

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

## **MEMOIRE DE MASTER**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : systèmes de télécommunication numériques (STN)

### THEME

***Etude D'une Antenne Micro- ruban  
Triangulaire A Bande Interdite Photonique  
(BIP) 1D***

*Proposé et dirigé par :*

*Dr. BENMEDDOUR.F*

*Réalisé par :*

*Dilmi Assia*

N° D'ordre: 2016 /STN 16/89/385

**PROMOTION: JUIN 2016**

# Remerciements

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

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

*Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'examen et l'étude de notre travail. Notre profonde gratitude à tous les Enseignants du Département d'Electronique qui nous ont encouragés à donner le meilleur de nous mêmes en nous assurant une formation aussi meilleure que possible .Un remerciement spécial aux Etudiants d'Electroniques et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

*Grand Merci...*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Mohamed pour sa patience avec moi et sa grande contribution.*

*A ceux qui sont les plus chères au monde, mes parents, à qui je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Pour leur amour et leur soutien tout au long de mes études.*

*A mes enfants Maram, Anes et la petite Bochra*

*A mes chers frères et ma petite sœur Amira.*

*A la famille Cheaa.*

*Et*

*A toute Ma Famille*

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

*Et à tous mes fidèles amis.*

*ASSIA DILMI*



# Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	x
Liste des abréviations.....	xi
Résumé .....	xii
ABSTRACT .....	xii
ملخص.....	xii

## Introduction générale:

Introduction générale.....	14
Bibliographie.....	16

## Chapitre I: généralités sur les antennes microrubans

I.1.Introduction.....	18
I.2.Historique .....	18
I.3.Définition et généralités sur les antennes .....	18
I.4.Applications.....	19
I.5.Présentation de la structure de l'antenne microruban.....	19
I.6. L'antenne a plaque triangulaire .....	22
I.7.Fonctionnement des antennes microrubans .....	22
I.8. Paramètres des antennes.....	24
I.8.1.Paramètres S .....	24
I.8.2.Le Diagramme de rayonnement .....	24
I.8.3.La directivité .....	25
I.8.4.Fréquence de résonance .....	25
I.8.5.Adaptation et condition d'adaptation .....	25
I.8.6.Bande passante et facteur de qualité .....	26
I.9.Choix des paramètres d'une antenne microruban.....	27
I.10.Critères de choix du substrat .....	27

I.10.1. Caractéristiques des matériaux diélectriques .....	27
I.10.1.1. Les matériaux céramiques .....	28
I.10.1.2. Les matériaux semi-conducteurs .....	28
I.10.1.3. Les matériaux ferrimagnétiques .....	28
I.10.1.4. Les matériaux synthétiques .....	28
I.10.1.5. Les matériaux photoniques .....	28
I.10.1.6. Les matériaux chiraux .....	29
I.10.1.7. Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material) .....	29
I.10.1.8. Les matériaux RO3000 .....	29
I.10.1.9. Les matériaux composites .....	29
I.10.2 Techniques d'alimentation .....	29
I.10.2.1. Alimentation avec la ligne microruban .....	30
I.10.2.2. Alimentation par câble coaxiale .....	30
I.10.2.3. Alimentation couplée par ouverture .....	31
I.10.2.4. Alimentation couplée par proximité .....	32
I.11. Méthodes d'analyse .....	34
I.11.1. Méthode analytiques .....	34
I.11.1.1. Modèle de la ligne de transmission .....	34
I.11.1.2. Modèle de la cavité .....	34
I.11.2. La méthodes numérique .....	35
I.11.2.1. La méthode d'intégration finie .....	35
I.11.2.2. Méthode des éléments finis .....	35
I.11.2.3. Méthode des différences finies .....	36
I.11.2.4. Méthode des moments .....	36
I.11.3. Méthodes d'optimisation .....	37
I.11.3.1. Algorithmes génétiques .....	37
I.11.3.2. Réseaux de neurones artificiels .....	38
I.12. Conclusion .....	38
Bibliographie .....	39

## **Chapitre II: Les cristaux photoniques**

II.1. INTRODUCTION .....	42
II.2. Définition des cristaux photoniques .....	42
II.3. Les différents types des cristaux photoniques .....	44

II.3.1.Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg).....	44
II .3.1.1.Ouverture d'une bande interdite 1D.....	45
II.3.1.2 Bande interdite complete.....	47
II.3.1.3.Largeur de la bande interdite photonique.....	47
II.3.1.4.Défauts ponctuels dans une structure périodique unidimensionnelle.....	48
II.3.2.Les cristaux photoniques bidimensionnels .....	49
II.3.2.1.Définition .....	49
II.3.2.2.Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnelles.....	49
II.3.3.Cristaux photoniques tridimensionnels.....	50
II.3.3.1.Structures « Tas de bois » .....	51
II.3.3.2.Opales.....	51
II.4.Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique.....	51
II.4.1.Le contraste d'indice $\delta$ .....	51
II.4.2.Les périodes .....	52
II.4.3.Le facteur de remplissage f.....	52
II.5.Les pertes dans les guides à cristaux photoniques.....	52
II.6.Les différentes Applications des cristaux photoniques .....	53
II.6.1 Guides d'ondes.....	53
II.6.2.Cavités.....	54
II.6.3 Filtres et multiplexeurs.....	55
II.6.4.Les fibres optiques .....	55
II.6.5.Réflecteurs et antennes.....	56
II.6.6.Application des BIP dans le domaine des micro-ondes et des antennes.....	56
II.7.Cristaux photoniques pour la conception d'antennes directives.....	56
II.8.Conclusion .....	57
Bibliographie.....	58

## **Chapitre III :Présentation du logiciel CST**

III.1.Introduction .....	61
III.2.Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO .....	61
III.3.La méthode d'intégration finie .....	62
III .4. Exemple d'un projet en CST.....	64
III.4.1.Démarrer le logiciel .....	64
III .4.2 Créer le plan de masse .....	65

III. 4.3. Créer des substrats diélectriques.....	66
III.4.4 Créer le patch.....	67
III.4.5 Définir le port .....	71
III.4.6 Définir le domaine de fréquence.....	72
III.4.7 Définir les conditions au bord .....	72
III.4.8 La simulation .....	73
III.4.9.Résultats.....	73
III.5. conclusion.....	74
Bibliographie.....	75

## **Chapitre IV: Résultats et discussions**

IV.1. Introduction.....	77
IV.2. Présentation de la structure .....	77
IV.3. Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante .....	78
IV.3.1. Effet de la variation de la permittivité $\epsilon_{r1}$ .....	78
IV.3.2. Effet de la variation de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	79
IV.3.3. Effet de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	80
IV.3.4. Effet de la variation des dimensions du patch triangulaire.....	81
IV.3.5. Effet de la forme du patch triangulaire (type du triangle).....	82
IV.3.5.a. Les différents types de triangles.....	82
IV.4. Influence des paramètres de l'antenne sur la directivité .....	83
IV.4.1. Comparaisons entre un substrat cristal photonique et un substrat normal .....	84
IV.4.2. Effet de la variation de la constante diélectrique $\epsilon_{r1}$ .....	85
IV.4.3. Effets de la variation de permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	86
IV.4.4. L'effet de Variation de l'épaisseur de substrat $h_1$ .....	88
IV.4.6. L'effet de Variation de la forme de patch triangulaire (type de triangle) .....	90
IV.5. Conclusion .....	92
A-Pour la fréquence de résonance et la bande passante .....	92
B- Pour la directivité .....	92

## **Conclusion générale:**

Conclusion générale .....	94
---------------------------	----

## Liste des figures

### CHAPITRE I

#### Généralité sur les antennes microrubans

<b>Figure I-1</b> Structure d'une antenne microruban.....	19
<b>Figure I-2</b> Antenne à élément imprimé.....	19
<b>Figure I-3</b> Divers formes d'éléments rayonnants.....	19
<b>Figure I-4</b> Exemple d'une antenne microruban triangulaire.....	21
<b>Figure I-5</b> (a-b-c) Rayonnement d'une antenne microruban.....	22
<b>Figure I-6</b> Diagramme de rayonnement d'une antenne microruban rectangulaire et triangulaire.....	23
<b>Figure I-7</b> Alimentation par sonde coaxiale.....	24
<b>Figure I-8</b> Alimentation couplée par ouverture.....	25
<b>Figure I-9</b> Alimentation par proximité.....	29
<b>Figure I-10</b> Antenne microruban alimentée par sonde.....	30
<b>Figure I-11</b> Alimentation couplée par ouverture.....	31
<b>Figure I-12</b> Alimentation couplée par proximité.....	32

### CHAPITRE II

#### Les cristaux photoniques

<b>Figure II-1</b> Schéma de cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D.....	42
<b>Figure II-2</b> Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau quasi-périodique de billes de silice.....	42
<b>Figure II-3</b> Exemples de réalisations naturelles de structures périodiques. Ces structures apparaissent chez certaines espèces animales et minérales comme les souris de mers.....	43
<b>Figure II-4</b> Schéma d'un empilement.....	44
<b>Figure II-5</b> Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptré.....	44
<b>Figure II-6</b> (a) Représentation schématique d'un miroir de Bragg constitué de 2 types de couches de permittivité $\epsilon_1$ et $\epsilon_2$ . La maille du cristal est $a = a_1 + a_2$ . (b)	

Schémas des réflexions sur les mailles successives.....	44
<b>Figure II-7</b> .....	45
<b>Figure II-8</b> Structures de bandes photoniques pour des réseaux de Bragg de pas $a$ avec (a) des couches de permittivité $\varepsilon = 13$ et $12$ et (b) de permittivité $\varepsilon = 13$ et $1$ .....	46
<b>Figure II-9</b> Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle.....	47
<b>Figure II-10</b> Densité d'états en bleue, nulle dans la bande photonique interdite, sauf dans un défaut, les modes peuvent exister ligne en rouge.....	47
<b>Figure II-11</b> Structures bidimensionnelles: (a) déconnectée (b) connectée.....	48
<b>Figure II-12</b> Différents réseaux.....	49
<b>Figure II-13</b> Structure 3D : a) Schéma de fabrication de la Yablonovite, b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA [Cuisin 2000] et c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium [Sandia 2006].....	49
<b>Figure II-14 (a-</b> Structure « tas de bois » <b>b-</b> Les opales).....	50
<b>Figure II-15</b> Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.....	51
<b>Figure II-16</b> guides d'onde à cristaux photoniques: a) droit, b) coudé.....	53
<b>Figure II-17</b> cavités sur membrane suspendue : a) cavité triangulaire b) cavité hexagonale, entourées par un cristal photonique triangulaire.....	53
<b>Figure II-18</b> La structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add-Drop.....	54
<b>Figure II-19</b> Exemple de fibre à cristal photonique.....	54

## CHAPITRE III

### Présentation du logiciel CST

<b>Figure III-1</b> Interface graphique de CST MICROWAVE STUDIO.....	61
<b>Figure III-2</b> La fenêtre principale du logiciel CST(2015).....	62
<b>Figure III-3</b> La fenêtre d'accueil.....	63
<b>Figure III-4(a-b-c-d)</b> La fenêtre de créer un nouveau projet.....	64
<b>Figure III-5</b> Créer un plan de masse.....	65
<b>Figure III-6</b> Créer des substrats diélectriques.....	66
<b>Figure III-7 (a-b-c-d-e-f-g-h-i-j-k-l-m)</b> Créer le patch.....	70
<b>Figure III-8 (a-b-c)</b> Définir le port.....	71

<b>Figure III-9</b> Définir le domaine de fréquence.....	71
<b>Figure III-10</b> Définir les conditions au bord.....	72
<b>Figure III-11</b> choisir la précision.....	72
<b>Figure III-12</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour une antenne patch triangulaire.....	72
<b>Figure III-13</b> directivité en 3D d'une antenne patch triangulaire.....	73

## CHAPITRE IV

### Résultats et discussions

<b>Figure VI-1</b> La Structure d'une antenne microruban.....	76
<b>Figure IV-2</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour une antenne patch triangulaire.....	76
<b>Figure IV-3</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ )...77	77
<b>Figure IV-4</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r2}$ )..78	78
<b>Figure IV-5</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	79
<b>Figure IV-6</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différentes valeurs de la surface du patch triangulaire (S).....	80
<b>Figure IV-7</b> Les différent types de triangles.....	81
<b>Figure IV-8</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour différents types du triangle .....	82
<b>Figure IV-9</b> Structure des antennes : <b>a)</b> à substrat cristal photonique <b>b)</b> à substrat normal...83	83
<b>Figure IV-10</b> La directivité en 3D : <b>a)</b> Substrat cristal photonique <b>b)</b> Substrat normal.....	83
<b>Figure IV-11</b> La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité $\epsilon_{r1}$ .....	85
<b>Figure IV-12</b> la directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	86
<b>Figure IV-13</b> La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur $h_1$ .....	87
<b>Figure IV-14</b> la directivité en 3D pour une variation de la surface S du patch .....	89
<b>Figure III-15 (a-b-c)</b> Directivité pour différentes formes de triangle.....	90

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation .....	32
<b>Tableau IV -1</b> La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ ).....	78
<b>Tableau IV-2</b> Variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de valeur de epsilon ( $\epsilon_{r2}$ ).....	79
<b>Tableau IV-3</b> Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat $h_1$ .....	80
<b>Tableau IV-4</b> Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la surface du patch triangulaire (S).....	81
<b>Tableau IV -5</b> Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différents types du triangle.....	82
<b>Tableau IV-6</b> La directivité pour différents substrats.....	84
<b>Tableau IV-7</b> Variation de la directivité pour différents valeurs de la permittivité $\epsilon_{r1}$ .....	85
<b>Tableau IV-8</b> Variation de la directivité en fonction de la permittivité $\epsilon_{r2}$ .....	86
<b>Tableau IV-9</b> Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch $h_1$ (mm) .....	88
<b>Tableau IV-10</b> Variation de la directivité pour une variation de la surface S du patch.....	89
<b>Tableau IV-11</b> Variation de la directivité en fonction de différents types de patch triangulaire.....	90

## Liste Des Abréviations

**BIP:** Bande Interdite Photonique.

**CP:** Cristaux Photonique.

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

**CST:** Computer Simulation Technology.

**TMM:** Thermoset Microwave Material.

**FIT:** Finite Integration Technique.

**FDTD:** Finite Difference Time Domain.

**FEM:** Finite Element Method.

**MOM :** Moment Method.

**FVM:** Finite Volume Integral.

**PEC:** Perfect Electric Conducting.

## Résumé

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'une antenne microruban (patch) triangulaire à bande interdite photonique 1D.

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

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

**Mots clés:** antenne microruban triangulaire, cristaux photonique, miroir de Bragg.

## ABSTRACT

The main objective of our work is the study of a microstrip antenna (patch) triangular 1D photonic band gap.

We study the influence of geometric parameters of the antenna on the resonance frequency and bandwidth and directivity. The parameters that were studied: the permittivity of the substrate, the patch surface, the shape of the triangle patch.

By using electromagnetic simulation tool in the frequency domain based on CST is the finite integration method.

**Keywords:** triangular microstrip antenna, crystal photonics, Bragg mirror.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة هوائي مدقق مثلث الشكل ذو بلورات فوتونية احادية البعد.

قمنا بدراسة تأثير المعايير الأساسية للهوائي على التردد الرنان و عرض النطاق الترددي والاتجاهية, المعايير التي قمنا بدراستها هي:

مساحة الهوائي و شكل مثلث الهوائي و السماحية للطبقة العازلة. و ذلك باستعمال برنامج سى اس تى الذي يعتمد علي طريقة التكمالات المنتهية .

**كلمات مفتاحية:** هوائي مدقق مثلث الشكل, بلورات فوتونية, مرآة براغ.

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## Introduction générale

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 [1][2].

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, triangulaire, rectangulaire, etc...). Cet élément rayonnant est aussi appelé patch conducteur. Dans la pratique, les formes de l'élément rayonnant souvent utilisées sont le rectangle et le disque, et d'un substrat diélectrique sur lequel se dépose l'élément rayonnant et d'un plan de masse. Elles seront réservées à des applications militaires, aéronautiques et aérospatiales, par exemple. Aujourd'hui, avec l'explosion des télécommunications, les antennes imprimées sont implantées dans de nombreux dispositifs électroniques par exemple : les téléphones portables, les ailes des avions, etc... Ces antennes possèdent deux atouts majeurs à savoir leur faible coût de réalisation et leur capacité d'intégration [3][2].

Les matériaux à bandes photoniques interdites sont des structures artificielles qui présentent une modulation périodique de la constante diélectrique dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de cristaux photoniques à une, deux ou trois dimensions. Ces matériaux ont été découverts par Eli Yablonovitch à la fin des années 80 [4].

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

Des travaux tirant profit des propriétés des BIP ont alors vu le jour. Ainsi dans le domaine des antennes on a réussi à réduire le niveau des lobes secondaires en évitant de piéger le champ électromagnétique dans le plan de masse arrière de l'antenne [5].

En exploitant les propriétés de réflexions des cristaux photoniques dans le gap, nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériau BIP comme substrat d'antenne ou comme réflecteur dans le but d'augmenter la directivité des antennes [6].

Le travail développé dans ce mémoire a pour objectif l'analyse d'une antenne microruban triangulaire à bande interdite photonique 1D alimentée par câble coaxiale en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO. Nous avons étudié :

l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité, et comparé la directivité d'une structure à substrat normal et à substrat cristal photonique.

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

- ✚ Le premier chapitre de ce mémoire est une présentation générale des antennes microruban (imprimées). Après avoir rappelé les propriétés et caractéristiques de ces antennes, nous décrivons l'ensemble des techniques d'alimentations utilisées pour ce type d'antennes, et ainsi que les différentes méthodes d'analyse utilisées dans ce domaine.
- ✚ Dans le deuxième chapitre nous présentons les concepts de base liés aux cristaux photoniques. Nous étudions les différents types de cristaux photoniques, en insistant sur la notion de bande interdite photonique, avant d'entrer un peu plus dans les détails pour la structure qui va nous intéresser tout particulièrement : les cristaux unidimensionnels.
- ✚ Dans le troisième chapitre nous montrons comment créer, simuler et analyser une antenne microruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO.
- ✚ Dans le quatrième chapitre nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure à antenne microruban de forme triangulaire à substrat cristaux photonique 1D sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

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

## Bibliographie

- [1] M. HASSAD," Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux" mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2009.
- [2] 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.
- [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-Bekr Belkaid-Tlemcen, Février 2011.
- [4] S. Massaoudi "Etude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels en micro-onde : application à l'ultrarefraction" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, université paris XI, Février 2005.
- [5] A. Ourir "Applications de Matériaux Bandes Interdites Photoniques et de métamatériaux en Télécommunications "thèse de Doctorat, Université de Paris XI d'Orsay, décembre2006.
- [6] K. BOULELLI "Simulation des effets géométrique des cristaux Photoniques bidimensionnels "mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR

### LES ANTENNES

### MICRORUBANS

## I.1.Introduction

Les antennes microrubans (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 microruban 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 microrubans sont également très performantes en termes de résonance, d'impédance D'entrée et de diagramme de rayonnement. Les inconvénients majeurs des antennes Microrubans résident dans et une bande passante étroite [1].

Dans ce chapitre nous présentons la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, les inconvénients des antennes microrubans, 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.

## I.2.Historique

Le concept des antennes microrubans a été proposé la première fois en 1953 par Des champs, 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].

## I.3.Définition et généralités sur les antennes

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

lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception. L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants [3][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.

#### **I.4.Applications**

Pour de nombreuses applications, les avantages des résonateurs microrubans l'emportent largement face à leurs limitations. initialement, cette technologie du résonateur s'est trouvée fortement répandue dans les systèmes militaires de haute technologie, tels que missiles, roquettes, fusées, avions et satellites...etc [3].

Cependant, les résonateurs microrubans sont aujourd'hui de plus en plus répandus dans Le secteur commercial en raison de la réduction des coûts en matière de substrat Diélectrique et de maturité des technologies de résonateurs imprimés. En ³ effet, dans les Satellites de communication,des polarisations circulaires sont requises et peuvent être Réalisées à partir de plaque rayonnante de forme carrée ou bien circulaire en utilisant 1 à 2 Points d'alimentation. Les systèmes mobiles utilisant ces résonateurs sont les véhicules, mais Aussi les équipements de petite taille, tels que les téléphones portables, radars...etc [3].

#### **I.5.Présentation de la structure de l'antenne microruban**

Les antennes microbandes, construites par la technique des circuits imprimés, ont en général des bandes de fréquence étroites dans leur structure de base. L'antenne microbande est représentée dans la Figure (I-1), est constituée d'un mince conducteur métallique (habituellement de 17,5 à 35 $\mu m$  d'épaisseur en hyperfréquence et 9 $\mu m$  en millimétrique) de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat épais utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par l'effet joule et amélioré la bande passante de l'antenne, la face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse [4].

