

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION (STLC)

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : SEGHIOUR Rima

CHERIFI Linda

Intitulé

Conception d'une antenne BIE bi-bande

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا "

إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ "

(صدق الله العظيم)

الآية 32 من سورة البقرة

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement À Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour terminer ce mémoire.

Nous ne pouvons, réellement, trouver les mots élégantes que mérite notre encadreur Dr. Fadila BENMEDDOUR, vous nous avez toujours encouragés et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu consacrer et sans ses conseils, son aide et sans elle ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

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

Grand Merci

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À l'âme qui été pour nos corps mieux qu'un cœur :

Nos parents.

À nos frères et sœurs.

À nos Familles.

À ceux qui ont contribués de près ou de loin à

l'aboutissement de ce travail.

À Tous nos proches, nos amies et nos collègues.

Nous dédions ce travail

Ríma Línda

Table des matières

<i>Remerciement</i>	i
<i>Dedicates</i>	ii
Liste des Figures	vi
Liste Des Tableaux	ix
Liste des Abréviations.....	x
Résumé	xi
ABSTRACT	xi
ملخص.....	xi
Introduction générale.....	2
Chapitre 02: Généralité sur les antennes microrubans bi-bandes	
I.1. Introduction	4
I.2.Historique	4
I.3.Définitions et généralités sur les antennes microstrips bi-bande	5
I.4.Description des antennes microstrip bi-bande	7
I.4.1. CMSA avec un U-slot	8
I.4.2.Description des éléments constitutifs d'une antenne microstrip bi bande	9
I.4.2.1. Les couches métalliques:	9
I.4.2.2. Le substrat	9
I.5. Principe de fonctionnement des antennes microstrips bi-bandes	10
I.6. Caractéristiques et propriétés d'antenne microstrip bi-bande	11
I.6.1. Le coefficient de réflexion S11	11
I.6.2. La bande passante	12
I.6.3.L'impédance d'entrée de l'antenne	13
I.6.4. Adaptation et condition d'adaptation	13
I.6.5.Directivité, Gain d'une antenne	14
I.6.6.Le diagramme de rayonnement.....	15
I.7. Techniques d'alimentation des éléments rayonnants	16
I.7.1 Alimentation par ligne micro ruban	16

I.7.2 Alimentation par câble coaxiale	17
I.7.3. Alimentation par fente.....	18
I.7.4. Alimentation par proximité	18
I.8.Les Avantages et inconvénients des antennes microstrips bi-bande.....	19
I.9.Les applications des antennes microstrips bi-bande	20
I.10. Conclusion	20
Bibliographie.....	21

Chapitre 02: Généralités sur les matériaux BIE

II-1. Introduction.....	25
II-2.Historique	25
II-3.Définitions de base des matériaux à bande interdite électromagnétique	26
II-4.Principe de fonctionnement de l'antenne BIE.....	26
II-5. Description des matériaux BIE.....	29
II-5.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D)	30
II-5.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D)	31
II-5.3 Structures périodiques tridimensionnelle (3D)	33
II-6 Description des structures BIE métalliques	34
II-6.1 les structures métalliques à base de FSS	35
II-7. Propriétés électromagnétiques des structures BIE à défaut.....	35
II-8.Domaine d'applications	36
II-8.1 Dans le domaine de l'optique les fibres optiques.....	36
II-8.2 Dans le domaine micro-onde.....	37
II-9 Conclusion	37
Bibliographie.....	38

Chapitre 03:Résultats & discussions

III.1 Introduction	41
III.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO	41
III.2.1. La méthode d'intégration finie	42
III.2.2. Aperçu de la structure de l'interface utilisateur	43
III.3. Exemple d'un projet en CST	44
III.3.1. Simulation d'une antenne patch circulaire	44
III.3.1.1. Pour une antenne patch circulaire mono bande à substrat normal	44

III.3.1.2. Pour une antenne patch circulaire bi-bande à substrat normal.....	46
III.4: Antenne microruban circulaire bi-bande à substrat normal.....	48
III.4.1 Antenne microruban circulaire bi-bande à substrat normal avec et sans slot.....	48
III.4.2 Effet de la variation de l'épaisseur du substrat d'une antenne bi-bande (avec slot)	51
III.4.3 Effet de la variation du rayon du patch	52
III.4.4 Effet de la Variation du matériau du substrat	53
III.4.5 Effet de la variation de la largeur du slot « U »:	54
III.4.6 Effet de la variation de l'emplacement du slot « U »:.....	56
III.5. Antenne BIE bi-bande.....	57
III.5.1 Antenne microruban circulaire avec slot à substrat simple et antenne BIE avec slot	59
III.5.2 Effet de la variation de l'épaisseur du substrat BIE	60
III.5.3 Effet de la Variation du rayon du patch BIE.....	62
III.5.4. Effet de la Variation du matériau du substrat BIE.....	63
III.5.5 Effet de la Variation de largeur du slot « U »	64
III.5.6 Effet de la Variation de l'emplacement du slot « U ».....	65
III.6. LTE	66
III.7 .Conclusion	67
Bibliographie.....	69
Conclusion générale	71

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: Structure d'une antenne microstrip.....	6
Figure I.2: VSWR représente deux catégories de fonctionnement double bande	7
(a) fixe et (b) accordable	7
Figure I. 3: Les différentes formes d'une antenne imprimée	8
Figure I.4: CMSA avec un U-slot.....	8
Figure II.5: a) Principe de fonctionnement D'une antenne BIE métalliques b) Résonateur BIE à de plan masse structure	11
Figure I.6: Coefficient de réflexion à l'entrée d'une antenne patch en fonction de la fréquence	13
Figure I.7: L'impédance d'entrée d'une l'antenne.	13
Figure I.8: Diagramme de rayonnement d'un dipôle.....	16
Figure I.9: Alimentation par ligne microruban	17
Figure I.10: Technique d'alimentation par câble coaxiale	17
Figure I.11: Technique d'alimentation de couplage par fente.....	18
Figure I.12: Méthode d'alimentation par couplage par proximité.	18

Chapitre II

Figure II.1: Principe de miroir de Bragg	25
Figure II.2: Différentes configurations de matériau B.I.E.....	26
Figure II.3: Matériau B.I.E sans défaut	26
Figure II.4: Matériau B.I.E avec défaut	26
Figure II.5: Diagramme d'une antenne à matériau B.I.E	27
Figure II.6: Distribution du champ électrique tangentiel.....	27
Figure II.7: Diagramme d'une antenne à demi-matériau B.I.E (plan de masse).....	28
Figure II.8: Antenne BIE	29
Figure II.9: Exemples de structures périodiques	30
Figure II.10: Structure 1D et son diagramme de dispersion.....	31
Figure II.11: structure périodique unidimensionnelle	31
Figure II.12: Structure périodique 2D connectée	32
Figure II.13: Structure périodique déconnectée.....	32
Figure II.14: Réseau carré.....	33

<i>Figure II.15:</i> Réseau triangulaire	33
<i>Figure II.16:</i> Réseau hexagonal	33
<i>Figure II.17:</i> Différentes structure 3D	34
<i>Figure II.18:</i> Motifs élémentaires pouvant constituer une FSS	35
<i>Figure II.19:</i> Caractérisation d'une structure BIE à défaut	36

Chapitre III

<i>Figure III.1:</i> Interface Graphique De CST MICROWAVE STUDIO.....	41
<i>Figure III.2:</i> La fenêtre principale du logiciel CST (2017).	43
<i>Figure III.3:</i> Créer un plan de masse	45
<i>Figure III.4:</i> Créer des substrats diélectriques	45
<i>Figure III.5:</i> Créer le patch	46
<i>Figure III.6:</i> Créer le slot	46
<i>Figure III.7:</i> Créer les murs de slot.....	47
<i>Figure III.8:</i> Définir le port.....	47
<i>Figure III.9:</i> Définir le domaine de fréquence.....	48
<i>Figure III.10:</i> choisir la précision	48
<i>Figure III.11:</i> Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne microruban sans slot et antenne microruban circulaire avec slot (bi-bande).....	49
<i>Figure III.12:</i> Directivité en 3D d'une antenne microruban circulaire simple	50
<i>Figure III.13:</i> Directivité en 3D d'une antenne microruban circulaire bi-bande.....	50
<i>Figure III.14:</i> Coefficient de réflexion S_{11} pour différent épaisseur du <i>substrat</i>	50
<i>Figure III.15:</i> La directivité en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1 = 1.274\text{mm}$	51
<i>Figure III.16:</i> La directivité en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.774\text{mm}$	51
<i>Figure III.17:</i> Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs du rayon du patch	52
<i>Figure III.18:</i> la directivité en 3D pour une variation de du rayon du patch ($R=15.89$)	52
<i>Figure III.19:</i> la directivité en 3D pour une variation de du rayon du patch ($R=16.39$)	53
<i>Figure III.20:</i> Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs de la permittivité du substrat ϵ_r	53
<i>Figure III.21:</i> La directivité en 3D pour Isola FR408 (loss free) $\epsilon_r = 3.75$	54
<i>Figure III.22:</i> La directivité en 3D pour Taconic RF-43(loss free) $\epsilon_r = 4.3$	54
<i>Figure III.23:</i> Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs de la largeur du slot « U »	55
<i>Figure III.24:</i> La directivité en 3D pour la largeur $L_1=3.85$	55
<i>Figure III.25:</i> La directivité en 3D pour la largeur $L_2=5.15$	55

Figure III.26: La directivité en 3D pour la largeur $L_3=5.7$	55
Figure III.27: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation de l'emplacement du slot « U »	56
Figure III.28: La directivité en 3D pour le slot au milieu	56
Figure III.29: la directivité en 3D pour le slot a coté	57
Figure III.30: Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne BIE sans slot et antenne BIE avec slot	58
Figure III.31: Directivité en 3D d'une antenne BIE simple	58
Figure III.32: Directivité en 3D d'une antenne BIE avec slot.....	58
Figure III.33: Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne microruban avec slot substrat simple et antenne BIE avec slot	59
Figure III.34: Directivité en 3D d'une antenne microruban avec slot.....	60
Figure III.35: Directivité en 3D d'une antenne BIE avec slot.....	60
Figure III.36: Coefficient de réflexion S_{11} pour différent épaisseur du substrat BIE_.....	60
Figure III.37: La directivité en 3D pour l'épaisseur du substrat BIE ($h=1.274$).....	61
Figure III.38: La directivité en 3D pour l'épaisseur du substrat BIE ($h=1.774$).....	61
Figure III.39: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation du rayon du patch	62
Figure III.40: La directivité en 3D pour un rayon du patch : $R=15.89$	62
Figure III.41: La directivité en 3D pour un rayon du patch $R=16.39$	62
Figure III.42: Coefficient de réflexion S_{11} pour la Variation du matériau du substrat.	62
Figure III.43: la directivité en 3D pour Isola FR408 (loss free) Epsilon = 3.75	63
Figure. III.44: la directivité en 3D pour Taconic RF-43 (loss free) $\epsilon_r = 4.3$	63
Figure III.45: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation de la largeur du slot « U ».	64
Figure III.46: La directivité en 3D pour la largeur ($L=4.65\text{mm}$)	64
Figure III.47: La directivité en 3D pour la largeur ($L= 5.15\text{mm}$)	65
Figure III.48: la directivité en 3D pour la largeur ($L=5.7\text{mm}$).....	65
Figure III.49: Coefficient de réflexion S_{11} pour la Variation de l'emplacement du slot « U »	65
Figure III.50: la directivité en 3D pour le slot au milieu.....	66
Figure III.51: La directivité en 3D pour le slot à coté	66

Liste Des Tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques des différentes structures des antennes	6
Tableau III.1: Dimensions de l'antenne microruban circulaire à substrat normal	49
Tableau III.2: La structure d'antenne microruban circulaire à substrat normal avec et sans slot	49
Tableau III.3: Antenne sans slot et antenne avec slot.....	50
Tableau III.4: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de l'épaisseur du substrat	52
Tableau III.5: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction du rayon du patch	53
Tableau III.6: Caractéristiques de l'antenne microruban avec slot en fonction de la permittivité du substrat.....	54
Tableau III.7: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de largeur de slot « U »	56
Tableau III.8: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de l'emplacement du slot « U »	57
Tableau III.9: structure d'antenne microruban circulaire BIE	57
Tableau III.10: Caractéristiques de l'antenne microruban BIE simple antenne BIE avec et sans slot	58
Tableau III.11: Structure d'antenne microruban circulaire	59
Tableau III.12: Caractéristiques de l'antenne microruban avec slot et antenne BIE avec slot	60
Tableau III.13: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de l'épaisseur du substrat BIE.....	61
Tableau III.14: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec Slot en fonction du rayon du patch	62
Tableau III.15: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec Slot en fonction de la permittivité du substrat.....	64
Tableau III.16: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec Slot en fonction de largeur de slot « U »	65
Tableau III.17: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec slot en fonction de l'emplacement du slot « U »	66

Liste des Abréviations

- **MSA** : Microstrip Antennas
- **VSWR**: Voltage Standing Wave Ratio (Rapport d'onde stationnaire de tension).
- **TOS**: taux d'onde stationnaire
- **CMSA**: Circulaire Microstrip Antenna
- **PA**: Puissance d'antenne
- **PS**: Puissance de source
- **BW**: Bandwidth
- **BIE**: bande interdite électromagnétique
- **1D, 2D, 3D** : Une, Deux, ou Trois Dimensions.
- **PRS** : Partially Reflective Surface (Surface Partiellement Réfléchissante).
- **SSF** : Surfaces Sélectives en Fréquence.

Résumé

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'une antenne microruban bi-bande fonctionnant dans deux bandes, de forme circulaire à bande interdite électromagnétique (BIE) 1D.

Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physiques de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : le matériau du substrat (matériau à BIE ou diélectrique simple), les dimensions de rayon du patch, l'épaisseur du substrat, largeur et l'emplacement du slot « U », permittivité ϵ_{r2} , en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

ABSTRACT

The main objective of our work is the study of a dual band circular microstrip antenna with 1D electromagnetic band gap (EBG ou BIE).operating in two bands.

We study the influence of the geometrical and physical parameters of the antenna on the resonance frequency and the bandwidth and on the directivity. The parameters studied are: substrate permittivity, radius patch, substrate height of the patch, width and location of the slot, using the frequency domain electromagnetic simulation tool CST based on the finite integration method.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة هوائي مدقق دائري الشكل ذو طبقات عازلة كهرومغناطيسيا احادية البعد. قمنا بدراسة تأثير المعايير الأساسية و الفيزيائية للهوائي على التردد الرنان و عرض النطاق الترددي والاتجاهية ، المعايير التي قمنا بدراستها هي: سماحية الطبقة العازلة ، نصف قطر الهوائي ، وارتفاع الطبقة العازلة ، عرض وموقع الفتحة. وذلك باستعمال برنامج CST الذي يعتمد على طريقة التكاملات المنتهية.



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Avec le développement rapide de la technologie de communication sans fil, la technologie de communication sans fil a été largement utilisée dans divers domaines. L'antenne est l'exportation et l'importation du signal dans le système de communication sans fil, de sorte que les performances de l'antenne affectent directement les performances du système de communication. Avec la recherche approfondie du système de communication, en même temps, afin de satisfaire la transmission de communication de plusieurs terminaux et réaliser le partage de multi-système, l'antenne doit fonctionner dans différentes bandes de fréquences. Par conséquent, l'antenne du fonctionnement à double bande est dans le champ de vision de la recherche.

L'invention concerne un réseau d'antennes double bande utilisé dans une station de base pour les télécommunications de téléphonie mobile est constitué d'un premier réseau linéaire d'antennes à plaques ou microruban.

Les antennes microrubans bi-bandes (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) fonctionnant dans deux bandes de fréquences, ont connu une évolution considérable depuis plusieurs décennies, les concepteurs d'antennes étudient l'antenne microruban miniaturisation et leur structure. La géométrie la plus simple de cette antenne est constituée d'un seul élément rayonnant appelé patch, gravé sur la façade supérieure d'un substrat diélectrique monocouche, alors que le plan de masse est gravé sur l'autre façade. C'est une configuration facile à fabriquer; mais elle est limitée dans ses performances fonctionnelles. De nombreux travaux de recherches ont été effectués concernant l'amélioration de la bande passante et le gain de cette antenne. Par une nouvelle technique, basée sur le concept de bande interdite électromagnétique (BIE), peut être utilisée.

La découverte des matériaux à Bandes Interdites électromagnétique (BIE) ont suscité un vif intérêt constitue une thématique de recherche prometteuse dans différents domaines, dont en particulier l'électromagnétisme, leur création par le professeur Eli Yablonovitch à la fin des années quatre-vingts. Celui-ci a introduit une bande interdite pour contrôler l'émission stimulée et spontanée de la lumière. Ces matériaux présentent, pour les ondes électromagnétiques, des propriétés physiques intéressantes (en matière de propagation) à la fois dans le domaine de l'optique et dans le domaine des micro-ondes, mais plus particulièrement dans celui des antennes.

Les antennes à bande interdite électromagnétique (BIE) répondent aux exigences d'encombrement réduit car elles présentent une épaisseur relativement inférieure à la longueur

d'onde contrairement à beaucoup d'autres antennes. Ces antennes sont constituées d'un résonateur BIE dans lequel un dispositif d'excitation est positionné. Le rôle de résonateur est de focaliser le rayonnement issu de la source d'excitation dans une direction précise.

Le but de ce travail est de concevoir, une antenne microstrip bi-bande fonctionnant dans deux bandes de fréquences, et d'optimiser leurs performances, cette dernière est une antenne BIE, en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO. Nous avons étudié l'effet des variations des paramètres géométriques et physiques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

L'organisation de la thèse est structurée en trois chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre, nous allons rappeler quelques définitions et historiques des antennes microstrip bi-bande, ainsi que la technologie de ces antennes. Nous donnerons leurs caractéristiques, leurs domaines d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous examinerons ensuite les différents types d'alimentation de ces antennes.

Dans le deuxième chapitre, nous allons dans un premier temps présenté les concepts de base liés aux matériaux BIE bi bande (Bande Interdite Electromagnétiques). Nous citerons les différents types de matériaux BIE, en insistant sur la notion de bande interdite électromagnétiques

Le dernier chapitre est consacré aux différentes simulations que nous avons effectuées ainsi que les résultats obtenus, on va présenter l'antenne microruban circulaire à substrat normal que nous avons simulée (mono bande et bi-bande), puis nous allons donner les différents résultats obtenus en ajoutant un slot de forme « U », et enfin, nous allons porter les résultats de simulation de l'antenne finale (antenne BIE bi-bande) désigné à fonctionner dans le standard de radio communication LTE.

Notre approche de conception est développée à partir d'un logiciel de simulation CST MWS (Computer Science Technology Microwave Studio), notre étude est centrée sur l'utilisation de ce logiciel pour calculer le coefficient de réflexion, la bande passante, la directivité.

Enfin, ce document se termine par une conclusion générale, et une bibliographie à la fin de chaque chapitre qui comprend les références relatives à notre travail.

CHAPITRE I

Généralités sur les antennes microstrips bi- bande

I.1. Introduction

Les antennes sont devenues les éléments de base pour une liaison radioélectrique, les technologies modernes s'orientent vers la miniaturisation de ces antennes tout en essayant de garder les meilleures performances. Dans ces dernières années, divers types d'antennes imprimées ont été développés, et différentes techniques d'alimentation sont mises en œuvre pour améliorer les performances de ce type d'antennes dans plusieurs cas d'applications. L'antenne imprimée (microstrip) est conçue pour satisfaire à ces besoins, son caractère en miniature offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission-réception.

Dans ce chapitre, nous intéresserons à la présentation générale des antennes microstrips bi-bande, la structure d'antennes bi-bande. Nous présenterons également le principe de fonctionnement des antennes microstrip, leurs caractéristiques, nous donnerons ensuite les différentes techniques d'alimentation des antennes microstrips bi-bande et leurs avantages ainsi que leurs inconvénients et nous précisons leurs domaines d'applications.

I.2. Historique

L'idée d'un élément rayonnant à microruban date de 1950. Il a été proposé par Des champs, quelque années plus tard en France Gutton et Baissinot ont breveté une antenne à base microruban, à cause du manque des bons substrats la recherche a stagné pour une période de 15 ans. Mais le besoin d'une antenne mince pour l'industrie militaire et spatial réanimé le développement des antennes microstrips au début des années 1970 [1].

Année 2000, des études menées par le département OSA d'XL1M ont montré qu'il est possible de concevoir des antennes BIE qui fonctionnent sur deux bandes différentes. Ces développements ont été effectués dans le cadre d'applications terrestres comme par exemple, la téléphonie mobile qui utilise des bandes de fréquences autour de 900MHz et de 1800MHz.

Le département OSA réaliser un prototype en 2004 fonctionnant sur les bandes de fréquences 4.2GHz et 7.2GHz pour des applications terrestres. L'antenne est composée d'une plaque de permittivité relative 6,57 et d'une lame perturbatrice de permittivité relative 2,33. L'excitation de cette antenne était réalisée par un patch double toit. L'antenne réalisée a permis de valider le concept BIE bi-bande.

Malgré que cette antenne fonctionne sur deux bandes de fréquence éloignées qui sont nécessaires pour une mission spatiale, elle présente de limitation au niveau de sa faible directivité et de sa source d'excitation par patch. En effet, une application spatiale nécessite

un système d'alimentation par guide d'onde pour la connexion avec les dispositifs en amont tels que les filtres.

De plus, ce concept présente une limitation importante au niveau des bandes de fonctionnement qui sont trop proches pour l'application spatiale [2].

Un progrès très important s'est produit maintenant, qui est vraiment une conséquence de la recherche et développement entreprise au cours des 20 dernières années : une bonne compréhension des performances et des limites de l'antenne microstrip a été développée. Avec l'augmentation des exigences en matière de communications personnelles et mobiles, la demande des antennes plus petites et à profil bas ont placé l'antenne microstrip premier plan [3].

I.3.Définitions et généralités sur les antennes microstrips bi-bande

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception [4].

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

- 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.

