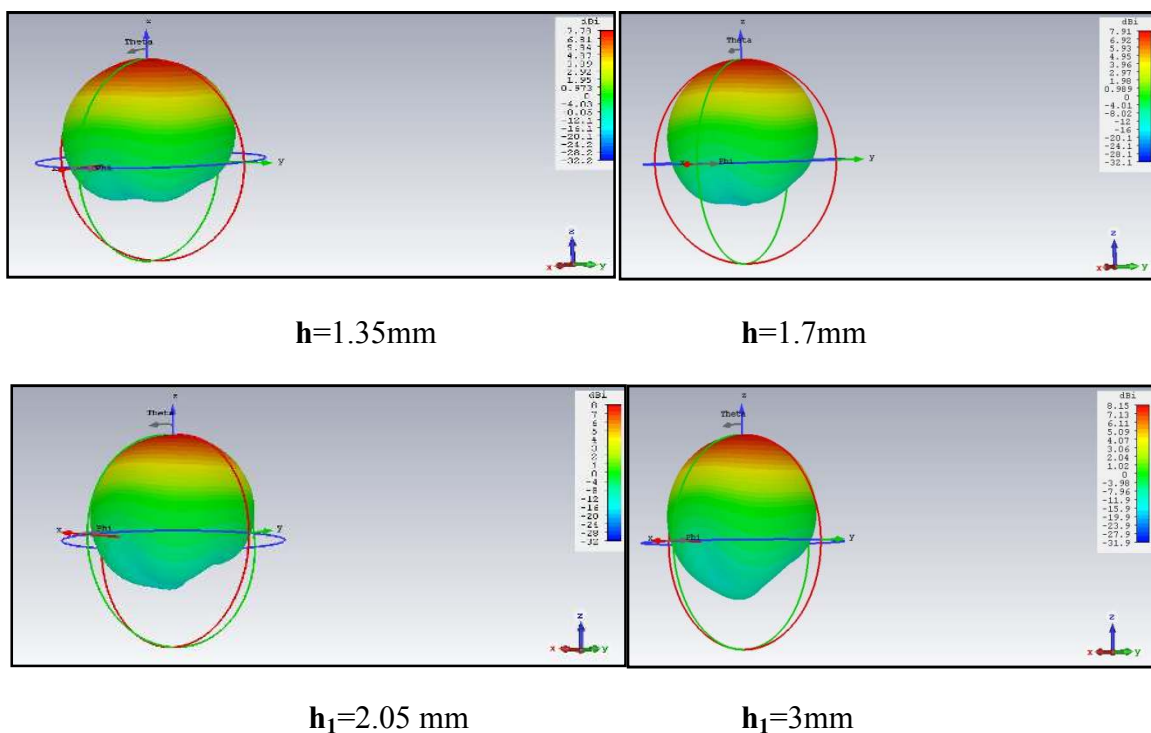


Figure (III-25) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur  $h_1$ (mm).

À partir de Figure (III-25) on déduit la directivité sur le Tableau (III-9)

épaisseur de $h_1$ (mm)	Directivité (dBi)
1.4	7.78
1.8	7.94
2.2	7.99
2.6	8.04

Tableau (III-9)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch  $h_1$ (mm)

À partir du Tableau (III-9) et la Figure (III-25) pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$ , on note que la directivité dépend de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$ , et la directivité augmente avec l'augmentation de  $h_1$ .

### III.7.4.Effet de l'épaisseur du substrat $h_2$

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur de substrat  $h_2$  d'une antenne patch carré de longueur du côté  $L = 30mm$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  leur épaisseur  $h_2 = 2.7$  mm, la longueur du côté du substrat  $a = 60mm$ .

