

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE
DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT :
ELECTRONIQUE



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION (STLC)

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

Par : Douiou Zoulikha, Roukaila Hadjira

Intitulé

**Conception d'une antenne
microruban à Surfaces Sélectives en
Fréquences (FSS)**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. OUDIRA Houcine	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. DJELID Asma	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. KEBAILI Farida	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A celle qui m'a fait de moi une femme forte courageuse
ambitieuse et à succès ma Mère ma source de vie.*

A l'être le plus cher de ma vie, mon père

*Mes chers frères et sœurs et leurs petits-enfants Assif, ♥
Salsabif, ♥Djawad, ♥Hana, ♥Nadjm eddine, ♥ Bouzid,
♥Safouane ♥ mes sources de joie et de bonheur*

A la mémoire de ma tante

A ma tante « Djamila »

A Toute personne qui occupe une place dans mon cœur

*A tous les membres de ma famille ma source d'espoir et
toute personne qui porte le nom DOUIOU,*

A tous ceux qui ont participé à ma réussite...

ZOULIKHA





Sommaire

Titre	page
Remerciements	i
Dédicaces	ii
Dédicaces	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
Résumé	xi
Abstract	xii
ملخص	xiii
Introduction générale	2
Chapitre 1 Généralités sur les antennes microrubans à FSS	4
1.1 Introduction	5
1.2 Historique	5
1.3 Définition et généralités sur les antennes à FSS	6
13.1 définition de la fréquence sélective surface	7
1.3.2 Différents types de FSS	7
1.3.2.1 les FSS à motifs gravés	8
1.3 .2 .2 les FSS à grille	8
1.3.3Présentation de la structure de l'antenne micro ruban à FSS	8
1.3.4Caractéristique de base d'une antenne micro ruban à FSS	9
1.3.5 Avantages et inconvénients des antennes micro ruban	10
1.3 .6 Domaines d'application des antennes micro ruban à FSS	10
1.4 Les matériaux diélectriques utilisés :	11
1.4.1 Critères de choix du substrat	12
1.4.2 Caractéristiques des matériaux diélectriques	12
1.4.2.1Les matériaux céramiques:	12
1.4.2.2Les matériaux semi-conducteurs:	12
1.4.2.3Les matériaux ferrimagnétiques:	12
1.4.2.4Les matériaux synthétiques:	12
1.4.2.5Les matériaux photoniques et BIE	13
1.4.2.6Les matériaux chiraux	13
1.4.2.7Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material):	13
1.4.2.8Les matériaux RO3000	13
1.4.2.9Les matériaux composites	13
1.5 Les caractéristiques d'une antenne microruban à FSS	14
1 .5.1 le rendement de l'antenne	14
1.5.2 le gain	14
1.5. 3 l'impédance d'entrée de l'antenne	14
1.5.4le coefficient de réflexion	14
1.5.5 le diagramme de rayonnement	15
1.5.6 la bande passante	15
1.5.7 la fréquence de résonance	16
1.6 Techniques d'alimentation des antennes micro rubans	16
1.6.1 Alimentation directe par une ligne microruban	16
1.6.1.1 avantages	17
1.6.1.2 inconvénient	17