Les conceptions des antennes microstrip furent proposées il y a de cela plus de 50 ans. Vingt ans après, ces antennes furent fabriquées à partir de meilleurs modèles théoriques et par des techniques de substrat en cuivre ou en or à large bande de constante diélectrique ϵ .Leurs

propriétés mécaniques furent ainsi développées. (*La Figure I.1*) montre la géométrie de base d'une antenne microstrip.

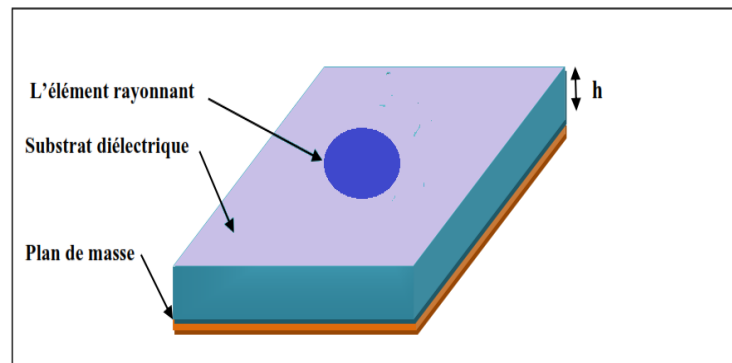


Figure I.1: Structure d'une antenne microstrip

Une nouvelle antenne microruban à double bande est introduite avec un schéma de conception. L'antenne étant plane, le coût de fabrication est faible, en particulier pour la production de masse, la procédure de conception est relativement facile [5]. L'antenne micro ruban bi-bande est une antenne qui fonctionne sur deux bandes de fréquence. Elles sont conçues en retranchant des fentes au niveau du patch, ces dernières peuvent être sous forme d'un **H**, **L**, **U**... Les deux bandes de fréquences n'apparaissent pas facilement en traçant une fente dès la première fois, mais il faut bien savoir comment la positionner et la dimensionner [6].

Caractéristiques	Antenne à microbande	Antenne à fente	Antenne à dipôle imprimé
Profil	Mince	Pas très mince	Mince
Fabrication	Très facile	Facile	Facile
Polarisation	Linéaire+ circulaire	Linéaire	Linéaire
Opération de fréquence	Possible	Pas possible	Pas possible
Forme	N'importe laquelle	Seul la rectangulaire	Rectangulaire + triangulaire
Rayonnement parasite	Existent	Existent	Existent
Largeur de bande	1 ÷ 5%	1 ÷ 2%	=10%

*Tableau I.1:*Caractéristiques des différentes structures des antennes [3]

Une variété de types de profil d'antennes imprimées furent développés, les antennes à microbande (microstrip antennas), antennes à fentes (stripline slot antennas), antennes à dipôle imprimé (printed dipole antennas), dont nous faisons une brève comparaison dans le tableau (I.1).

I.4. Description des antennes microstrip bi-bande

Le développement d'une MSA double bande suscite un intérêt considérable en raison de son utilité dans diverses applications. Ces opérations bi-bande peuvent être à des fréquences fixes, ou accordables sur les deux fréquences. (La figure I.2) illustre les tracés VSWR (TOS) pour le fixe et la réglable catégorie. Les lignes pleines montrent deux fréquences fixes et les lignes pointillées montrées l'accordabilité. Soit les deux, soit l'une des fréquences de double bande pourrait être ajustable en fonction de l'application. Plusieurs configurations MSA pour obtenir des caractéristiques bi-bande sont discutées dans cette section [7].

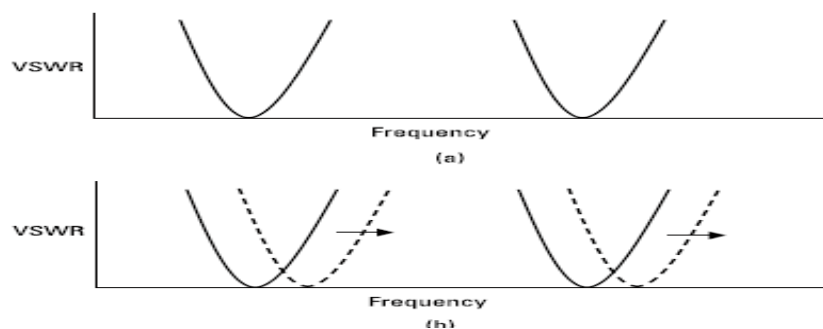


Figure I.2: VSWR représente deux catégories de fonctionnement double bande
(a) fixe et (b) accordable

Une antenne microstrip est constituée d'une couche métallique d'épaisseur très fine (très inférieure à la longueur d'onde dans le vide λ_0) placée sur un plan de masse métallique à une hauteur proportionnelle à la longueur d'onde comprise entre $0.003 \lambda_0$ et $0.05 \lambda_0$, et séparée par un substrat mince en matériau isolant, généralement d'un diélectrique.

En général, le carré, le rectangle, le disque ou l'anneau sont les formes courantes des éléments rayonnants utilisés. Pour répondre à certaines contraintes spécifiques de fonctionnement, comme pour la polarisation circulaire, des géométries plus complexes sont envisagées [8].

Les antennes imprimées peuvent prendre des formes géométriques arbitraires. Parmi les formes les plus utilisées, on distingue : la forme circulaire, la forme rectangulaire qui est préférable à cause des dimensions encombrantes de la circulaire. Cependant, dans certaines applications, l'antenne microstrip circulaire offre des performances meilleures que celle de l'antenne rectangulaire. En outre, l'antenne circulaire présente l'avantage de pouvoir obtenir la polarisation circulaire [9].

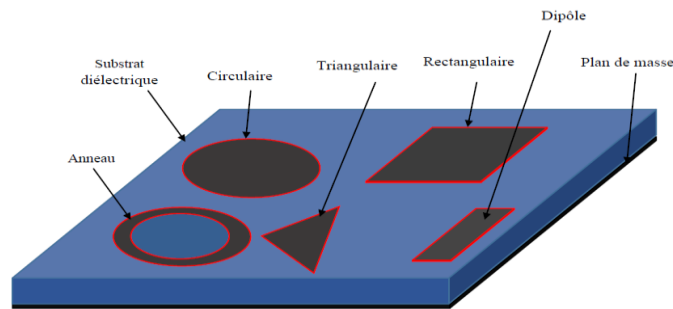


Figure I. 3: Les différentes formes d'une antenne imprimée

I.4.1. CMSA avec un U-slot

Au lieu de couper une fente en forme de U dans le patch rectangulaire, il peut être coupé à l'intérieur du patch circulaire comme le montre *la figure I.4*. Le patch circulaire avec une fente en U est fabriqué sur la carte de circuit imprimé à faible coût substrat dans la configuration suspendue inversée. En conséquence, la couche supérieure agit comme une couche supérieure protectrice. Le patch inverse est pris en charge par un substrat en mousse avec $h = 0,5$ cm. une impédance bw pour $VSWR(TOS) \leq 2$ est de: 3,77 GHz à 4,78 GHz (24%). Le gain est d'environ 7 dB à une fréquence de 4 GHz [7].

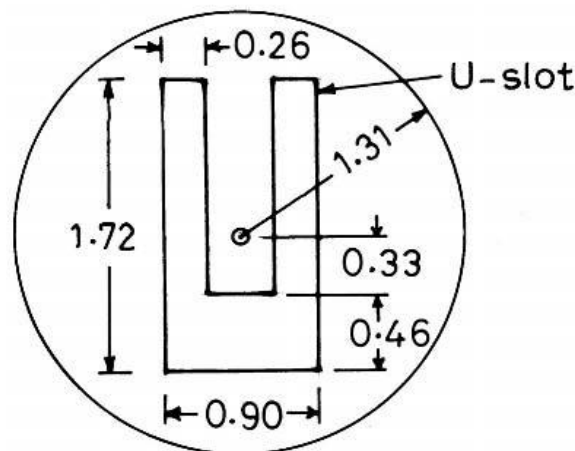


Figure I.4: CMSA avec un U-slot

I.4.2. Description des éléments constitutifs d'une antenne microstrip bi bande

I.4.2.1. Les couches métalliques:

La métallisation dans les circuits microstrip peut être réalisée de deux manières fondamentalement différentes:

- Par la technique de la sérigraphie : elle est utilisée pour des couches épaisses et consiste à déposer une pâte métallique sur la région que l'on souhaite recouvrir, à travers un masque définissant le circuit à réaliser. Cette méthode ne fournit en général pas une résolution suffisante aux hyperfréquences.
- Par des procédés photolithographiques : ils sont utilisés en hyperfréquences pour l'obtention de couches minces. Le métal recouvrant entièrement la face du substrat est recouvert d'une couche photosensible, que l'on expose à la lumière à travers le masque du circuit à réaliser après quoi une attaque chimique enlève le métal non désiré dans les régions exposées. La couche inférieure de l'antenne imprimée joue le rôle d'un plan de masse parfaitement réflecteur, elle est souvent métallique et réalisée avec de très bons conducteurs :

Le cuivre ($\sigma = 59,6 \cdot 10^6 S/m^{-1}$), l'argent ($\sigma = 63 \cdot 10^6 S/m^{-1}$), et l'or ($\sigma = 45,2 \cdot 10^6 S/m^{-1}$).

Telle que σ représente la conductivité électrique du matériau. La couche supérieure peut comporter un ou plusieurs éléments métalliques qui s'appellent éléments rayonnants, pavés, plaques rayonnantes ou patches en anglais, son rôle principal consiste à rayonner l'énergie. Physiquement le patch est un conducteur mince (son épaisseur est souvent négligeable car elle est de l'ordre de quelques microns [8]).

I.4.2.2. Le substrat

Les substrats exploités dans la conception des antennes imprimées sont nombreux, ils sont caractérisés par leurs épaisseurs et leurs permittivités relatives. 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 surface, 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 [10].

➤ **Critères de choix du substrat**

La conception des antennes microstrips dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat [9]:

- Possibilité d'excitation par onde de surface ;
- Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion ;
- Importance des pertes par diélectrique et par conducteur ;
- Anisotropie dans le substrat ;
- Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité ;
- 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 ;
- Coût de fabrication.

I.5. Principe de fonctionnement des antennes microstrip bi-bande

Le fonctionnement bi-bande de l'antenne peut être donc assuré grâce à deux états de phase du plan de masse structure. Pour obtenir des bandes de fonctionnement, il est nécessaire que deux valeurs de phase φ_1 et φ_2 à deux fréquences f_1 et f_2 satisfont les relations suivantes :

$$h1 = \frac{c}{2f_1} \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_{sup}(f_1)}{2\pi} \right)$$

$$h1 = \frac{c}{2f_2} \left(\frac{\varphi_2 + \varphi_{sup}(f_2)}{2\pi} \right)$$

En effet, l'insertion de la surface partiellement réfléchissante au niveau du plan de masse métallique doit permettre de créer une seconde fréquence de fonctionnement f_2 de l'antenne au voisinage de sa fréquence de fonctionnement initiale f_1 . Le comportement du résonateur est donc équivalent à celui de deux cavités de hauteur h_1 et h_2 , h_1 est la hauteur de la cavité initiale à plan de masse métallique, h_2 est la hauteur de la cavité à plan de masse structure (Figure II.5).

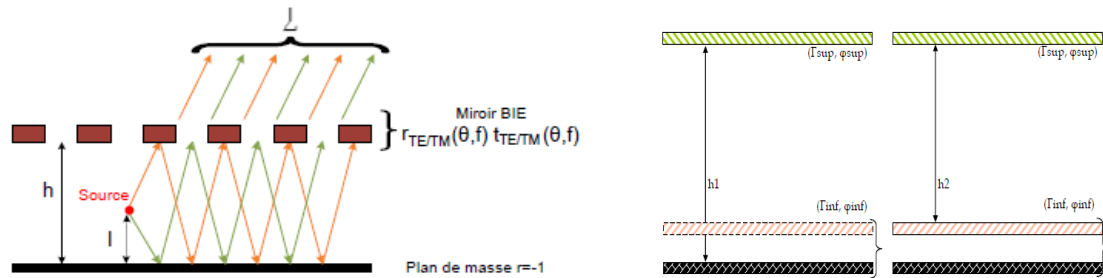


Figure II.5: a) Principe de fonctionnement
D'une antenne BIE métalliques

b) Résonateur BIE à
de plan masse structure

Pour concevoir une antenne à fonctionnement bi-bande en suivant l'approche décrite ci-dessus, la condition de résonance doit être satisfaite pour deux fréquences f_1 et f_2 correspondant à deux valeurs de phase φ_1 et φ_2 dont la différence compense la différence fréquentielle entre f_1 et f_2 [11].

I.6. Caractéristiques et propriétés d'antenne microstrip bi-bande

I.6.1. Le coefficient de réflexion S_{11}

Le coefficient de réflexion (*Return Loss*: RL) est un paramètre qui indique la quantité de puissance réfléchie vers l'émetteur, et qui n'est pas dissipée à la charge.

Dans un système électrique caractérisé par les paramètres S, lorsque le coefficient S_{11} connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance, il y a un maximum de transfert de puissance entre la source et la charge. Ce paramètre est très important pour optimiser une antenne. Son expression est donnée par :

$$S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (\text{I.1})$$

Z_e : Impédance d'entrée de l'antenne

Z_0 : Impédance normalisée (généralement égale à 50Ω)

$$R_L = -20 \log_{10} |S_{11}| \text{ (dB)} \quad (\text{I.2})$$

Pour une adaptation parfaite entre l'émetteur et l'antenne $S_{11} = 0$ et $RL = \infty$ signifie qu'il n'aura aucune énergie réfléchie, tandis qu'une $S_{11}=1$ a une $RL=0$ dB ce qui implique que tout la puissance incidente est réfléchie. Pratiquement, un TOS de 2 est acceptable, qui correspond à un RL de -9.54 dB qui signifie 1% de la puissance sera réfléchie vers la source. Le TOS : (taux d'onde stationnaire) est donnée par [12] :

$$TOS = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (I.3)$$

I.6.2. La bande passante

La largeur de bande, appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Il s'agit la plupart du temps de la puissance transmise par l'antenne, mais on peut définir d'autres caractéristiques exigées pour le fonctionnement d'une antenne telle que la polarisation. Il se peut par exemple qu'une polarisation circulaire soit recherchée et obtenue seulement dans une bande de fréquence. Dans la suite, nous allons définir la bande de fréquence relative à la puissance de rayonnement. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 . La bande de fréquence Δf est définie par la différence entre ces deux fréquences:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (I.4)$$

La bande passante BW (Bandwidth en anglais) est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale f_0 . [13]

$$(BW \%) = \frac{\text{la bande passante}}{\text{la fréquence de résonance}} \times 100 = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (I.5)$$

Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, on trace le paramètre S_{11} de réflexion en fonction de la fréquence. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur à -10 dB, la puissance de rayonnement est suffisante. Il suffit alors de repérer sur la courbe les valeurs de la fréquence correspondant à cette valeur ; Les antennes résonantes ont généralement des largeurs de bandes faibles. Une antenne de type dipôle d'une longueur égale à la demi-longueur d'onde a une largeur de l'ordre de 10 % ; Le paramètre de réflexion à l'entrée d'une antenne planaire simple est donné sur *la figure I.6*. Définissant la bande de fréquence pour un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB, les fréquences limites

de la bande sont : $f_1 = 7,27$ GHz et $f_2 = 7,51$ GHz La bande relative est donc un peu supérieure à 3 % [14].

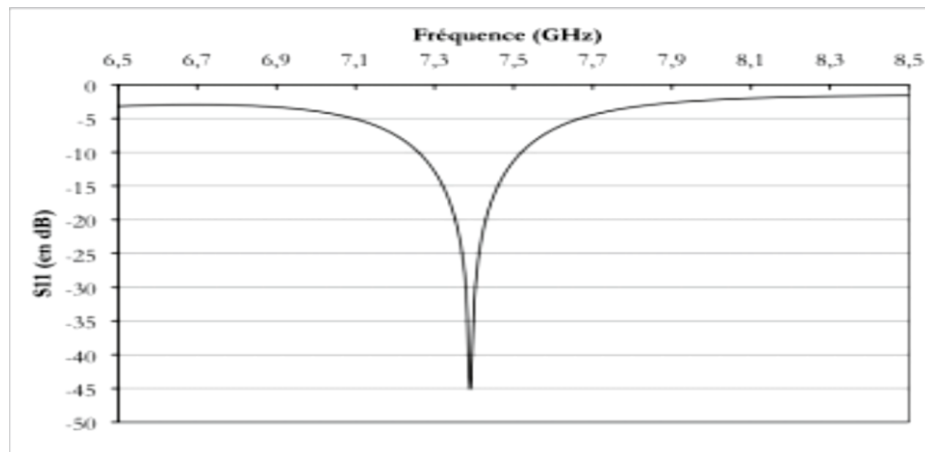


Figure I.6: Coefficient de réflexion à l'entrée d'une antenne patch en fonction de la fréquence

I.6.3.L'impédance d'entrée de l'antenne:

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule [12] :

$$Z = \frac{Z_0(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (I.6)$$

Z_0 = Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

$$Z_e = \frac{v_e}{i_e} = R_e + jX_e \quad (I.7)$$

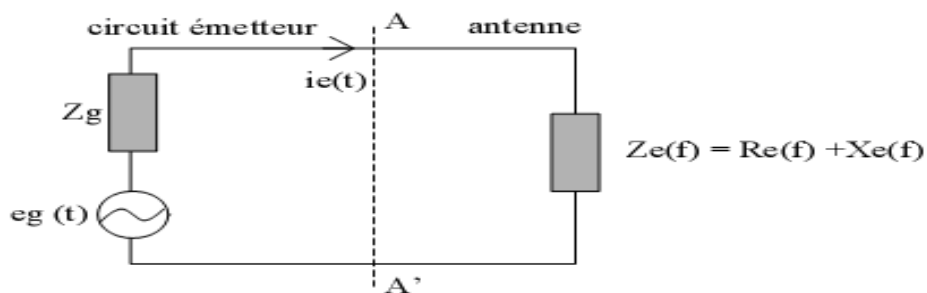
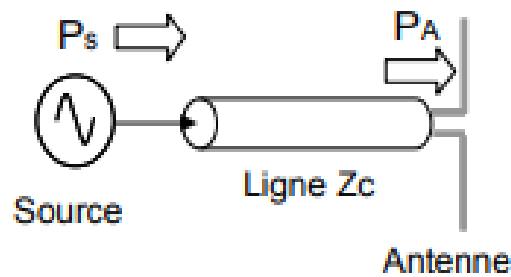


Figure I.7: L'impédance d'entrée d'une l'antenne.

I.6.4. Adaptation et condition d'adaptation

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général : $Z_c = 50 \Omega$). Pour assurer un transfert maximal de puissance

entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion Γ_{in} ou S_{11} en entrée de l'antenne :



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

$$PA = PS (1 - |\Gamma_{in}|)^2 \quad (I.8)$$

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (I.9)$$



Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance ($P_{mismatch} = \Gamma^2 \cdot PA$) 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) [15].

I.6.5. Directivité, Gain d'une antenne

Ces 2 grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qui est l'antenne isotrope:

- **Gain:**

Le gain d'une antenne est défini comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne a été rayonnée de façon isotrope. Le gain peut être exprimé comme :

$$G = 4\pi \frac{u(\theta, \varphi)}{P_0} \quad (\text{I.10})$$

Où P_0 est la puissance absorbée par l'antenne.

Le gain est lié à la directivité à travers :

$$G = \eta_e D \quad (\text{I.11})$$

Où η_e est l'efficacité de l'antenne et prend en compte les pertes dues à l'inadéquation aux bornes de l'antenne et les pertes diélectriques et de conduction. Pour une parfaite antenne sans perte adaptée, son gain et sa directivité sont égaux [16].

- **Directivité**

La directivité d'une antenne est le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction à l'intensité de rayonnement moyenne, c'est-à-dire la puissance totale rayonnée / 4π :

$$D = 4\pi \frac{u(\theta, \varphi)}{Prad} \quad (\text{I.12})$$

Si la direction n'est pas spécifiée, la direction du rayonnement maximal est implicite. La directivité est une indication des propriétés directionnelles de l'antenne. Il le fait en comparant l'intensité du champ à tout moment à celle d'un radiateur isotrope. La directivité est une quantité sans dimension et est généralement exprimé en décibel [16].

I.6.6. Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est défini comme la distribution spatiale d'une quantité qui caractérise le champ électromagnétique généré par une antenne. L'intensité de champ de l'onde se propageant diminue de $1/R$ avec la distance R de la source. Pour comprendre comment une antenne rayonne, considérons une impulsion de charge électrique se déplaçant le long d'un conducteur droit. Une charge électrique statique ou une charge en mouvement avec une vitesse uniforme ne rayonne pas. Cependant, lorsque les frais sont accélérés le long d'un conducteur et sont ralentis lors de la réflexion de son extrémité, rayonnés des champs sont produits le long du fil et à chaque extrémité. Une explication détaillée de la façon dont une antenne rayonne est donnée dans La distribution spatiale 3D de l'énergie rayonnée est affichée en fonction de la position de l'observateur le long d'un rayon constant [16].