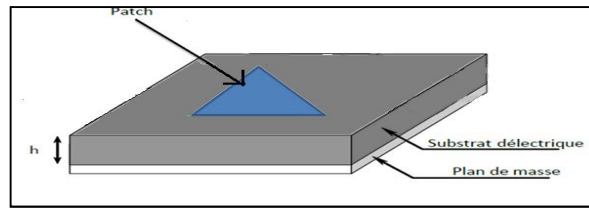


Figure I-1 Structure d'une antenne microruban.

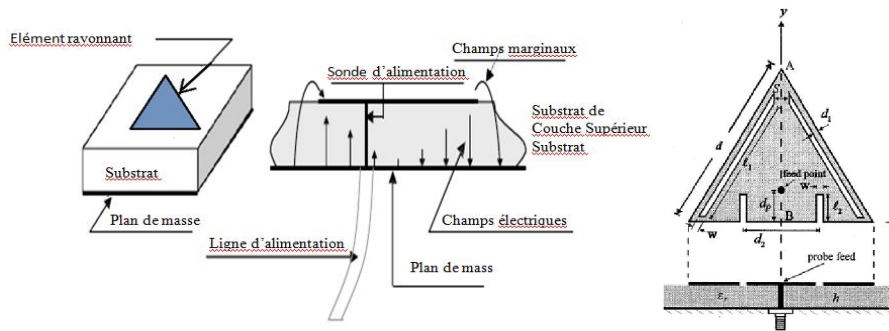


Figure I-2 Antenne à élément imprimé.

Les antennes microrubans rayonnent principalement en raison des champs marginaux entre le bord du patch et le plan de masse. Pour la bonne performance d'antenne, un substrat diélectrique épais ayant une faible constante diélectrique est souhaitable, puisque ceci fournit une meilleure efficacité, une largeur de bande plus grande et un meilleur rayonnement [1].

Afin de simplifier l'analyse et l'estimation des performances, le patch a généralement une forme rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique ou autre forme connue comme indiqué dans (la figure I.3). Pour un patch rectangulaire, sa longueur  $L$  est généralement  $0.3333 \lambda_0 < L < 0.5 \lambda_0$ , où est la longueur d'onde dans l'espace libre. Le patch est sélectionné de façon qu'il soit très mince ( $t \ll \lambda_0$ , où  $t$  est l'épaisseur du patch). La hauteur  $h$  du substrat diélectrique est habituellement  $0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$ . La constant diélectrique du substrat  $\epsilon_r$  est typiquement dans la gamme  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ .

En pratique, les formes des éléments rayonnants les plus utilisés sont montrées sur la Figure (I-3)

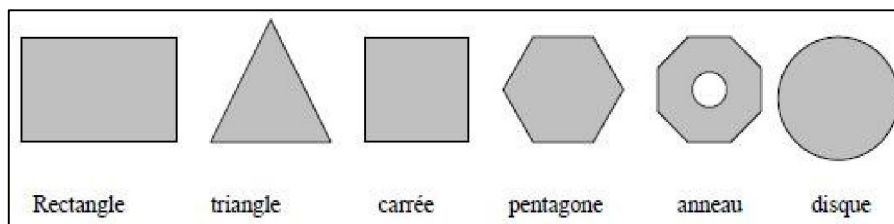


Figure I- 3 Divers formes d'éléments rayonnants.

La constante diélectrique est souhaitable, puisque ceci fournit une meilleure efficacité, une largeur de bande plus grande et un meilleur rayonnement. Cependant, une telle configuration mène à une taille d'antenne plus grande. Afin de concevoir une antenne microbande moins encombrante, on doit employer des constantes diélectriques plus élevées mais on va avoir une largeur de bande plus étroite. Par conséquent un compromis doit être fait entre les dimensions de l'antenne [5].

La réduction en taille d'une antenne se traduit généralement par une réduction importante de la bande passante ainsi qu'une diminution de son efficacité de rayonnement.

En effet, la réduction des dimensions de l'antenne entraîne une augmentation de l'intensité des champs électromagnétiques au voisinage de la structure. Les phénomènes de résonance susceptibles de se produire présentent alors un fort coefficient de qualité qui rend délicat l'adaptation de l'antenne ainsi que l'obtention de larges bandes passantes. C'est pourquoi, les antennes microrubans ont la particularité de présenter des performances médiocres qui se dégradent en même temps que leurs dimensions se réduisent [6].

De plus, les antennes sont sensibles aux matériaux métalliques et diélectriques qui constituent leur proche environnement de rayonnement. Ces phénomènes sont classiquement connus sous le nom d'effet de proximité. Citons comme cas particulier à ces effets, la structure sur laquelle ces antennes sont disposées est susceptible de modifier fortement leur fonctionnement, d'autant que les dimensions de cette structure sont généralement petites (de l'ordre de la longueur d'onde). Cette sensibilité peut aussi poser des problèmes d'expérimentation ou les systèmes de maintien et d'alimentation des antennes (câble coaxial) peuvent provoquer des modifications sur l'impédance d'entrée et le rayonnement.

Ces phénomènes s'expliquent également par la présence de forts champs électromagnétiques au voisinage de l'antenne microruban qui sont susceptibles de se coupler avec les proches structures environnantes [6].

Les substrats exploités dans la conception des antennes microrubans sont nombreux. Leurs permittivités relatives varient de 2.2 à 12 ( $2.2 < \epsilon_r < 12$ ). Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques de grande épaisseur et de basse permittivité dans le but d'avoir une grande efficacité, une large bande passante, mais dans ce cas la perte par onde de surface augmente et l'antenne devient de plus en plus encombrante. Au contraire, l'utilisation de minces substrats de permittivités élevées est conseillée pour les circuits micro-ondes parce qu'elle minimise les ondes de surfaces, les radiations non désirées et le volume de l'antenne.

Toutefois, l'efficacité et la bande passante diminuent à cause de la grande perte dans le substrat [1].

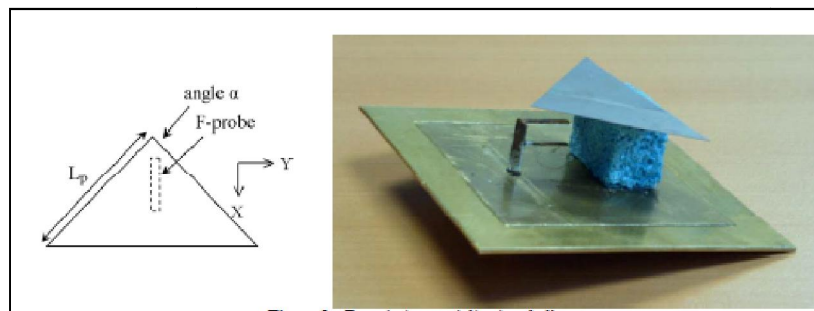
Le substrat joue deux rôles :

✚ **Electriquement** : C'est une partie intégrante de lignes de transmission, des circuits, et des antennes.

✚ **Mécaniquement** : C'est le support de la structure.

## I.6. L'antenne a plaque triangulaire

Ayant les mêmes propriétés de radiation que l'antenne rectangulaire, l'antenne à microruban triangulaire trouve une extensive utilisation pour la réalisation des antennes microrubans. Le triangle équilatéral est généralement le plus utilisé des types de plaques triangulaires, car il a la propriété de son facteur de qualité qui est élevée et l'avantage d'occuper moins d'espace, son inconvénient majeur réside dans sa bande passante qui est relativement étroite [7].



**Figure I- 4** Exemple d'une antenne microruban triangulaire.

## I.7.Fonctionnement des antennes microrubans

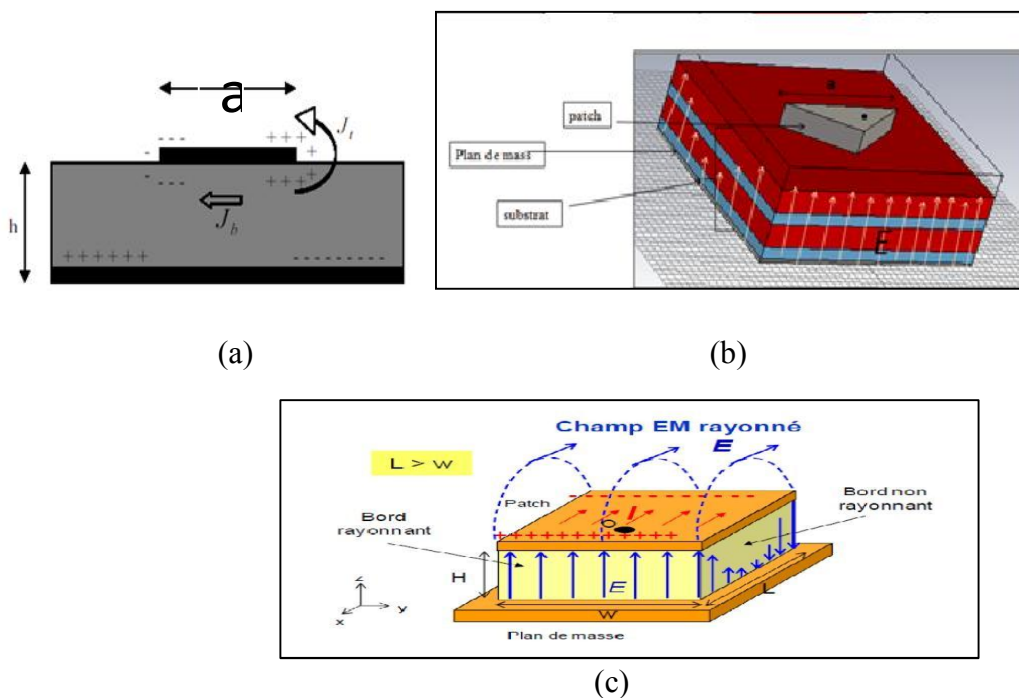
Dans son fonctionnement usuel, une antenne microruban sur substrat diélectrique peut être considérée en première approximation comme une cavité résonante imparfaite, présentant des murs magnétiques verticaux à pertes et des murs électriques horizontaux. Pour des fréquences appelées 'de résonance', cette cavité emmagasine de l'énergie électromagnétique selon un ensemble de modes de type  $TM_{mn}$ .

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

En général, le mode fondamentale est considéré comme étant le mode de fonctionnement

de ce type d'antennes. Ce mode emporte le maximum d'énergie et se caractérise par une répartition du champ électrique en dessous de l'élément rayonnant dont une dimension au moins est égale à une demi-longueur d'onde. Les courants surfaciques qui sont produits sur l'élément métallique sont dirigés selon l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [2].

Pour comprendre le fonctionnement d'une antenne microruban, il est nécessaire de connaître les champs électromagnétiques en champ proche. Lorsque la ligne d'alimentation est excitée par une source radiofréquence, une onde électromagnétique guidée entre la ligne et le plan de masse va se propager jusqu'à l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge va s'établir sous l'élément rayonnant, et sur le plan de masse [6][15].



**Figure I-5 (a-b-c)** Rayonnement d'une antenne microruban.

Le champ présent entre les bords du microruban et le plan de masse va déborder et contribuer à générer le champ électromagnétique rayonné : ceux générés par les bords séparés par  $L$  étant maximum et en opposition de phase vont avoir tendance à s'additionner de manière constructive et optimale, et générer un rayonnement inscrit dans le plan  $YZ$ , ces 2 bords sont donc appelés bords rayonnants [8][9].

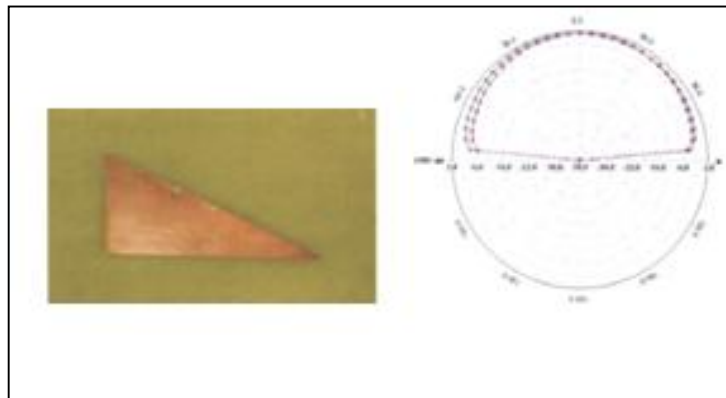
## I.8. Paramètres des antennes

### I.8.1. Paramètres S

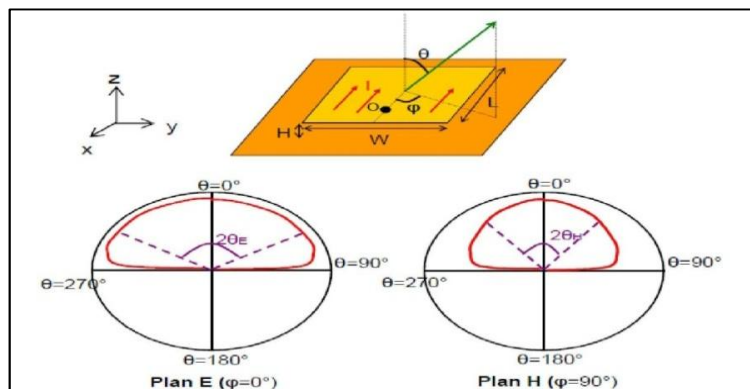
Une autre façon de quantifier la puissance réfléchie est l'utilisation des paramètres S. En effet, les paramètres S définissent les paramètres de réflexion et de transmission entre l'onde réfléchie et incidente aux bornes d'une composante. En fait, ils décrivent le comportement d'une composante dans le spectre micro-ondes [2].

### I.8.2. Le Diagramme de rayonnement

Le rayonnement d'une antenne microruban rectangulaire ou triangulaire est similaire à celui d'un dipôle orienté dans l'axe X. La polarisation du champ rayonné est rectiligne. Le rayonnement est dépendant de  $\theta$  et  $\varphi$ . Il est concentré dans un lobe principal orienté vers la verticale du microruban ( $\theta=0^\circ$ ). En raison du plan de masse, le rayonnement ne se fait que dans le demi-plan au-dessus du plan de masse [10][15].



(a)-antenne triangulaire[15]



(b)- antenne rectangulaire [5]

**Figure I-6** Diagramme de rayonnement d'une antenne microruban rectangulaire et triangulaire.

### I.8.3. La directivité

La directivité d'une antenne désigne la façon de concentrer son rayonnement dans certaines directions de l'espace. Afin de définir les propriétés directionnelles du diagramme de rayonnement de l'antenne, on fait appel à la notion de directivité **D**. Il s'agit en réalité du rapport entre l'intensité du rayonnement (**U**) dans une direction donnée de l'antenne et celle d'une source isotrope **U<sub>0</sub>** [5].

### I.8.4. 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 [5][2]

### I.8.5. Adaptation et condition d'adaptation

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

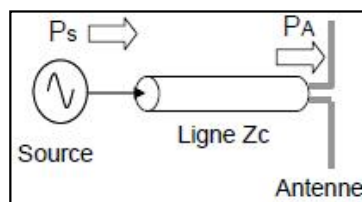


Figure -I-7 Adaptation et condition d'adaptation

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.[10].

$$P_A = P_S(1 - |\Gamma_{in}|^2) \dots \dots \dots \text{I.1}$$

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \dots \dots \dots \text{I.2}$$

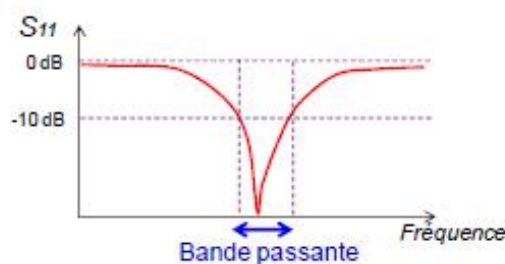


Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance ( $P_{\text{mismatch}} = \Gamma^2 \cdot P_A$ ) est renvoyée vers la source (ou re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception), appelée en anglais mismatch loss (pertes de désadaptation). En pratique, soit on cherchera à concevoir l'antenne 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. Ce réseau est composé d'éléments passifs (filtres à base d'inductances et de capacités) ou de lignes de transmission (à haute fréquence) [10].

### I.8.6. 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 I-8** Bande passante et coefficient de réflexion

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant 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]).

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \dots\dots\dots I.3$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}} \dots\dots\dots I.4$$

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

## I.9.Choix des paramètres d'une antenne microruban

L'antenne microruban est fabriquée à base d'un matériau de conductivité suffisamment élevée (Cuivre :  $\sigma = 59,6 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , Or :  $\sigma = 45,2 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  etc.).

L'élément rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photogravés sur le substrat diélectrique. Les paramètres physiques et géométriques liés au choix de l'antenne microruban sont :

- ✚ La permittivité relative du diélectrique;
- ✚ L'angle des pertes ( $\tan \delta$ ) dans ce même substrat, avec prédominance des pertes par effet joule ;
- ✚ L'épaisseur du diélectrique (elle doit rester faible par rapport à la longueur d'onde) ;
- ✚ Les dimensions et la forme de l'élément rayonnant [11].

## I.10.Critères de choix du substrat

La conception des antennes microrubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat [4]:

- (a) Possibilité d'excitation par onde de surface ;
- (b) Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion ;
- (c) Importance des pertes par diélectrique et par conducteur ;
- (d) Anisotropie dans le substrat ;
- (e) Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité ;
- (f) Conditions mécaniques: Physiquement, le matériau doit résister aux contraintes mécaniques, conserver sa forme originelle. Son facteur d'expansion doit être voisin de celui de la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures. Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible ;
- (g) Coût de fabrication.[1].

### I.10.1.Caractéristiques des matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories, et le détail des caractéristiques de chacune de ces familles de matériaux est donné ci-dessous [4].

### **I.10.1.1. Les matériaux céramiques**

Couramment employés pour les circuits microrubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité, mais sont cassants et donc fragiles. Leurs permittivités sont pour la plupart élevées et ils présentent de faibles pertes ( $\tan \delta < 10^{-3}$ ).

### **I.10.1.2. Les matériaux semi-conducteurs**

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

### **I.10.1.3. Les matériaux ferrimagnétiques**

Ces matériaux comprennent les substrats Ferrite et YIG. L'effet gyromagnétique est mis à profit pour concevoir des circulateurs, des isolateurs ou encore des antennes microrubans rayonnant naturellement une onde en polarisation circulaire. Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques.[1]

### **I.10.1.4. Les matériaux synthétiques**

La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, une permittivité proche de 2 avec de faibles pertes ( $\tan \delta \approx 0,003$ ).

À ceux-ci viennent s'ajouter aujourd'hui les mousses ROHACELL dont la permittivité relative est proche de l'air ( $\epsilon_r \sim 1$ ), cependant les pertes deviennent vite importantes lorsque l'on monte en fréquence ( $\tan \delta > 0,01$  à 26.5 GHz) un exemple de ces matériaux: le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène, etc...

### **I.10.1.5. Les matériaux photoniques**

Depuis le début des années soixante, un nouveau type de matériaux, les cristaux photoniques (matériaux à permittivité périodique) font l'objet d'une grande effervescence dans le monde scientifique. Or, la grande majorité des recherches portant sur ces matériaux ont été effectuées par des physiciens dans le cadre d'études de dispositifs optiques.

Actuellement les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des micro ondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface.

### **I.10.1.6. Les matériaux chiraux**

Les propriétés de chiralité ou de bi-isotropie que possèdent certains matériaux, notamment dans le domaine des microondes et de l'optique, font depuis plusieurs années l'objet d'intenses recherches. Récemment, A. Bossavit prédit qu'on peut construire des matériaux chiraux en incluant périodiquement dans une matrice de matériau diélectrique des inclusions de matériau fortement conducteur. Le comportement souhaité s'obtient alors à la limite 0 où désigne la taille de la cellule de périodicité. Un des points clé pour aboutir au comportement chiral est que la conductivité des inclusions doit être telle que la profondeur de peau dans ces matériaux est de l'ordre de  $\lambda$ . Bossavit a proposé une loi de comportement équivalente à l'aide de techniques formelles à base de développements de Taylor locaux.[1]

### **I.10.1.7. Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material)**

Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques, génèrent une gamme de substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10 de faibles pertes ( $\tan\delta < 0,0018$ ) pour des permittivités respectivement égales à 3.25 ; 4.5 ; 6.5 ; 9.8. Rigides et moins cassants que les céramiques, ils conservent leurs dimensions et leurs permittivités à des températures élevées [1].

### **I.10.1.8. Les matériaux RO3000**

Ces matériaux sont de permittivité relative stable en température et en fréquence. Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence ( $> 30$  GHz).

### **I.10.1.9. Les matériaux composites**

Ce type de matériaux s'obtient en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d'un substrat. En ajoutant aux matériaux plastiques de la fibre de verre (cas du DUROID 5870, du TLC, ARLON 320) ou de la poudre de céramique (ARLON 340) les propriétés mécaniques sont améliorées et l'on peut, suivant le dosage, ajuster la permittivité. Des produits comme le DUROID sont couramment utilisés pour réaliser des antennes imprimées.