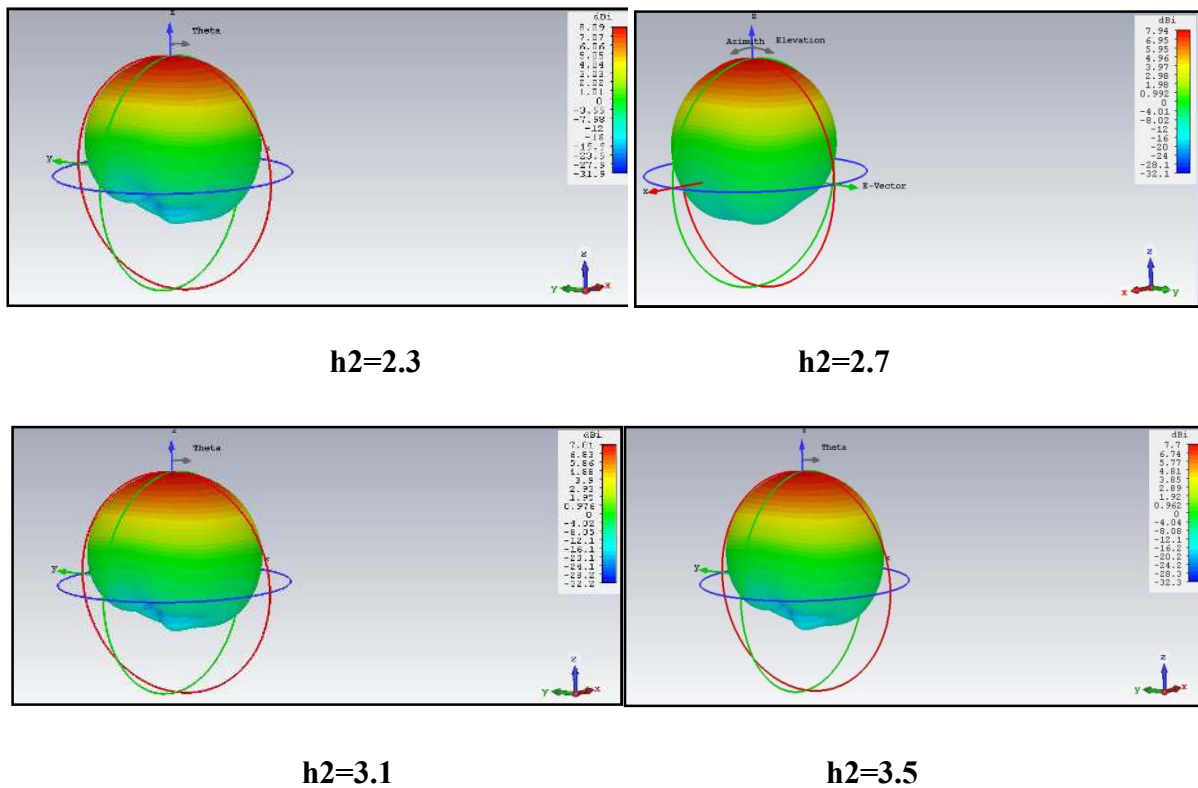


Figure (III-26) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur  $h_2$ (mm).

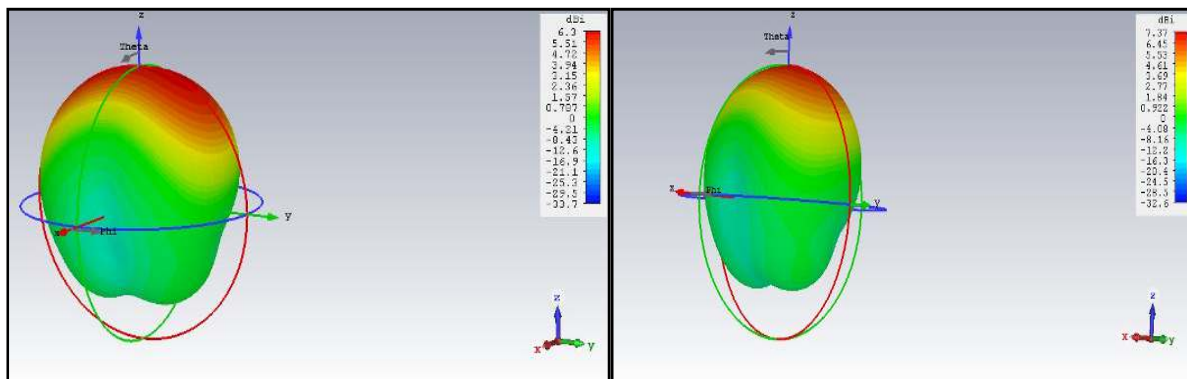
Épaisseur de $h_2$ (mm)	Directivité (dBi)
2.3	8.02
2.7	7.94
3.1	7.87
3.5	7.81

Tableau (III-10)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch  $h_2$ (mm).