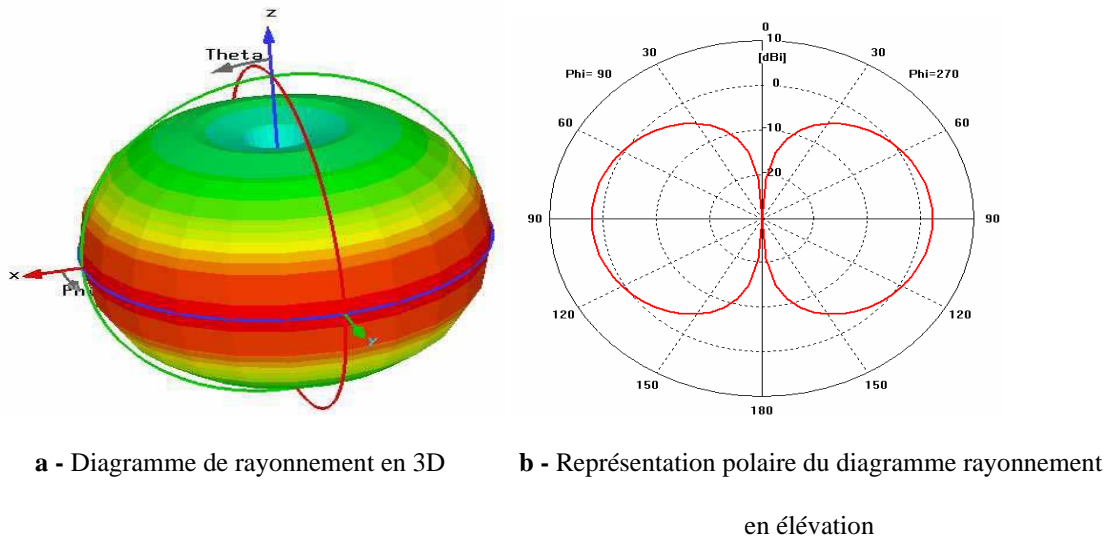


Figure 1.8: Diagramme de rayonnement d'un dipôle

I.7. Techniques d'alimentation des éléments rayonnants

L'alimentation joue un rôle très important lors de la conception des antennes imprimées. Elle peut modifier les caractéristiques de rayonnement de celles-ci. L'alimentation pourra être soit centrée soit arbitraire par rapport à la géométrie de l'élément. Par sa position, elle détermine l'adaptation de l'antenne à la ligne d'alimentation. Il existe une large variété de techniques d'alimentation permettant ainsi de fournir à l'antenne, l'énergie qui lui est nécessaire pour rayonner [17], les méthodes d'alimentation des antennes microbandes peuvent être classées en deux catégories :

- Les alimentations par contact (par câble coaxiale ou ligne micro ruban) ;
- Les alimentations sans contact (fente).

I.7.1. Alimentation par ligne micro ruban

Dans cette méthode d'alimentation, une ligne microruban (généralement de 50 Ohm) est connectée directement au bord du patch rayonnant. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch. Ce genre d'alimentation a l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure plane. C'est la technique la moins coûteuse et la plus simple à réaliser [17].

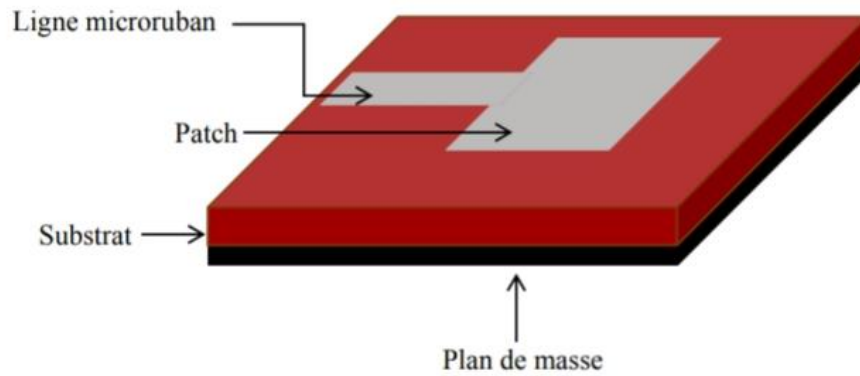


Figure I.9: Alimentation par ligne microruban

I.7.2. Alimentation par câble coaxiale

L'alimentation avec câble coaxiale ou alimentation par sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans. Dans ce cas, le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, alors que le conducteur externe est relié au plan de masse.

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication. Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément rayonnant [18].

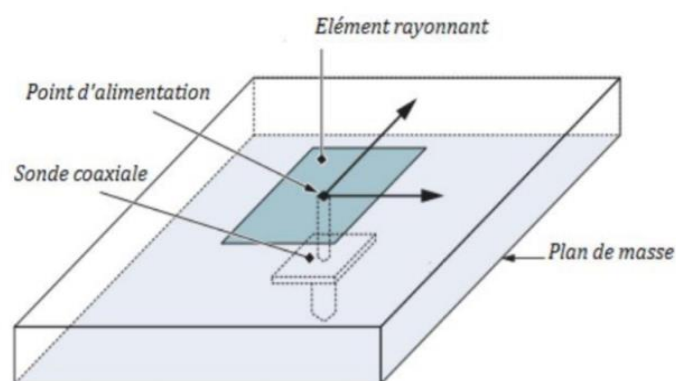


Figure I.10 : Technique d'alimentation par câble coaxiale [19]

I.7.3. Alimentation par fente

Une solution du problème de rayonnement de la ligne dans l'alimentation par ligne microruban, consiste à réaliser l'alimentation sous une seconde plaque de substrat. Le transfert de puissance de la ligne à l'élément rayonnant se fait par couplage magnétique depuis la ligne à travers la fente. Ce type d'alimentation est appelé alimentation par fente (Figure I.11). Cette technique nécessite un positionnement très précis qui n'est pas toujours facile à obtenir surtout dans le cas des structures de petites dimensions [20].

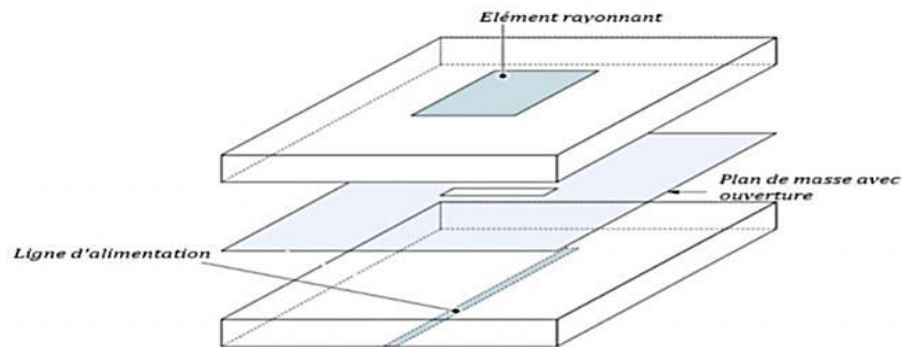


Figure I.11 : Technique d'alimentation de couplage par fente [19].

I.7.4. Alimentation par proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur (la figure I.12), deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur. L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre.

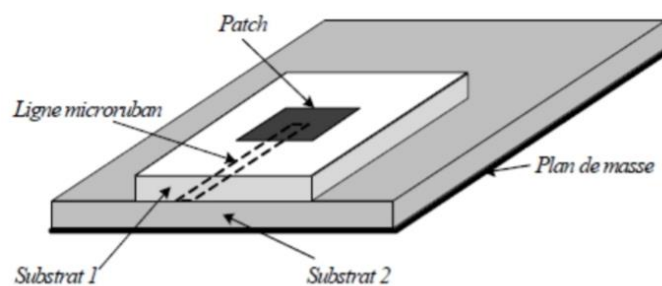


Figure I.12: Méthode d'alimentation par couplage par proximité.

I.8. Les Avantages et inconvénients des antennes microstrips bi-bande

Les antennes microbandes ont de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et on peut [18]:

- ✓ Faible poids, volume réduit, configuration plane, faible épaisseur ;
- ✓ Faible coût de fabrication, production en masse possible ;
- ✓ Ces antennes peuvent être placées sur les fusées et les satellites sans modifications importantes ;
- ✓ Les antennes ont de petites aires de rayonnement ;
- ✓ La polarisation linéaire comme pour le cas des antennes plaques rectangulaire et circulaire (gauche ou bien droite) est possible avec de légers changements dans la position de l'alimentation ;
- ✓ L'utilisation de deux fréquences de travail est possible ;
- ✓ Les antennes microbandes sont compatibles avec les constructions modulaires (Composants monolithiques tels que les oscillateurs, les alternateurs variables, les interrupteurs, les modulateurs, les mélangeurs, les déphaseurs et peuvent être adaptées directement sur le substrat) ;
- ✓ Les lignes d'alimentation et les circuits d'adaptation d'impédance sont fabriqués simultanément avec la structure de l'antenne ;

Comme les antennes microbandes ont des avantages; elles ont aussi quelques inconvénients tels que [18]:

- ✓ Bande passante étroite ;
- ✓ Gain plus faible dû aux pertes ;
- ✓ Limitations pratiques sur le gain (au maximum à 20dB);
- ✓ La performance du rayonnement longitudinal est faible;
- ✓ L'isolation entre les éléments rayonnants et l'alimentation est faible;
- ✓ Possibilité d'excitation des ondes de surface;
- ✓ Capacité de manipulation à faible énergie.

I.9. Les applications des antennes microstrips bi-bande

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

- Télécommunication satellitaires;
- Commande et contrôle;
- Télémétrie (télémesure) par missile;
- Équipements portatifs;
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes ;
- Antenne d'émission utilisée en médecine ;
- Récepteur satellite de navigation [21] ;

I.10. Conclusion

La technologie microbande en générale, et les antennes patch en particulier connaissent un succès croissant aux prés des industriels et des professionnels de télécommunication, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation, et de s'assurer qu'elle se conformera aux exigences des systèmes. Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes imprimées dont aurait besoin tout chercheur s'intéressant à ce type d'antenne. On a cité quelques applications de ce type d'antennes, l'étude du fonctionnement d'une antenne microstrip bi-bande, on s'est intéressé par la suite aux plus importantes techniques utilisées pour son alimentation, la structure ainsi qu'aux différentes caractéristiques de son rayonnement.

Bibliographie

- [1] Melihi Souhila, Fengal Tine-hinane " caractérisation et optimisation Antenne de Téléphonie mobile ", En vue d'obtention du diplôme Master en Télécommunication. Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia2016.
- [2] Ahmad KANSO, »Etude, conception et réalisation d'antennes BIE bi-bande Application au développement d'une structure focale pour des applications spatiales multimédia et multifaisceaux", Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 2010.
- [3] Rodney. B. Waterhouse, "Microstrip Patch Antennas A Designer's Guid ». RMIT University.2003
- [4] Rouibah Ammar,"Etude d'une antenne microruban de forme arbitraire par la méthode FDTD", Thèse de Magister en Electronique présentée a UNIVERSITE FERHAT ABBAS S ETIF, 28/10/2009.
- [5] Amina Meftahi, Rania Ouzzir,"Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelles", thèse de Master en système de télécommunication, Université Abou Beker Belkaid Tlemcen, 2017.
- [6] MENKHERFIS Siham, ZEMMOURA Hanane, "Conception d'une antenne BIE bi-bande à haut gain", Mémoire pou Obtention du diplôme de Master, En Télécommunication, Université Abderrahmane MIRA- Bejaïa,2016-2017.
- [7] GirishKumar.K. P. Ray,« Broadband Microstrip Antennas »,Artech House, 2003.
- [8] Linda Djouablia," Contribution à l'étude des structures microbandes rayonnantes par la méthode des moments application à la forme triangulaire", thèse de Doctorat en sciences en Electronique présentée a Université de Constantine,02 juillet 2012.
- [9] Bahloul Mohammed Salim, « Etude et conception de réseaux d'antennes imprimées larges bandes à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques »,Thèse de doctorat, Université AboubakrBelkaïd – Tlemcen, 2017.
- [10] LABANDJI Samy, « Etude de la miniaturisation des antennes par repliement Application pour la conception d'une antenne 2.4GHz », Mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013-2014.

- [11] E. Rodes, M. Diblanc, E. Arnaud, T. Monediere, B. Jecko. Dual band EBG resonator antenna using a single layer FSS. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume 6: 368-371, 2007.
- [12] BACHIR Hemza, BEN RABAH Hichem, « Conception d'une antenne multi-bandes pour les terminaux mobile LTE », mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA 2016-2017.
- [13] CHETOUAH FAROUK, "Etude et modélisation des antennes miniatures basées sur des matériaux diélectriques", Thèse de doctorat en Electronique, université FERHAT ABBAS setif-1,2018
- [14] Odile Picon et coll. LES ANTENNES Théorie, conception et application. Dunod. Paris, 2009.
- [15] Alexandre Boyer, « Cours Antenne», Institut national des sciences appliquées de TOULOUSE, 2011.
- [16] Christos G. Christodoulou ET Parveen F. Wahid, « Fundamentals of Antennas Concepts and Applications », Tutorial Texts in Optical Engineering Volume TT50
- [17] BOUSSAHA Somia, «Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication »mémoire de Magister en Télécommunications à Université 8Mai 1945 – Guelma, 2012
- [18] MEDDOUR Meriem, BENKEDDA Siham, « Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande Wifi 5 GHz », thèse de Master Académique en Signal et communication présentée à l'université Kasdi Merbah Ouargla, en 25/05/2017
- [19] Daouia Belguellaoui, « analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire », mémoire de master en système de télécommunication numérique, présentée à l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, Juin 2016
- [20] Mr. GUELLIL Nasser, « Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum », thèse de magister en communication présente à l'université FERHAT ABBAS –SETIF 1- UFAS, 2018.

[21] Zaoui Bachir, « Modélisation d'une antenne micro ruban compacte » Mémoire de fin d'études présenté Pour l'obtention du diplôme de master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar _ El oued, 2015

CHAPITRE II

Généralités sur les matériaux BIE

II-1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux les matériaux BIE. Nous commençons alors par un historique des matériaux BIE, ainsi que leurs principes de fonctionnement, nous avons étudié et décrit des matériaux BIE diélectrique et métallique avant d'entrer un peu plus dans les détails pour les caractéristiques des matériaux BIE.

II-2.Historique

Le terme de bande interdite (ou « band gap »), a été introduit par Lord Rayleigh en 1887 [1]. La possibilité d'étendre les bandes interdites aux structures bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D) a été initiée par Eli Yablonovitch et Sajeev John En 1987 [2].

En 1915, les cristaux photoniques unidimensionnels, « miroir de Bragg », (**figure. II.1**) a étudié principalement par le physicien William Laurence Bragg [3]. Comme Lord Rayleigh l'a montré en 1887.

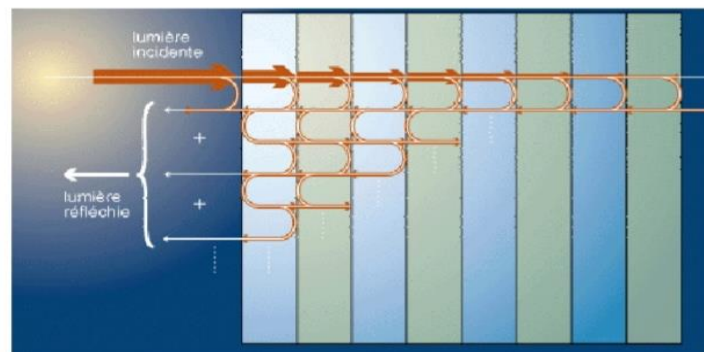


Figure II.1: Principe de miroir de Bragg

Ces structures possédaient une bande interdite unidimensionnelle, et avaient une grande réflectivité. Une étude théorique détaillée des structures optiques unidimensionnelles a été réalisée par V.P. Bykov en 1972, qui a été le premier à examiner l'effet de bandes interdites sur l'émission spontanée provenant d'atomes et de molécules intégrées à la structure.

Après 1987, le nombre de publications concernant les cristaux photoniques commença à croître exponentiellement. Cependant, à cause de la difficulté de fabrication de ces structures pour qu'elles soient effectives dans le spectre visible, les premières études étaient soit théoriques, soit dans les micro-ondes, car les cristaux pouvaient être fabriqués plus facilement

à la grandeur du centimètre. En 1991, Yablonovitch conçoit le premier cristal photonique tridimensionnel possédant une bande interdite dans les microondes. [1]

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

Il existe une grande variété de matériaux à bande interdite électromagnétique. Ils sont construits à partir d'objets élémentaires, agencés périodiquement dans l'espace. Dans la Figure II.2, nous avons des exemples de réseaux BIE de périodicité selon une, deux et trois dimensions. [4]

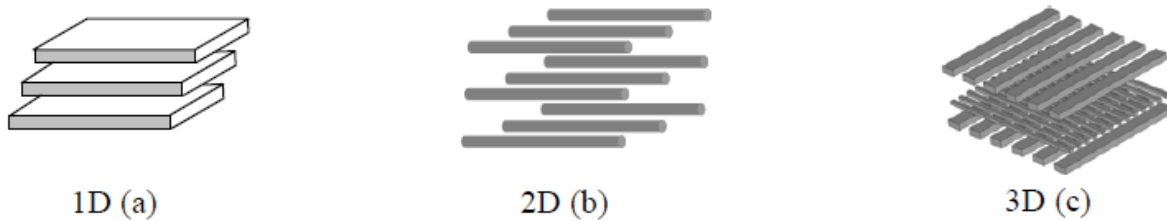


Figure II.2: Différentes configurations de matériau B.I.E

II-4. Principe de fonctionnement de l'antenne BIE

Le principe de l'antenne à **B**ande **I**nterdite **E**lectromagnétique (Electromagnetic Band Gap en anglais) repose sur l'utilisation d'un matériau partiellement réfléchissant. Ce dernier est appelé "matériau B.I.E" ou plus précisément le "demi-matériau B.I.E" (voir explication ci-dessous). Il peut être constitué d'une ou de plusieurs couches de diélectrique ou métallique associées de manière périodique dans une ou plusieurs directions (1D, 2D et 3D). Ce principe reste valable pour les deux autres topologies (2D et 3D). Les caractéristiques (fréquence, bande passante) de cette bande permise dépendent du matériau B.I.E et du défaut engendré

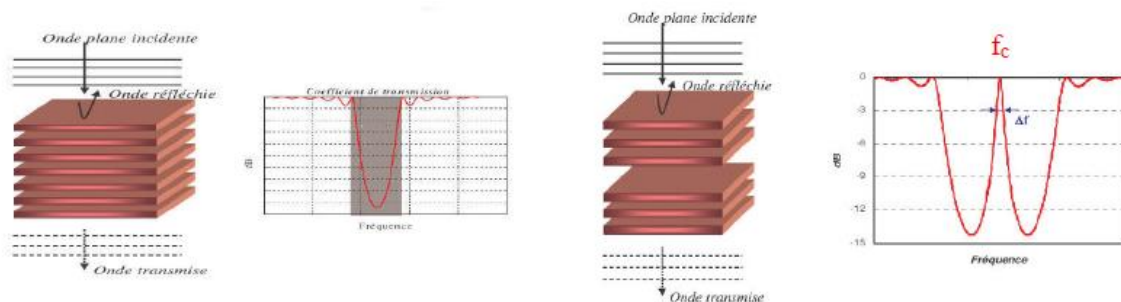


Figure II.3: Matériau B.I.E sans défaut

Figure II.4: Matériau B.I.E avec défaut

Une cavité résonante à fuite est ainsi créée avec une fréquence de résonance (fréquence de coupure : f_c) correspondant à la fréquence du pic de transmission. En excitant cette structure par une source placée en son milieu, il est possible de réaliser une antenne avec deux directions propagation (*Figure II.5*).

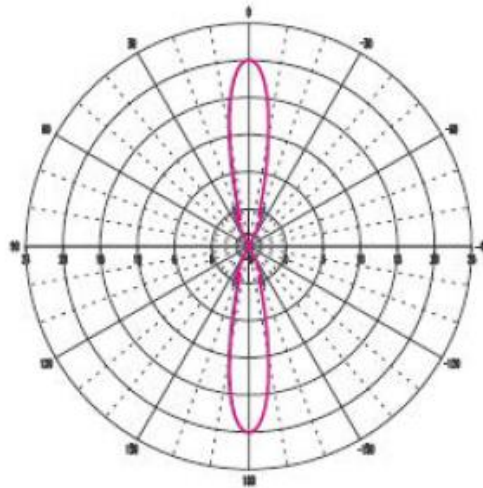


Figure II.5: Diagramme d'une antenne à matériau B.I.E

Marc THEVENOT montre qu'il est possible de remplacer un matériau **B.I.E** par un **demi-matériau B.I.E**, en insérant un plan de masse au milieu de cette structure. Pour pouvoir le faire, il faut que la structure ait un plan de symétrie et une distribution des champs électromagnétiques tangentiels nulle sur ce plan de symétrie (condition de court circuit électrique) avec une répartition antisymétrique de la partie réelle (théorie des images). En examinant le graphe *Figure II.6* représentant ce champ dans un matériau B.I.E à défaut, ces conditions sont obtenues.

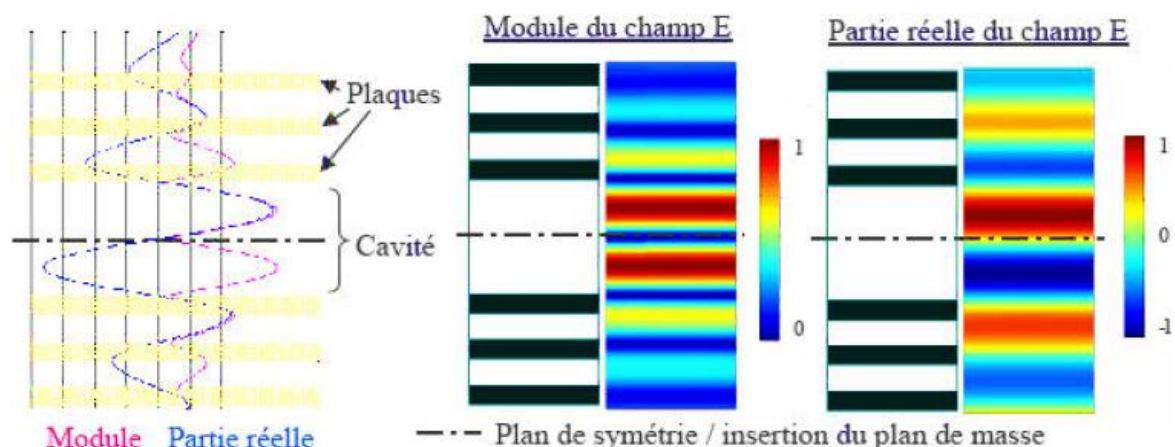


Figure II.6: Distribution du champ électrique tangentiel

Le plan de masse n'aura pas d'effet sur cette structure et permettra ainsi de placer plus facilement une source d'excitation dans la cavité et donc, de concevoir plus facilement des antennes. Au final, le diagramme obtenu est dirigé vers une seule direction. (*Figure II.7*).