## **I.10.2. Techniques d'alimentation**

Les antennes microbandes peuvent être alimentées par une variété de méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories: avec contact et sans contact. Dans les méthodes avec contact, la puissance de RF est alimentée directement au patch rayonnant en utilisant un élément de connexion telle qu'une ligne microruban. Dans les techniques sans

contact, le couplage de champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne microruban et le patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus populaires utilisées sont la ligne microruban, la sonde coaxiale (techniques avec contact), le couplage par ouverture et le couplage par proximité (technique sans contact) [13]

#### I.10.2.1. Alimentation avec la ligne microruban

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

Le but de l'encart coupé dans le patch est d'adapter l'impédance de la ligne d'alimentation au patch sans avoir besoin d'un élément d'adaptation additionnel. Ceci est achevé par un contrôle correct de la position de l'encart. Par conséquent c'est une technique d'alimentation facile, puisqu'elle fournit la facilité de fabrication et la simplicité de modélisation, ainsi que l'adaptation d'impédance. Cependant, certaines applications nécessitent un substrat épais, ce qui engendre l'augmentation des ondes de surface et le rayonnement parasite, entraînant une dégradation de la bande passante [13]

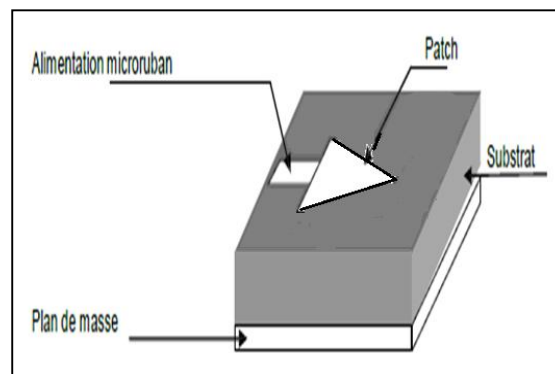
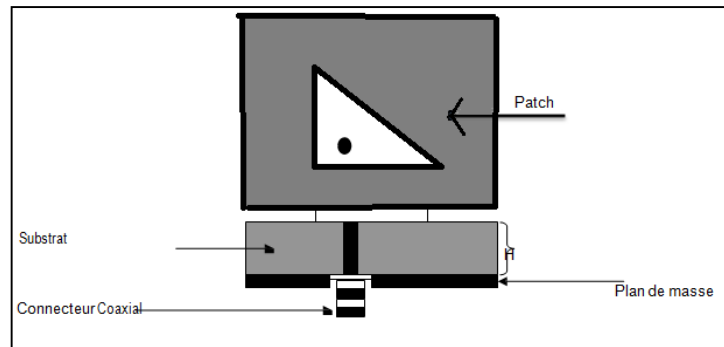


Figure I-9 Alimentation par microruban

#### I.10.2.2. Alimentation par câble coaxiale

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation par sonde est une technique très connue utilisée pour alimenter les antennes plaques. Le conducteur intérieur du connecteur coaxial s'étend à travers le diélectrique et il est soudé au antenne microruban, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse figure (I-10)[13].



**Figure I-10** Antenne microruban alimentée par sonde.

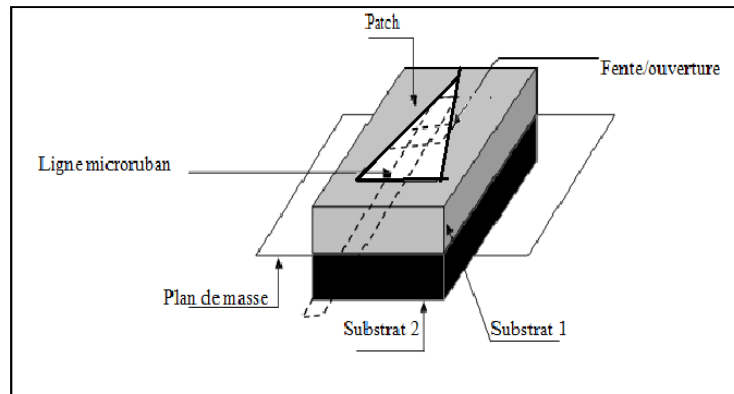
L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être placée à n'importe quel endroit désiré du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance.

Cette méthode d'alimentation est facile à fabriquer et a un rayonnement parasite faible. Cependant, son inconvénient principal est qu'elle fournit une bande passante étroite et elle est difficile à modéliser puisqu'un trou doit être foré dans le substrat et le connecteur sort en dehors du plan de masse, cela ne la rend pas complètement plane pour les substrats épais ( $h > 0.002 \lambda_0$ ) [11].

En outre, pour des substrats plus épais, l'accroissement de la longueur de sonde rend l'impédance d'entrée plus inductive, menant aux problèmes d'adaptation. Il est clair, à partir de ce qu'on a vu, qu'avec un substrat diélectrique épais, ce qui fournit une large bande passante, les alimentations, par lignes microrubans et par câble coaxial, souffrent de plusieurs inconvénients. Les techniques d'alimentation sans contact, que nous allons discuter ci-dessous, résolvent ces problèmes [11]

### **I.10.2.3. Alimentation couplée par ouverture**

Dans ce type d'alimentation, le patch rayonnant et la ligne microruban d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme représentée dans la figure (I-11). Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [13].

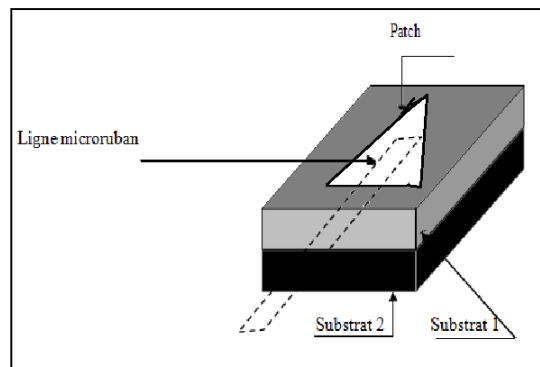


**Figure I-11 Alimentation couplée par ouverture**

L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch (microruban) et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. D'une façon générale, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est employé pour le substrat inférieur, alors qu'un matériau épais et ayant une constante diélectrique faible est employé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle présente des difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples qui augmentent également l'épaisseur d'antenne. Cette technique d'alimentation fournit aussi une largeur de bande étroite [1].

#### **I.10.2.4. Alimentation couplée par proximité**

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés de sorte que la ligne d'alimentation soit située entre les deux substrats et le patch soit imprimé sur le substrat supérieur comme il est montré dans la figure (I.12). L'avantage principal de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine le rayonnement parasite dû à l'alimentation et fournit une largeur de bande très élevée (plus que 13%), en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [1].



**Figure I-12 Alimentation couplée par proximité**

L'adaptation peut être réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation. L'inconvénient principal de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des deux couches diélectriques qui nécessitent un alignement approprié. En outre, il y a une augmentation de l'épaisseur globale de l'antenne [13].

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

Caractéristiques	Alimentation par Ligne microruban	Alimentation Coaxiale	Alimentation Couplée par ouverture	Alimentation Couplée par proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (Réalisée avec adaptation d'impédance)	2.5%	2.5%	2.5%	13%

**Tableau I-1** Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation [1]

## **I.11.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 [1].

### **I.11.1.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 [1].

#### **I.11.1.1.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 surtout pour les substrats électriquement minces, il permet une bonne interprétation physique mais modélisé difficilement le couplage.

Développé en premier lieu pour les patches 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 [13].

#### **I.11.1.2.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. Une fois ces champs connus, le champ rayonné, la puissance totale et l'impédance d'entrée seront alors déduits[13]. Ce modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage.

### **I.11.2. La méthodes numérique**

Les techniques numériques, basées sur la détermination de la distribution du courant sur la surface de l'élément conducteur et le plan de masse dans le domaine fréquentiel pour certaines et temporel pour d'autres, peuvent analysées les formes les plus arbitraires et les multicouches. Toutefois, elles nécessitent toutes un temps de calculs, un espace mémoire et un effort très considérables et ne permettent que très peu d'interprétations physiques [1].

#### **I.11.2.1.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 Weiland et a été amélioré continuellement au fil des ans. Cette méthode s'applique à l'ensemble de l'électromagnétisme (à partir de l'électricité statique à haute fréquence) et des applications optiques constituent la base pour les outils de simulation commerciale.

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

En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel numérique efficacité et précision, la FIT a été utilisé dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, de DC à THz. Par ailleurs, la méthode d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numérique, telles que la méthode des éléments finis [1]

#### **I.11.2.2. 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 [13]. La première étape consiste à mailler le domaine de calcul grâce à des éléments géométriques adaptés, les triangles pour les problèmes à deux

dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels. À chacun de ces éléments géométriques est associé un certain nombre de nœuds aux quelles 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. Ceci permet alors de reformuler l'équation d'onde et d'éliminer les dérivées à l'ordre un et d'aboutir ainsi à une formulation variationnelle. L'intérêt d'une telle formulation réside dans le fait qu'elle réunit en une seule expression, l'équation d'onde et les conditions aux limites tout en ne faisant intervenir que des dérivées d'ordre un. 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 [14].

### **I.11.2.3.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 [13].

### **I.11.2.4.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. Elle est basée sur le critère de nullité d'une fonctionnelle constitué à partir d'une intégrale des résidus, due à la différence

entre la solution approximative et la solution exacte, pondérée par des fonctions de test [13]. La fonction d'essai est exprimée sous forme de fonctions de bases dont les coefficients de pondération sont déterminés en résolvant le système linéaire. 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 [1].

### **I.11.3.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  $S_{11}$ . Les principales méthodes de cette catégorie sont les algorithmes génétiques pour l'optimisation globale et les réseaux de neurones pour l'optimisation locale [14].

#### **I.11.3.1. Algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques (GA) sont inspirés du concept de sélection naturelle élaboré par Charles Darwin. Le principe est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers, à laquelle on applique différents opérateurs génétiques (croisement, mutation, ...etc.) et que l'on soumet chaque génération à une sélection. Si la sélection s'opère à partir d'une fonction d'adaptation alors la population tend à s'améliorer. L'évaluation de chaque individu est réalisée par une fonction de fitness qui représente le seul lien entre les algorithmes génétiques et le problème physique à optimiser.

Étant une méthode d'optimisation globale très stochastique, l'optimisation par GA présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes d'optimisation classique:

- Elle optimise les variables continues et discrètes.
- Elle ne nécessite pas le calcul des dérivées d'une fonction de coût.
- Capable d'obtenir un minimum global sans rester piégée dans un minimum local.
- Elle peut aboutir à une liste de solutions.

Toutefois elle nécessite un temps de calcul considérable. L'optimisation par les algorithmes

génétiques a été largement utilisée dans la modélisation des antennes. Elle a été aussi utilisée pour l'initiation des poids d'un réseau de neurones, cette conjugaison entre les deux méthodes d'optimisation permet de résoudre le problème des minima locaux dont souffrent les ANNs [14].

### **I.11.3.2.Réseaux de neurones artificiels**

Se trouvant à l'intersection de différents domaines (informatique, électronique, science cognitive, neurobiologie et même philosophie), l'étude des réseaux de neurones est une voie prometteuse de l'Intelligence Artificielle, qui a des applications dans de nombreux domaines.

- Industrie: contrôle de qualité, diagnostic de pannes, corrélations entre les données fournies par les différents capteurs, analyse de signature ou écriture de manuscrite
- Finance: prévision et modélisation des marchés (cours de monnaies...), sélections d'investissements, attribution de crédits
- Télécommunications et informatique: analyse du signal, élimination des bruits, reconnaissances de formes (bruit, images, paroles), compression de données, Modélisation de composants et circuits hyperfréquences...
- Environnement Evaluation des risques, analyse chimique, prévisions et modélisations météorologiques, gestion de ressources...

## **I.12.Conclusion**

La technologie microruban en général, et les antennes microbandes en particulier connaissent un succès croissant au près des industriels et des professionnels des télécommunications

Qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité de paramètres des antennes .

Dans ce chapitre , nous avons montré le rôle et l'évolution technologique des antennes microrubans, leur fonctionnement. Ainsi que leur domaine d'utilisation ,certains paramètres sur le fonctionnement et le rendement de ce type d'antennes

à savoir les paramètres constitutifs , le type d'alimentation. Nous avons évoqué l'influence de quelques paramètres, et les matériaux diélectriques utilisés .Nous avons également mis l'accent sur les antennes microrubans et son mécanisme de rayonnement et les méthodes d'analyse de ces antennes.

## Bibliographie

- [1] B. BECITA " Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques" mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [2] 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.
- [3] F. BENMEDDOUR "Etude et réalisation d'un résonateur microruban de forme circulaire (Application au cas particulier de l'alimentation par couplage) " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Mars 2012.
- [4] M. HASSAD," Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux " mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2009.
- [5] 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.
- [6] A. AICHE" Etude de l'alimentation par ouverture d'une antenne microstip circulaire", mémoire de Master, Institut d'électronique, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [7] Linda Djouablia « Contribution A L'étude Des Structures Microbandes Rayonnantes Par La Méthode Des Moments Application A La Forme Triangulaire » thèse Doctorat en sciences en Electronique, Institut d'électronique, Université de Constantine, juillet 2012.
- [8] 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.
- [9] L. BENACHOUR " Modélisation des Structures Planaires de Formes Régulières Implantées sur Substrat d'une Anisotropie Tensorielle" mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine,2008.
- [10] A. BOYER " ANTENNES SUPPORT DE COURS ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES",Institut Informatique et Réseau, Université TOULOUSE, Octobre 2011.

[11] S. TEBACHE " Méthode de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées" mémoire de Magister, Institut de Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, juin 2013.

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

[13] Nazih HAMDIKEN " Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale " mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna.

[14] Yamina TIGHILT " Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Setif. Juin 2011.

[15] 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)

# CHAPITRE II

# LES CRISTAUX

# PHOTONIQUES

## II.1.INTRODUCTION

La notion de « cristaux photoniques » a été proposée pour la première fois en 1987 par de Yablonovitch et Sajevjohn. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991.

Les cristaux photoniques sont des structures artificielles dont l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde dans une, deux ou trois dimensions d'un point de vue théorique, l'étude et le développement des propriétés des matériaux à bande interdite photonique reposent sur la forte similitude qui existe entre les équations de Schrödinger et de Maxwell. Ils ont été présentés comme analogues pour l'optique intégrée des semi-conducteurs.

Ces structures sont actuellement la source de nombreuses expériences en optique telles que l'inhibition de l'émission spontanée, les miroirs omnidirectionnels à haute réflectivité ainsi que des guides d'ondes à faibles pertes ou encore des propriétés originales de réfraction de la lumière tels que l'auto-collimation ou la réfraction négative. [1].

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux cristaux photoniques. Nous commençons alors par une Définition des matériaux cristaux photoniques, ainsi que leurs existence dans la nature, Nous étudierons les différents types de cristaux photoniques, en insistant sur la notion de bande interdite photonique, avant d'entrer un peu plus dans les détails pour la structure qui va nous intéresser tout particulièrement : les cristaux unidimensionnels, citer leurs caractéristiques physiques et géométriques, en effet ces dernières trouvent leurs application dans de nombreux domaines tels que l'optique, les circuits microondes et les antennes.

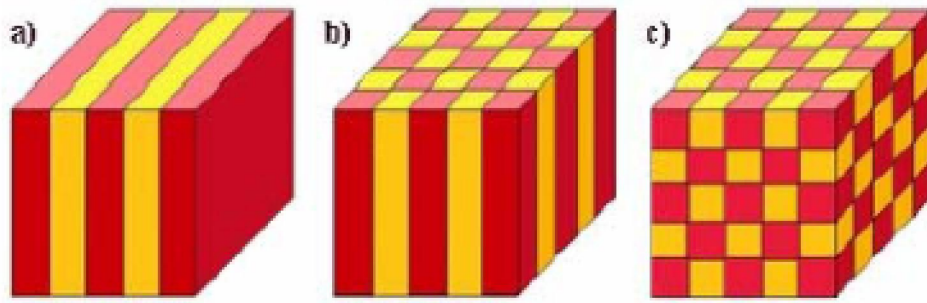
## II.2.Définition des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques (CPs) sont des structures qui présentent une variation périodique d'indice de réfraction de l'ordre de la longueur d'onde.

Il existe différents types de cristaux photoniques, à classer selon leur dimensionnalité.

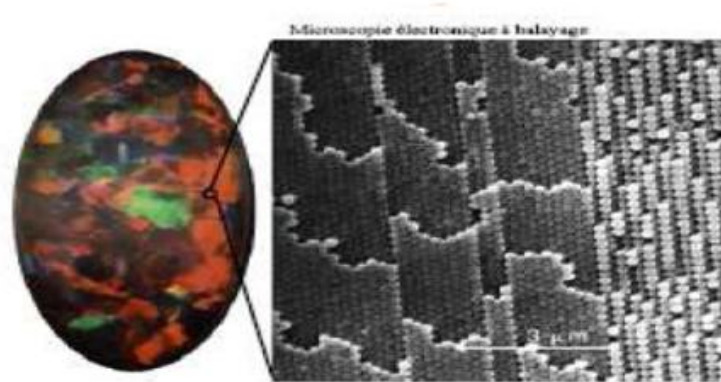
A une dimension, on retrouve les bien connus miroirs de Bragg (Figure I.1) a formés d'une alternance de couches de bas et haut indice. Le principe des miroirs de Bragg peut être généralisé à 2 ou 3 dimensions, constituant des cristaux photoniques 2D ou 3D (Figure I.1.b et c) [1].

Les différentes couleurs représentent des matériaux de constants diélectriques différents.



**Figure II-1** Schéma de cristaux photoniques 1D, 2D ou 3D [3].

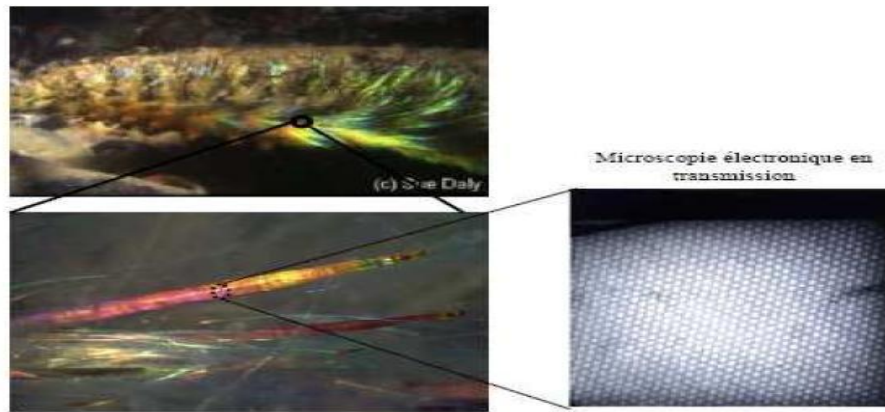
On peut noter qu'il existe des cristaux photoniques naturels. Sur la (Figure II-2), on montre une image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau quasi-périodique de billes de silice [4][2].



**Figure II-2** Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau quasi-périodique de billes de silice.

Cet arrangement périodique des billes de silice est responsable des couleurs chatoyantes des opales naturelles, dans la mesure où le caractère périodique de la structure conduit à des effets de diffraction gouvernés par la loi de Bragg.

L'opale n'est pas le seul exemple de cristal photonique naturel. Des biologistes ont trouvé un ver dont la carapace est un cristal photonique plus performant que ceux fabriqués jusqu'à présent. Cet animal se nomme souris de mer (Figure II- 3) [4][2].



**Figure II-3** Exemples de réalisations naturelles de structures périodiques. Ces structures apparaissent chez certaines espèces animales et minérales comme les sours de mers.

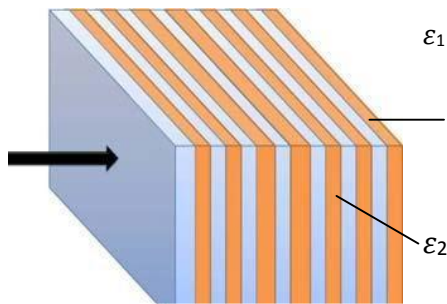
## II.3. Les différents types des cristaux photoniques

### II.3.1. Cristaux photoniques à une dimension (réseau de Bragg)

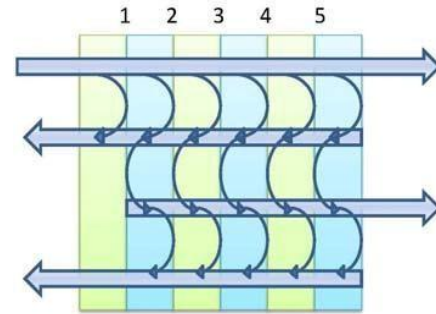
Les cristaux photoniques unidimensionnels sont couramment utilisés sous le nom de réseau de Bragg figure(II-3). Ils sont traditionnellement obtenus par un empilement de couches d'indices diélectriques différents. Les réseaux de Bragg sont utilisés dans plusieurs applications, on peut citer: les filtres de longueur d'onde sélectifs, les multiplexeurs, les convertisseurs de modes pour fibres optiques, compensation de la dispersion, lasers spéciaux à bande étroite [5].