À partir du Tableau (III-10) et la Figure (III-26) pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$ , on note que la directivité dépend de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$ , elle augmente avec la diminution de  $h_2$ .

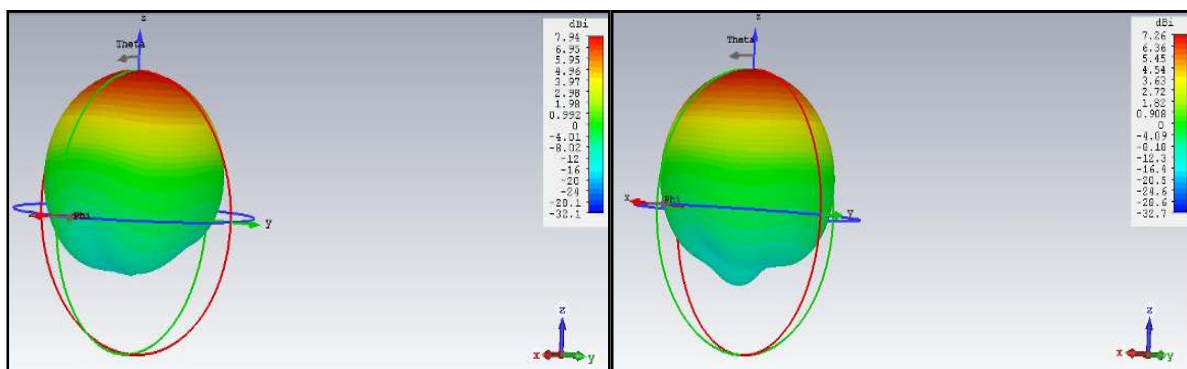
### III.7.5. L'effet de Variation des dimensions du patch carré

On étudie la variation de la directivité en fonction de la variation de longueur du côté du patch carré, les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  leurs épaisseurs  $h_1 = 1.8$  mm et  $h_2 = 2.7$  mm, la longueur du côté du substrat  $a = 60$  mm.



L=22mm

L=25mm



L=30mm

L=35mm

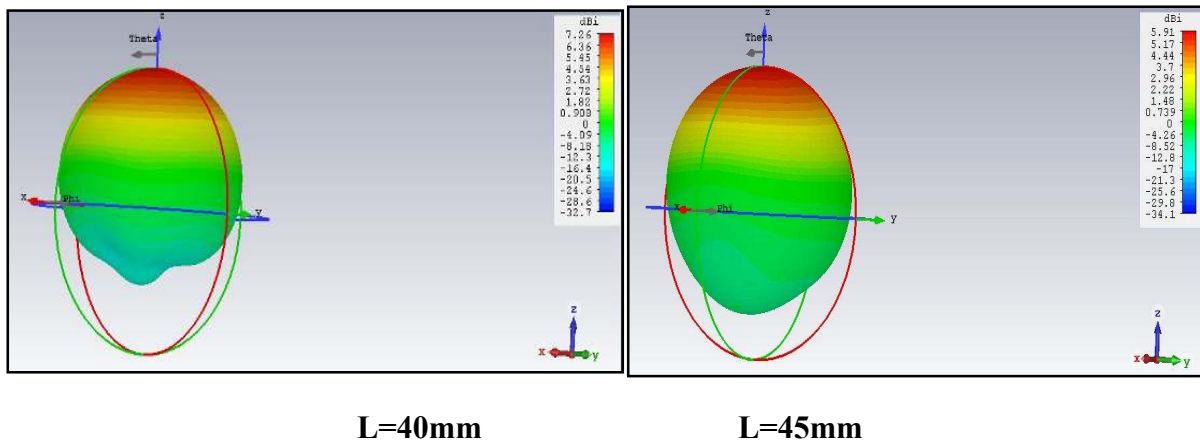


Figure (III-27) : la directivité en 3D pour une variation du longueur côté (L) du patch carré.