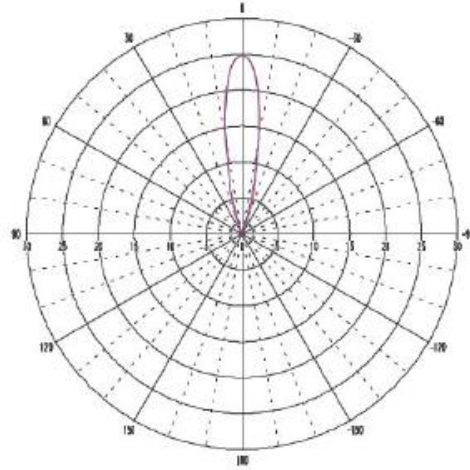


Figure II.7: Diagramme d'une antenne à demi-matériau B.I.E (plan de masse)

L'antenne B.I.E étant une ouverture rayonnante, son gain est égal à :

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \quad (\text{II.1})$$

(S étant la surface de la tache rayonnante pour une variation d'amplitude inférieure à -15 dB).

Comme la distribution n'est pas parfaitement uniforme (équiamplitude et équiphase), le gain réel devient :

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} * \eta \quad (\text{II.2})$$

avec η correspondant au rendement de la loi d'éclairement. Pour une antenne B.I.E, la valeur de ce paramètre varie entre 0.6 et 0.8 suivant le type de matériau.

λ : est la longueur d'onde.

Pour finir, d'autres équipes scientifiques utilisent la méthode du résonateur de "Fabry-Perot" pour expliquer le principe de cette antenne [5]. L'antenne BIE peut être considérée comme une antenne à cavité Fabry-Pérot, elle est constituée généralement de :

- 1) Un plan de masse métallique (appelé aussi interface inférieure de l'antenne)
- 2) Une source rayonnante primaire qui sert d'alimentation pour l'antenne (ici c'est une antenne patch).

3) Superstrat (appelé aussi interface supérieure de l'antenne) constitué d'une ou plusieurs couches ou surfaces partiellement réfléchissantes (PRS), de type substrat diélectrique (à haute permittivité ou perméabilité) ou métallique ou métallo-diélectrique à base de méta matériaux (jouant le rôle des surfaces sélectives en fréquence). Il est maintenu à une distance h au-dessus du plan de masse.

La distance h est donnée par l'expression suivante :

$$h = \left(\frac{\varphi_{PRS}}{360^\circ} + \frac{\varphi_G}{360^\circ} \right) * \frac{\lambda}{2} \quad (\text{II.3})$$

Où φ_{PRS} et $\varphi_G (= 180^\circ)$ est le coefficient de réflexion de la PRS et du plan de masse respectivement

λ : est la longueur d'onde

Un exemple de cette antenne est présenté dans la (*figure II.8*)

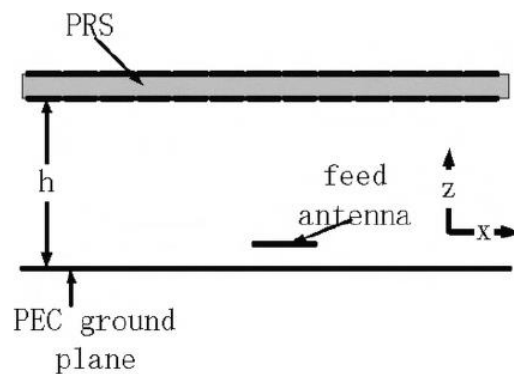


Figure II.8: Antenne BIE.

II-5. Description des matériaux BIE

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques (**Figure II .9**). Les périodicités proposées par ces matériaux peuvent exister dans une, deux ou bien dans les trois directions de l'espace. Les motifs élémentaires de ces matériaux se décomposent en trois parties selon leurs propriétés de périodicité:

- ✓ **BIE 1D:** Il s'agit d'un empilement de plaques essentiellement **diélectriques**.
- ✓ **BIE 2D:** c'est un alignement de tiges réparties sur un réseau dont la cellule élémentaire est de forme **carrée** [7], **rectangulaire**[8], **triangulaire**[9], **hexagonale**[10]. Ces structures peuvent être soit **diélectriques** soit **métalliques**.
- ✓ **BIE 3D:** c'est un enchevêtrement de tiges (structure « tas de bois »)[8,11] ou un agencement particulier de sphères ou de cubes répartis périodiquement au sein de l'espace cristallin (cubique, cubique entré, cubique face centrée)[12]. Cette forme est

plus représentative des matériaux diélectriques. Pour les matériaux métalliques, il s'agit d'un entrecroisement des tiges qui forment une grille ou autre Frequency Selective Surface (FSS) [13].

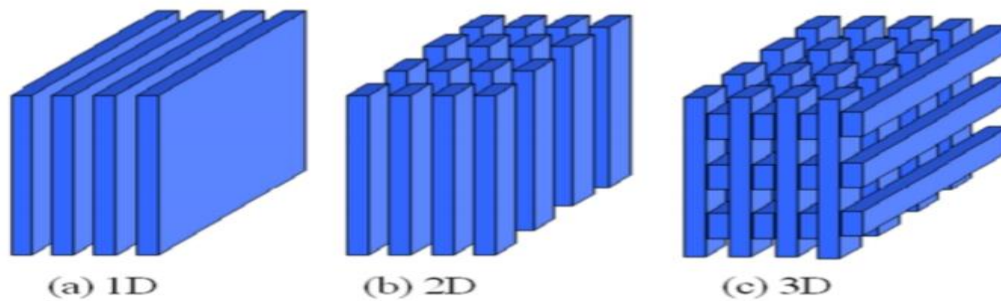


Figure II.9: Exemples de structures périodiques

Ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial.

Puisque l'incidence des ondes est un facteur limitant les performances de ces structures, les chercheurs travaillent dans les domaines utilisant ces matériaux. Ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes [6].

II-5.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D)

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures BIE. En effet, elles ont été déjà longuement étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques. Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée (**Figure II-10**). Lors des réalisations, la conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions [6].

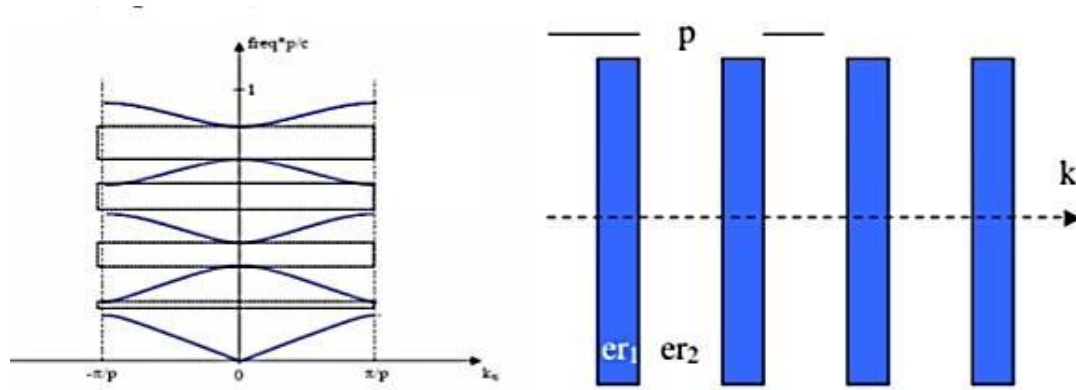


Figure II.10: Structure 1D et son diagramme de dispersion



Figure II.11: structure périodique unidimensionnelle

II-5.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D):

Les structures 2D sont des cristaux dont la permittivité diélectrique est périodique dans les deux dimensions et reste invariante dans la troisième dimension (**figure II (2D)**). Elles se regroupent principalement suivant trois familles qui sont les réseaux carré, triangulaire et hexagonal. Ces structures bi-périodiques sont généralement composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une géométrie simple qui facilite leurs études théoriques et expérimentales [14].

Dans ces structures 2D, il existe deux polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation électrique correspond au cas où le champ électrique E est parallèle aux barreaux de la structure considérés de longueur infinie et la polarisation magnétique correspond lorsque le champ magnétique H est parallèle aux cylindres infinis.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques:

Les structures dites « connectées » (*figure II.12*) : les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

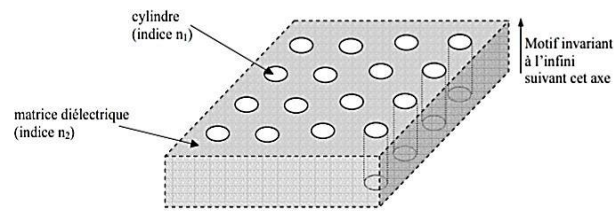


Figure II.12: Structure périodique 2D connectée

Les structures dites « déconnectées » (*figure II.13*) : les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse.

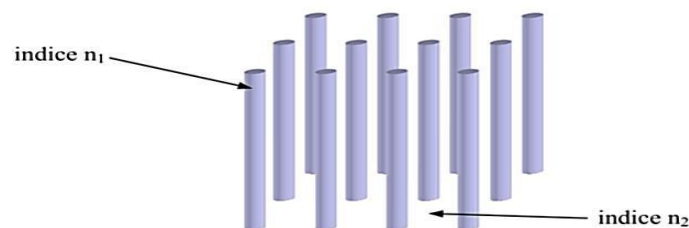


Figure II.13: Structure périodique déconnectée

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

- **Le réseau carré:** Les nœuds du réseau sont situés sur un carré de côté "a" (*figure II.14*). Il a été montré que ce type de réseau est très sensible à l'angle d'incidence et à la polarisation de l'onde électromagnétique. Il est ainsi difficile d'obtenir une bande interdite totale, c'est-à-dire une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation.

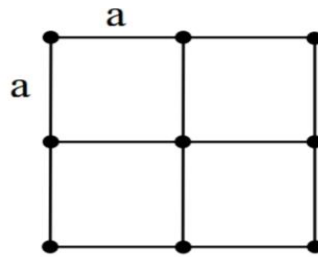


Figure II.14: Réseau carré

- **Le réseau triangulaire:** Chaque nœud du réseau est espacé de son proche voisin d'une même distance "a" (*figure II.15*). Cette structure est moins sensible à l'angle d'incidence que le réseau carré mais la bande interdite complète reste difficile à obtenir.

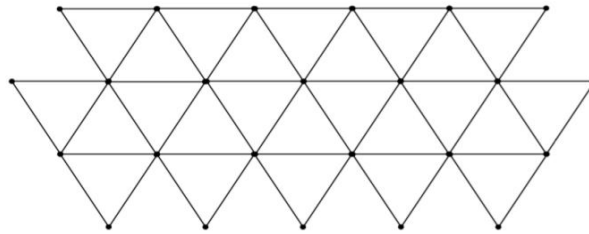


Figure II.15: Réseau triangulaire

- **Le réseau hexagonal:** Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de "a", alors on appelle cette structure "graphite" car elle est similaire à la structure cristalline du graphite (*figure II.16*) [16].

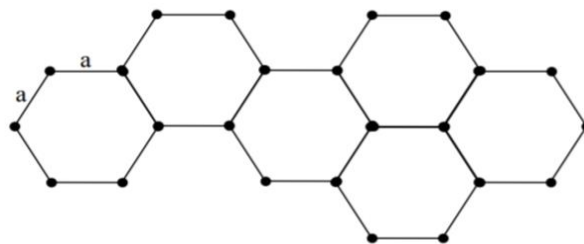


Figure II.16: Réseau hexagonal

II-5.3 Structures périodiques tridimensionnelle (3D) :

Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes

principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite photonique complète. C'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles.

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète. Ho, Chan et Soukoulis ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie Cubique à Face Centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant [6].

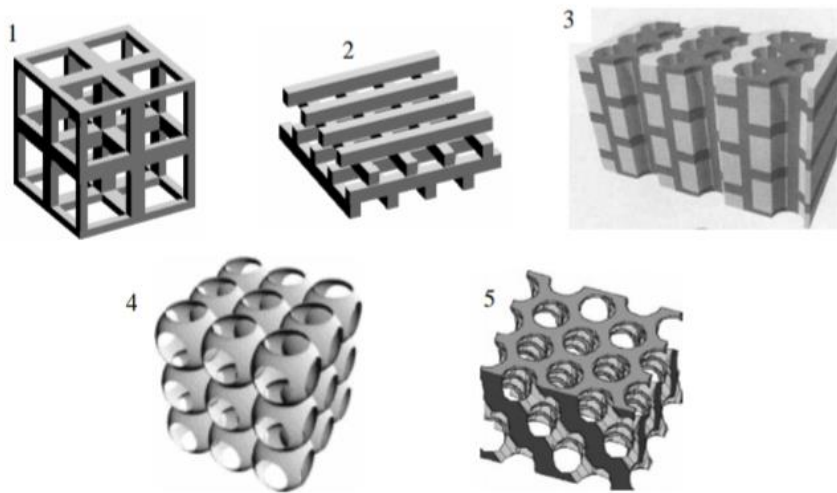


Figure II.17: Différentes structure 3D

(1) Structure cubique, (2) le tas de bois, (3) la structure multicouches, (4) les opales inversées, (5) la Yablonovitch

II-6 Description des structures BIE métalliques

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

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs. Elles ont aussi permis de concevoir des Surfaces Sélectives en Fréquence ou SSF mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les

structures BIE métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions [16].

II-6.1 les structures métalliques à base de FSS

Les surfaces sélectives en fréquence ou FSS sont des structures imprimées d'un arrangement périodique de motifs (éléments) métalliques sur un substrat diélectrique suivant un ou deux axes de périodicité. Selon la forme du motif métallique, différentes propriétés de réflexion peuvent être obtenues avec ce type de structure.

Le gain de l'antenne est principalement déterminé par la taille de la PRS et sa réflexion, la hauteur h de la cavité, et du gain de l'antenne d'alimentation. Si les dimensions de la PRS et le gain de l'antenne d'alimentation sont fixés, la hauteur h détermine la fréquence de fonctionnement et le gain de l'antenne à cavité qui formée par la PRS et le plan de masse.

Le superstrat doit satisfaire un bon coefficient de réflexion en module et en phase:

- Le module doit être compris entre 0.7 et 0.9 en linéaire.
- La phase qui est déduite de l'expression suivante:

$$\varphi_P + \varphi_G - \frac{2\pi}{\lambda} 2h = 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (\text{II.4})$$

Où φ_P et φ_G ($= 180^\circ$) sont les coefficients de réflexion de la PRS et du plan de masse respectivement [17].

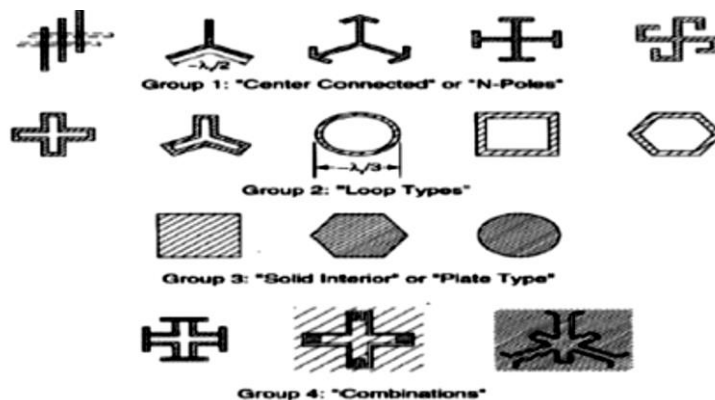


Figure II.18: Motifs élémentaires pouvant constituer une FSS

II-7. Propriétés électromagnétiques des structures BIE à défaut

L'introduction d'un défaut dans la structure peut être réalisée de plusieurs manières à savoir par la modification de la permittivité des empilements ou encore par la suppression de

plaques. L'observation du coefficient de transmission de la structure à défaut illuminée par une onde plane montre l'apparition d'un pic de transmission à la fréquence centrale f_0 (**Figure II.19**). Une bande permise vient donc d'être créée à l'intérieur de la bande interdite. Ces résultats s'appliquent également aux structures 2D et 3D.

La caractérisation fréquentielle de la structure à défaut souligne une propriété importante des matériaux BIE : le filtrage fréquentiel. Les matériaux BIE appliqués dans le domaine des antennes permettent de réaliser également un filtrage spatial. En effet, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, il existe une direction privilégiée pour la propagation des ondes électromagnétiques [18].

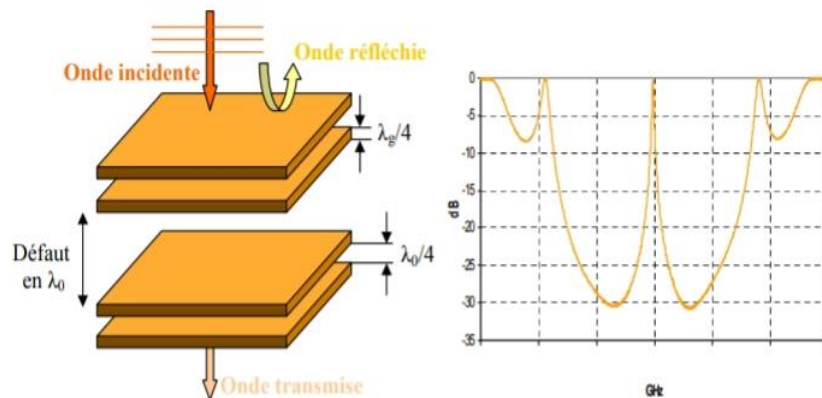


Figure II.19: Caractérisation d'une structure BIE à défaut

II-8. Domaine d'applications [18]

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

II-8.1 Dans le domaine de l'optique les fibres optiques [22]

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

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

II-8.2 Dans le domaine micro-onde

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

- Substrats d'antennes: les premières expériences visant à exploiter les cristaux électromagnétiques diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par ER. Brown et al.
- Surfaces à hautes impédances: peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes Les BIE peuvent aussi être utilisés dans la réalisation de circuits micro-ondes tels que :
 - Filtres planaires; guides.
 - Multiplexeurs,
 - Amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des cristaux électromagnétique ultra réfractifs. [18]

II-9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents concepts qui nous seront utilisés pour la suite de notre étude, nous avons vu que les matériaux BIE restent un sujet très riche, tout comme le choix de leurs applications. Pour comprendre leur fonctionnement, elles requièrent de nombreuses notions. Les matériaux BIE diélectrique et métalliques ont ensuite été décrits dans la deuxième partie. L'étude de leurs caractéristiques a permis de comprendre comment agir sur les performances des antennes. Afin de répondre rapidement à des cahiers des charges et de pouvoir concevoir plus facilement des antennes, des abaques ont été mis au point.

Bibliographie

- [1] NOUIRI Mouna, TERKI Zakia, « Conception d'une Antenne Microruban Reconfigurable à base de Diode PIN et des Structures EBG », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018 /2019.
- [2] Laurent OYHENART, « Modélisation, Réalisation et Caractérisation de cristaux Photoniques Tridimensionnels en vue d'Applications a la Compatibilité Electromagnétique », Thèse de Doctorat, université Bordeaux I ,2005.
- [3] Ludovic SCHREIDER, « Antennes à très large bande passante et de très faible épaisseur – Application à l'intégration d'antennes dans des structures de porteurs dans la bande 100MHz-1GHz », Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications Spécialité Électronique et Communications de Paris, 2006.
- [4] Mohamed Farhat, Sebastien Guenneau, and Stefan Enoch. «Ultrabroadband elasticcloaking in thin plates». *Phys. Rev. Lett.*, 103(2) :024301, July 2009.
- [5] Eric ARNAUD « Contribution à la conception d'antennes B.I.E métalliques à polarisation circulaire alimentées par cornet » Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2010
- [6] Tanguy JAFFRE, « Caractérisation des matériaux a bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes », Thèse de Doctorat, Université De Limoges, 2005
- [7] P.R. VILLENEUVE, M. PICHE « Photonic band gaps in two-dimensional square lattices: Square and circular rods ». *Physical Review B*, Volume 46, Number 8, 15 August 1992, pp 4973.
- [8] K. F. LEE & W. CHEN, « Advances in microstrip and printed antennas »- John WILEY & Sons, Inc. 1997
- [9] M. PLIHAL, A. A. MARADUDIN, « Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice » *Physical Review B*, Volume 44, Number 16, 15 October 1991, pp 8565.
- [10] D. CASSAGNE, C. JOUANIN, D. BERTHO « Hexagonal photonic band-gap structures », *Physical Review B*, Volume 53, Number 11, 15 March 1996, pp 7134.
- [11] K.M. HO, C.T. CHAN, C.M. SOUKOULIS, R. BISWAS & M. SIGALAS « Photonic band gaps in three dimensions: New layer-by-layer periodic structures » *Solid State Communications*, Volume 89 (1994), 413-416
- [12] E. YABLONOVITCH & T.J. GMITTER « Photonic band structure: The face-centered-cubic case » *J. Opt. Soc. Am. A* – Volume 7 – N°9 – September 1990 – pp 1792.
- [13] L.MERCIER, M.THEVENOT, T.MONEDIERE, B.JECKO « New concept of a reconfigurable EBG antenna » ANTEM 2005, 15-17 juin 2005, Saint-Malo

[14] ALI BOUGRESSI, « Application du concept des réseaux acoustiques à bandes interdites pour l'isolation sismique d'un site", Mémoire de magister, Spécialité : Génie Civil
OPTION : MODELISATION ET CALCUL NON LINEAIRE, 2013

[15] Yannick MERLE, « Etude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels », Thèse doctorat, Université de Limoges 2003.

[16] M. M. SIGALAS, C. T. CHAN, K. M. HO and C. M. SOUKOULIS « Metallic photonic band-gap materials » Appl. Phys letters (1995).

[17] d. HAMZAOU, « Modélisation et caractérisation de métamatériaux en hyperfréquence. Application à la réalisation de composants passifs ». Thèse de doctorat 2017.

[18] A. BOUFRIOUA « Contribution à l'étude des antennes à patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2006.

[19] S. ROWSON A. CHELNOOV, et J. M. Lourtioz, « Macroporous silicon photonic crystals: photonic crystal substrates at 1.55 μm », 25th European Conference On Optical Communication ECOC'98, Nice, 1999



CHAPITRE III

Résultats & discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, en premier, on va décrire le logiciel de simulation CST MWS qu'on a utilisé, ensuite présenter les structures des antennes micro ruban (mono-bande, bi-bande à substrat normal, à substrat BIE bi-bande avec et sans slot), nous avons comparé les différentes structures dans le but d'avoir les meilleures caractéristiques de ces antennes.