Les miroirs de Bragg sont des successions de couches d'indices de réfraction différents, empilées, de manière périodique. Le comportement du réflecteur de Bragg est expliqué à partir de processus d'interférences multiples. Comme le montre (la figure II.4), une onde qui se propage dans la succession de couches, subit une réflexion à chaque interface. Si l'onde passe d'un milieu faible indice vers un milieu de fort indice la réflexion s'accompagne d'un changement de phase  $\pi$ , dans le cas contraire la réflexion reste en phase.

Dans le cas particulier où l'épaisseur optique totale des alternances est de  $\lambda/2$ , les ondes réfléchies par les interfaces d'ordre impair restent en phase pour former des interférences constructives et aboutir à une réflexion totale, ce qui revient à dire que l'onde ne peut se propager et que l'on est en présence d'une bande interdite photonique. Un autre cas particulier où les deux couches de chaque alternance ont même épaisseur optique  $\lambda/4$ , on observe que les ondes réfléchies par toutes les interfaces sont en phase. Il est alors facile d'imaginer que ce cas correspondra à la bande interdite la plus large [5][3].



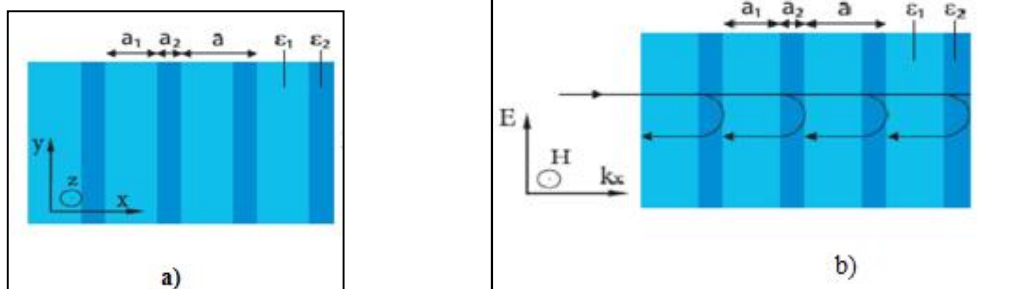
**Figure II-4** Schéma d'un empilement



**Figure II-5** Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies par chaque dioptre [5]

### II .3.1.1.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  $k$  (Figure II-6.b). 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  $w_1$  et  $w_2$  [6][2].



**Figure II-6** (a) Représentation schématique d'un miroir de Bragg constitué de 2 types de couches de permittivité  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . La maille du cristal est  $a = a_1 + a_2$ . (b) Schémas des réflexions sur les mailles successives.

La dégénérescence des fréquences ouvre une bande interdite photonique  $\Delta\omega$  entre  $w_1$  et  $w_2$  (Figure II-6).

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 :

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

Où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des deux matériaux diélectriques avec:

$$n = \sqrt{\epsilon} \dots \dots \dots (II.2)$$

$\omega_0$  : la fréquence de centre du bande interdite photonique.

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 [6][2].

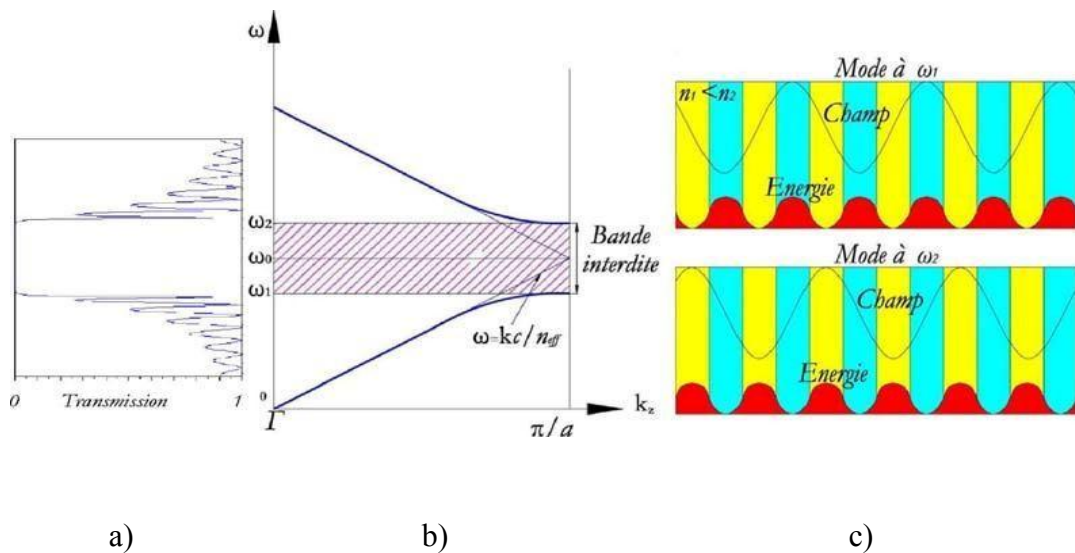


Figure II-7 [3].

(a) Transmission en fonction de la fréquence pour un réseau de Bragg, à incidence normale

(b) Diagramme de dispersion pour une onde incidente normale et ouverture d'une bande interdite photonique entre  $\omega_1$  et  $\omega_2$ .

(c) Représentation du champ électrique et de l'énergie locale pour les fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$

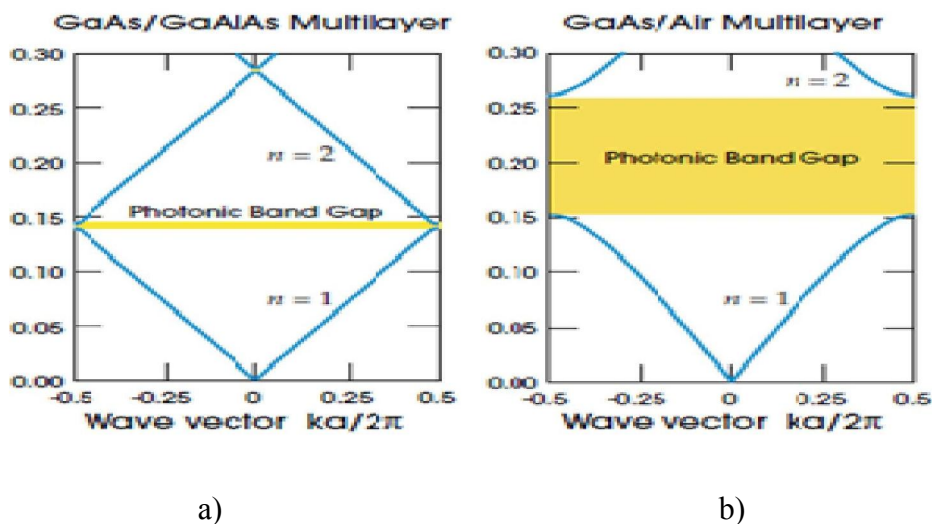
### II.3.1.2. Bande interdite complete

Une bande interdite photonique d'un cristal 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 le cristal 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 [6][2].

### II.3.1.3. Largeur de la bande interdite photonique

La largeur de la bande interdite photonique (gap) dépend du contraste d'indice des deux milieux: lorsque ce contraste est faible, la largeur du gap est faible (Figure II-8.a) et lorsqu'il est élevé, elle augmente considérablement (Figure II-8. b) [7][2].

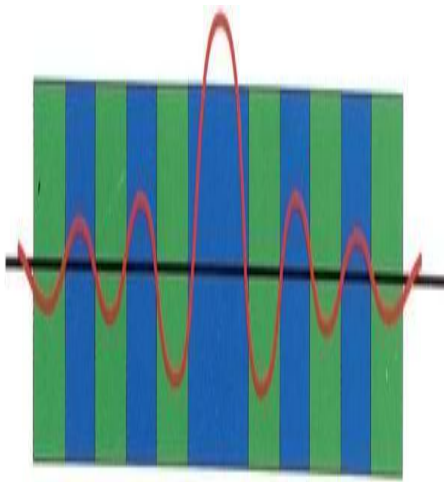


**Figure II-8** Structures de bandes photoniques pour des réseaux de Bragg de pas  $a$  avec (a) des couches de permittivité  $\varepsilon = 13$  et  $12$  et (b) de permittivité  $\varepsilon = 13$  et  $1$ .

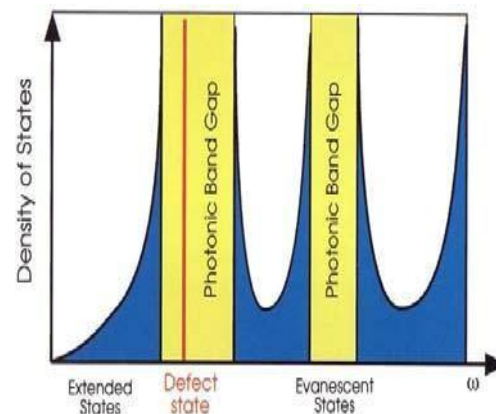
### II.3.1.4. Défauts ponctuels dans une structure périodique unidimensionnelle

L'introduction des défauts sur les cristaux photoniques permet de réaliser de véritables fonctions optiques et de contrôler les flux de lumière. Le fait de rompre la périodicité d'une structure permet, par exemple, d'autoriser la propagation d'une onde de fréquence  $\omega_0$  comprise dans la bande interdite photonique. Des filtres très sélectifs peuvent être ainsi réalisés. Une simple variation dans l'épaisseur d'une seule couche dans la structure, peut former ce défaut (Figure II-9).

Pour étudier l'influence d'un défaut, on se restreint à l'axe de propagation et on examine un mode dont la fréquence  $\omega$  se trouve dans la bande photonique interdite. Il n'y a pas de modes propagatifs à la fréquence  $\omega$  dans la structure périodique même si un défaut de périodicité existe dans la structure, en effet on ne peut pas retracer les modes avec le vecteur d'onde  $k$  dès lors que la périodicité est rompue, mais il est possible de savoir si une certaine fréquence peut supporter des états propagatifs dans le reste du cristal. Dans ce cas, on peut scinder en espaces de fréquence les endroits dans lesquelles les états sont propagatifs ou évanescents, ce qui est schématisé dans la (figure II-10). L'introduction d'un défaut ponctuel revient à créer une cavité optique, des modes à des fréquences incluses dans la bande interdite photonique pourront apparaître [5].



**Figure II-9** Défaut dans une structure périodique unidimensionnelle



**Figure II-10** Densité d'états en bleue, nulle dans la bande photonique interdite, sauf dans un défaut, les modes peuvent exister ligne en rouge

## II.3.2. Les cristaux photoniques bidimensionnels

### II.3.2.1. Définition

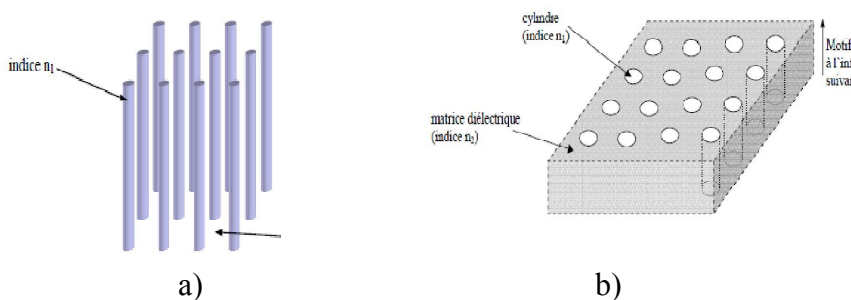
Les cristaux photoniques bidimensionnels sont des structures périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième. Il existe deux types de structures périodiques bidimensionnelles: [9] [2].

#### II.3.2.1.1. Les structures dites « connectées »

Dans ces structures l'indice de réfraction du motif élémentaire  $n_1$  est inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique. Cette structure est constituée de trous d'air percés dans la matrice diélectrique comme il est montré sur la Figure (II-11.b).

#### II.3.2.1.2. Les structures dites « déconnectées »

Dans ce cas, les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter-motifs comme il est représenté sur la Figure(II-11.a). Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air [8][2].



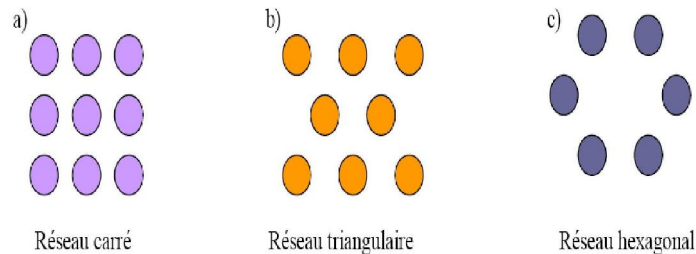
**Figure II-11** Structures bidimensionnelles: (a) déconnectée (b) connectée. [2].

### II.3.2.2. Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnelles

Il est possible d'introduire des défauts dans ce type de cristal photonique. Le guide d'onde classique se compose d'une couche diélectrique entourée de deux autres couches diélectriques d'indices de réfraction plus faibles. Les guides d'ondes classiques sont couramment utilisés en optique intégrée et sont facilement fabriqués par des techniques habituelles d'épitaxie. Les trous des cristaux photoniques sont gravés dans le guide d'onde classique. Ce type de cristal photonique s'appelle : cristal photonique bidimensionnel planaire. Il est fabriqué à l'aide de technologies standard de la microélectronique qui laissent une grande liberté quant aux

modifications locales des propriétés du réseau. Ces avantages font de ces structures des candidats prometteurs pour la réalisation de composants pour l'optique intégrée [9].

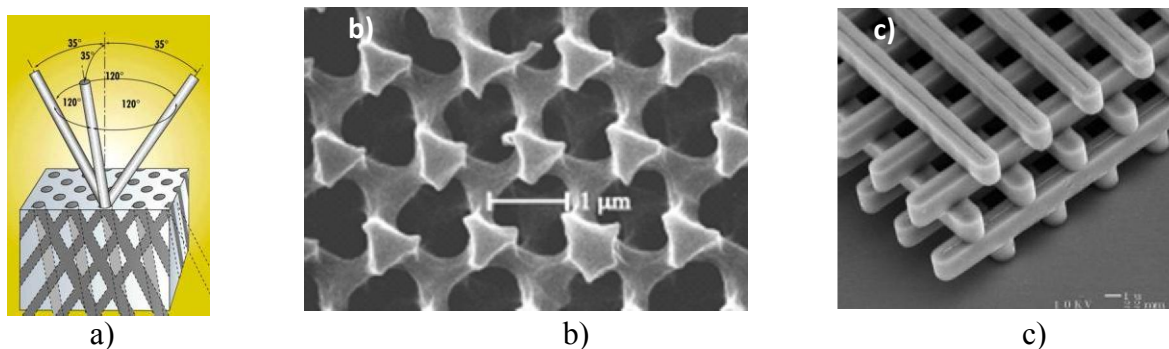
Les réseaux périodiques à deux dimensions se regroupent principalement suivant trois familles:



**Figure II-12** Différents réseaux.

### II.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels

Les cristaux photoniques 3D constituent la seule structure qui permet d'obtenir une bande d'énergie interdite dans toutes les directions de l'espace. Le premier cristal photonique tridimensionnel a été fabriqué par K.M. Ho et al. . Il était formé de sphères de silicium arrangées sur une structure diamant. Mais l'histoire retient généralement la célèbre Yablonovite , structure 3D pour les micro-ondes fabriquée en 1993 par E. Yablonovitch en perçant des trous dans du plexiglass selon trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$  (Figure II-13) [9][2].



**Figure II-13** Structure 3D : a) Schéma de fabrication de la Yablonovite, b) Image MEB d'une structure Yablonovite en PMMA [Cuisin 2000] et c) Image MEB d'une structure tas de bois en silicium [Sandia 2006].[3]

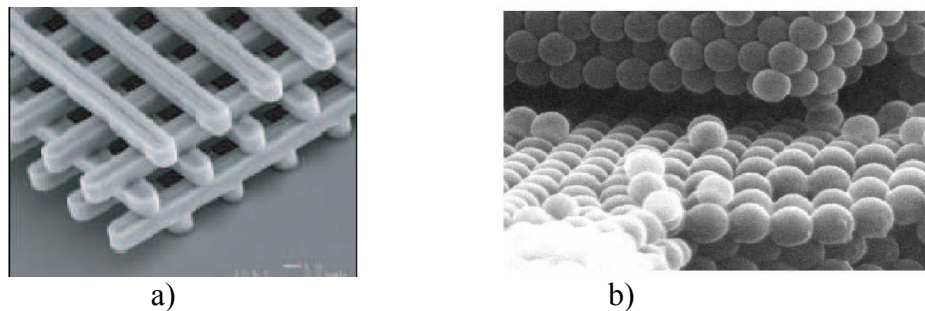
De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées. Les deux suivantes ont attiré le plus d'efforts de recherche:

### II.3.3.1. Structures « Tas de bois »

Ces structures 3D sont obtenues en déposant par couches successives des rubans de silicium polycristallin dans des tranchées de silice. Après avoir bâti la structure, la silice est retirée pour obtenir un cristal photonique 3D Si/air dont le contraste d'indice est suffisant pour ouvrir une bande d'énergie interdite omnidirectionnelle (Figure II-16.a).

### II.3.3.2. Opales

Des opales sont obtenues chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice ( $\text{SiO}_2$ ) en solution: par sédimentation ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées. Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto-organisées proposées par Y.A. Vlasov (Figure II-14.b). La plupart de ces cristaux colloïdaux ne présentent pas de bandes d'énergie interdites, à cause du faible contraste d'indice. Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inverses à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice. Les sphères initiales sont ensuite dissoutes pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice [9][2].



**Figure II-14 (a- Structure « tas de bois » b- Les opales).**

## II.4. Caractéristiques géométriques et physiques d'un cristal photonique

Un cristal photonique est caractérisé par: les différents matériaux qui le composent, le système cristallin selon lequel ces matériaux sont organisés et les volumes relatifs qu'ils occupent dans la cellule élémentaire du cristal. Les quantités représentatives de ces différentes caractéristiques sont [10] [3].

### II.4.1. Le contraste d'indice $\delta$

Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la

barrière de potentiel de la physique du solide [10] [3].

$$\delta = n_h/n_l \dots \dots \dots (II.3)$$

Avec:

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

$n_l$ : L'indice de réfraction du matériau de faible indice.

#### II.4.2. Les périodes

Ces paramètres géométriques choisis selon le domaine de fréquence étudié, influent sur les caractéristiques de la bande interdite photonique. 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  $\epsilon_2$ .

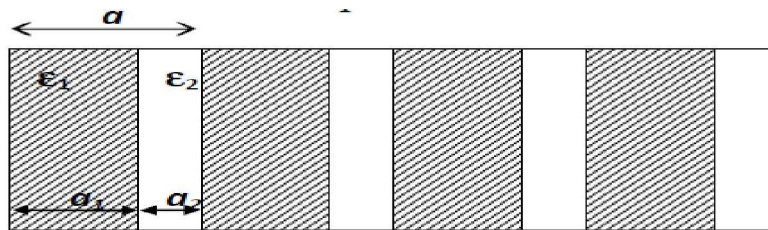


Figure II-15 Les périodes d'un cristal photonique unidimensionnel.

#### II.4.3. 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.

L'influence de ces différents paramètres sur le comportement d'une structure photonique peut être comprise par analogie avec un potentiel périodique induit de l'arrangement des atomes dans un semi-conducteur [10].

#### II.5. Les pertes dans les guides à cristaux photoniques

Les pertes sont un problème crucial pour les guides à cristaux photoniques. Cette problématique mobilise d'ailleurs de nombreux groupes de recherche depuis plusieurs années. Les pertes peuvent être évaluées expérimentalement en utilisant la méthode cut-back, en étudiant les franges d'interférence de Fabry-Perot ou alors en observant l'intensité de la

lumière diffractée dans la direction verticale. Il convient de distinguer les deux types d'approche: substrat ou membrane. Dans le cas de l'approche substrat, nous avons vu que les guides fonctionnent forcément au-dessus du cône de lumière, ce qui entraîne nécessairement des pertes par rayonnement. Celles-ci peuvent néanmoins être minimisées et des valeurs allant jusqu'à 11 dB/mm pour un W3 pour une couche de GaInAsP sur InP [Talneau 2001] ont été obtenues dans ces filières [11] [3].

Dans le cas de l'approche membrane, il est possible de s'affranchir des pertes par rayonnement en travaillant au-dessous du cône de lumière. Cependant, des pertes par propagation causées par les imperfections de fabrication des structures (rugosité de surface ou forme imparfaite des trous) subsistent tout de même. Au fil des années, les progrès de la fabrication des cristaux photoniques ont permis de réduire de manière importante ces pertes par propagation [11][3].

## **II.6. Les différentes Applications des cristaux photoniques**

La majorité des échanges de données à grande distance s'effectue par propagation d'un signal optique à l'intérieur d'une fibre optique. Les fonctions de traitement du signal se font en revanche toujours sur des signaux électriques : ils nécessitent donc une conversion du signal optique en signal électrique. Les interconnexions électriques constitueront une limitation sévère à l'augmentation du débit des informations échangées. L'objectif à terme est de parvenir à un traitement tout optique de l'information, en s'affranchissant ainsi des étapes de conversion optique-électrique et électrique-optique [5].