1.6.2 Alimentation coaxiale :	17
1.6.3Alimentation couplée par ouverture :	17
1.6.4. Alimentation Couplée Par Proximité	18
1.7 Méthodes d'analyses :	18
1.7.1Les méthodes analytiques :	19
1.7.2Les méthodes numériques (Full-wave) :	19
1.7.2.1. La méthode des moments (MoM) :	19
1.7.2.2. La méthode intégrale associée à La méthode des moments	19
1.7.2.3. La méthode des éléments finis (FEM) :	19
1.7.2.4. La méthode des différences (FDTD) :	20
1.7.2.5. La méthode de la matrice des lignes de transmissions (TLM) :	20
1.8 Conclusion	20
Bibliographie	21
Chapitre 2 Généralités sur les matériaux BIE	22
2.1. Introduction :	23
2.2. Historique :	23
2.3. Description des matériaux BIE :	24
2.3.1. Descriptions des matériaux diélectriques	24
2.3.1.1 Réseaux unidimensionnels :	25
2.3.1.2. Réseaux bidimensionnels :	25
2.3.1.3Réseaux tridimensionnels :	27
2.3.2. Description des structures BIE métalliques :	28
2.3.3. Principe de fonctionnement de l'antenne BIE :	28
2.3.4Différents types des FSS :	31
2.3.4.1Structures métalliques (à grille) :	31
2.3.4.1.1Grilles métalliques 1D et 2D :	32
2.3.4.2. Les structures métalliques à base de FSS (imprimé) :	33
2.4Domaine d'applications :	34
2.4.1. Dans le domaine de l'optique les fibres optiques :	34
2.4.2. Dans le domaine micro-onde :	34
2.5. Evolution des antennes BIE-M :	35
2.5.1. Antenne bibande :	35
2.5.2. Antenne multisource :	35
2.5.3. Antenne omnidirectionnelle :	36
2.6 Conclusion	37
Bibliographie	38
Chapitre 3 Résultats et discussions	41
3.1 Introduction:	42
3.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO :	42
3.3 La méthode d'intégration finie	42
3.4 Présentation de la structure:	43
3.4.1 Effet de la variation de longueur de patch X :	46
3.4.2 Effet de la variation de largeur de patch Y:	48
3.4.3 Effet de la variation de l'épaisseur h du substrat:	50
3.4.4Effet de la variation de la permittivité du substrat:	52
3.4.5 Effet de la variation de longueur x " du slot:	54
3.4.6 Effet de la variation de largeur y " du slot:	56
3.4.7 Effet de la variation de l'emplacement de slot suivante x:	58
3.4.8 Effet de la variation de l'emplacement de slot suivante y:	60
3.5 Présentation de la structure avec FSS:	61

3.5.1 Effet de la variation de l'épaisseur H de superstrat:	64
3.5.2 Effet de la variation de la distance entre le patch et FSS :	66
3.5.3 Effet de la variation de la permittivité ϵ_p :	68
3.6. La cinquième génération	70
3.7. Conclusion	71
Bibliographie	73
Conclusion générale	75

Liste des figures

N° de figure	Intitulé	Page
CHAPITRE I		
		1
Figure 1.1	FSS imprimées	7
Figure 1.2	les types du motifs des FSS	8
Figure 1.3	Structure d'une antenne microbande	9
Figure 1.4	différent motif des éléments imprimés.	10
Figure 1.5	Représentation du coefficient de réflexion s_{11}	15
Figure 1.6	Diagramme de rayonnement d'une antenne microruban	15
Figure 1.7	la bande passante	16
Figure 1.8	Le microruban alimenté par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant	16
Figure 1.9	Le microruban alimenté par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant	16
Figure 1.10	Antenne micro ruban alimenté par sonde	17
Figure 1.11	Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.	18
Figure 1.12	Alimentation par couplage par proximité	18
CHAPITRE II		
		22
Figure 2.1	Principe Du Miroir De Bragg	24
Figure 2-2	Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D .	25
Figure 2-3	Structure 1D et son diagramme de dispersion	25
Figure 2-4	Exemples de différents réseaux 2D .	26
Figure 2-5	Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation.	26
Figure 2-6	Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5)	27
Figure 2.7	Matériau B.I.E sans défaut	28
Figure 2.8	Matériau B.I.E avec défaut	28
Figure 2.9	Diagramme d'une antenne à matériau B.I.E	29
Figure 2.10	Distribution du champ électrique tangentiel	29
Figure 2.11	Diagramme d'une antenne à demi-matériau B.I.E (plan de masse) .	30
Figure 2.12	Antenne BIE.	31
Figure 2-13	Coefficient de transmission d'une structure BIEM	32
Figure 2.14	Grille métallique unidimensionnelle formée de tiges avec des sections rectangulaires	32
Figure 2.15	Grilles métalliques bidimensionnelles formées de grilles ou de plaques	33
Figure 2.16.	Principe de l'antenne bibande	35
Figure 2.17	Performances de l'antenne bibande	35
Figure 2.18	Comparaison entre une antenne BIE monosource et une antenne BIE multisource	36
Figure 2.19	Méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle	37
Figure 2.20	Antenne BIE-M coaxiale omnidirectionnelle et ses diagrammes de rayonnement	37
CHAPITRE III		
Figure 3.1	La structure d'antenne rectangulaire avec et sans slot	44
Figure 3.2	Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne micro ruban sans slot et antenne micro ruban rectangulaire avec slot (bi-bande)	44