À partir de Figure (III-27) on déduit la directivité sur le Tableau (III-11).

Longueur du côté (L) du patch carré(mm)	Directivité (dBi)
22	6.3
25	7.37
30	7.94
35	7.26
40	7.26
45	5.91

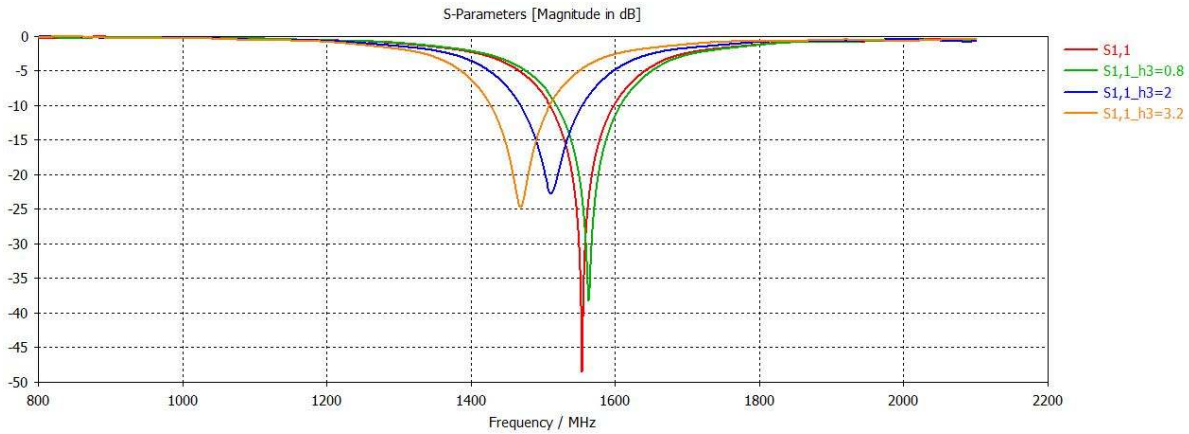
Tableau (III-11) : Variation de la directivité pour une variation du longueur du côté(L) du patch carré.

À partir du Tableau (III-11) et la Figure (III-27) pour différentes valeurs de la longueur côté(L) du patch carrée on note que la directivité dépend longueur du côté (L) du patch carré, mais la variation de la directivité n'est pas uniforme.

### III .8.Influence des défauts du substrat BIE sur les caractéristiques de l'antenne

#### III.8.1.Effet de l'épaisseur de la couche insérée (défaut) $h_3$ du substrat BIE

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  sa permittivité  $\epsilon_{r3} = 4$  d'une antenne patch carré : la longueur du côté  $L = 30 \text{ mm}$ , les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  et leurs épaisseurs  $h1 = 1.8 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 2.7 \text{ mm}$  la longueur du côté du substrat  $a = 60 \text{ mm}$ .



Figure(III-28) Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_1$ (mm)

Épaisseur de $h_3$ (mm)	Fréquence de résonance (MHz)	Bande passante(MHz)
0.8	1563.1	89.406
2	1511.1	85.571
3.2	1468.2	83.014

Tableau (III-12) : Fréquence de résonance et bande pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_1$ .

À partir du Tableau (III-12) et les courbes de la Figure (III-28) pour différentes valeurs de l'épaisseur de substrat  $h_3$ , on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat.

### III.8.2.Effet de la variation de la permittivité de la couche insérée (défaut)( $\epsilon_{r3}$ )du substrat BIE

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction de la variation de la permittivité la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) son épaisseur est  $h_3=1$  mm,d'une antenne patch carré sa longueur du côté  $L=30$ mm,les deux couches diélectriques ont les permittivités : $\epsilon_{r1} =1$ , et  $\epsilon_{r2} =3.87$  leurs épaisseurs  $h_2=2.7$  mm et  $h_1=1.8$  mm, la longueur du côté du substrat  $a=60$ mm.