C'est le domaine de l'optique intégrée, qui forme le vaste champ d'applications des cristaux photoniques. La miniaturisation des composants existants, ainsi que l'exploitation de propriétés nouvelles, sont les principales motivations des recherches dans le domaine des cristaux photoniques. Comparée à l'optique intégrée classique, la promesse d'un moindre encombrement est liée à l'absence de perte par rayonnement dans le plan. On peut classer les cristaux photoniques suivants leurs applications en deux grandes secteurs les cristaux photoniques passifs et actifs [5] [3].

### **II.6.1 Guides d'ondes**

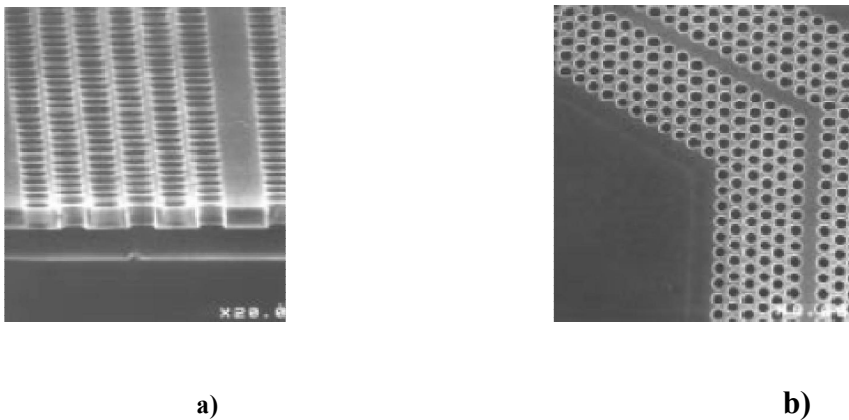
L'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999[8][2].

Le processus de guidage dans les guides à cristal photonique est différent de celui des guides classiques à réfraction (guidage par indice) puisqu'ils reposent majoritairement sur l'existence

d'une bande interdite omnidirectionnelle dans le plan (guidage par bande) [12].

Les guides coudés (courbés) permettent théoriquement de réaliser des virages avec des rayons de courbure de l'ordre de longueur d'onde sans pertes, mais expérimentalement des problèmes de réflexion et de pertes subsistent à cause du couplage dans le virage vers les modes de fuite dans le cône de lumière [2].

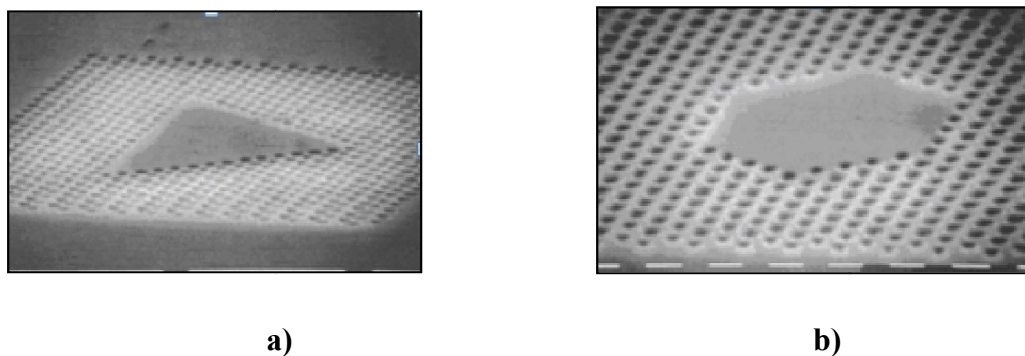
La Figure II-16. Donne la structure d'un guide photonique droit et d'un autre coudé



**Figure II-16** guides d'onde à cristaux photoniques: a) droit, b) coudé.

### II.6.2.Cavités

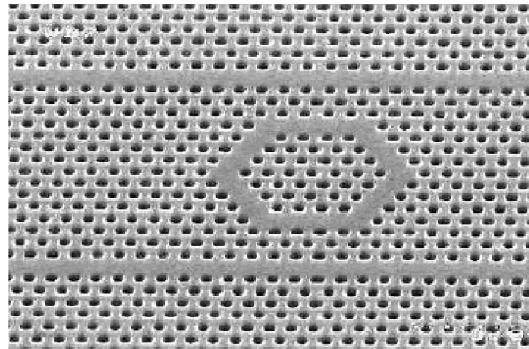
Les premières cavités avec des cristaux photoniques bidimensionnels sont réalisées en 1996, ces cavités sont élaborées en incluant des mono défauts sur le réseau cristallin photonique. Les cavités sur membrane suspendue (entourée d'air semblent donner les meilleurs résultats) avec des dimensions très petites, sont illustrées dans la Figure (II-17), une cavité triangulaire et une autre hexagonale plongées dans un cristal photonique triangulaire [2].



**Figure II-17** cavités sur membrane suspendue : a) cavité triangulaire b) cavité hexagonale, entourées par un cristal photonique triangulaire.

### II.6.3 Filtres et multiplexeurs

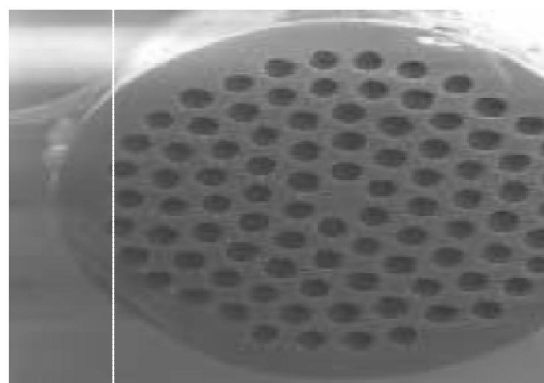
Une fonction importante qu'on peut réaliser avec des cristaux photoniques : le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises. Plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Par exemple, la réalisation permet l'extraction ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde bien précise [2].



**Figure II-18** La structure et le principe de fonctionnement d'un filtre Add- Drop.

### II.6.4. Les fibres optiques

Les fibres dites à « cristal photonique » 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 (Figure II-19) [2].



**Figure II-19** Exemple de fibre à cristal photonique.

### II.6.5. Réflecteurs et antennes

En exploitant les propriétés de réflexions des cristaux photoniques dans le gap, nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériau BIP comme substrat d'antenne ou comme réflecteur dans le but d'augmenter la directivité des antennes [2].

### II.6.6. Application des BIP dans le domaine des micro-ondes et des antennes

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 antennes et des composants micro-ondes.

Des travaux tirant profit des propriétés des BIP ont alors vu le jour. Ainsi dans le domaine des antennes on a réussi à réduire le niveau des lobes secondaires en évitant de piéger le champ électromagnétique dans le plan de masse arrière de l'antenne [2].

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIP 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 photoniques interdites pour la réalisation de : [2]

- ✚ Substrats d'antennes : les premières expériences visant à exploiter les cristaux photoniques 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 [2].

## II.7. Cristaux photoniques pour la conception d'antennes directives

Le développement des communications par satellite nécessite des antennes de faible encombrement et de directivité comparable à celle de s antennes à réflecteur parabolique. Dans ce but, nous envisageons l'utilisation de cristaux photoniques métalliques, permettant de réaliser des structures planes de faible épaisseur. Cette solution présente aussi l'avantage de pouvoir être excitée par une seule source localisée (micro ruban(patch), monopôle, ...) contrairement aux antennes plaquées du type "réseaux de micro rubans( patches)"[8].

## **II.8.Conclusion**

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont le constant diélectrique varie de façon périodique, à l'échelle de la longueur d'onde, dans une ou plusieurs directions. Cette périodicité est à l'origine de plusieurs propriétés intéressantes comme par exemple l'ouverture d'une bande photonique interdite interdisant la propagation des ondes électromagnétique.

L'utilisation de cet effet de bande interdite ouvre la voie à la réalisation de nombreuses fonctions optiques telles que le guidage ou le filtrage de la lumière et aussi dans le domaine des micro-ondes et des antennes. Dans le chapitre suivant on va donner comment créer, simuler et analyser une antenne micro ruban en utilisant le logiciel CST MICROWAVE.

## Bibliographie

- [1] CHALI RIAD, Etude des cristaux photonique et phononique mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme master 2 Institut d'électronique, Université de M'sila; Juin 2011
- [2]-Azi Oussama 'Etude d'une antenne micro ruban rectangulaire à bande interdite photonique 1D' mémoire de master, Institut d'électronique, Université de M'sila; Juin 2015.
- [3] B. BECITA" Antenne micro ruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques" mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014.
- [4] B. FEIDA" Etude des guides d'ondes a cristaux Photoniques bidimensionnels" mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine,2008.
- [5] Robert Michaël FARHA " Etude d'une structure à cristal photonique « LOM » gravée dans un guide Ti:LiNbO3 dopé erbium pour l'émission de la lumière à 1,55 $\mu$ m" thèse de Doctorat, Ecole Doctorale EDITE Université Paris, septembre 2010.
- [6] R. BENDJELLOUL " Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques" mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, Novembre 2009.
- [7] A. BENMERKHI" optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques" thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Mai 2012.
- [8] Y. DEHIRI " Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux Photoniques bidimensionnels cas d'une structure connectée "" mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, 2014.
- [9] B. LOMBARDET "étude et réalisation de cristaux photoniques pour l'optique intégrée" thèse de Doctorat, Institut de photonique et d'électronique quantiques, École Polytechnique, France,2005.
- [10] Julien DROUET "Méthodes d'analyse électromagnétique spécifiques à la conception des antennes à résonateur BIE multi sources" thèse de Doctorat, Université de limoges, 2007.
- [11] Delphine NEEL"Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI" thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Novembre 2006.

[12] Guérin Nicolas, Enoch Stefan, Tayeb Gérard, Vincent Patrick "Cristaux photoniques pour la conception d'antennes directives "Equipe C.L.A.R.T.E., Institut Fresnel, UMR 6133 24 Sep 2014 .

**CHAPITRE III**  
**PRESENTATION**  
**DU LOGICIEL**  
**CST**

### 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  $\Delta t$ . Nous avons choisi ce logiciel car l'utilisation d'un outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageuse en 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 :

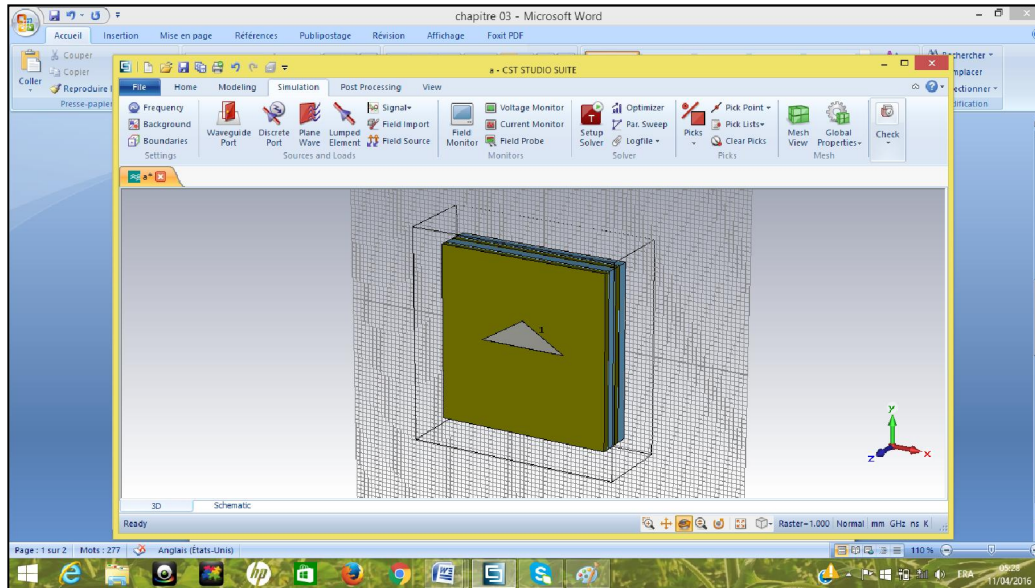
- ✚ FDTD: finite difference  
time domain;
- ✚ FEM: finite element  
method;
- ✚ MOM: moment method;
- ✚ FIT: Finite Integration  
Technique ;
- ✚ FVI: finite volume  
integral ;
- ✚ TLM : transmission Line Matrix.....etc

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

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

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique 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 STUDIO SUITE 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 : Finite Integration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant. Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes etc...

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

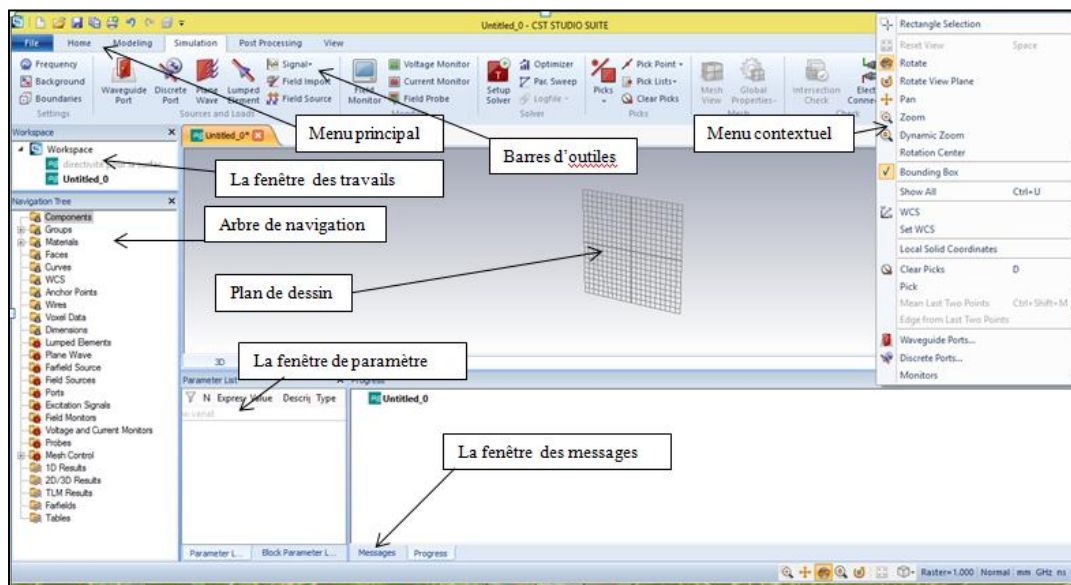
La combinaison de propriétaire PERFECT BOUNDARY APPROXIMATION (PBA) à l'efficacité inégalée de la méthode des intégrales finies est la base de CST MICROWAVE

Studio succès.

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

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

En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel numérique efficacité et précision, la FIT a été utilisé dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, 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(2015).

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 modeler très puissant.

La fenêtre de paramètre affiche une liste de tous les paramètres précédemment définis avec leurs valeurs actuelles.

La fenêtre de message affiche le texte de l'information (par exemple la sortie du solveur) le cas échéant.

Les autres éléments de l'interface utilisateur sont standards pour une application basée sur Windows.

### III .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:

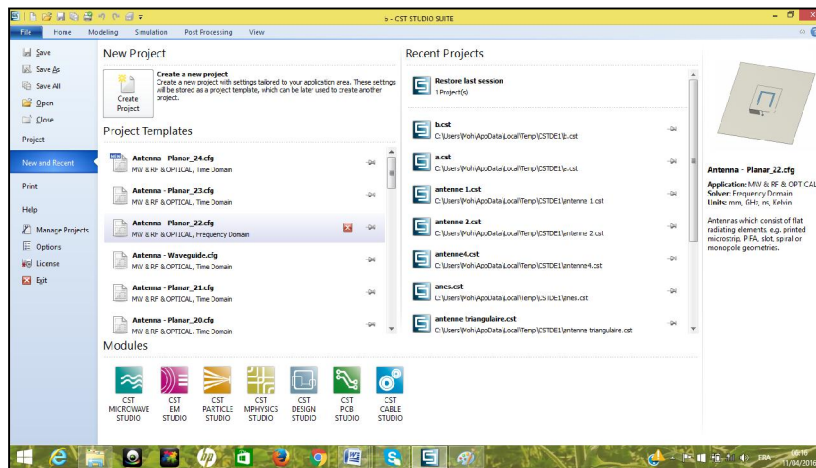
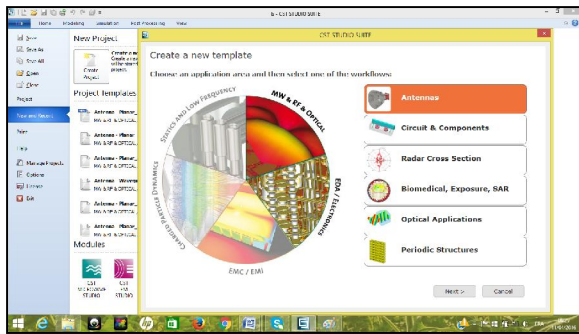
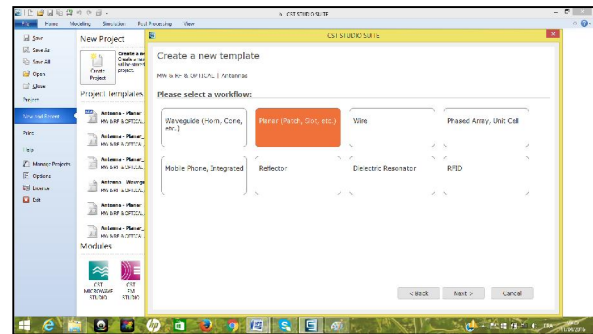


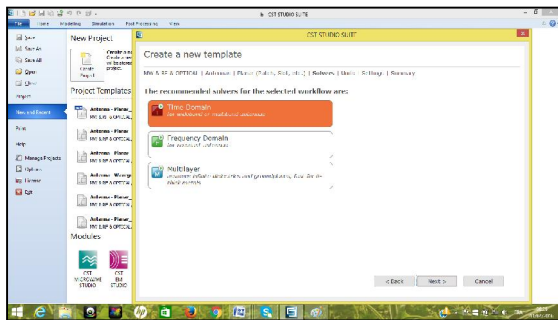
Figure III-3 La fenêtre d'accueil.



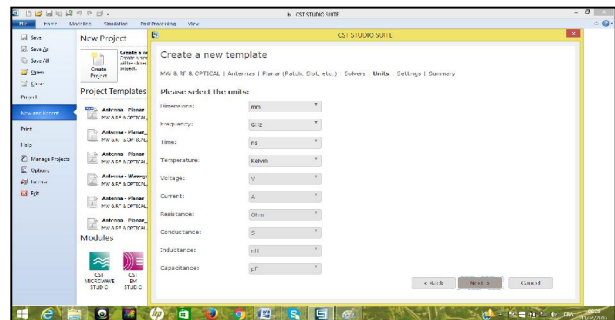
(a)



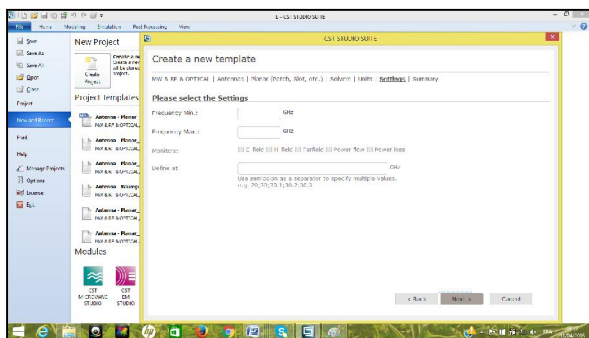
(b)



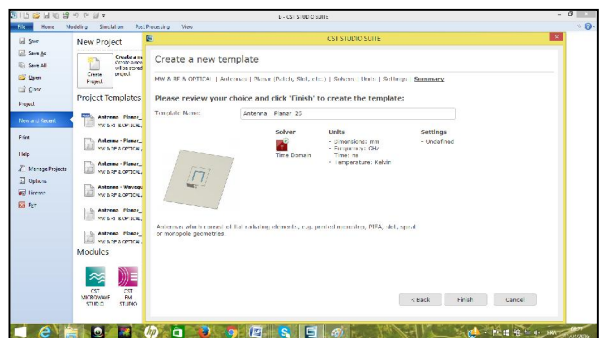
(c)



(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-clic sur un emplacement sur le plan du dessin.

3-Maintenant, on peut sélectionner la base de la face de coin de la brique sur le plan du dessin par double-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 : perfect electric conductor) et cliquez sur OK.

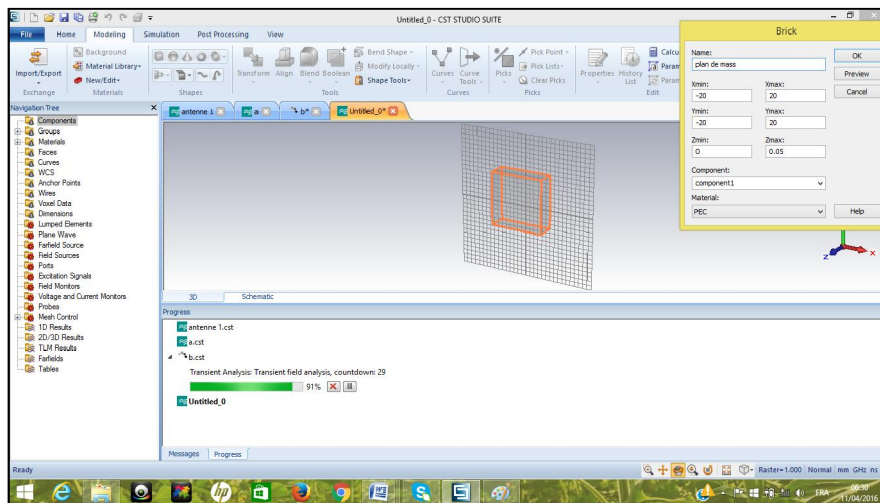



Figure III-5 Créer un plan de masse.