Figure 3.3	Directivité et le gain d'une antenne micro ruban rectangulaire sans slot	44
Figure 3.4	Directivité et le gain d'une antenne micro ruban rectangulaire avec slot	45
Figure 3.5	Coefficient de réflexion S11 pour différent longueur de patch	46
Figure 3.6	Directivité et le gain pour une longueur de patch $x_2=19.50\text{mm}$	46
Figure 3.7	Directivité et le gain pour une longueur de patch $x_1=20.25\text{mm}$	47
Figure 3.8	Coefficient de réflexion S11 pour différent longueur de patch	48
Figure 3.9	Directivité et le gain pour une largeur de patch $Y=15.35\text{mm}$	48
Figure 3.10	Directivité et le gain pour une largeur de patch $Y=14\text{ mm}$	49
Figure 3.11	Coefficient de réflexion S11 pour différent épaisseur du substrat	50
Figure 3.12	Directivité et le gain pour l'épaisseur du substrat $h=1.935\text{ mm}$	50
Figure 3.13	Directivité et le gain pour l'épaisseur du substrat $h=1.335\text{mm}$	51
Figure 3.14	Coefficient de réflexion S11 pour différent permittivité du substrat	52
Figure 3.15	Directivité et le gain pour la permittivité du substrat $\epsilon_p =3.8$	52
Figure 3.16	Directivité et le gain pour la permittivité du substrat $\epsilon_p =4.3$	53
Figure 3.17	Coefficient de réflexion S11 pour différent longueur de slot	54
Figure 3.18	Directivité et le gain pour la longueur du slot $x''=4.2\text{mm}$	54
Figure 3.19	Directivité et le gain pour la longueur du slot $x''=7\text{mm}$	55
Figure 3.20	Coefficient de réflexion S11 pour différent largeur de slot	56
Figure 3.21	Directivité et le gain pour la largeur du slot $y=2.4\text{mm}$	56
Figure 3.22	Directivité et le gain pour la largeur du slot $y=4.7\text{mm}$	57
Figure 3.23	Coefficient de réflexion S11 pour l'emplacement de slot suivant x	58
Figure 3.24	Directivité et le gain pour l'emplacement du slot $x=-4\text{mm}$	58
Figure 3.25	Directivité et le gain pour l'emplacement du slot $x=6\text{mm}$	59
Figure 3.26	Coefficient de réflexion S11 pour l'emplacement de slot suivant y	60
Figure 3.27	Directivité et le gain pour l'emplacement du slot $y=1.25\text{mm}$	60
Figure 3.28	Directivité et le gain pour l'emplacement du slot $y=-3\text{mm}$	61
Figure 3.29	Cellule unitaire FSS	62
Figure 3.30	Antenne microruban bibande à FSS	62
Figure 3.31	Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne micro ruban rectangulaire avec slot et FSS	63
Figure 3.32	Directivité et le gain pour antenne à FSS	63
Figure 3.33	Coefficient de réflexion S11 pour différent l'épaisseur de superstrat	64
Figure 3.34	Directivité et le gain pour l'épaisseur de superstrat H1	64
Figure 3.35	Directivité et le gain pour l'épaisseur de superstrat H2	65
Figure 3.36	Coefficient de réflexion S11 pour différentes distance entre le patch et la FSS	66
Figure 3.37	Directivité et gain pour une distance entre le patch et la FSS $F=38\text{mm}$	66
Figure 3.38	Directivité et gain pour une distance entre le patch et la FSS $F=46\text{mm}$	67
Figure 3.39	Coefficient de réflexion S11 pour différent permittivité du superstrat	68
Figure 3.40	Directivité et le gain pour permittivité $\epsilon_p=3.5$	68
Figure 3.41	Directivité et le gain pour permittivité $\epsilon_p=4.4$	69

Liste des tableaux

N° du tableau	Intitulé	Page
Tableau 3.1	Dimension de l'antenne micro ruban rectangulaire	43
Tableau 3.2	Antenne rectangulaire avec et sans slot	45
Tableau3. 3	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de longueur de patch	47
Tableau3. 4	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de largeur de patch	49
Tableau3. 5	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de l'épaisseur du substrat	51
Tableau3. 6	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de la permittivité du substrat	53
Tableau3. 7	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de la longueur de slot	55
Tableau3. 8	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction de la largeur de slot	57
Tableau3. 9	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction l'emplacement du slot suivant x	59
Tableau3. 10	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction l'emplacement du slot suivant y	61
Tableau3.11	dimension de FSS	62
Tableau3. 12	Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec Slot en fonction l'emplacement du slot suivant y	63
Tableau3.13	Caractéristiques de l'antenne à FSS en fonction l'épaisseur de superstrat	65
Tableau3. 14	Caractéristiques de l'antenne à FSS en fonction la distance entre le patch et le FSS	67
Tableau3. 15	Caractéristiques de l'antenne à FSS en fonction permittivité du superstrat	69