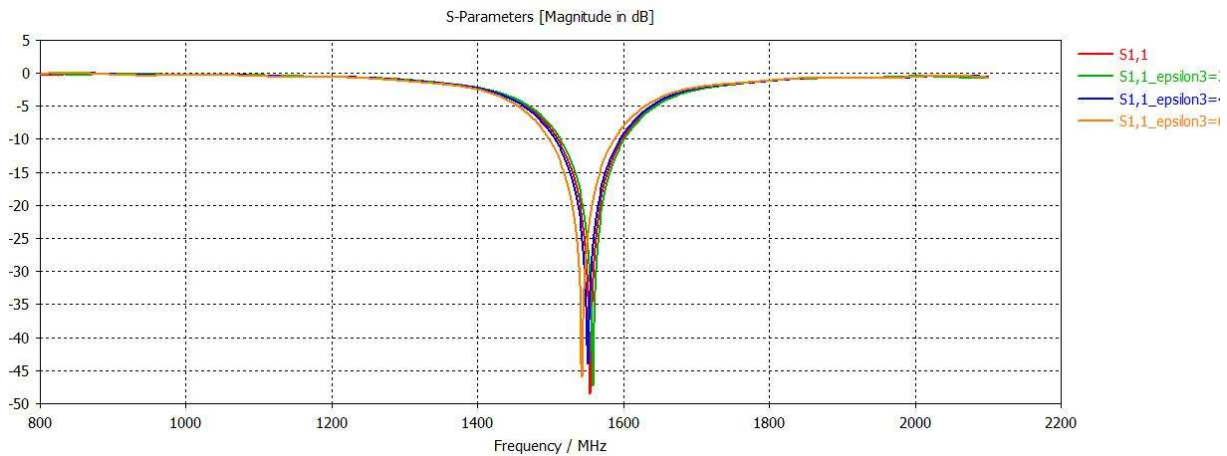


Figure (III-29) : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r3}$ ).

À partir de Figure (III-29) on déduit la directivité sur le Tableau (III-13)

Permittivité( $\epsilon_{r3}$ )	Fréquence de résonance(MHz)	Bande passante(MHz)
3.6	1557.9	43.379
4	1554	44.658
4.5	1551.4	45.936
6.15	1543.6	45.936

Tableau(III-13)La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la ( $\epsilon_{r1}$ ).

À partir du Tableau (III-13) et les courbes de la Figure (III-29) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r3}$ , on remarque que la fréquence de résonance diminuent et la bande passante augmente avec l'augmentation de la permittivité  $\epsilon_{r3}$ .

### III .9.Influence des paramètres de l'antenne sur la directivité à défauts

#### III.9.1.Effet de l'épaisseur de la couche insérée (défaut) $h_3$ du substrat BIE

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  sa permittivité  $\epsilon_{r3} = 4$  d'une antenne patch carré : la longueur du côté  $L=30$  mm, les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  et leurs épaisseurs  $h_1 = 1.8$  mm,  $h_2 = 2.7$  mm la longueur du côté du substrat  $a = 60$  mm.