### III. 4.3. Créer des substrats diélectriques

Le substrat est constitué de quatre couches diélectriques.

Pour créer les couches 1 et 3 il faut :

1-Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante  et les mêmes étapes que celles du plan de masse.

2-En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (vacuum : air) 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))

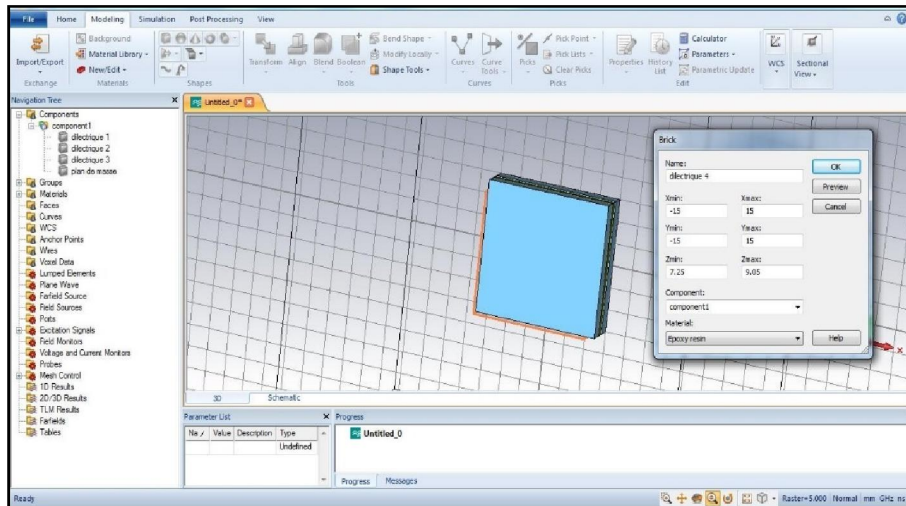
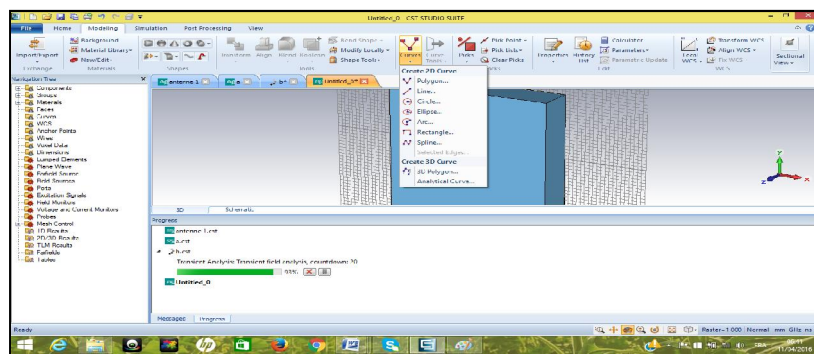
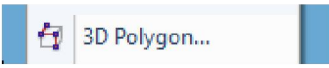


Figure III-6 Créer des substrats diélectriques.

### III.4.4 Créer le patch



(a)

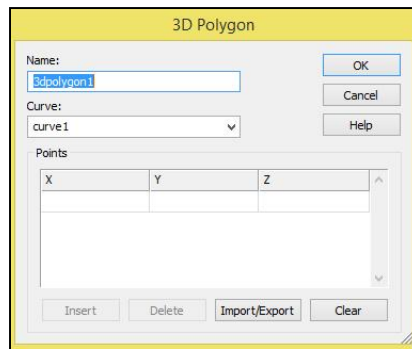
En appuyant sur **Curves** et après sur  et après il apparaît sur l'écran

Le message suivant :



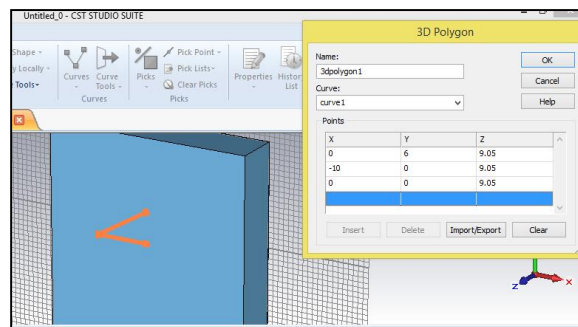
Appuyant sur **echap** du clavier du PC.

Ensuite Nous avons :



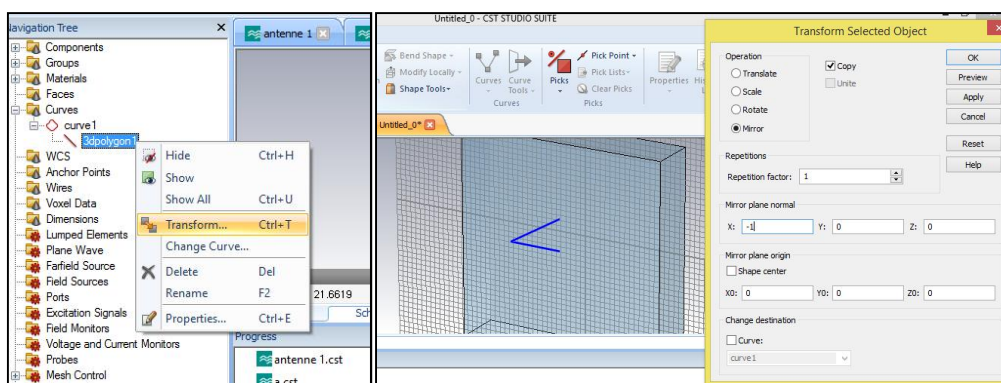
(b)

On remplit le tableau avec des 3 coordonnées des points des têtes du triangle :



(c)

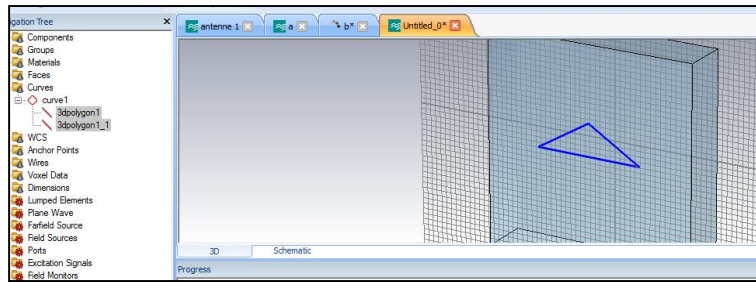
Et ensuite on continue la création du patch triangulaire:



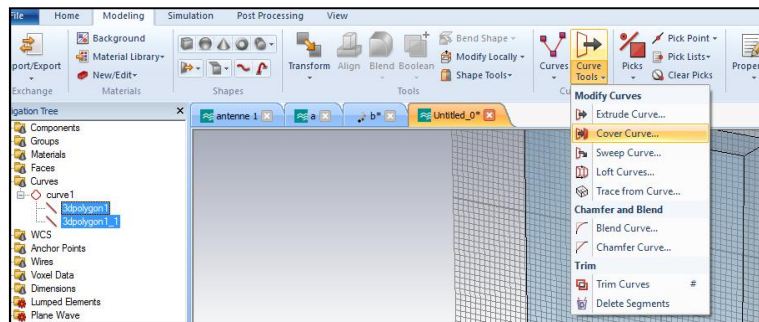
(d)

(e)

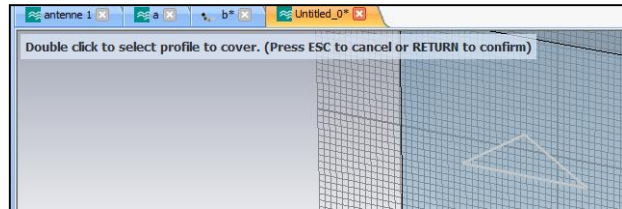
Appuyons sur OK :



(f)



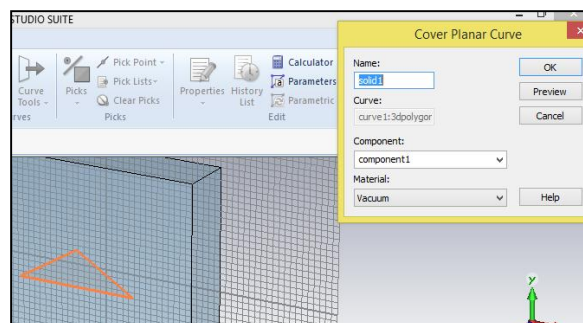
(g)



Il apparait le message suivant sur l'écran :

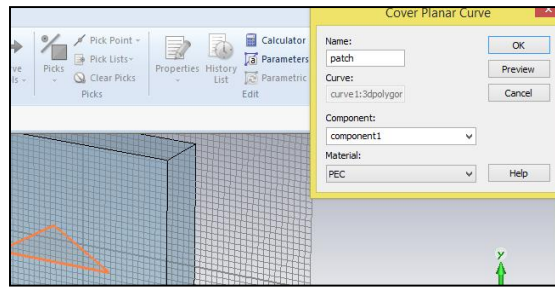
(h)

Click 2 fois sur le triangle on obtient :



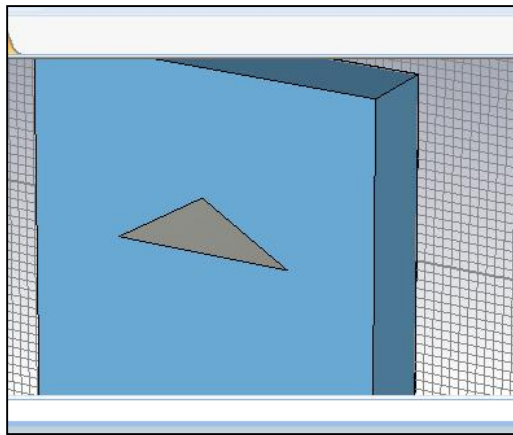
(i)

On choisit le nom et la nature du matériau (PEC pour notre cas).



(j)

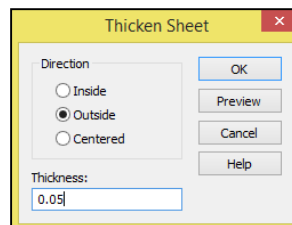
Et en appuyant sur OK. On obtient :



(k)

Ensuite en appuyant sur le triangle 2 fois  et la fenêtre  apparaît.

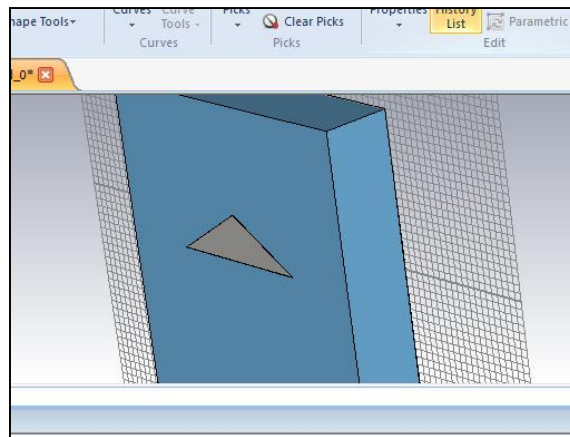
Et on obtient :



(l)

Outside : pour la position du patch sur le substrat et Thickness : pour l'épaisseur de patch, et après on clique sur Ok.


On obtient notre patch :



(m)

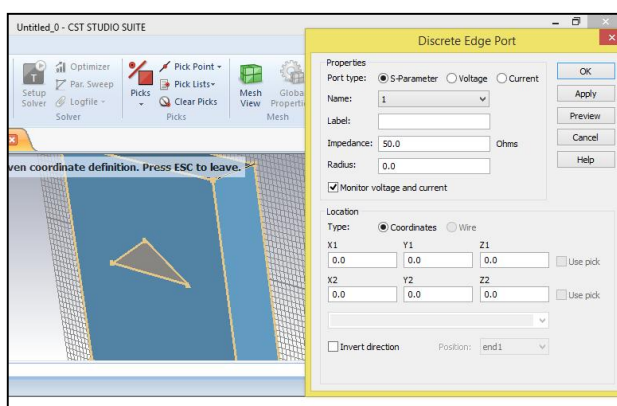
Figure III-7 (a-b-c-d-e-f-g-h-i-j-k-l-m) Créer le patch.

### III.4.5 Définir le port

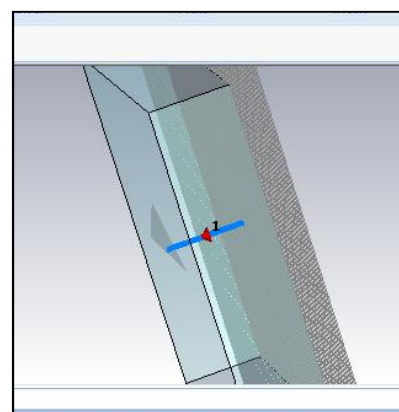
1-Activez l'outil de PORT en cliquant sur l'icône correspondante  dans la barre d'outils de l'objet.

2-En utilisant la boîte de dialogue s'ouvre on va entrer l'emplacement de ce port suivant x, y et

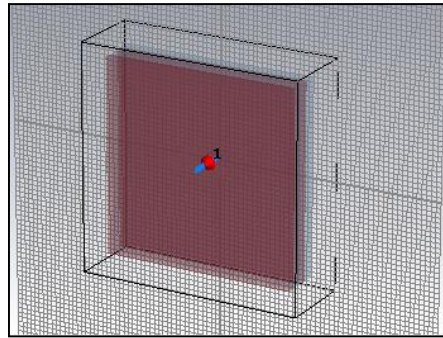
Z



(a)



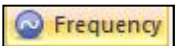
(b)



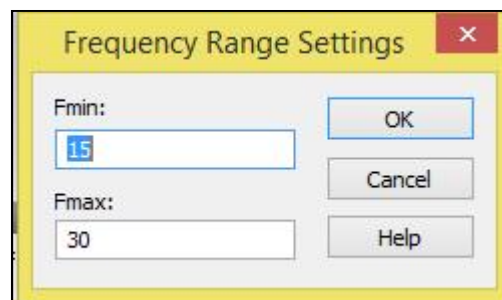
(c)

**Figure III-8 (a-b-c) 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 add space) sur tous les directions dans notre cas et cliquez sur OK.

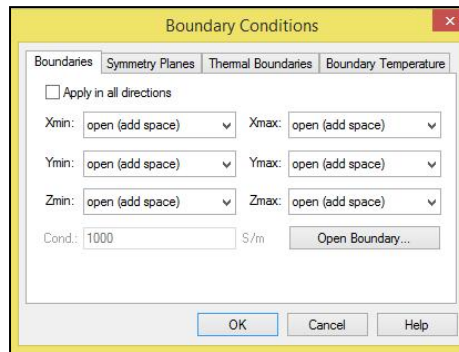



Figure III-10 Définir les conditions au bord.

### 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 -30.0 dB et cliquez sur **Start**>

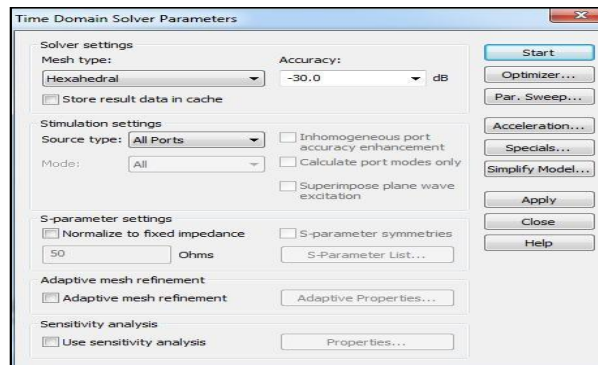


Figure III-11 choisir la précision.

### III.4.9.Résultats

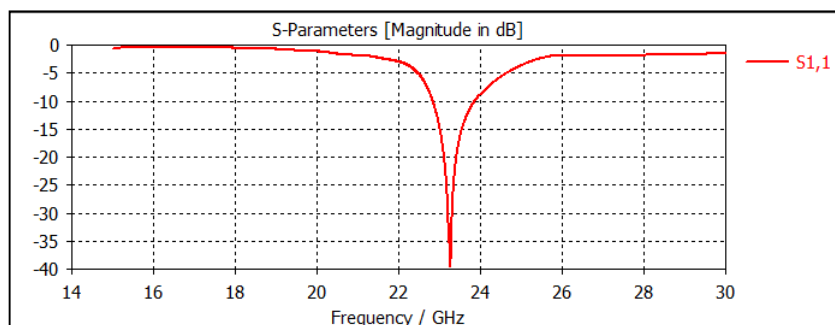
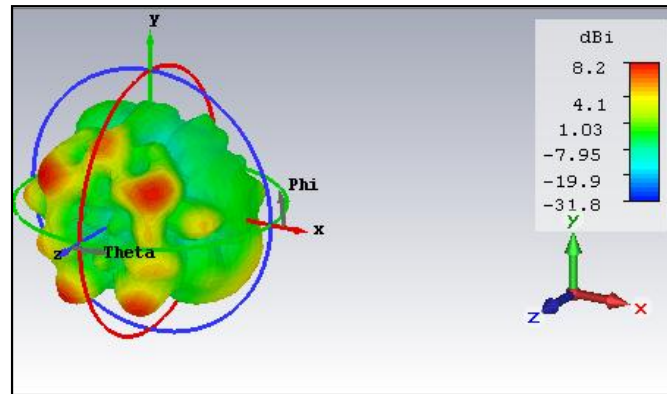


Figure III-12 Coefficient de réflexion S11 pour une antenne patch triangulaire.



**Figure III-13** directivité en 3D d'une antenne patch triangulaire.

### III.5. conclusion

Ce chapitre a été consacré à une présentation globale de l'outil de simulation CST. Le logiciel CST intègre la simulation, la visualisation et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement 3D avec une bonne précision. Dans le chapitre suivant on va étudier l'influence des d'une antenne microruban triangulaire à bande interdite photonique 1D sur ses caractéristiques.

---

## Bibliographie

- [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 'Etude 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. Poitou "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.

**CHAPITR IV**  
**RESULTATS**  
**ET DISCUSSIONS**

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure d'antenne microruban (patch) de forme triangulaire sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité. On a utilisé le logiciel de simulation CST Microwave Studio pour notre simulation.

## IV.2. 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 cristaux photoniques 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 (oil impregnated)), de l'épaisseur  $h_2=1.8\text{mm}$ , la surface du patch triangulaire  $S = 60 \text{ mm}^2$  et les dimensions du substrat  $a=b=40\text{mm}$ . Cette antenne est alimentée par sonde coaxiale.

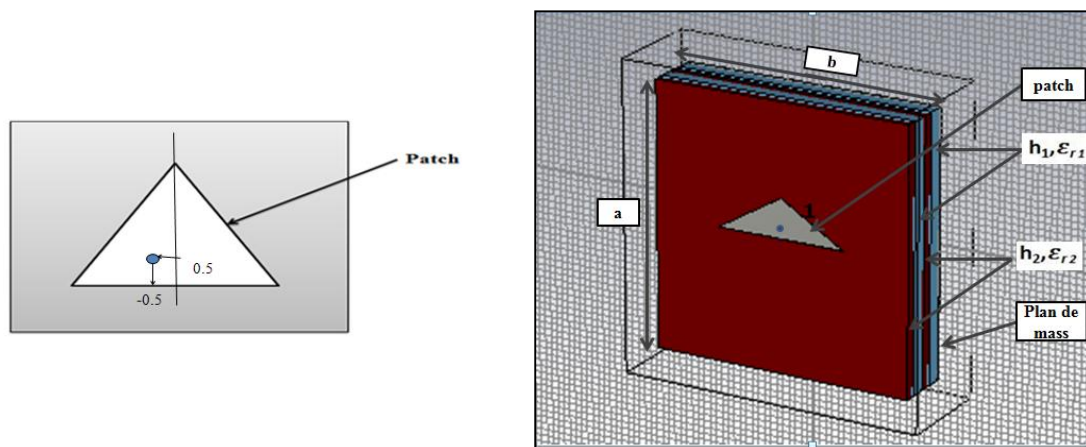


Figure VI-1 La Structure d'une antenne microruban.