III.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique [1], C'est un logiciel complet pour l'analyse et la conception électromagnétique dans la gamme haute fréquence. Il simplifie l'insertion des structures en fournissant un solide en 3D pour modélisé à la fin chaque élément ou « Component », (Figure III.1) [2].

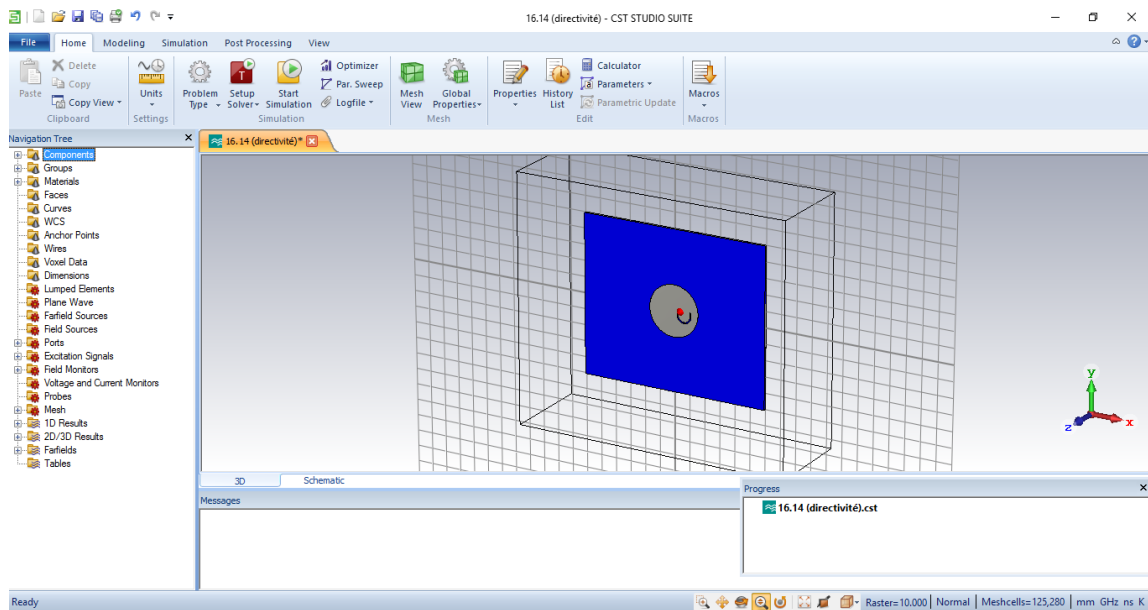


Figure III.1: Interface Graphique De CST MICROWAVE STUDIO

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). Il est basé sur la technique FIT (en anglais : Finité Intégration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant. Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes ...etc. [3].

Il est donc possible par ce logiciel de calculer des champs électriques, des champs magnétiques, mais aussi les paramètres "S" d'un dispositif et de visualiser en trois dimensions les champs rayonnés par ce dernier. Les points importants pour la réalisation d'une simulation exploitable sont principalement le réglage du maillage lequel est déterminé par la maille élémentaire, le réglage de la précision de convergence du calcul ainsi que le choix des ports pour l'injection du signal d'excitation de la structure [2].

Comme tous les simulateurs électromagnétiques 3D, l'avantage de cet outil est sa potentialité de simuler toutes sortes de structures homogènes et inhomogènes, quelle que soit la technologie utilisée. Cet outil facilite le dessin de la structure avec les dimensions requises [4].

CST Microwave Studio est vu par un nombre croissant d'ingénieurs comme un outil de développement standard de l'industrie qui offre à ses clients le choix de six modules solveur puissants.

CST Microwave Studio fait partie de la CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents pour différents types d'application. Étant donné aucune méthode ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'application [5].

III.2.1. La méthode d'intégration finie

CST microwave studio utilise la méthode d'intégration finie (FIT) introduite par Weiland en 1977. Elle consiste en une discrétisation spatio-temporelle des équations de Maxwell dans une formulation intégrale. Le domaine de calcul est décomposé en cellules élémentaire cubiques [6].

La FIT est utilisée par le logiciel d'analyse électromagnétique 3D Microwave studio de CST qui présente de nombreuses optimisation de calcul et une interface graphique conviviale. 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 [1].

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

Une fois le projet est crée, on accède à l'interface d'utilisateur du CST. L'image suivante montre une capture d'écran du CST Microwave Studio comme un exemple :

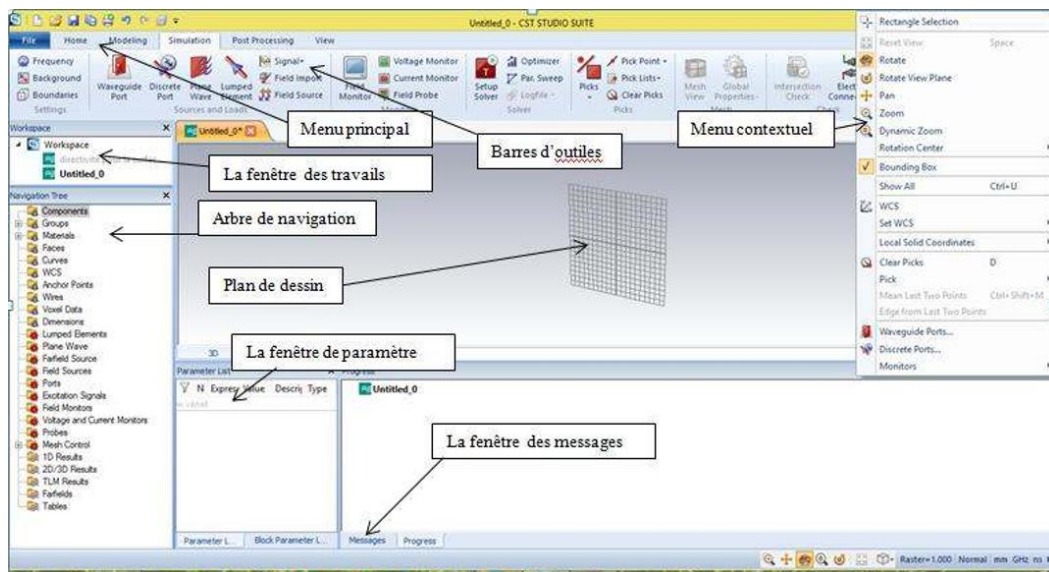


Figure III.2: La fenêtre principale du logiciel CST (2017).

- A l'entête de l'interface, on trouve la barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre du menu.
- Au pied de l'interface, nous avons : la liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparaît [7].
- L'arbre de navigation est un élément essentiel de l'interface utilisateur. De là, nous pouvons accéder aux éléments structurels ainsi que les résultats de simulation. Les sections suivantes expliquent les différents articles dans cette fenêtre d'arbre.
- Le menu contextuel est un moyen souple d'accéder à des commandes du menu les plus fréquemment utilisées pour le contexte actuel. Le contenu de ce menu qui peut être ouvert en appuyant sur le bouton droit de la souris.
- Le plan du dessin est le plan sur lequel nous allons dessiner des primitives de la structure. Comme la souris n'est qu'un localisateur 2D, même lors de la définition des

structures 3D, les coordonnées doivent être projetées sur le plan du dessin, afin de spécifier un emplacement 3D. Comme on peut modifier l'emplacement et l'orientation du plan de dessin à l'aide de différents outils, cette caractéristique rend le modelleur très puissant.

- La fenêtre de paramètre affiche une liste de tous les paramètres précédemment définis avec leurs valeurs actuelles.
- La fenêtre de message affiche le texte de l'information (par exemple la sortie du solveur) le cas échéant.
- Les autres éléments de l'interface utilisateur sont standards pour une application basée sur Windows [3].


III.3. Exemple d'un projet en CST

III.3.1. Simulation d'une antenne patch circulaire

Nos tous premiers travaux de simulation consistaient à réaliser en premier une antenne patch circulaire mono-bande bien adaptée, et ensuite une antenne patch circulaire à substrat normal bi-bande aussi bien adaptée.

III.3.1.1. Pour une antenne patch circulaire mono bande à substrat normal

- *Créer le plan de masse*

1. Activez l'outil de briques en cliquant sur l'icône  correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
2. On peut définir un point de départ par un double-clic sur un emplacement sur le plan du dessin.
3. Maintenant, on peut sélectionner la base de la face de coin de la brique sur le plan du dessin par double-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 où on peut introduire les valeurs numériques de tous les coordonnées et choisir le matériau dans ce cas (**PEC**: perfect electric conductor) et cliquez sur OK.

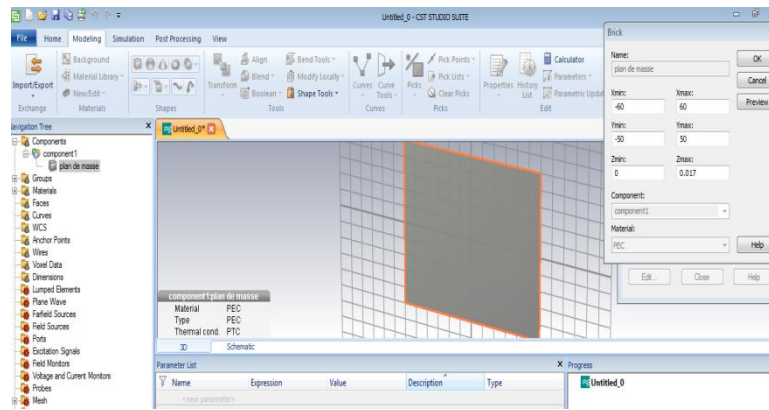



Figure III.3: Créer un plan de masse.

- **Créer des substrats diélectriques**

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 «Epoxy resin» puis cliquez sur OK.

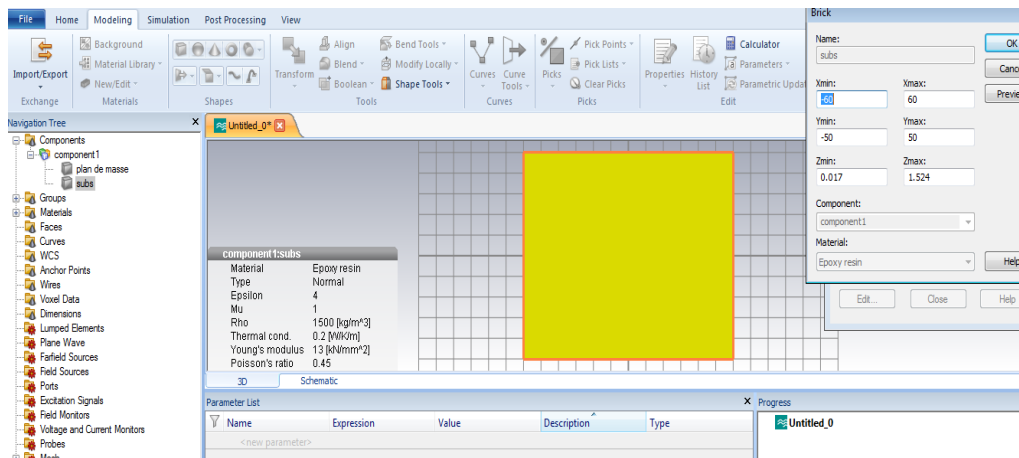



Figure III.4: Créer des substrats diélectriques

- **Créer les patches**

Pour créer un patch circulaire il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et on a choisie circular cylinder
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et cliquez sur OK.

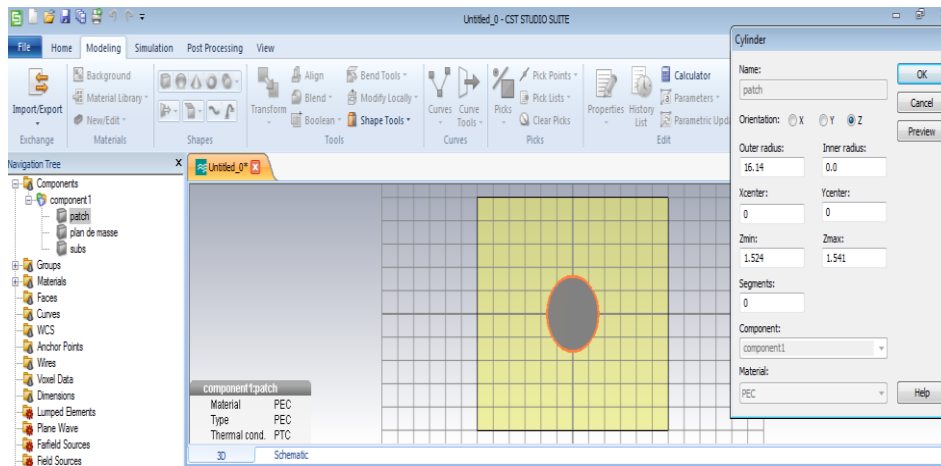




Figure III.5: Créer le patch

III.3.1.2. Pour une antenne patch circulaire bi-bande à substrat normal

Même étapes pour l'antenne patch circulaire mono-bande.

- *Pour Créer le slot*

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

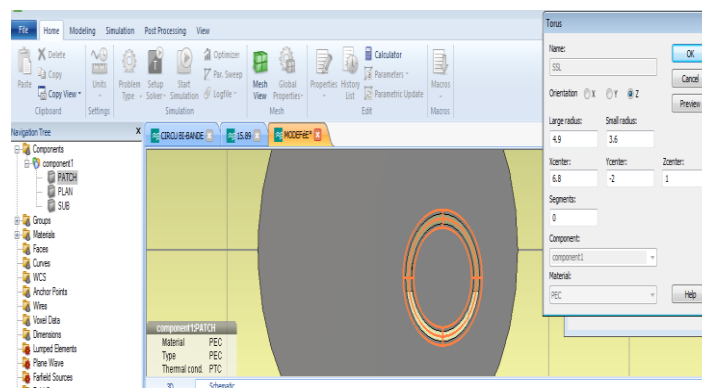

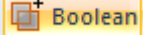

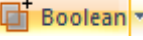


Figure III.6: Créer le slot

- *Pour Créer les deux murs de slot*

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

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

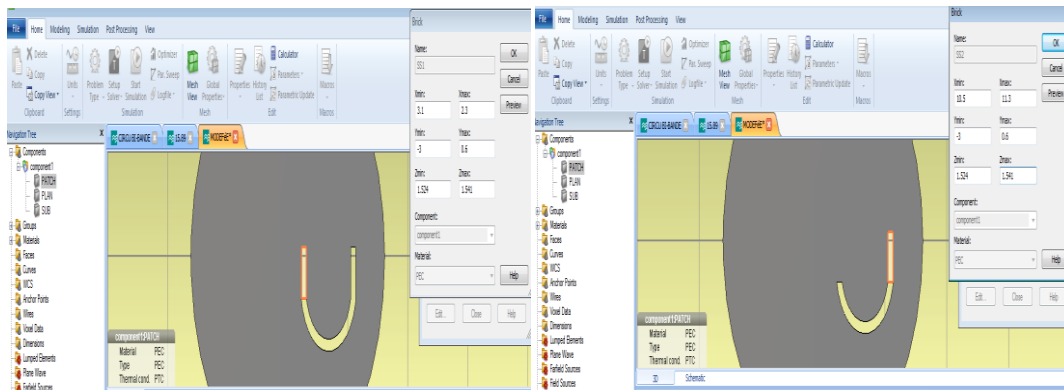



Figure III.7: Créer les murs de slot

- **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, on va entrer l'emplacement de ce port suivant x, y et z.

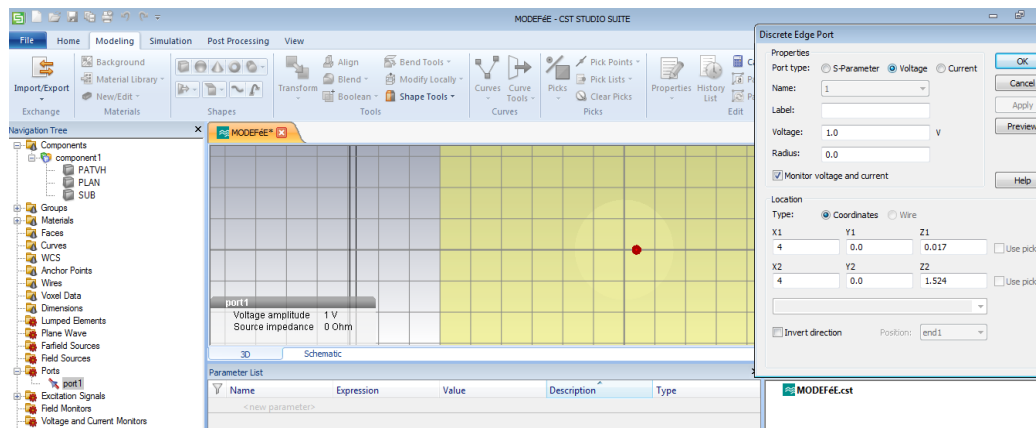



Figure III.8: Définir le port

- *Définir le domaine de fréquence*

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

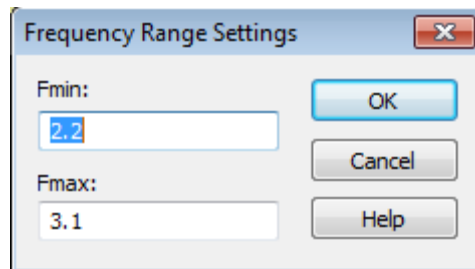



Figure III.9: Définir le domaine de fréquence.

- *La simulation*

Pour lancer la simulation il faut:

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

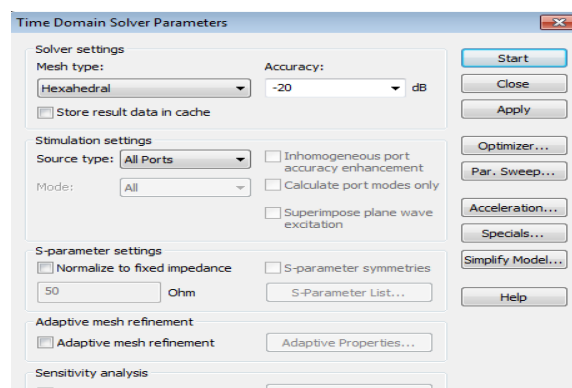


Figure III.10: choisir la précision

III.4: Antenne microruban circulaire bi-bande à substrat normal

III.4.1 Antenne microruban circulaire bi-bande à substrat normal avec et sans slot

On commence par comparer une antenne sans slot et antenne avec slot.

L'antenne qu'on a simulée fonctionne à la fréquence 2.6 GHz (LTE), dont les dimensions sont résumées dans le *Tableau III. 1*.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
h : épaisseur du substrat	1.524
W: largeur du substrat	50
L : longueur du substrat	60
X_0 : position du point d'alimentation	4
t : épaisseur du plan de masse	0.017
R : le rayon du patch	16.14

Tableau III.1: Dimensions de l'antenne microruban circulaire à substrat normal

Nous avons effectué plusieurs simulations, et on a changé plusieurs fois les paramètres, enfin on a fixé la valeur d'un paramètre à savoir le rayon du patch $R = 16.14 \text{ mm}$, le type du diélectrique constituant le substrat $\epsilon_r = 4$ « **Epoxy resin** » et enfin la position du point d'alimentation $X_0 = 4 \text{ mm}$, pour arriver à avoir les meilleurs résultats possibles. Pour créer une antenne bi-bande en utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et on a ajouté un slot sous forme d'une « U »

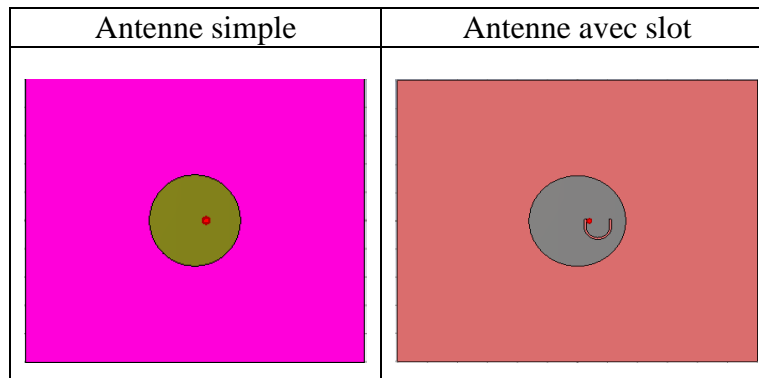


Tableau III.2: La structure d'antenne microruban circulaire à substrat normal avec et sans slot

A)-Fréquence de résonance

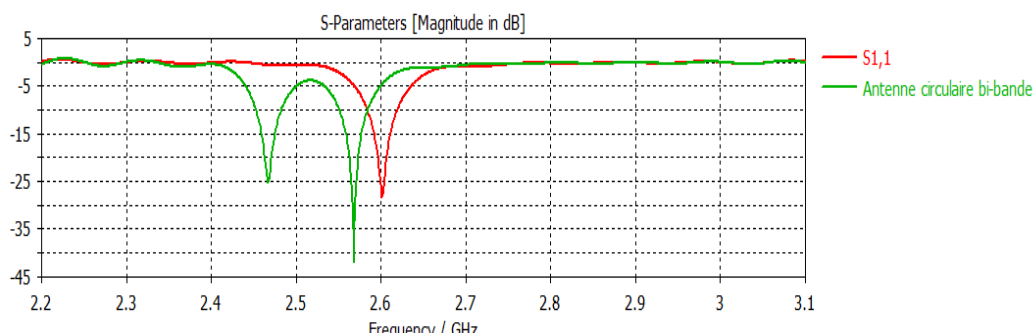


Figure III.11: Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne microruban sans slot et antenne microruban circulaire avec slot (bi-bande)

B)-Directivité:

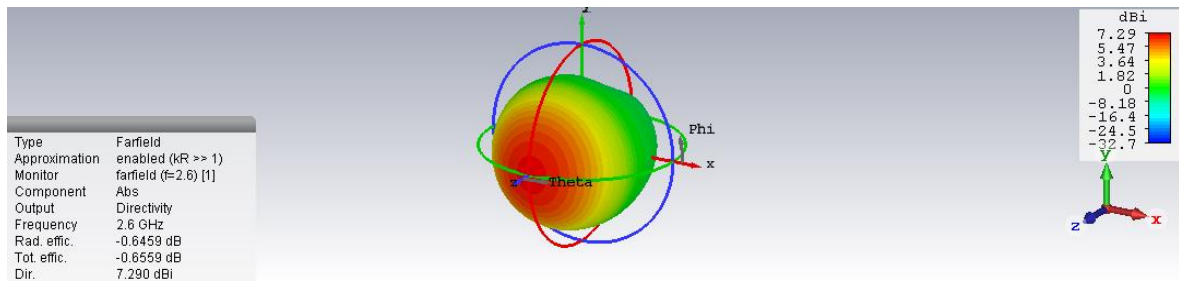


Figure III.12: Directivité en 3D d’une antenne microruban circulaire simple

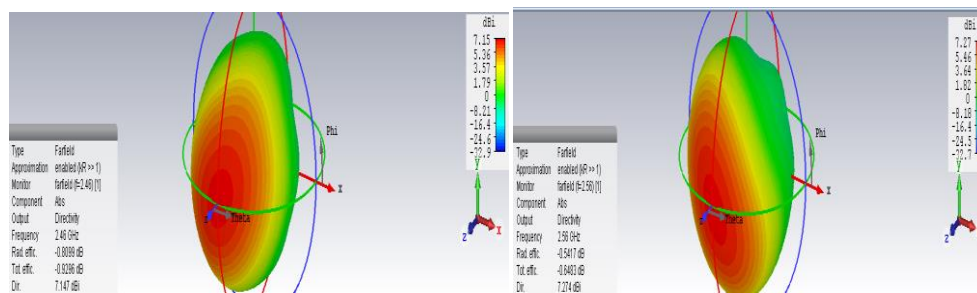


Figure III.13: Directivité en 3D d’une antenne microruban circulaire bi-bande

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S ₁₁₋₁ (dB)	S ₁₁₋₂ (dB)	D1 (dB)	D2 (dB)
Antenne sans slot	2.6	/	0.0352	/	-28.29	/	7.29	/
Antenne (bi-bande) avec slot	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29

Tableau III.3: Antenne sans slot et antenne avec slot

On peut dire que l’antenne est bien adaptée si le coefficient de réflexion $S_{11} \leq -10$ dB, donc les deux antennes réalisées sont bien adaptées.