Liste des abréviations :

- **BIE**: Bande Interdite Electromagnétique
- **BIP** : Bande Interdite Photonique
- **BIE M** : Bande Interdite Electromagnétique Métallique
- **SSF** : Surfaces Sélectives en Fréquences
- **CST** : Computer Simulation Technology
- **USAF**: **United States Air Force** (Armée de l'air des États-Unis)
- **NASA** : National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)
- **GSM** : Global System For Mobile Communication (système mondial de communication avec les mobiles)
- **FM** : Modulation de fréquence
- **AM**: Modulation d' amplitude
- **WIFI** : Wireless Fidelity (fidélité sans fil)
- **TNT** : télévision numérique hertzienne
- **RFID** : Radio Fréquence Identification (Identification radiofréquence)
- **M.M.I.C** : Monolithic Microwave Integrated Circuit (Circuits intégrés monolithiques micro-onde)
- **1D, 2D, 3D**: Une, Deux, ou Trois Dimensions.
- **FDTD**: Finite Difference Time Domain (méthode de calcul des différences finies)
- **FEM**: Finite Element Method (méthode des éléments finies)
- **TLM** : Transmission Line Matrix (Matrice de ligne de transmission)
- **Al₂O₃**: Alumine (oxyde d'aluminium).
- **GaAs**: Arséniure de Gallium.
- **Si**: Silicium.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier une antenne microruban de forme rectangulaire à BIE bi-bande (fonctionnant dans deux bandes) avec slot, le superstrat BIE est à base de FSS (Frequency Surface Selectifs).

On a étudié l'influence des différents paramètres physiques et géométriques de l'antenne tel que (les dimensions du patch, l'épaisseur du substrat et du superstrat (FSS), dimensions et emplacement du slot, permittivité .du substrat et du superstrat, sur les caractéristiques de l'antenne microruban : l'adaptation de l'antenne (S_{11}), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité , En utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

Mots clés : Antenne microruban, Bande Interdite Electromagnétique, Surfaces Sélectives en Fréquences.

Abstract

The main objective of this work is to study a rectangular microstrip bi-band EBG antenna (operating in two bands) with slot, the BIE superstrate is based on FSS (Frequency Surface Selective).

We studied the influence of the various physical and geometric parameters of the antenna such as (the dimensions of the patch, the thickness of the substrate and the superstrate (FSS), dimensions and location of the slot, permittivity of the substrate and the superstrate, on the characteristics of the microstrip antenna: the adaptation of the antenna (S_{11}), the resonant frequency, the bandwidth, the gain and the directivity, using the electromagnetic simulation software in the frequency domain CST which is based on the finite integration method.

Key words: Microstrip Antenna, Electromagnetic Band Gap, Frequency Surface Selective

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة هوائي ذو شريط مدقق مستطيل الشكل وذو الطبقة الفوقية عازلة كهرومغناطيسيا (BIE) ثنائي النطاق (تعمل في نطاقين) مع فتحة . تستند الركيزة الفوقية (BIE) على سطح يسمح بانتقاء التردد (FSS)

درسنا تأثير المعايير الأساسية والفيزيائية للهوائي المدقق على مميزات الهوائي مثل (أبعاد الشريط المدقق، سماكة و سماحية الركيزة و الركيزة الفوقية (FSS) ، أبعاد وموقع الفتحة، على خصائص الهوائي ذو الشريط المدقق : معامل الانعكاس (h_{11}) , تواتر الرنين، عرض النطاق الترددي ، الكسب والاتجاهية.

وذلك باستعمال برنامج CST الذي يعتمد على طريقة التكامل المحدود.

الكلمات المفتاحية: الهوائي المدقق, طبقة عازلة كهرومغناطيسيا, سطح يسمح بانتقاء التردد.

I
N
T
R
O
D
U
C
T
I
O
N
G
E
N
E
R
A
L
E

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

La technologie microbande en générale, et les antennes micro ruban en particulier connaissent un développement aux prés des industriels et des professionnels des télécommunications.

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Beaucoup de recherche scientifique continue concernant les antennes micro rubans qui sont les éléments les plus importants dans la transmission et la réception de signaux radiofréquences à la fois, et vu les exigences multiples dans le domaine des télécommunications, les antennes micro rubans remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications dans plusieurs domaines d'applications et surtout pour les applications aéronautiques, aérospatial, militaire... etc.