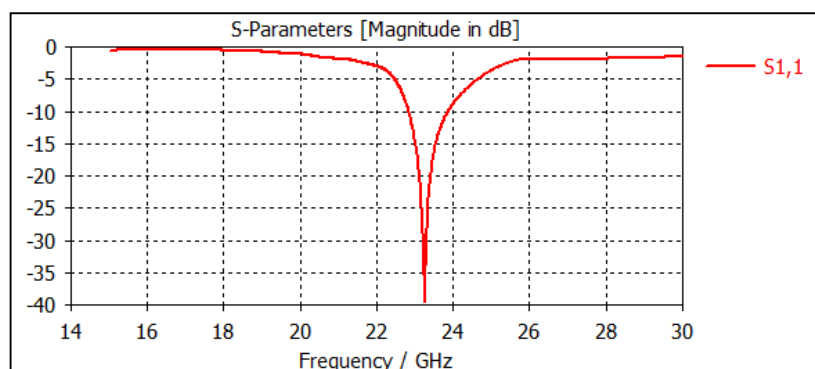


Figure IV-2 Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch triangulaire.

A partir du Figure (IV-2) qui représente le Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch triangulaire, on remarque que la fréquence de résonance est 23.262 GHz.

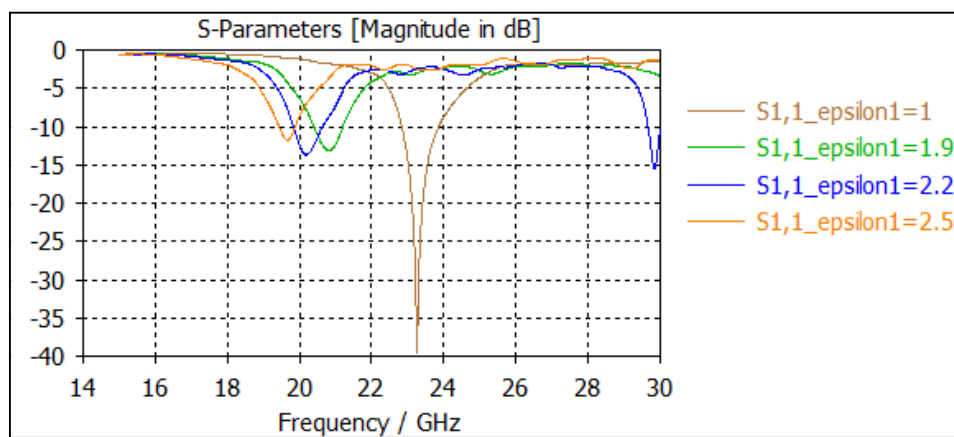
### IV.3. Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante

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

On a :  $\epsilon_{r1}$ =(1 : vacuum, 1.96 :Rogers RT 5880LZ(loss free), 2.2 :Arlon Di 880 (loss free) ,2.5 :Arlon AD 250 (loss free)) et  $\epsilon_{r2}$ =(3.6 : Arlon AD 360 (loss free),3.87 : paper (oil impregnated) ,4.1 :Getek ML200M (loss free),4.5 :Arlon AR 450 (loss free)).

#### IV.3.1. 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 surface du patch  $S=60 \text{ mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r2}=3.87$  (Paper (Oil Impregnated)), et leurs épaisseurs  $h_1=2.7\text{mm}$  et  $h_2=1.8 \text{ mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$  (Figure IV -3).



**Figure IV- 3** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ )

A partir des courbes du coefficient de réflexion  $S_{11}$  Figure (IV-3), on déduit la fréquence de résonance et la bande passante de la structure étudiée en fonction la constante diélectrique ( $\epsilon_{r1}$ ) Tableau (IV -1).

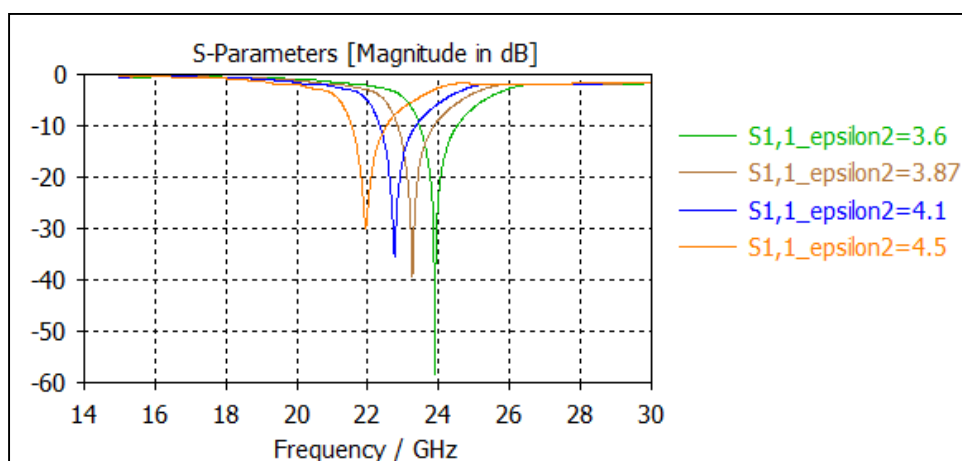
Permittivité ( $\epsilon_{r1}$ )	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
1	23.262	1.043
1.9	20.798	0.801
2.2	20.191	0.8
2.5	19.67	0.45336

**Tableau IV -1** La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r1}$ ).

A partir du Tableau (IV-1) et les courbes de la Figure (IV-3) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$ .

### IV.3.2. 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 surface du patch  $S=60 \text{ mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et leurs épaisseurs  $h_1=2.7\text{mm}$  et  $h_2=1.8 \text{ mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$  (Figure-IV-4).



**Figure IV-4** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la permittivité ( $\epsilon_{r2}$ )

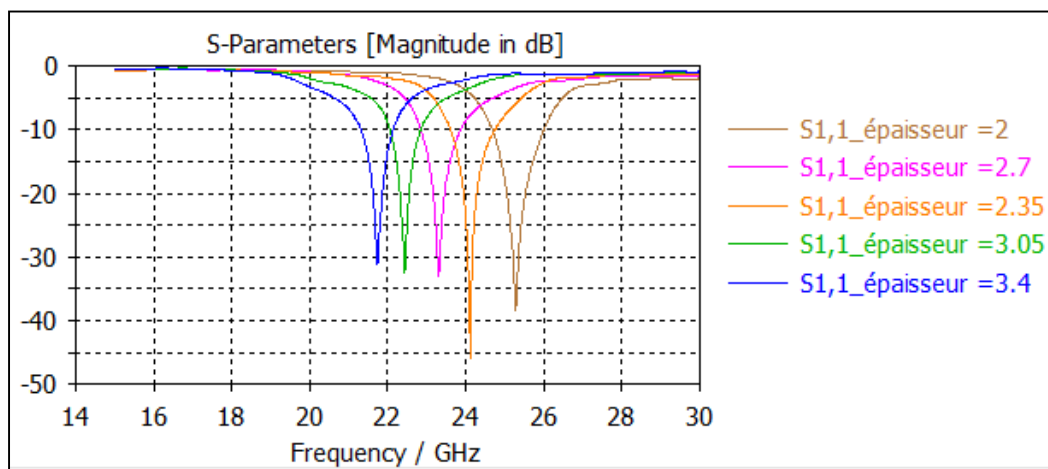
Permittivité ( $\epsilon_{r2}$ )	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
3.6	23.905	1.078
3.87	23.262	1.043
4.1	22.759	1.026
4.5	21.944	1.009

**Tableau IV-2** Variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de valeur de epsilon ( $\epsilon_{r2}$ )

A partir du Tableau (IV-2) et les courbes de la Figure (IV-4) 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  $\epsilon_{r2}$ .

### IV.3.3. 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 pour une surface du patch  $S=60 \text{ mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2} = 3.87$  leur épaisseur  $h_2=1.8 \text{ mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$  (Figure-IV-5).



**Figure IV-5** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat

$h_1$

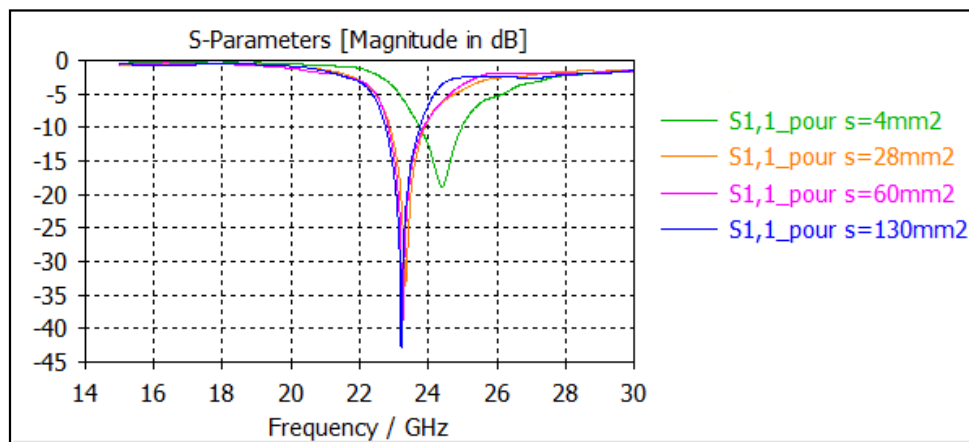
épaisseur de vacum $h_1$ (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
2	25.289	1.286
2.35	24.099	1.1649
2.7	23.262	1.043
3.05	22.43	0.836
3.4	21.735	0.830

**Tableau IV-3** Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat  $h_1$

A partir du Tableau (IV-3) et les courbes de la Figure (IV-5) pour différentes valeurs de l'épaisseur de substrat  $h_1$ , on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat.

#### IV.3.4. Effet de la variation des dimensions du patch triangulaire

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la Variation de surface  $S$  du patch triangulaire, les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1}=1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$  leurs épaisseurs  $h_1=2.7$  mm et  $h_2=1.8$  mm, la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40$ mm (Figure-IV-6).



**Figure IV-6** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la surface du patch triangulaire ( $S$ ).

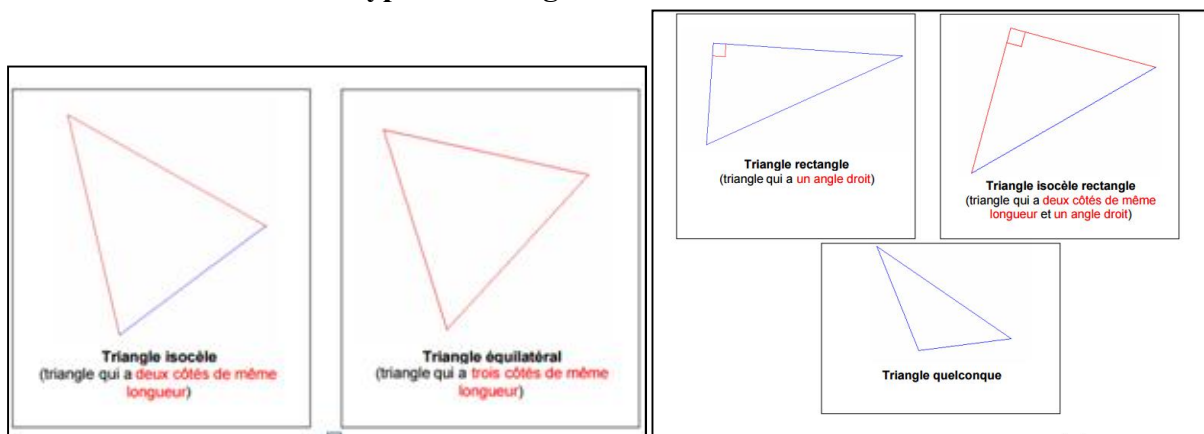
surface S ( $mm^2$ )	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
4	24.41	1.212
28	23.349	1.026
60	23.262	1.043
130	23.203	1.015

**Tableau IV-4** Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la surface du patch triangulaire (S).

A partir du Tableau (IV-4) et les courbes de la Figure (IV-6) pour différentes valeurs de la surface du patch (S). On remarque que la fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la diminution de la surface du patch (S).

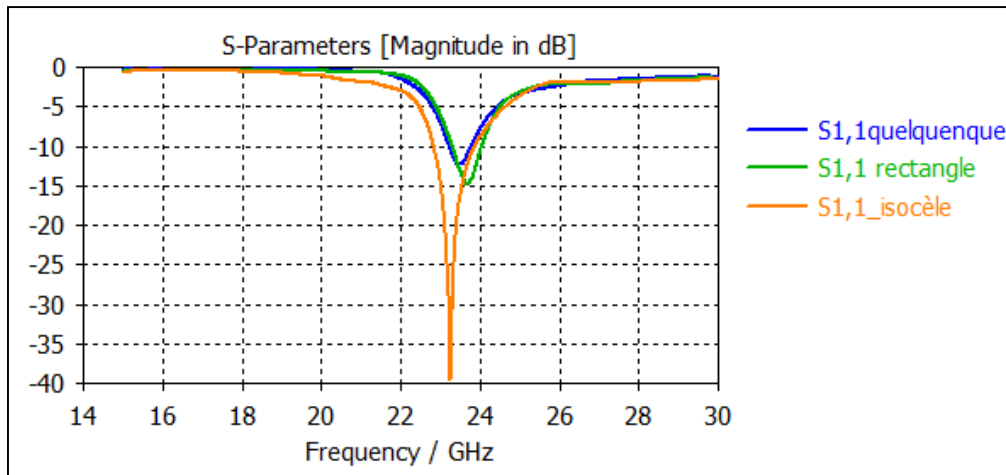
### IV.3.5. Effet de la forme du patch triangulaire (type du triangle)

#### IV.3.5.a. Les différents types de triangles



**Figure IV-7** Les différents types de triangles.

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de la forme du patch triangulaire, avec la surface du triangle  $S=60mm^2$ , les deux couches diélectriques ont les permittivités :  $\epsilon_{r1}=1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$ , leurs épaisseurs  $h_1=2.7\text{ mm}$  et  $h_2=1.8\text{ mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40mm$  (Figure-IV-8).



**Figure IV-8** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différents types du triangle .

Les types du patch triangulaire	Fréquence de résonance (GHz)	Bande passante (GHz)
Quelconque	23.49	0.586
Isocèle	23.262	1.043
Rectangle	23.685	0.967

**Tableau IV -5** Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différents types du triangle.

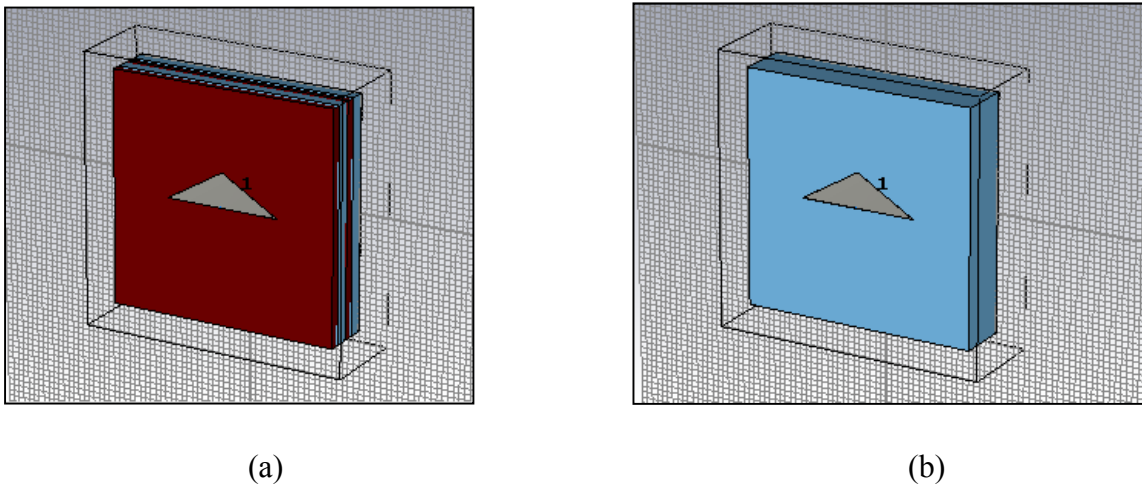
A partir du Tableau( IV-5) et les courbes de la Figure (IV-8) pour différentes formes du patch, on remarque que la fréquence de résonance et la bande passante varient avec la variation de forme du patch.

#### IV.4. Influence des paramètres de l'antenne sur la directivité

Dans cette partie on étudie la variation de la directivité de la fréquence de résonance en fonction des paramètres de l'antenne, premièrement on compare une structure à substrat normal avec une structure à substrat cristal photonique, et ensuite l'influence des paramètres géométriques (surface et la forme du triangle de patch) et la permittivité des différentes couches sur la directivité.

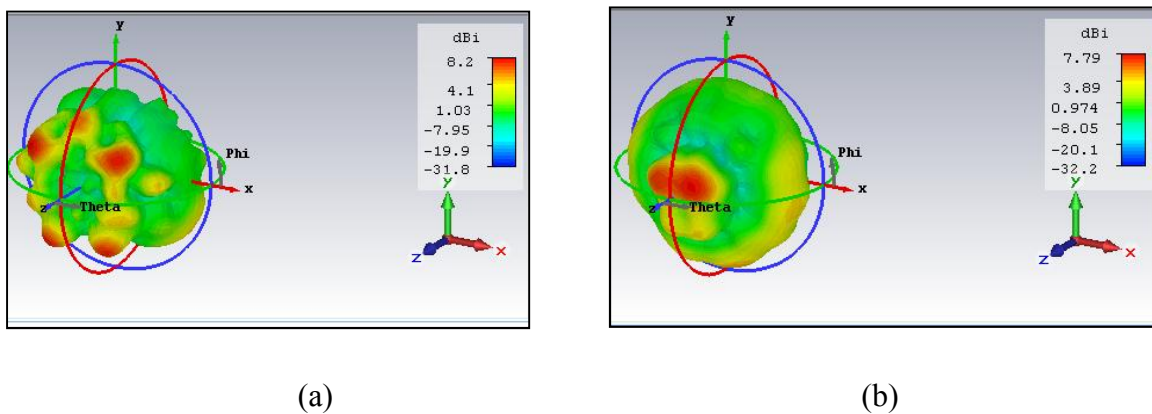
#### IV.4.1. Comparaisons entre un substrat cristal photonique et un substrat normal

On étudie la variation de la directivité de deux antennes microrubans de forme triangulaires: une à substrat cristal photonique, de surface  $S=60 \text{ mm}^2$ , la permittivité du substrat qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et leurs épaisseur  $h_1=2.7 \text{ mm}$  et les deux autres couches diélectriques de  $\epsilon_{r2}=3.87$ , d'épaisseur  $h_2=1.8 \text{ mm}$ , et une antenne à substrat normal dans ce cas on utilise le diélectrique vacuum d'épaisseur  $h=9 \text{ mm}$ , et la surface  $S=60 \text{ mm}^2$  (Figure IV-9).



**Figure IV-9** Structure des antennes : **a)** à substrat cristal photonique **b)** à substrat normal.

La Figure (IV-9) permet une visualisation en 3D la directivité pour les deux antennes.



**Figure IV-10** La directivité en 3D : **a)** Substrat cristal photonique **b)** Substrat normal.

A partir de Figure (IV-10) on déduit la directivité sur le Tableau (IV-6).

Substrat	Directivité (dBi)
Normal	7.79
Cristal photonique	8.2

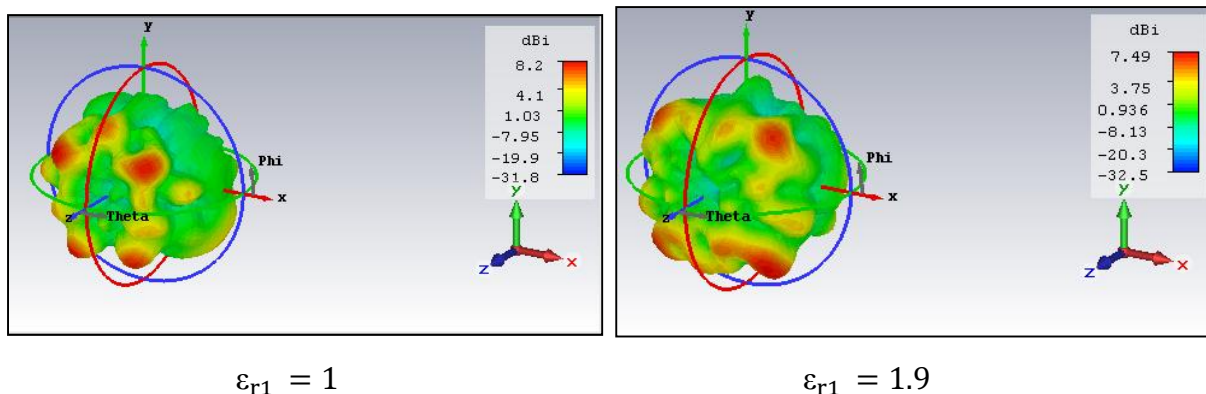
**Tableau IV-6** La directivité pour différents substrats

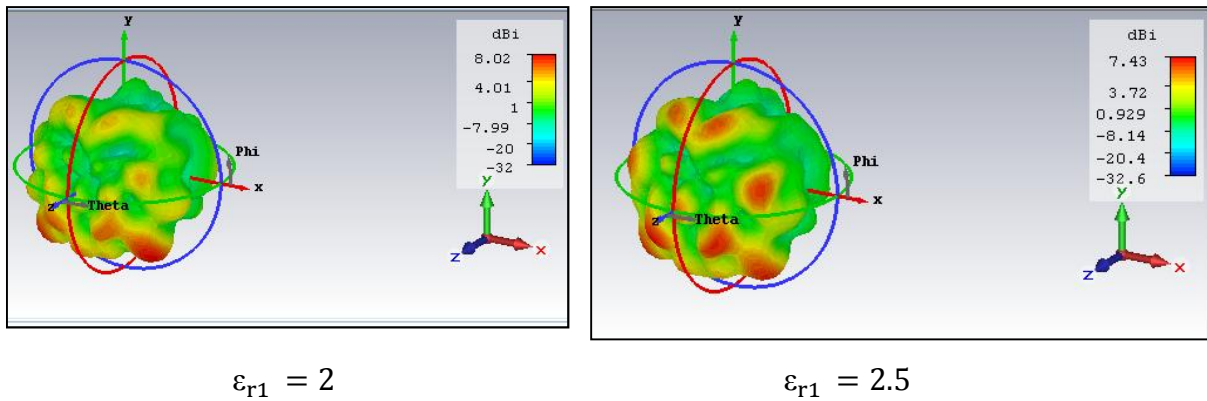
A partir du Tableau ( IV-6) et la Figure( IV-10) pour différents substrats, on remarque que la directivité est plus importante pour le substrat cristal photonique par rapport au substrat normal.