On Remarque :

- On a deux bandes pour l’antenne avec slot (bi-bande) et une seule bande pour l’antenne sans slot.
- Les fréquences de résonance pour l’antenne avec slot (bi-bande) est inférieur à celle de l’antenne sans slot ;
- Vue le coefficient de réflexion S_{11} pour les deux antennes sans slot et l’antenne avec slot (bi-bande), elles sont adaptées ;

- On observe pour une antenne avec slot les deux bandes sont proches et étroites ($BP1=1.34\%$ et $BP2=1.41\%$), et pour l'antenne sans slot une seule étroite bande ($BP=1.35\%$) ;
- La directivité pour l'antenne avec slot est presque la même par rapport à une antenne avec slot ;

III.4.2 Effet de la variation de l'épaisseur du substrat d'une antenne bi-bande (avec slot)

A) Coefficients de réflexion S_{11}

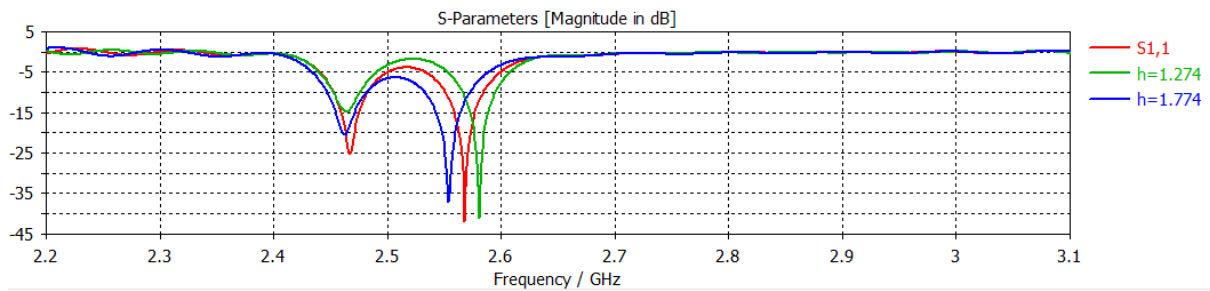


Figure III.14: Coefficient de réflexion S_{11} pour différent épaisseur du *substrat*

B) Directivité:

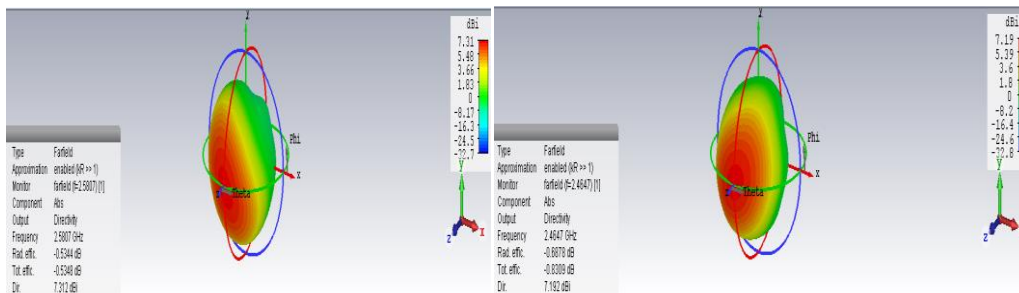


Figure III.15 : La directivité en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1 = 1.274\text{mm}$

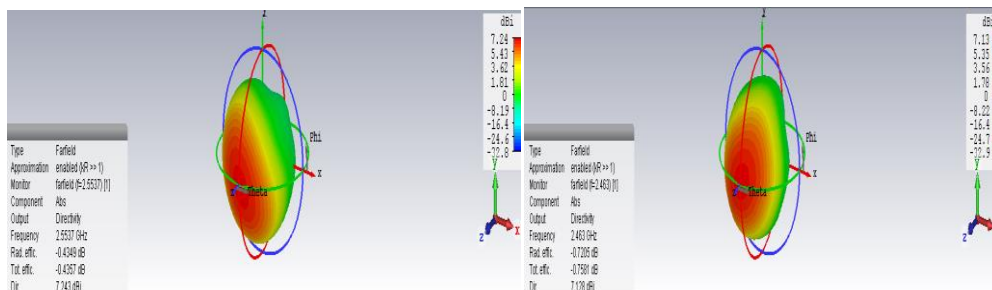


Figure III.16 : La directivité en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.774\text{mm}$

	fr_1 (GHz)	fr_2 (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
$h_1=1.274$	2.46	2.58	0.0251	0.0291	-14.91	-41.04	7.19	7.31
$h_0=1.524$	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29
$h_2=1.774$	2.46	2.55	0.0352	0.0402	-20.58	-37.33	7.13	7.24

Tableau III.4: Caractéristiques de l’antenne microruban avec Slot en fonction de l’épaisseur du substrat

A partir du tableau III.4 on remarque :

- Coefficients de réflexion S_{11} change avec la variation de l’épaisseur du substrat ;
- La fréquence de résonance et la directivité diminue avec l’augmentation de l’épaisseur de substrat ;
- La bande passante s’élargie avec l’augmentation de l’épaisseur de substrat ;

III.4.3 Effet de la variation du rayon du patch

A) Coefficients de réflexion S_{11}

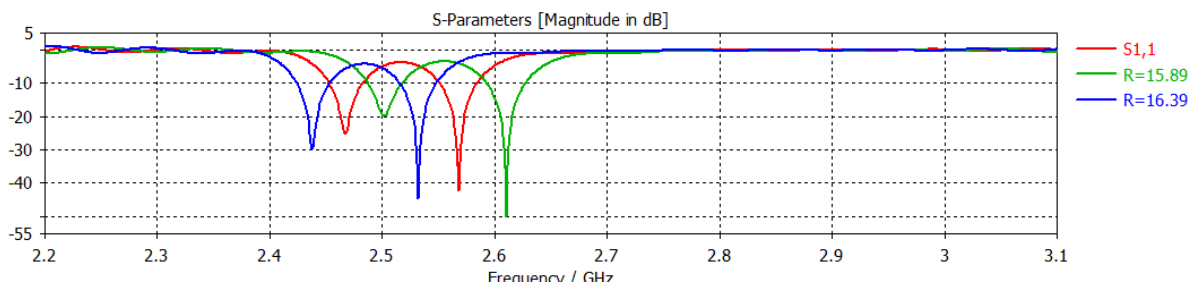


Figure III.17: Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs du rayon du patch

B) Directivité :

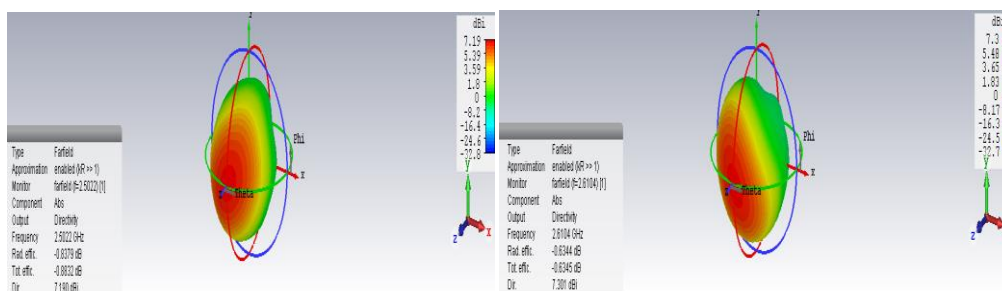


Figure III.18: la directivité en 3D pour une variation de du rayon du patch (R=15.89)

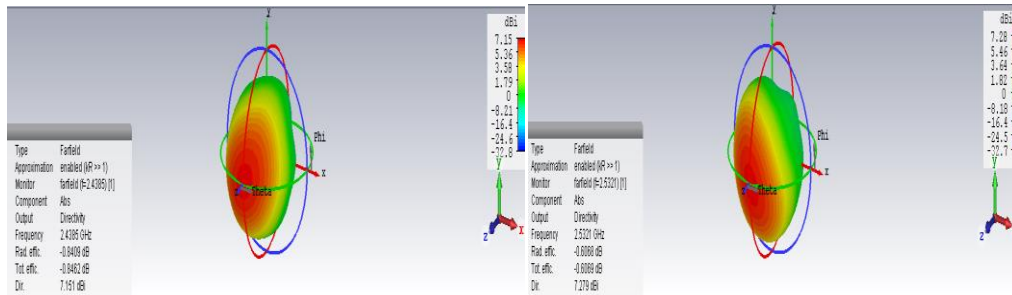


Figure III.19 : la directivité en 3D pour une variation de du rayon du patch (R=16.39)

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
R1=15.89	2.50	2.61	0.0305	0.0375	-19.88	-50	7.19	7.3
R0=16.14	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29
R2=16.39	2.43	2.53	0.0302	0.0342	-29.28	-44.54	7.15	7.28

Tableau III.5: Caractéristiques de l’antenne microruban avec Slot en fonction du rayon du patch

- La bande passante est et le coefficient de réflexion S_{11} changent avec la variation du rayon du patch ;
- La directivité augmente avec la diminution du rayon ;
- La fréquence de résonance diminue avec l’augmentation du rayon.

III.4.4 Effet de la Variation du matériau du substrat

A) Coefficient de réflexion S_{11}

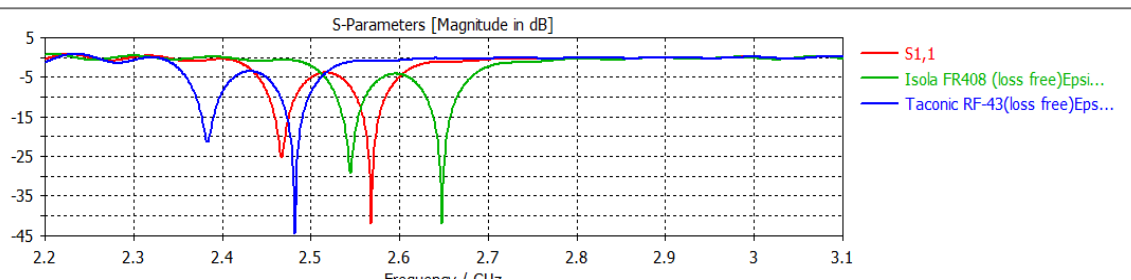


Figure III.20: Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs de la permittivité du substrat ϵ_r

B) Directivité :

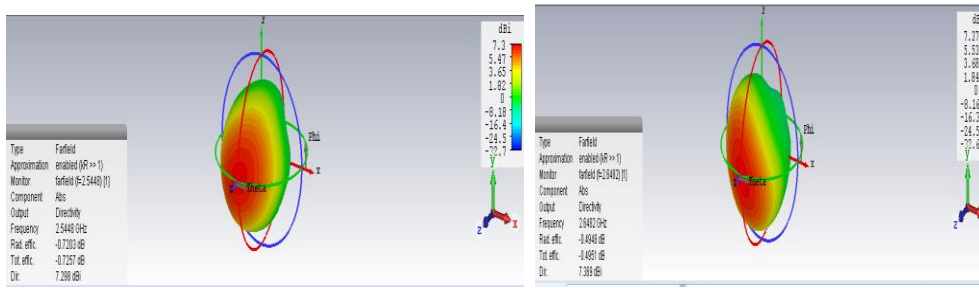


Figure III.21 : La directivité en 3D pour Isola FR408 (loss free) $\epsilon_r = 3.75$

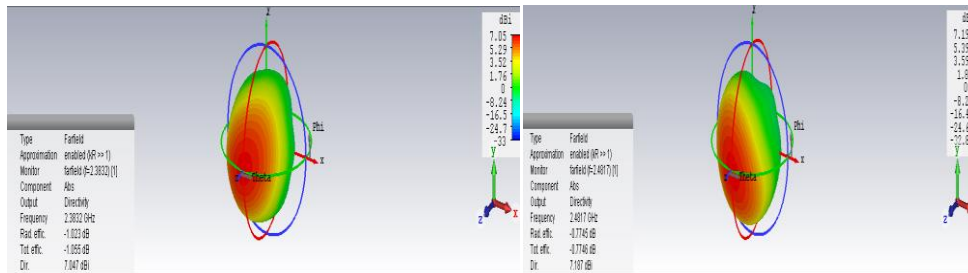


Figure III.22 : La directivité en 3D pour Taconic RF-43(loss free) $\epsilon_r= 4.3$

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
Isola FR408 (loss free) $\epsilon_r=3.75$	2.54	2.64	0.0332	0.0362	-29.15	-42.03	7.3	7.37
Epoxy resin $\epsilon_r=4$	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29
Taconic RF-43(loss free) $\epsilon_r= 4.3$	2.38	2.48	0.0281	0.0322	-21.39	-44.61	7.05	7.19

Tableau III.6: Caractéristiques de l’antenne microruban avec slot en fonction de la permittivité du substrat

- La fréquence de résonance et la bande passante ainsi la directivité diminuent avec l’augmentation de la permittivité ;
- Le coefficient de réflexion augmente avec l’augmentation de la permittivité ;

III.4.5 Effet de la variation de la largeur du slot « U »

A) Coefficient de réflexion S_{11}

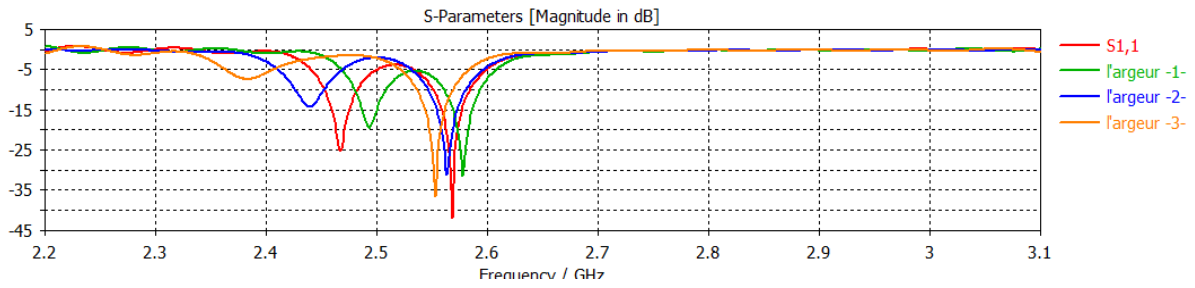


Figure III.23: Coefficient de réflexion S_{11} pour différents valeurs de la largeur du slot « U »

B) Directivité

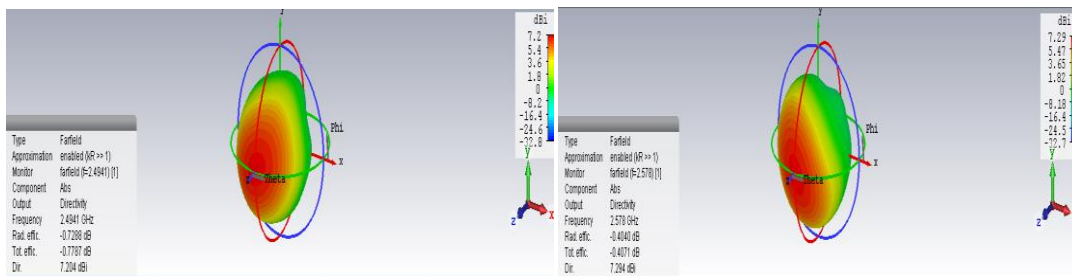


Figure III.24 : La directivité en 3D pour la largeur $L_1=3.85$

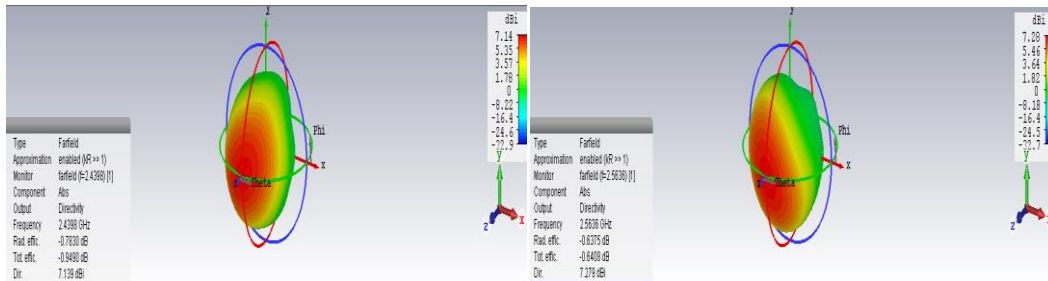


Figure III.25 : La directivité en 3D pour la largeur $L_2=5.15$

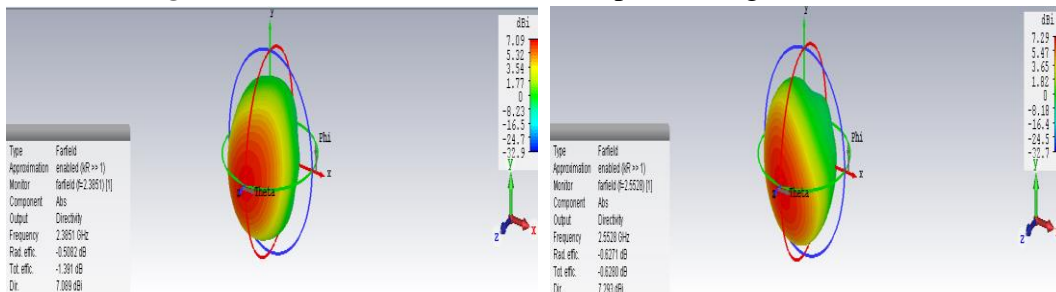


Figure III.26 : La directivité en 3D pour la largeur $L_3=5.7$

	fr_1 (GHz)	fr_2 (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
L₁=4.65	2.49	2.57	0.0302	0.0332	-19.36	-31.53	7.2	7.29
L₀=4.9	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29
L₂=5.15	2.43	2.56	0.0271	0.0352	-14.30	-31.24	7.14	7.28
L₃=5.7	2.38	2.55	/	0.0342	-7.40	-36.72	7.09	7.29

Tableau III.7: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de largeur de slot « U »

- La bande passante varie avec la largeur du slot et pour la valeur de la largeur L₃ on a une seule bande ;
- la directivité et le coefficient de réflexion varient avec l'augmentation de la largeur de slot « U »

III.4.6 Effet de la variation de l'emplacement du slot « U »:

A) Coefficient de réflexion S_{11}

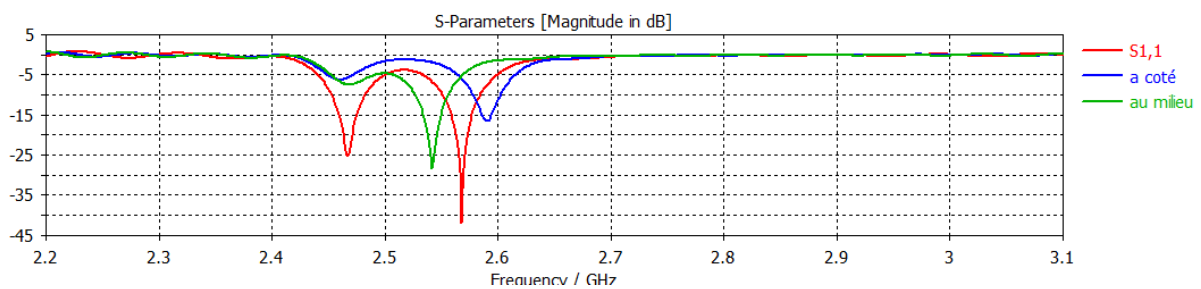


Figure III.27: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation de l'emplacement du slot « U »

B) Directivité :

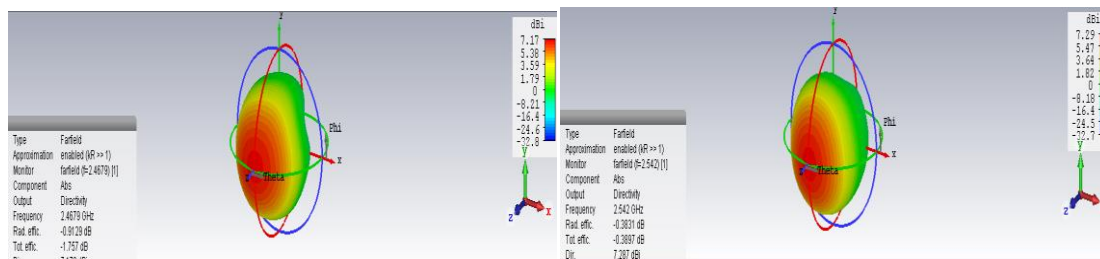


Figure III.28 : La directivité en 3D pour le slot au milieu

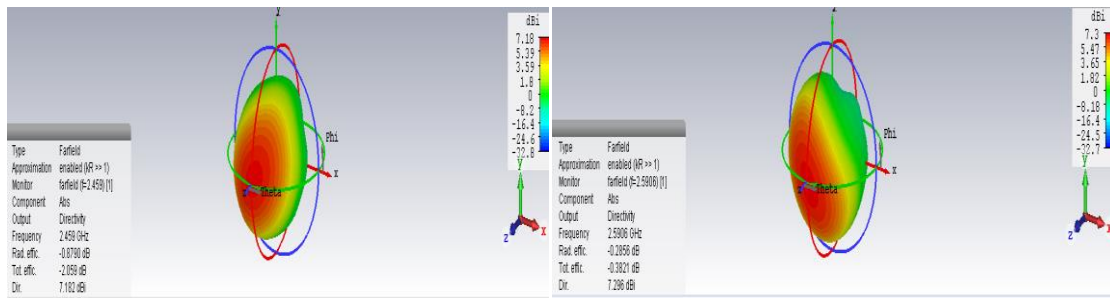


Figure III.29 : la directivité en 3D pour le slot a coté

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
Au milieu	2.46	2.54	/	0.0312	-7.45	-28.31	7.17	7.29
Cas initial	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.04	-42.10	7.15	7.29
A coté	2.45	2.59	/	0.0271	-6.24	-16.56	7.18	7.3

Tableau III.8: Caractéristiques de l’antenne microruban avec Slot en fonction de l’emplacement du slot « U »

- Après le changement l’emplacement du slot, on remarque qu’il ne reste qu’une seule bande.
- La directivité change avec l’emplacement du slot.