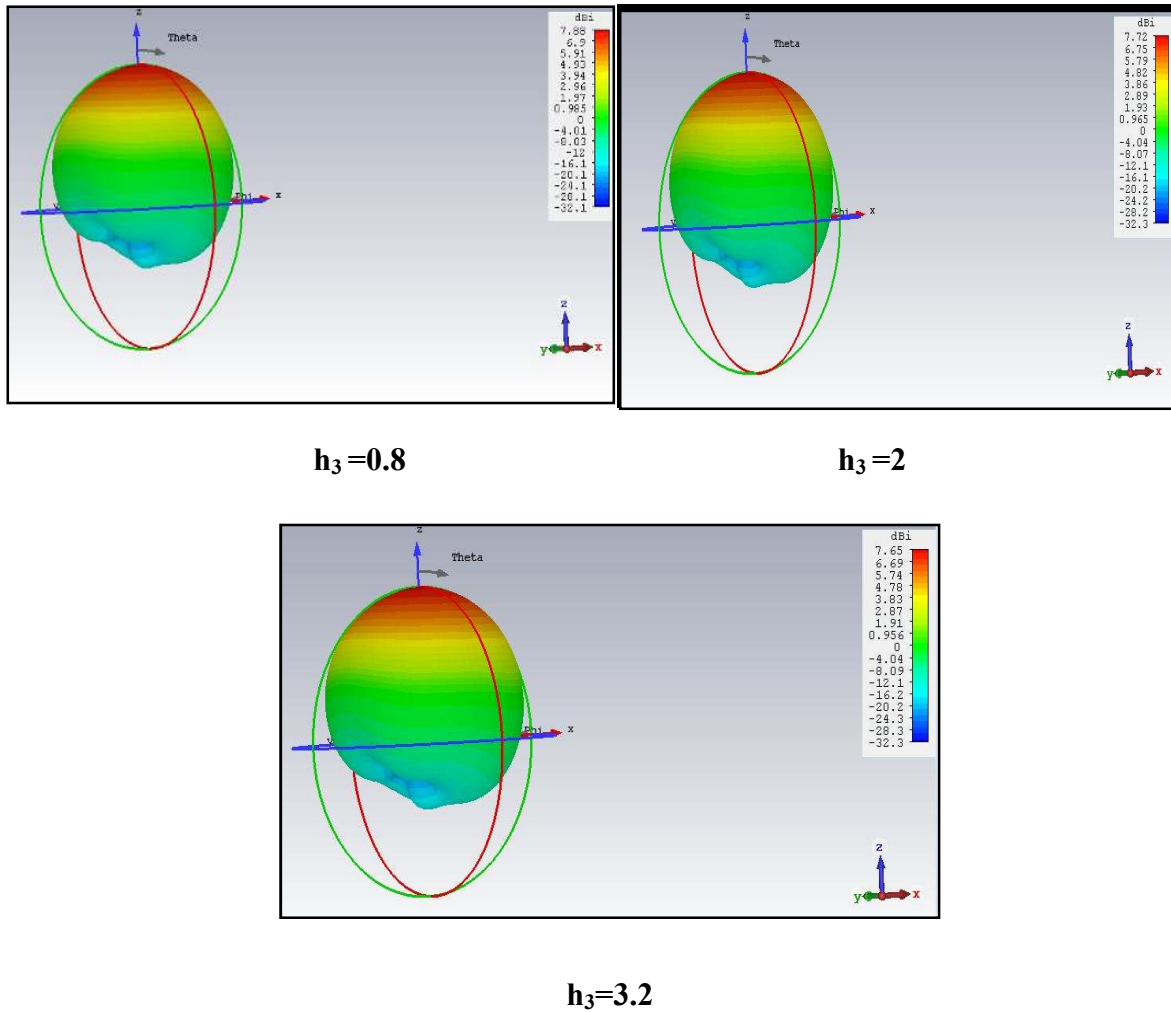


Figure (III-30) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur  $h_3$ (mm).

À partir de Figure (III-30) on déduit la directivité sur le Tableau (III-14)

Épaisseur de $h_3$ (mm)	Directivité (dBi)
0.8	7.88
2	7.72
3.2	7.65

Tableau (III-14)Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch  $h_3$ (mm)

À partir du Tableau (III-14) et la Figure (III-30) pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat du patch  $h_3$  (défaut), on note que la directivité dépend de l'épaisseur du substrat du patch  $h_3$  mais la directivité diminue avec l'augmentation de  $h_3$ .

**III.9.2.Effet de la variation de la permittivité de la couche insérée (défaut)( $\epsilon_{r3}$ )du substrat BIE**

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction de la variation de la permittivité la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) son épaisseur est  $h_3=1$  mm,d'une antenne patch carré et la longueur du côté  $L = 30$  mm, les deux couches diélectriques ont les permittivités : $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$  leurs épaisseurs  $h_2=2.7$  mm et  $h_1 = 1.8$  mm, la longueur du côté du substrat  $a=60$ mm.