Parmi les avantages de ces d'antennes, profil plat, faible poids, volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes, simplicité de leurs structures, faible coût de fabrication donc la production en grandes quantités devient facile. Cependant, elles présentent les inconvénients suivants : bande passante étroite, faible puissance, impureté de la polarisation, faible gain.

Les chercheurs se sont intéressés à l'amélioration des performances des antennes micro rubans pour améliorer leurs caractéristiques : large bande, faible coût, malgré que ce sont des critères relativement difficile et non compatibles mais les chercheurs ont réussi à découvrir un type des antennes micro rubans à Bande Interdite Electromagnétique (BIE) ou à Surfaces Sélectives en Fréquences (FSS) qui sont aujourd'hui très utilisées.

Les surfaces sélectives ont été découvertes en 1783 par les scientifiques David Rittenhouse et Francis Hopkinson, ce sont un élément clé dans la conception de systèmes multifréquences. Leur utilisation dans les systèmes de télécommunication est motivée par le caractère de plus en plus multi-bandes des applications et donc la possibilité de réduire le nombre d'antennes spatiales. Elles sont utilisées comme filtre en fréquence.

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.

Le but de ce travail est de concevoir, une antenne micro ruban bi-bande à FSS fonctionnant dans deux bandes de fréquences opérant dans la bande 5G et d'optimiser leurs performances, 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, le gain et la directivité.

Ce manuscrit est scindé en quatre chapitres, il est présenté comme suit :

Dans le premier chapitre de ce mémoire est une présentation générale des antennes micro rubans à FSS. Après avoir rappelé les propriétés et caractéristiques de ces antennes nous aborderons ainsi les techniques d'alimentation permettant le fonctionnement de ces antennes, les avantages, les inconvénients et quelque domaines d'applications et. Enfin nous présentons les méthodes d'analyse utilisées pour traiter ce genre d'antenne.

Dans Le deuxième chapitre nous avons présenté les concepts de base liés aux matériaux BIE (Bande Interdite Electromagnétiques). Nous avons cité les différents types de matériaux BIE, en insistant sur la notion de bande interdite électromagnétiques.

- Dans le troisième chapitre nous montrons comment créer, simuler, et analyser une antenne micro ruban à FSS en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO, après nous exposons les résultats obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure d'antenne micro-ruban sans et avec la couche FSS sur la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

Enfin nous terminons ce document par une conclusion générale.

C

H

A

P

I

T

R

E

1

*GENERALITES SUR LES
ANTENNES MICRORUBANS*

A FSS

1.1 Introduction:

Les antennes sont devenues les éléments de base pour une liaison radioélectrique, les nouvelles technologies aujourd'hui s'orientent vers la conception des antennes de hautes performances.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la présentation générale des antennes microruban. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur les antennes à FSS base de matériau BIE-M qui est l'objectif de notre étude. Nous rappellerons la définition et les propriétés des antennes microrubans leurs domaines d'application ainsi que les divers types d'antennes microruban à FSS, nous allons voir les différentes méthodes d'analyse, les différentes techniques d'alimentation sont également citées, les avantages les inconvénients de ces antennes.

1.2 Historique:

Le concept d'une antenne imprimée fut pour la 1^{ère} fois imaginé en 1953 par **George Deschamps** «18octobre 1911-20juin 1988» [1] qui suggéré l'époque de canaliser l'efficacité d'un rayonnement parasite engendré par les discontinuités qui existe dans les circuits microondes planaire Mr. Deschamps à l'époque a publié un travail sur les antennes microrubans au niveau d'une conférence international dans sa 3^{ème} édition qui s'appelle « USAF » » antenna reserch and developement programme en 1953.



George Deschamps

Alors que le 1^{er} brevet a été déposé 1956 par **HONRIE GLUTIN** et **GEORGE BOISSINOT**. Il fallait cependant attendre années 1970 pour voir apparaître la réalisation des 1^{ers} prototypes [2], notamment grâce à l'amélioration des techniques de photo lithogravure de cuivre et de leurs substrats diélectriques cette technique : c'est l'ensemble des opérations qui permettent de reproduire une image vers un substrat recouvert d'une couche de résine photosensible c'est une technique très utilisée dans les semi-conducteurs et surtout dans l'industrie. Les études se sont orientées vers une miniaturisation importante, vers l'utilisation de nouveaux matériaux diélectriques et vers le développement de capacités multifonctionnelles....