III.5. Antenne BIE bi-bande

Dans cette partie le substrat BIE de type 1D qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques d'une permittivité de $\epsilon_{r1} = 1$ « vacuum », d'épaisseur $h_1 = 0.2mm$ et deux autres couches diélectriques d'une permittivité de $\epsilon_r=4$ « Epoxy resin », d'épaisseur $h_2 = 0.5535mm$, et les paramètres restent les mêmes à l’antenne à substrat normal.

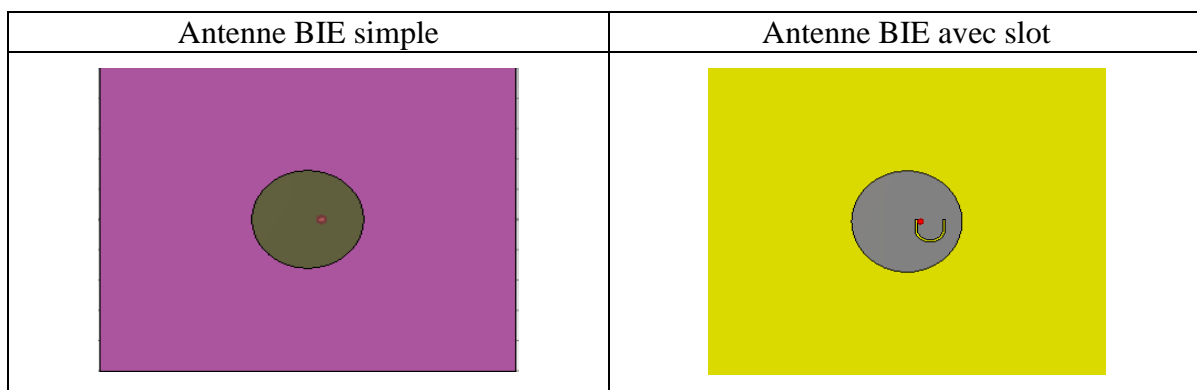


Tableau III.9: Structure d'antenne microruban circulaire BIE

A)- Coefficient de réflexion S_{11}

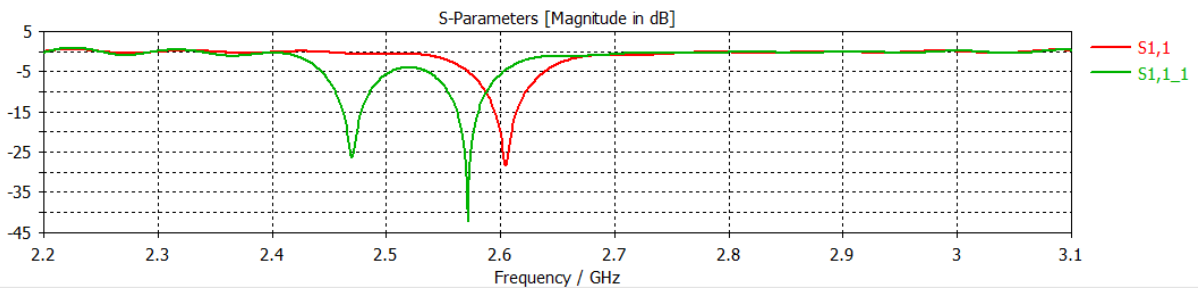


Figure III.30: Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne BIE sans slot et antenne BIE avec slot

B)-Directivité:

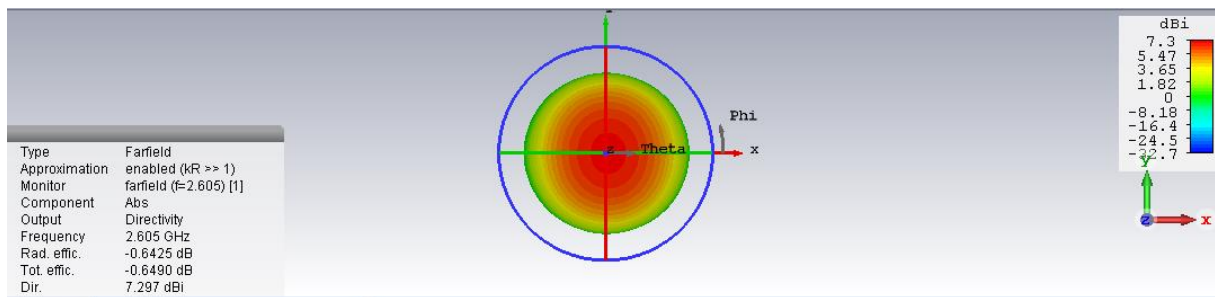


Figure III.31: Directivité en 3D d’une antenne BIE simple

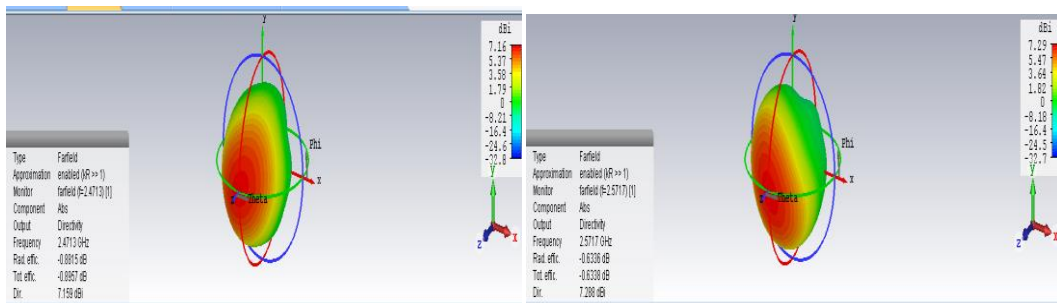


Figure III.32: Directivité en 3D d’une antenne BIE avec slot

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D_1 (dB)	D_2 (dB)
Antenne sans slot	2.6	/	0.0372	/	-28.29	/	7.3	/
Antenne BIE avec slot	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29

Tableau III.10: Caractéristiques de l’antenne microruban BIE simple antenne BIE avec et sans slot

On remarque:

- Les deux antennes sont bien adaptées ;
- On observe deux bandes pour l'antenne avec slot et une seule bande pour l'antenne sans slot ;
- La fréquence de résonance de l'antenne avec slot est inférieure à celle de l'antenne sans slot ;
- Le coefficient de réflexion S_{11} pour antenne sans slot est inférieure par rapport à l'antenne avec slot ;
- On observe pour antenne avec slot deux bandes sont proches et étroites $BP1 = 1.35\%$ et $BP2 = 1.44\%$, et pour antenne sans slot une seule étroite bande, $BP = 1.43\%$;
- Les directivités pour les deux antennes sont presque les mêmes.

III.5.1 Antenne microruban circulaire avec slot à substrat simple et antenne BIE avec slot

On a comparé les deux antennes : antenne BIE et antenne bi-bande à substrat normal.

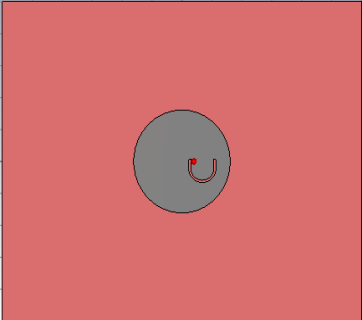
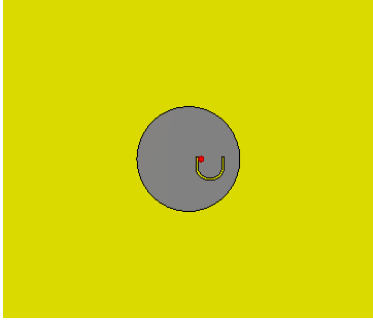
Antenne circulaire à substrat simple	Antenne BIE avec slot
	

Tableau III.11: Structure d'antenne microruban circulaire

A)- Coefficient de réflexion S_{11}

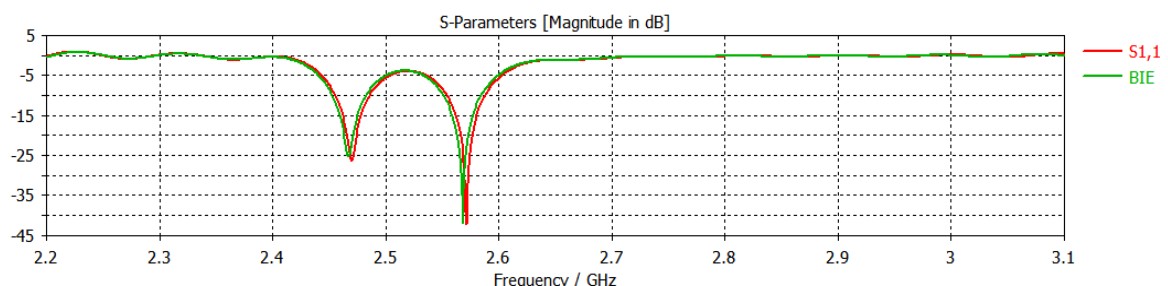


Figure III.33: Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne microruban avec slot substrat simple et antenne BIE avec slot

B) - Directivité:

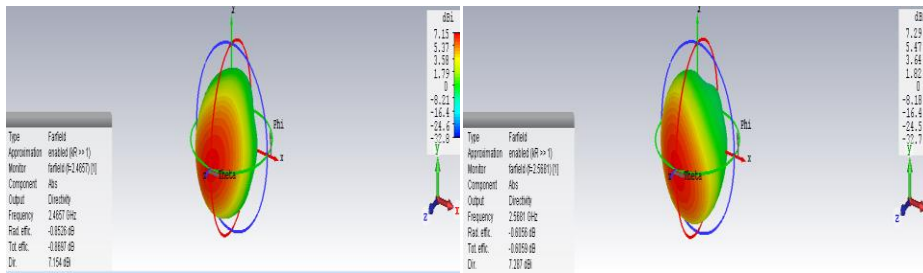


Figure III.34: Directivité en 3D d’une antenne microruban avec slot

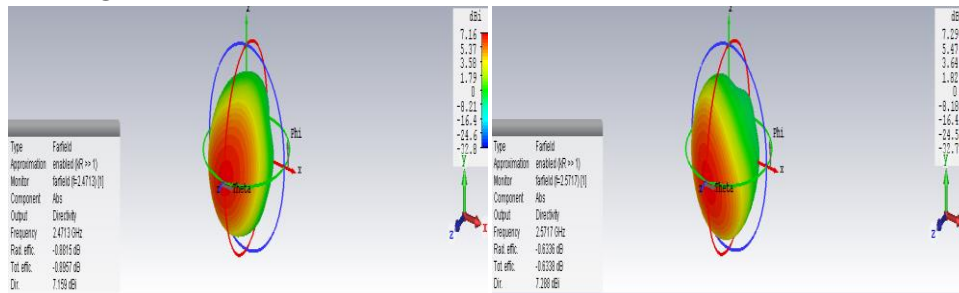


Figure III.35: Directivité en 3D d’une antenne BIE avec slot

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S ₁₁₋₁ (dB)	S ₁₁₋₂ (dB)	D1 (dB)	D2 (dB)
Antenne à substrat normal sans slot	2.46	2.56	0.0332	0.0362	-25.12	-42.10	7.15	7.29
Antenne BIE avec slot	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29

Tableau III.12: Caractéristiques de l’antenne microruban avec slot et antenne BIE avec slot

On Remarque :

- Les directivités et les coefficients de réflexion S₁₁ pour les deux antennes sont presque les mêmes ;
- La bande passante pour une antenne BIE est plus large par rapport à l’antenne à substrat normal.

III.5.2 Effet de la variation de l’épaisseur du substrat BIE

A) Coefficient de réflexion S₁₁

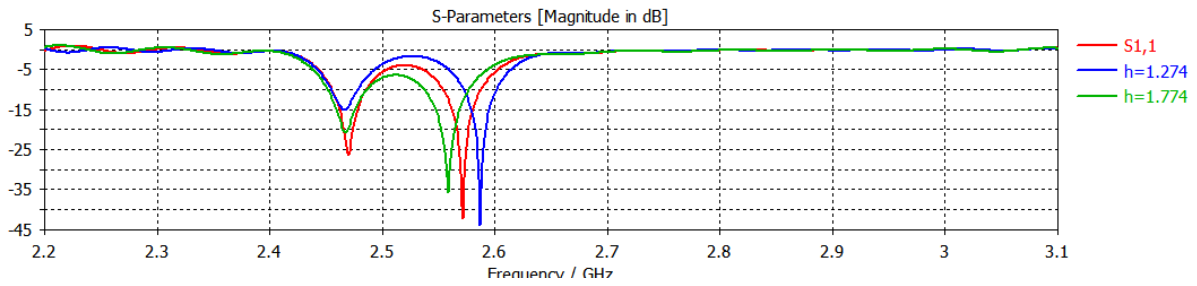


Figure III.36: Coefficient de réflexion S11 pour différent épaisseur du substrat BIE

B) Directivité :

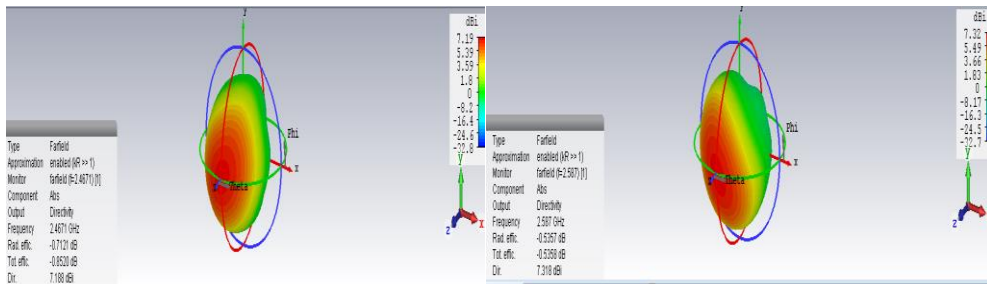


Figure III.37 : La directivité en 3D pour l'épaisseur du substrat BIE (h=1.274)

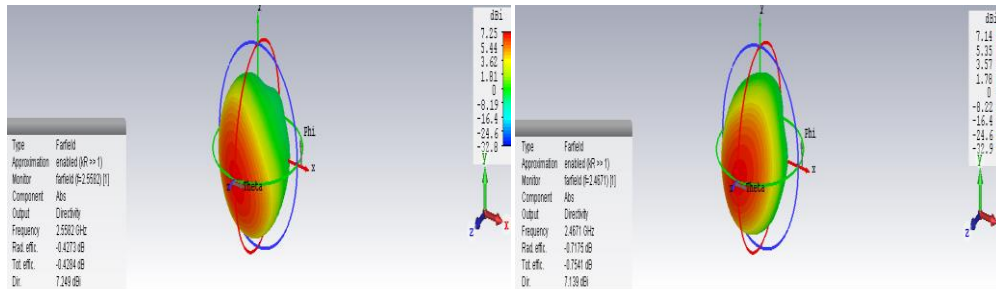


Figure III.38 : La directivité en 3D pour l'épaisseur du substrat BIE (h=1.774)

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D_1 (dB)	D_2 (dB)
$h_1=1.274$	2.46	2.58	0.0251	0.0312	-15.04	-41.05	7.19	7.32
$h_0=1.524$	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.04	-42.35	7.16	7.29
$h_2=1.774$	2.46	2.55	0.0362	0.0412	-20.46	-35.81	7.14	7.25

Tableau III.13: Caractéristiques de l'antenne microruban avec Slot en fonction de l'épaisseur du substrat BIE

Après le changement l'épaisseur de substrat on Remarque :

- Coefficients de réflexion S11 change avec la variation de l'épaisseur ;

- La directivité et la fréquence de résonance diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de substrat ;
- La bande passante s'élargit avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat.

III.5.3 Effet de la Variation du rayon du patch BIE

A) Coefficients de réflexion

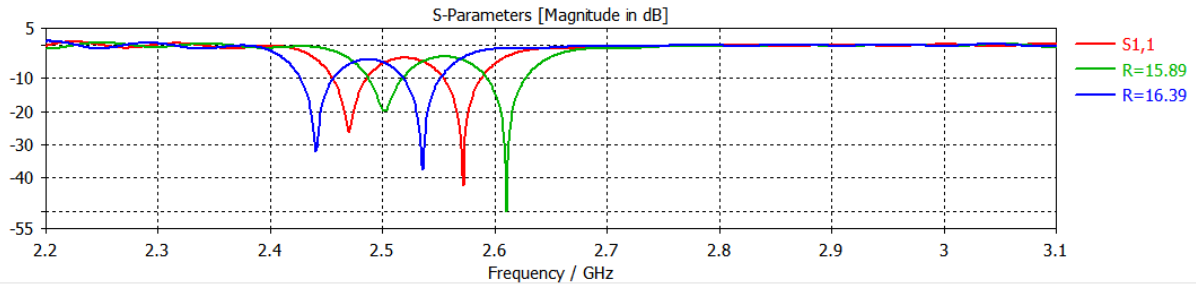


Figure III.39: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation du rayon du patch

B) Directivité

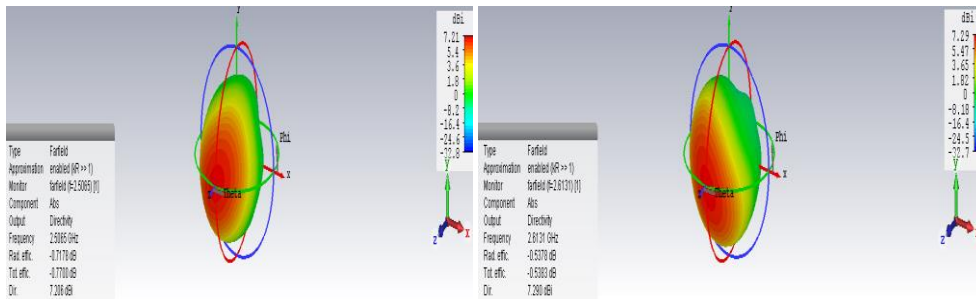


Figure III.40 : La directivité en 3D pour un rayon du patch : $R=15.89$

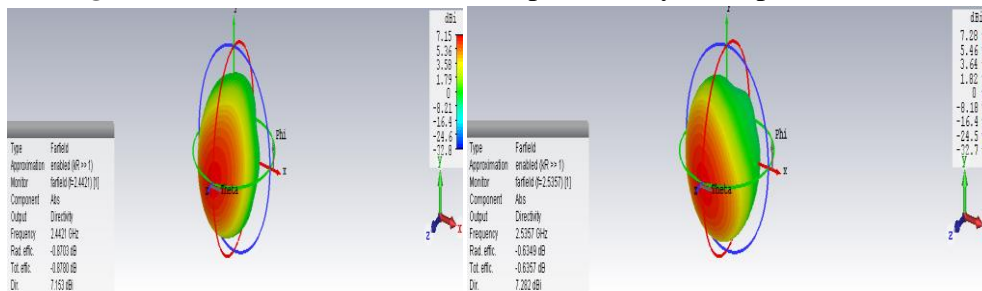


Figure III.41 : La directivité en 3D pour un rayon du patch $R=16.39$

	fr_1 (GHz)	fr_2 (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D_1 (dB)	D_2 (dB)
$R_1=15.89$	2.50	2.61	0.0312	0.0372	-19.34	-39.94	7.21	7.29
$R_0=16.14$	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29
$R_2=16.39$	2.44	2.53	0.0325	0.0365	-31.09	-38.41	7.15	7.28

Tableau III.14: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec Slot en fonction du rayon du patch

- La directivité, la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion diminuent avec l'augmentation du rayon ;
- La bande passante change avec la variation du rayon du patch.