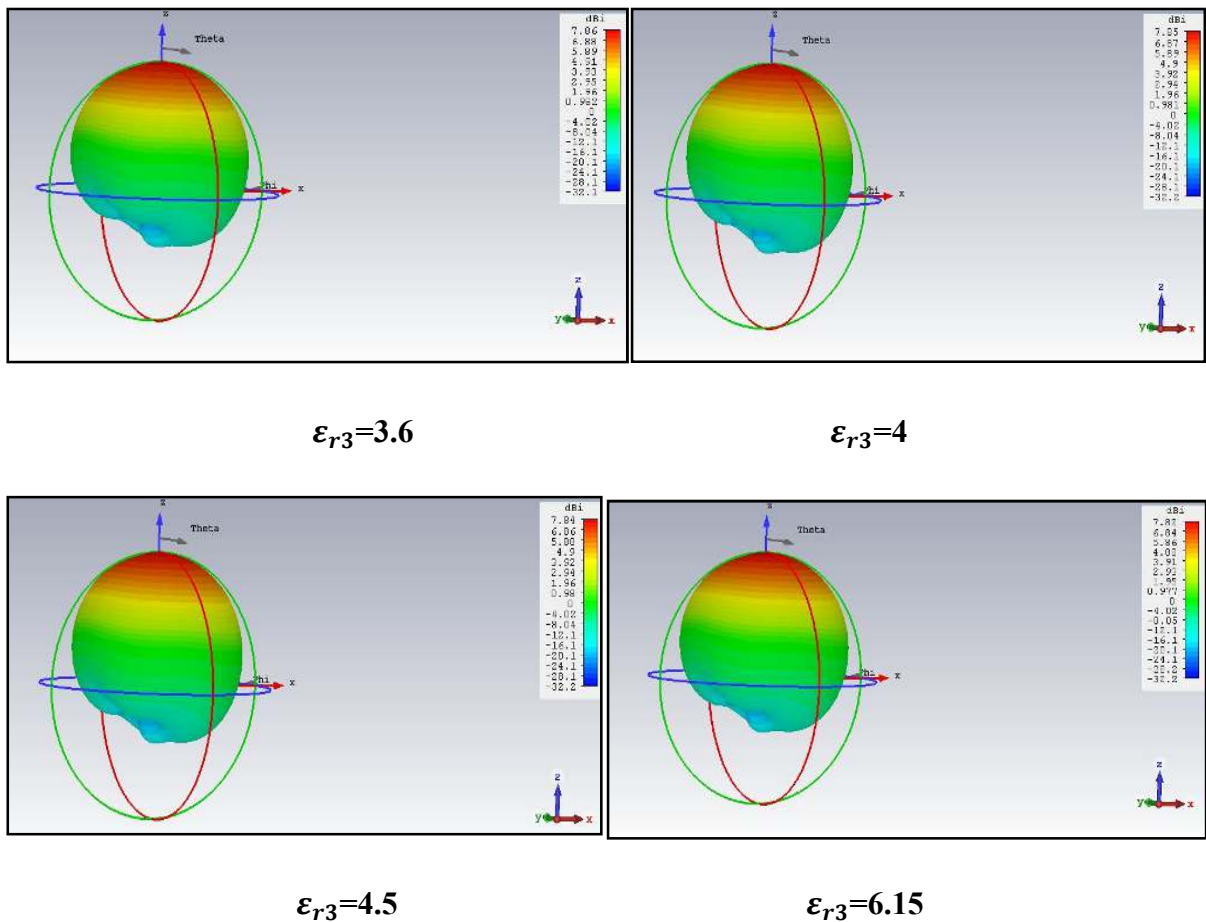


Figure (III-31) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de la permittivité.

À partir de Figure (III-31) on déduit la directivité sur le Tableau (III-15)

variation de la permittivité( $\epsilon_{r3}$ )	Directivité (dBi)
3.6	7.86
4	7.85
4.5	7.84
6.15	7.82

Tableau (III-15) : Variation de la directivité en fonction de la permittivité $\epsilon_{r3}$ .

À partir du Tableau (III-15) et la Figure (III-31) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r3}$  du substrat on note que: la directivité diminue avec l'augmentation de  $\epsilon_{r3}$ .