Les matériaux à bande interdite photonique (BIP) connus sous le nom de matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE) ont incité un vif intérêt depuis leur création par le

professeur **Eli Yablonovich** à la fin des années quatre-vingt, 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. Ces matériaux ont attiré l'intérêt de beaucoup de recherches dans l'électromagnétisme et tout particulièrement dans le domaine de la télécommunication.

En 1972 **JOHN HOWELL** réalisa des antennes microruban à polarisation linéaire et circulaire en bande L et UHF pour la NASA sont posé en décembre 1972 [3], ce travail a été publié lors d'une conférence Antenna and propagation society international. A la même période **ROBERT**, il est en Space system a conçu une antenne microruban conformée sur toute la circonférence d'un massive,.

Les propriétés des écrans périodiques ont été observées depuis très longtemps. En 1786, **Francis Hopkinson** observa un phénomène qu'il d'écrivit à **David Rittenhouse**, un physicien américain : « assis devant ma porte, un soir d'été, je sortis un mouchoir de ma poche et l'étirai entre mes deux mains. Je le mis devant mon visage et regardai au travers du mouchoir un lampadaire placé à une centaine de mètres de distance... Les fils de soie semblaient alors aussi gros que du vulgaire fil ; mais je fus encore plus étonné de voir que lorsque je déplaçais le mouchoir de gauche à droite, les traits sombres ne semblaient pas bouger... » [1]. Rittenhouse procéda alors à une série d'expérimentations. Il découvrit alors qu'un réseau de fils éclairé par la lumière blanche créait des franges d'interférences de couleurs différentes. Il venait alors d'observer le caractère sélectif d'une grille périodique.

Depuis cette époque, les physiciens se sont intéressés aux propriétés de ces structures périodiques, d'abord dans le domaine optique puis celui des micro-ondes [4]. Ce type d'antenne est devenu indispensable aujourd'hui dans de nombreuses applications actuelles telles que la téléphonie mobile et les réseaux sans fils.

1.3 Définition et généralités sur les antennes à FSS:

Le domaine de l'électromagnétisme est un domaine relativement récent, il est affiné au fur et à mesure que les techniques et la conception de réalisation des antennes.

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner les champs électromagnétiques dans l'espace ou pour le capter en permettant d'effectuer la transmission entre l'énergie guidée et l'énergie rayonnée.

Suivant sa forme et son mode de fonctionnement l'énergie est rayonnée dans certaines directions privilégiées de l'espace, la représentation de ces directions dans tout l'espace est

appelée diagramme de rayonnement. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception. L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- ✓ Adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation ;
- ✓ Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées ;
- ✓ La fidélité de transmission de l'information.

Nos travaux de recherche résident dans la conception des antennes microrubans à surface sélectives en fréquence FSS alors **c'est quoi une surface sélectives en fréquence FSS ?**

1.3.1 Définition de la fréquence sélective surface :

Les surfaces sélectives en fréquences, mieux connus par le terme anglais FSS (Frequency Selective Surface) sont des surfaces constituées d'un arrangement périodique dans un plan d'éléments passifs électriquement conducteurs. Lorsque cet arrangement d'éléments est soumis à une onde plane incidente, celle-ci est en parti transmise et en parti réfléchi. Sous certaines conditions de résonance, l'amplitude de l'onde transmise est égale à 0, l'énergie étant réfléchi ou diffusée du côté de l'onde incidente. Ce type de surface se comporte comme un filtre coupe-bande. Ainsi, il est possible de filtrer certaines fréquences choisies tout en laissant les autres. Par exemple, on peut isoler un réseau interne WIFI d'une entreprise tout en laissant passer les signaux GSM, les fréquences FM ou AM de la radio ou les fréquences de la Télévision Numérique Terrestre (TNT). Ceci est un avantage indéniable pour un phénomène de blindage [5]



Figure 1.1 : FSS imprimées

1.3.2 Différents types de FSS :

Une Surface Sélective en Fréquence (FSS) est généralement formée soit d'un plan métallique perforé périodiquement avec des ouvertures (grille métallique), soit d'un réseau périodique de motifs métalliques imprimés sur du substrat. Dans la plupart des cas, les FSSs sont classées en deux groupes : les FSSs à motifs gravés et les FSSs à grille.

1.3.2.1. Les FSSs à motifs gravés : Les surfaces sélectives à motifs gravés sont généralement assimilables à un filtre passe bas. Pour les fréquences basses la structure diélectrique de l'écran ne provoque qu'une atténuation de l'onde dépendant de la permittivité et de la tangente de pertes du milieu considéré [5].