III.5.4. Effet de la Variation du matériau du substrat BIE

A) Coefficient de réflexion S_{11}

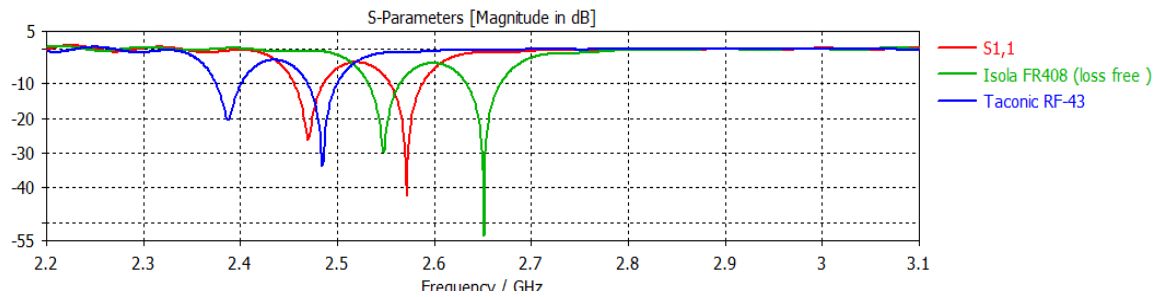


Figure III.42: Coefficient de réflexion S_{11} pour la Variation du matériau du substrat.

B) Directivité:

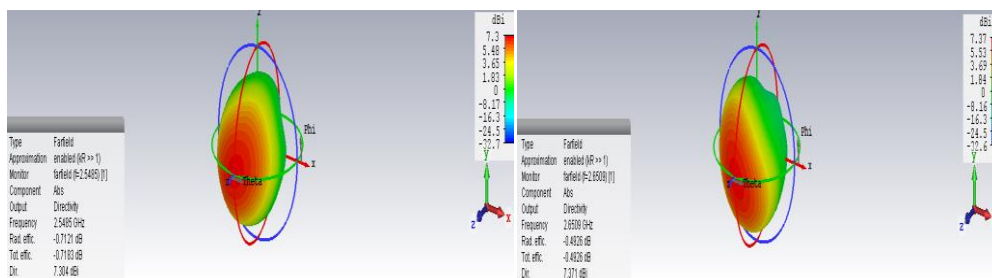


Figure III.43 : la directivité en 3D pour Isola FR408 (loss free) Epsilon = 3.75

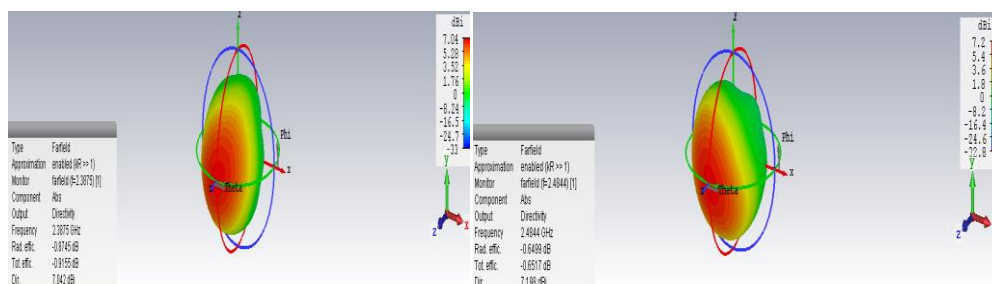


Figure. III.44 : la directivité en 3D pour Taconic RF-43 (loss free) $\epsilon_r = 4.3$

Tableau III.15: Caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec Slot en fonction de la permittivité du substrat

	fr_1 (GHz)	fr_2 (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D_1 (dB)	D_2 (dB)
Isola FR408 (loss free) Epsilon=3.75	2.54	2.65	0.0355	0.0385	-28.63	-53.67	7.3	7.37
cas normal Epoxy resin Epsilon=4	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29
Taconic RF-43(loss free) Epsilon=4.3	2.38	2.48	0.0291	0.0332	-20.22	-33.92	7.04	7.2

- Toutes les caractéristiques dans le tableau III.15 : La fréquence de résonance, la bande passante, la directivité diminuent avec l'augmentation de la permittivité.
- Le matériau **Isola FR408 (loss free)** donne la meilleur directivité, une bande passante plus large et une meilleur adaptation $S_{11}=-53.67$;

III.5.5 Effet de la Variation de largeur du slot « U »

A)- Coefficient de réflexion S_{11}

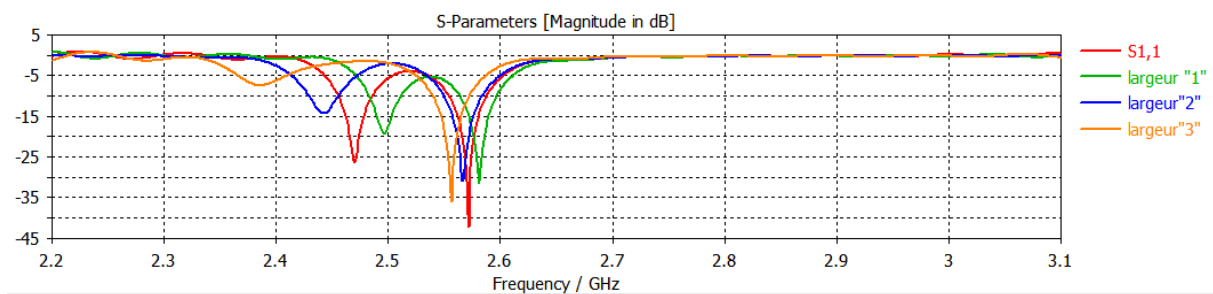


Figure III.45: Coefficient de réflexion S_{11} pour la variation de la largeur du slot « U ».

B)-Directivité:

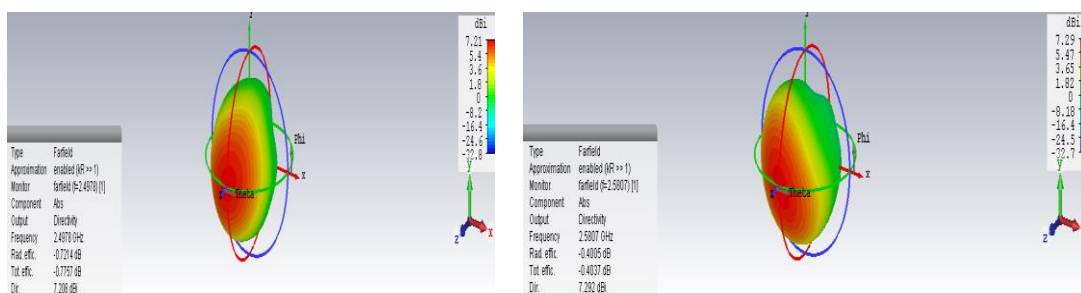


Figure III.46 : La directivité en 3D pour la largeur ($L=4.65\text{mm}$)

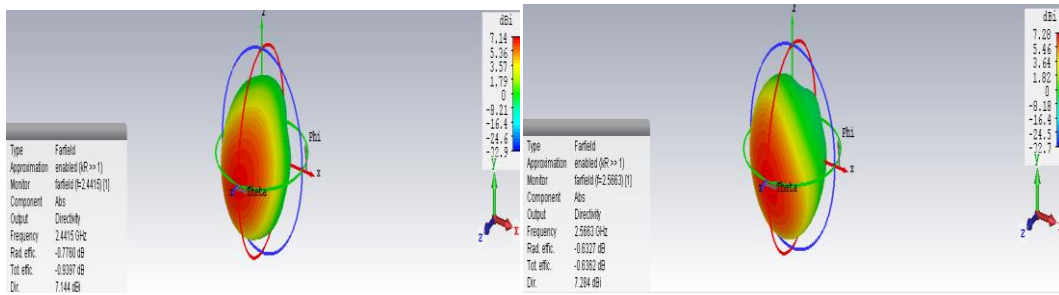


Figure III.47 : La directivité en 3D pour la largeur (L= 5.15mm)

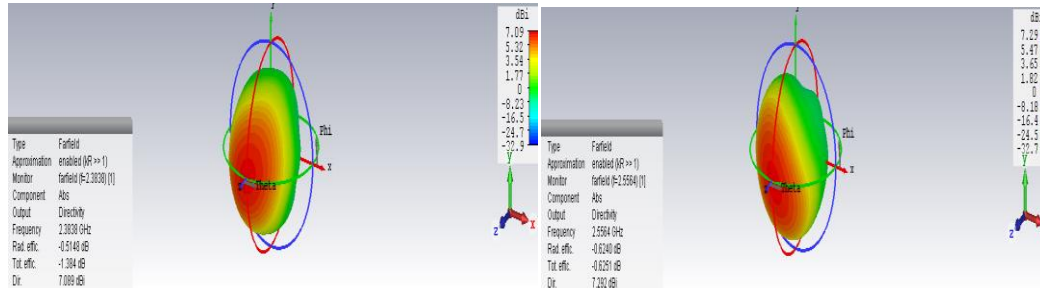


Figure III.48 : la directivité en 3D pour la largeur (L=5.7mm)

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP ₁ (GHz)	BP ₂ (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D ₁ (dB)	D ₂ (dB)
L₁=4.65	2.49	2.58	0.0312	0.0362	-19.32	-31.41	7.21	7.29
L₀=4.9	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29
L₂=5.15	2.44	2.55	0.0302	0.0342	-14.35	-32.39	7.14	7.28
L₃=5.7	2.38	2.55	/	0.0342	-7.42	-36.12	7.09	7.29

Tableau III.16: Caractéristiques de l’antenne microruban à BIE avec Slot en fonction de largeur de slot « U »

- La bande passante varie avec l’épaisseur du slot ;
- La directivité, la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion diminuent avec l’augmentation de la largeur du slot.

III.5.6 Effet de la Variation de l’emplacement du slot « U »

A) Coefficient de réflexion S_{11}

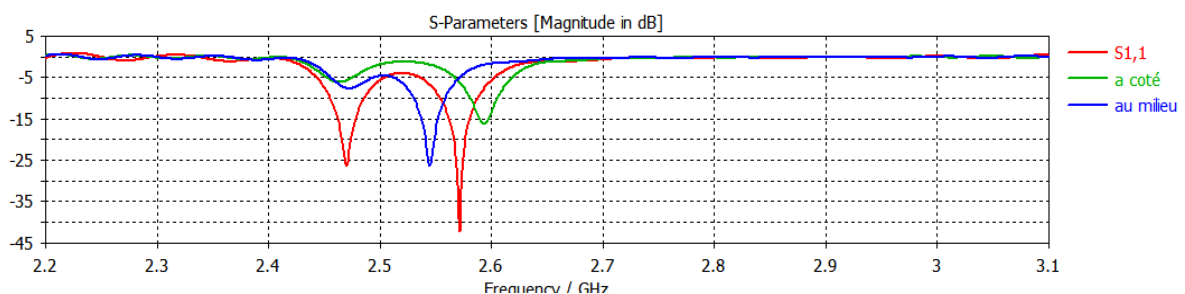


Figure III.49: Coefficient de réflexion S11 pour la Variation de l’emplacement du slot « U »

B) Directivité :

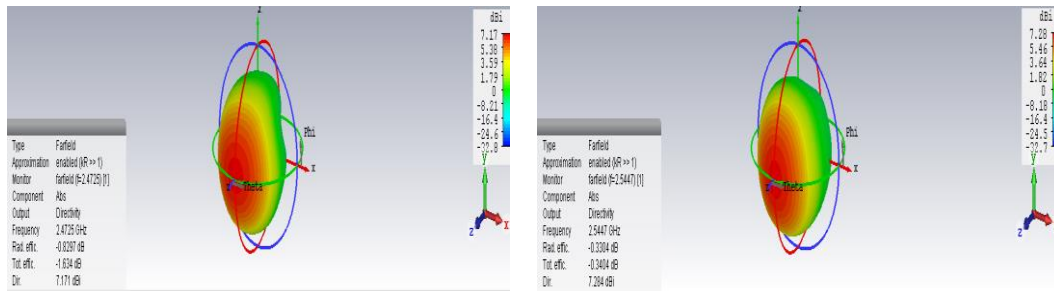


Figure III.50: la directivité en 3D pour le slot au milieu

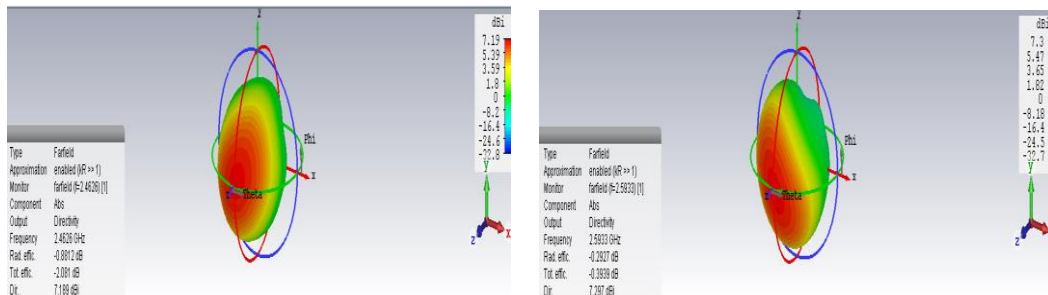


Figure III.51 : La directivité en 3D pour le slot à coté

	f_{r1} (GHz)	f_{r2} (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D_1 (dB)	D_2 (dB)
Au milieu	2.47	2.54	/	0.0302	-7.68	-26.45	7.17	7.28
Cas initial	2.47	2.57	0.0334	0.0372	-26.15	-42.35	7.16	7.29
A coté	2.46	2.59	/	0.0271	-6.16	-16.35	7.19	7.3

Tableau III.17: Caractéristiques de l’antenne microruban à BIE avec slot en fonction de l’emplacement du slot « U »

- L’emplacement du slot influe sur tous les caractéristiques de l’antenne microruban à BIE avec slot

III.6. LTE

En octobre 2010, l’UIT (Union internationale des télécommunications) a reconnu la technologie LTE-Advanced.

LTE est un acronyme pour "Long-Term Evolution". C'est une évolution des normes de téléphonie mobile. A d’abord été considérée comme une norme de troisième génération "3.9G" car proche de la 4G. Qui introduit du très haut débit pouvant aller, en théorie, jusqu’à 150 Mbits/s.



La 4^{ème} génération vise à améliorer l'efficacité spectrale et augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes.

III.7. Conclusion:

Dans ce chapitre on a étudié une antenne microstrip bi-bande circulaire, après nous avons simulé une antenne BIE bi-bande sur un substrat à BIE 1D qui est utilisé dans les applications 4G (LTE), et nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques (l'épaisseur de substrat) et la permittivité de la couche 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 1D avec une bonne précision. À partir des résultats nous avons conclu que:

A) - Pour la fréquence de résonance

- ❖ La fréquence de résonance pour une antenne à substrat simple est inférieure à celle d'une antenne BIE bi-bande ;
- ❖ La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat et le rayon du patch ainsi la permittivité et la largeur de slot « U » ;
- ❖ La fréquence de résonance varie pour la variation de l'emplacement du slot « U » ;

B)-Pour la directivité

- ❖ La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat BIE par rapport à une antenne avec un substrat normal ;
- ❖ La directivité varie pour la variation de la largeur du slot « U »
- ❖ La directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité, l'épaisseur du substrat et le rayon du patch ;

C)-pour la bande passant

- ❖ La bande passante est plus large pour une antenne à un substrat à BIE par rapport à celle d'un substrat simple ;
- ❖ La bande passante s'élargit avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat;
- ❖ La bande passante diminue pour l'augmentation de la permittivité ;
- ❖ La bande passante varie pour la variation de largeur de slot « U » et le rayon du patch ;

Bibliographie

[1] BENDIABDALLAH Zakaria Amine BOUDJELAL Yassamina Ikram," Nouvelles Topologies Des Filtres Passe-Bandes A Base De La Technologie Siw Operant En Bandes Ku, C Et S Pour Des Applications Satellitaires", Pour l'obtention du diplôme de MASTER, Réseaux et Systèmes de Télécommunication, A L'UNIVERSITÉ DE TLEMCEM, 2015.

[2] Belazzoug. F," Etude D'une Antenne Micro ruban Triangulaire A Bande Interdite Photonique (BIP) 2D", Pour l'obtention du diplôme de master, système de télécommunication numérique, université Mohamed Boudiaf - m'sila, juin 2016 .

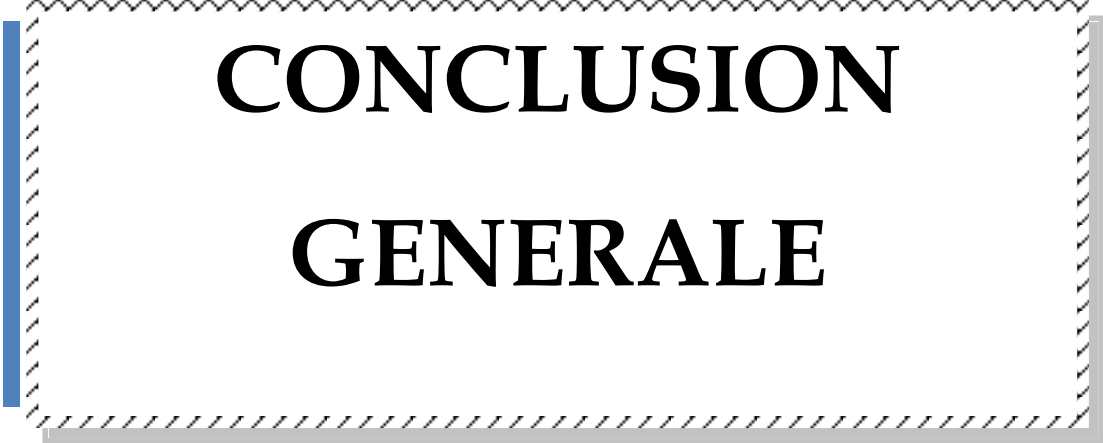
[3] MANSOUR RAZIK HADJI MOHAMMED KHALIL," Étude d'une antenne microruban à Bande interdite Électromagnétique(BIE) 1D à defaults", pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, système de télécommunication, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018 /2019.

[4] M. CHAABANE Abdelhalim," Conception D'une Antenne Bip Large Bande A Fort Gain", thèse doctorat, en électronique, Université Ferhat Abbas - Sétif 1-2017

[5] BELGACEM Nassima," Conception Des Antennes Pifa Mono-Bande Et Multi-Bandes GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI pour téléphones mobiles", Pour l'obtention du diplôme de MASTER, Réseaux Mobile et Service, université De Tlemcen, 2013

[6] Michael Grelier," Miniaturisation des antennes large bande à l'aide de matériaux artificiels", Thèse presentee pour obtenir le grade de docteur, Ecole Doctorale d'Informatique, Télécommunications et électronique de Paris, le 28 janvier 2011.

[7] BELABAS Lynda, Mr H.KANANE CHEMMOUN Lila," Miniaturisation de l'antenne patch sous CST", Thèse de mastère Réseaux et Télécommunication, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2017/2018



CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était d'étudier une antenne BIE bi-bande (fonctionnant dans deux bandes), de forme circulaire à substrats BIE (1D) selon la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel de simulation électromagnétique CST (Computer Science Technology) microwave studio qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

Les paramètres que nous avons étudiés dans ce travail sont : le matériau du substrat (matériau à BIE ou diélectrique simple), les dimensions de rayon du patch, l'épaisseur du substrat, largeur et l'emplacement du slot « U », permittivité ϵ_{r2} .

Dans le premier chapitre nous avons présenté un historique concernant les antennes microrubans bi-bande, leurs caractéristiques, ensuite les différentes structures et les matériaux diélectrique. Ainsi les différentes techniques d'alimentation de ces antennes. Ainsi leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un contexte général les matériaux à bandes Interdites Electromagnetique ou (Electromagnetic Band Gap en anglais). Dans un premier temps, nous rappellerons les propriétés générales des matériaux BIE par un bref historique et quelques définitions des matériaux à BIE et leurs caractéristiques, une description pour les matériaux BIE et leurs structures, aussi leurs domaines d'application.

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

Tout d'abord, nous avons effectué plusieurs simulations sous le logiciel CST pour arriver à la conception une antenne microruban circulaire fonctionnant à une seule fréquence et qui est bien adaptée. Ensuite, nous sommes passées à l'antenne microruban circulaire fonctionnant sur deux bandes de fréquences. Pour avoir le fonctionnement bi-bande nous avons créé un slot sur le patch sous forme d'une « U » aussi bien adaptée. Après la conception de l'antenne bi-bande à substrat simple, nous avons pu faire la conception d'une antenne bi-bande à substrats BIE (1D), on a comparé l'antenne à substrat normal et l'antenne à substrat BIE, et on a étudié l'effet de variation du matériau et l'épaisseur du substrat, l'effet de la variation du rayon du patch, l'emplacement et l'épaisseur du slot « U », où les résultats obtenus sont :

- ✓ Le slot est importants pour avoir le fonctionnement bi-bande ;

- ✓ Les caractéristiques d'une antenne sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques ;
- La fréquence de résonance est plus importante pour une antenne à substrat BIE par rapport à celle à substrat simple ;
- La bande passante est plus large pour une antenne à substrat à BIE par rapport à celle d'un substrat simple ;
- La directivité dépend des permittivités du matériau BIE ;
- La fréquence de résonance pour une antenne à substrat simple est inférieure à celle d'une antenne BIE bi-bande ;
- La directivité est plus importante pour une antenne avec un substrat BIE par rapport à une antenne avec un substrat normal ;
- La directivité dépend des épaisseurs des couches du substrat ;
- L'emplacement du slot influe sur tous les caractéristiques de l'antenne microruban à BIE avec slot
- La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat et le rayon du patch ainsi la permittivité et la largeur du slot « U » ;
- La directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité, l'épaisseur du substrat et le rayon du patch ;
- La directivité varie pour la variation de la largeur du slot « U » ;
- La bande passante s'élargit avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat ;
- La bande passante diminue pour l'augmentation de la permittivité ;
- La bande passante varie pour la variation de largeur de slot « U » et le rayon du patch.

تَعْمُرُ بِفَضْلِ

اللَّهِ