## II.10.Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié une antenne microruban de forme carré imprimée sur un substrat à BIE1D qui est utilisé dans les applications 3G de bande passante [800MHZ,2100MHZ], et nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques (les dimensions longueur du côté(L)du patch carré, l'épaisseur de substrat) et les permittivités des couches du substrat de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Le logiciel CST intègre, la simulation, la visualisation et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement 3D avec une bonne précision. À partir des résultats nous avons conclu que :

### A- Pour la fréquence de résonance et la bande passante

- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ .
- La fréquence de résonance diminue et la bande passante augmente avec l'augmentation de la permittivité de la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) du substrat BIE.
- L'augmentation de la fréquence de résonance et la bande passante avec l'augmentation d'épaisseur du substrat  $h_1$ .
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat  $h_2$ .
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  du substrat BIE.
- Diminution de la fréquence de résonance et bande passante avec l'augmentation de la longueur du côté(L)du patch carré.

### B- Pour la directivité :

- La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat BIE par rapport à une antenne avec un substrat normal ;
- La directivité dépend des permittivités  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ .
- La directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité de la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) du substrat BIE.

- La directivité dépend des épaisseurs des couches du substrat  $h_1$  et  $h_2$ .
- La directivité diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  du substrat BIE.
- La directivité varie avec les dimensions de la longueur du côté(L)du patch carré.

**REFERENCES**

- [1] N. BELGACEM " conception des antennes PIFA MONO-BANDE ET MULTI-BANDES GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI " mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de Tlemcen, Juin 2013.
- [2] AZI Oussama 'Étude d'une antenne microruban rectangulaire à bande interdite photonique 1D' mémoire de master, Institut d'électronique, Université de M'sila; Juin 2015.
- [3] B. BECITA " Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques" mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [4] L. Barlatey, T. Sphicopoulos, J. R. Mosig and F. E. Gardiol, "Un nouveau modèle pour l'excitation coaxiale d'une antenne microruban", JINA' 1986 Journées internationales de Nice sur les Antennes, Nice, France, 4-6 Novembre 1986, pp. 221-223.
- [5] G. Pointaux "Contribution au développement d'un isolateur coplanaire à résonance par la méthode des différences finies dans le domaine temporel", thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées Lyon, juillet 2002.

***CONCLUSION***  
***GENERALE***

### Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était d'étudier une antenne microruban de forme carrée à substrats BIE à une dimension(1D), selon la fréquence de résonance et la directivité, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST basé sur la méthode d'intégration finie.

Nous avons commencé par la présentation, la description, le mécanisme de fonctionnement, les avantages, et les inconvénients des antennes patches à BIE, ainsi que les différents types d'alimentation, et leurs applications, en plus le principe des méthodes d'analyses les plus utilisées dans le domaine des antennes.

Cette modélisation a aussi permis d'étudier l'influence de divers paramètres de la structure à antenne microruban de forme carrée à BIE 1D sur la fréquence de résonance, et bande passante et la directivité.

Les matériaux BIE sont très prometteurs pour la réalisation des antennes et des composants planaires compacts et originaux.

L'étude d'une antenne microruban de forme carrée simulé sur un substrat à BIE, où nous avons les obtenus résultats:

- La fréquence de résonance augmente pour un substrat BIE par apport à un substrat normal.
- La fréquence de résonance diminue pour l'augmentation de la la longueur du coté du patch (relation inversement proportionnelle).
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ .
- La fréquence de résonance diminuent et la bande passante l'augmentation avec l'augmentation de la permittivité de la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) du substrat BIE.
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation des épaisseur des couches du substrat  $h_1$  et  $h_2$ .
- la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  du substrat BIE.
- Diminution de la fréquence de résonance et la bande passante avec augmentation de la longueur du coté(L) du patch carrée.

## Conclusion générale

---

- La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat BIE par rapport à une antenne avec un substrat normal ;
- La directivité dépend de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ .
- La directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité de la couche insérée (défaut) ( $\epsilon_{r3}$ ) du substrat BIE
- La directivité dépend des épaisseurs des couches du substrat  $h_1$  et  $h_2$ .
- La directivité diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche insérée (défaut)  $h_3$  du substrat BIE.

Nous avons utilisé un logiciel de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel 3D nommé **CST**.

Comme perspectives nous proposons l'étude et la réalisation des antennes patchs à BIE, ainsi que les réseaux antennes patchs à BIE.