1.3.2.2. Les FSSs à grille : Les grilles ou plaques métalliques trouées ont un comportement fréquentiel de type passe haut. Pour les fréquences basses, la grille dichroïque est vue comme un plan parfaitement conducteur, l'onde incidente est donc totalement réfléchiée[5].

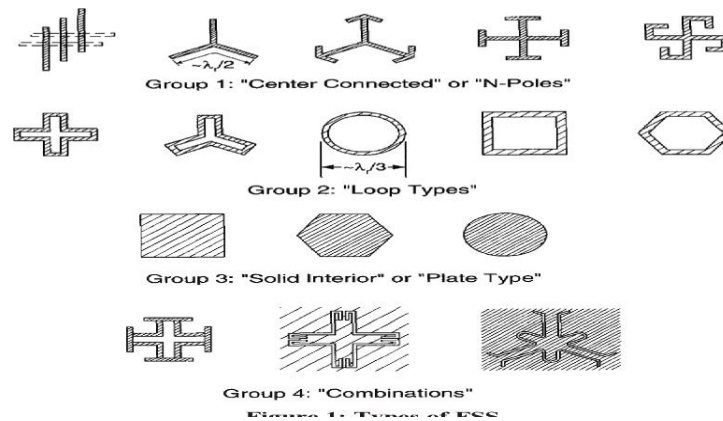


Figure 1.2 : les types des motifs des FSS

1.3.3. Présentation de la structure de l'antenne micro ruban à FSS:

L'antenne imprimée se compose d'un plan de masse et un substrat qui est déposé sur le substrat le substrat qui est déposé sur le plan de masse, sur le substrat un élément de rayonnement est déposé. L'élément rayonnant c'est l'antenne microruban parce que c'est l'élément le plus important. L'élément rayonnant et le plan de masse ont de nature conductrices sont en général faites avec de très bons conducteurs tel que cuivre , argent , or :

conductrices	conductivité
Cuivre	5.8107s/m
Argent	6.2107s/m
Or	4.1107s/m

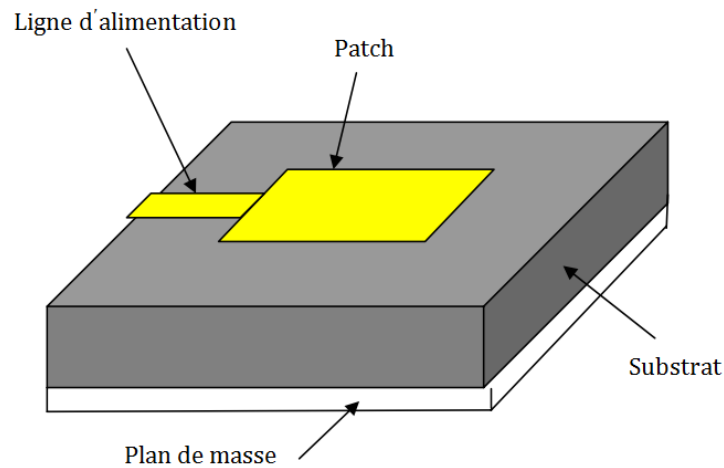


Figure 1.3: Structure d'une antenne microbande

Comme montré, dans la (figure 3), la configuration de base d'une antenne microbande, communément appelée antenne microruban, est une ligne microbande de forme particulière. Puisqu'on a proposé la configuration de base (originale), il faut noter que des douzaines de variations de formes du microruban, de techniques d'alimentation, de configuration du substrat et des géométries de réseau d'antennes ont été développés par des chercheurs dans le monde entier. La variété dans la conception des antennes microbandes excède probablement celle de n'importe quel autre type d'antenne.

1.3.4. Caractéristique de base d'une antenne micro ruban à FSS :

Une Antenne micro ruban est constitué de :

- ✓ Plan de masse : doit être de dimension théoriquement l'infinie ;
- ✓ Substrat : la hauteur de substrat h respecte cette égalité $0.3333 \lambda_0 < L < 0.5 \lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre et la permittivité est comprise entre cette gamme $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$;
- ✓ Pour la bande métallique qui est l'élément rayonnant qui possède une hauteur $0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$ divers type d'éléments rayonnant (microruban).