#### IV.4.2. Effet de la variation de la constante diélectrique $\epsilon_{r1}$

On étudie la variation de la directivité en fonction de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$  et leur épaisseur  $h_2= 2.7\text{mm}$  d'une antenne microruban à substrat cristal photonique pour une surface du patch  $S= 60\text{mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r2}=3.87$ , et leurs épaisseur  $h_2=1.8\text{mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{ mm}$  (Figure IV-11).

La Figure IV-11 permet une visualisation en 3D de la directivité, dans le Tableau IV-3 les résultats obtenus pour une variation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$ .





**Figure IV-11** La directivité en 3D pour différents valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$ .

A partir de Figure (IV-11) on déduit la directivité sur le Tableau (IV-7).

Permittivité $\epsilon_{r1}$	Directivité (dBi)
1	8.2
1.9	7.49
2.2	8.02
2.5	7.43

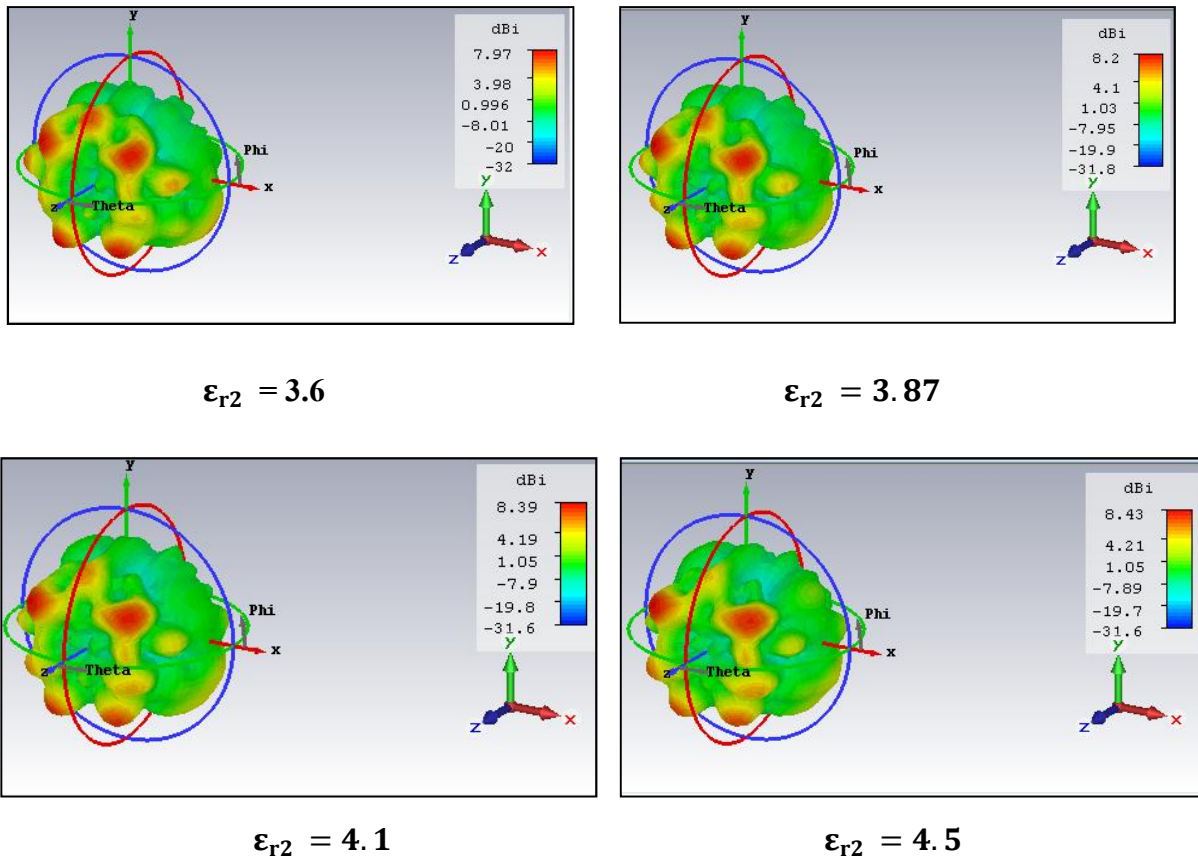
**Tableau IV-7** Variation de la directivité pour différents valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$

A partir du Tableau (IV-7) et la Figure (IV-11) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r1}$  de substrat on note que : la directivité dépend de la permittivité  $\epsilon_{r1}$ , mais la variation de la directivité n'est pas uniforme.

#### IV.4.3. Effets de la variation de permittivité $\epsilon_{r2}$

On étudie la variation de la directivité en fonction de la constante diélectrique  $\epsilon_{r2}$ , d'une antenne microruban à substrat cristal photonique pour une surface du patch  $S= 60\text{mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et leurs épaisseurs  $h_1=2.7\text{mm}$  et  $h_2=1.8\text{mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$  (Figure IV-12).

La Figure IV-12 permet une visualisation en 3D de la directivité pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .



**Figure IV-12** la directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$

A partir de Figure (IV-12) on déduit la directivité sur le Tableau (IV-9).

La constante diélectrique $\epsilon_{r2}$	Directivité (dBi)
3.6	7.97
3.87	8.2
4.1	8.39
4.5	8.43

**Tableau IV-8** Variation de la directivité en fonction de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .

A partir du Tableau (IV-8) et la Figure (IV-12) pour différentes valeurs de la permittivité  $\epsilon_{r2}$  du substrat on remarque que la directivité augmente avec l'augmentation de la permittivité  $\epsilon_{r2}$ .

#### IV.4.4. L'effet de Variation de l'épaisseur de substrat $h_1$

On étudie la variation de la directivité en fonction de la variation de l'épaisseur du substrat à partir de variation de l'épaisseur  $h_1$  d'une antenne pour une surface du patch  $S=60 \text{ mm}^2$ , les deux diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1} = 1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$ , l'épaisseur  $h_2=1.8\text{mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$ .

La Figure (IV-13) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de l'épaisseur  $h_1$ .

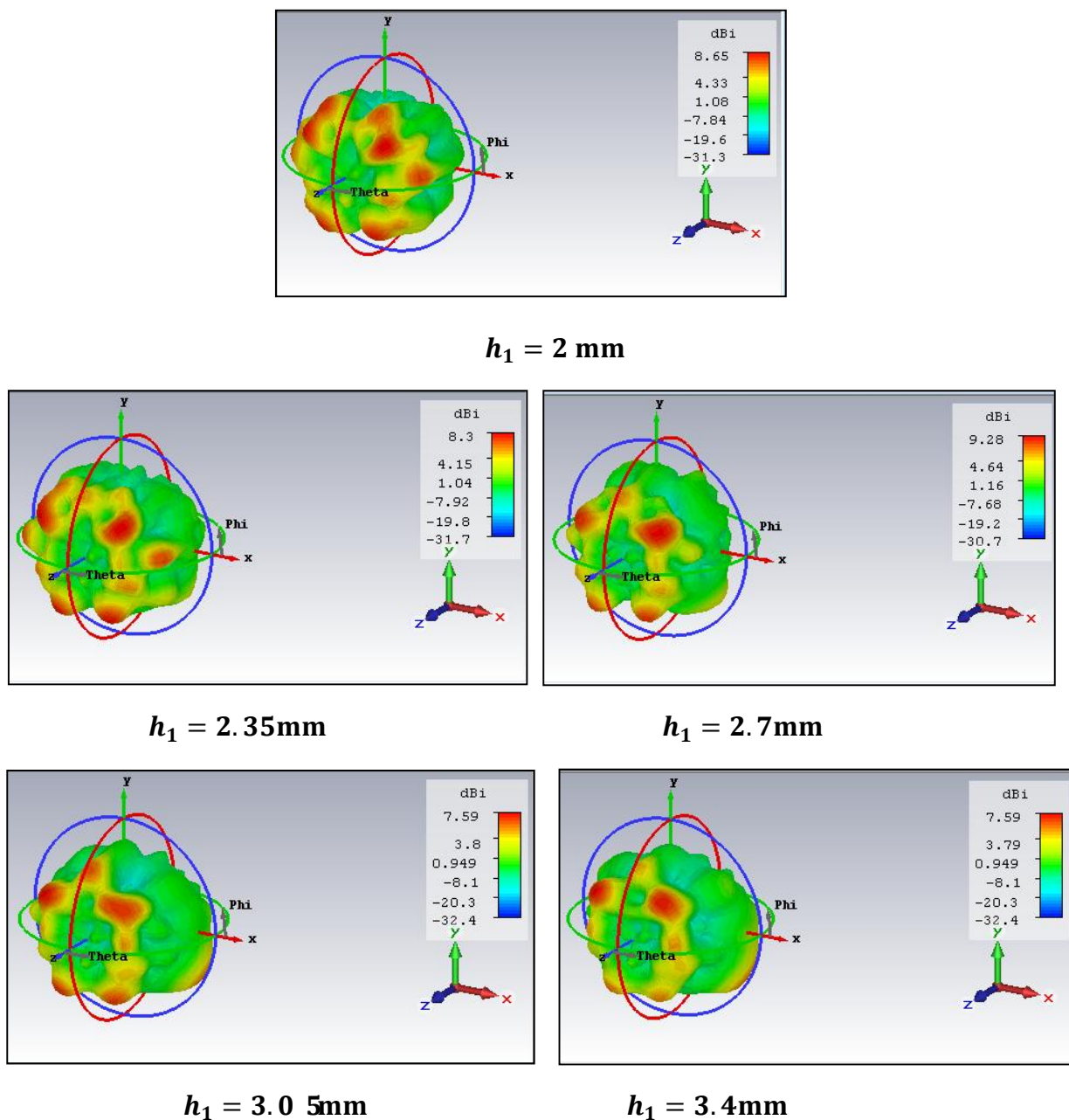


Figure IV-13 La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur  $h_1$

A partir de Figure (III-12) on déduit la directivité sur le Tableau (IV-9).

Epaisseur du substrat du patch $h_1$ (mm)	Directivité (dBi)
2	8.65
2.35	8.3
2.7	9.28
3.05	7.59
3.4	7.59

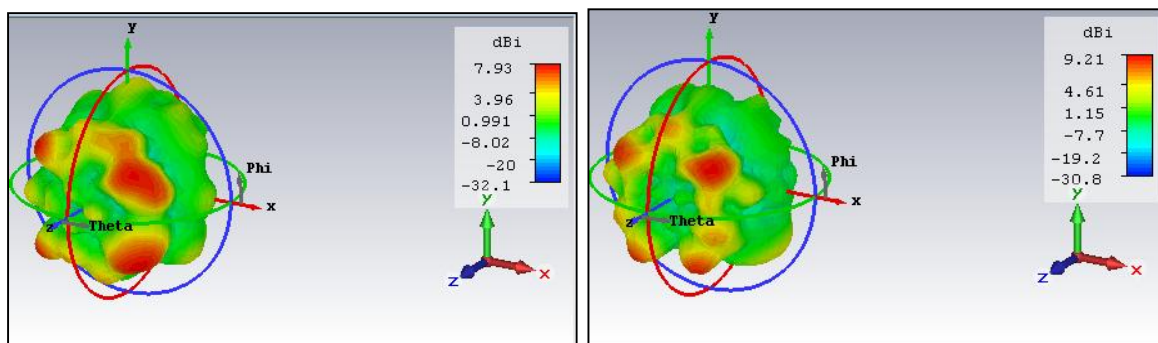
**Tableau IV-9** Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur de substrat de patch  $h_1$ (mm)

A partir du Tableau (IV-9) et la Figure (IV-13) pour différente valeur de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$ , on note que la directivité dépend de l'épaisseur du substrat du patch  $h_1$  mais la variation de la directivité n'est pas uniforme.

#### IV.4.5. L'effet de Variation des dimensions du patch triangulaire

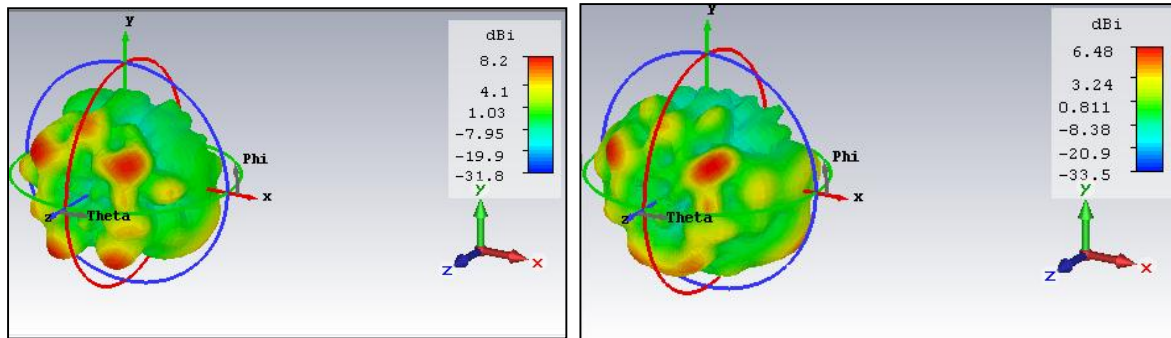
On étudie la variation de la directivité en fonction de la variation de la surface  $S$  du patch triangulaire, les deux couches diélectriques ont une permittivité  $\epsilon_{r1}=1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$  leurs épaisseurs  $h_1=2.7$  mm et  $h_2=1.8$  mm, la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40$ mm Figure (IV-14).

La Figure (IV-14) permet une visualisation en 3D de la directivité pour une variation de la surface  $S$  du patch triangulaire.



$S=4$  mm<sup>2</sup>

$S=28$  mm<sup>2</sup>



$S=60 \text{ mm}^2$

$S=130 \text{ mm}^2$

**Figure IV-14** la directivité en 3D pour une variation de la surface S du patch.

A partir de Figure ( IV-14 )on déduit la directivité sur le Tableau (IV-10).

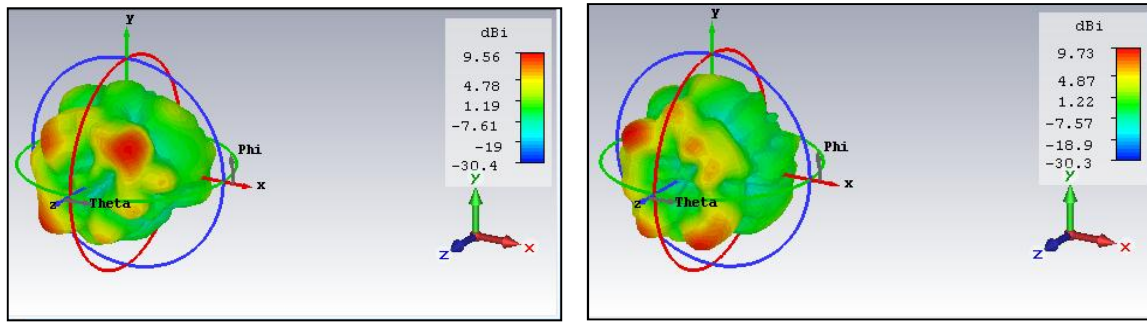
La surface de patch S $\text{mm}^2$	Directivité (dBi)
4	7.93
28	9.21
60	8.2
130	6.48

**Tableau IV-10** Variation de la directivité pour une variation de la surface S du patch

A partir du Tableau (IV-10) et la Figure (IV-14) pour différentes valeurs de la surface du patch  $S(\text{mm}^2)$  on note que la directivité dépende de la surface S du patch, mais la variation de la directivité n'est pas uniforme.

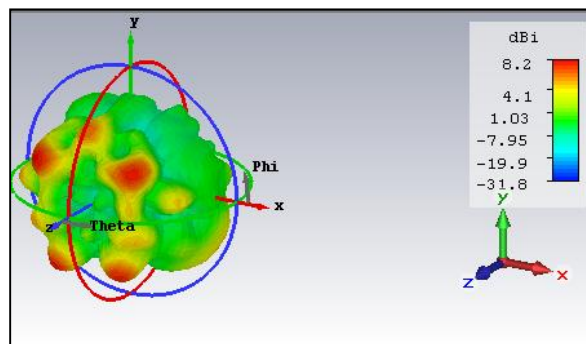
#### IV.4.6. L'effet de Variation de la forme de patch triangulaire (type de triangle)

On étudie la variation de la directivité en fonction de la variation de la forme du patch triangulaire, la surface  $S=60\text{mm}^2$ , les deux couches diélectriques ont les permittivités  $\epsilon_{r1}=1$ , et  $\epsilon_{r2}=3.87$ , leurs épaisseurs  $h_1=2.7 \text{ mm}$  et  $h_2=1.8 \text{ mm}$ , la longueur et la largeur du substrat  $a=b=40\text{mm}$  (Figure –IV-15).



a- patch rectangle

b- patch quelconque



c- patch isocèle

**Figure III-15 (a-b-c)** Directivité pour différentes formes de triangle.

A partir de Figure( IV-15) on déduit la directivité sur le Tableau( IV-11).

Les différents types de patch triangulaire.	Directivité (dBi)
Quelconque	9.73
Isocèle	8.2
Rectangle	9.56

**Tableau IV-11** Variation de la directivité en fonction de différents types de patch triangulaire.

A partir du Tableau( IV-11) et la Figure (IV-15) pour différents types ou forme de patch on note que : la directivité varie entre les différentes formes du patch.

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié une antenne microruban de forme triangulaire imprimée sur un substrat cristal photonique 1D, et nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques (surface, l'épaisseur de substrat et la forme de triangle du patch) et les permittivités 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.

A partir des résultats nous avons conclu que :

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

1- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$ .

2- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r2}$ .

3- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat.

4- La fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la diminution de surface S du patch (**S**).

5- La fréquence de résonance et la bande passante varient avec la variation de forme du patch.

### B- Pour la directivité :

1- La directivité est plus intéressante pour un substrat cristal photonique par rapport à un substrat normal ;

2- La directivité dépend de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$  ;

3- La directivité augmente avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r2}$  ;

4- La directivité dépend de l'épaisseur du substrat de patch ( $h_1$  de  $\epsilon_{r1}$ ) ;

5- La directivité varie pour les différentes formes du patch.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## Conclusion générale

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

Nous avons commencé par la présentation, la description, le mécanisme de fonctionnement, les propriétés des antennes patches, 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.

Les cristaux photoniques sont très prometteurs pour la réalisation des antennes et des composants optiques planaires compacts et originaux. Ils représentent une plateforme extrêmement intéressante pour la future optique intégrée submicronique car ils possèdent les qualités adéquates en terme de confinement et de dispersion.

L'étude d'une antenne microruban de forme triangulaire simulé sur un substrat cristaux photonique, où nous avons vérifié quelques résultats, les résultats obtenus sont:

- ✓ Les caractéristiques de l'antenne microruban sont liées directement à ses paramètres dimensionnels.
- ✓ On constate que la fréquence de résonance et la bande passante augmente avec le décroissement la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$  et la constante diélectrique  $\epsilon_{r2}$ .
- ✓ La diminution de la surface du patch augmente la fréquence de résonance et la bande passante.
- ✓ La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat.
- ✓ La fréquence de résonance et la bande passante varient avec la variation de la surface du patch.
- ✓ Un substrat à cristaux photonique a une influence sur la directivité.
- ✓ On remarque que la directivité augmente avec substrat cristaux photonique par rapport substrat normale.
- ✓ La directivité change en variant les dimensions du patch et les permittivités des différentes couches du substrat.
- ✓ la directivité varie entre les différentes formes des patches.

- ✓ la directivité dépend de la constante diélectrique  $\epsilon_{r1}$  ;
- ✓ la directivité augmente avec l'augmentation de la constante diélectrique  $\epsilon_{r2}$  .

Comme perspectives nous proposons l'étude des antennes microrubans à cristaux photoniques 2D et 3D, ainsi l'effet des paramètres de l'antenne sur ses caractéristiques.