Le micro ruban a généralement la forme rectangulaire, circulaire, triangulaire, dipôle sont les plus courant en raison de la facilité de l'analyse et de fabrication il existe d'autre formes connues comme illustrés dans **figure 1.4**

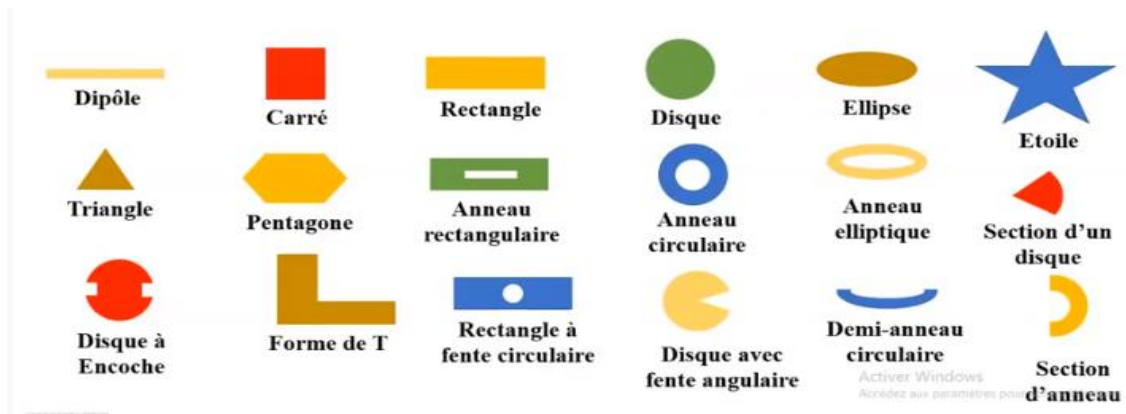


Figure 1.4: différents motifs des éléments imprimés.

1.3.5. Avantages et inconvénients des antennes micro ruban :

Les antennes micro ruban présentent des avantages :

- Faible poids ;
- Volume réduit ;
- Conforme sur les surfaces planes et non-planes (avec les substrats minces) ;
- Faible coût de fabrication ;
- Production en masse possible ;
- La possibilité de polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications ;
- Possibilité de Regrouper plusieurs antennes microruban identiques pour construire un réseau ;
- Capable de fonctionner en double et triple fréquence (plusieurs fréquences plusieurs domaines d'application) ;
 - Facile à intégrer avec les circuits MMX (c'est un circuit intégré qui fonctionne en fréquence radio).

Les antennes microruban présentent des inconvénients :

- Faible rendement ;
- Pureté de polarisation difficile à obtenir ;
- Faible puissance ;
- Supportent uniquement des faibles puissances ;

1.3.6. Domaines d'application des antennes micro ruban à FSS:

Les antennes constituent un segment indispensable des systèmes utilisant le rayonnement électromagnétique (télécommunications, télévision, RFID, radiodétection ...) la variété des antennes est grande du fait de leurs nombreuses applications et aussi des différentes bandes de fréquences dans lesquelles elles sont utilisées.

- La communication sans fil, la téléphonie mobile (téléphone portable, station de base, la radio, Bluetooth, wifi etc. ...)
- Dans le domaine médical (la médecine curatif)

La médecine sans fil dans la population oriental la majorité des gens présente des maladies chronique (les gens plus de 60 ans ayant des maladies chronique : des problèmes cardiaque, problème de tension, problème de diabète, problème d'alzaimneur,)

Avec la technologie existante aujourd'hui on peut déjà surveiller ces maladies sur un smart phone à travers le schéma suivant :

On peut mettre des capteurs sur le corps humain et on a la possibilité de collecter des informations à partir de ces capteurs via le smart phone, la connexion Internet et donc le médecin qui a toutes les informations qui peut contrôler à distance et peut intervenir s'il y a un risque.

En effet, Les FSS trouvent de nombreuses applications dans le domaine des micro-ondes et dans la région THz, pour des fins à la fois scientifiques et commerciales, qui vont de systèmes d'antennes pour la recherche en radioastronomie, aux portes de l'écran de fours à micro-ondes. Les FSSs trouvent également des applications dans les antennes spatiales. Ils trouvent aussi une utilisation commerciale à l'échelle de la porte d'écran de fours à micro-ondes: la plaque métallique perforée reflète complètement l'énergie microondes à 2,45 GHz tout en laissant passer la lumière, ce qui permet ainsi de voir les aliments dans le four.

Dans la région THz, les FSSs sont utilisées comme filtres passe-bande dans les systèmes quasi- optiques [3]

1.4. Les matériaux diélectriques utilisés :

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. Le substrat joue un rôle double dans la technologie micro ruban. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h \ll \lambda_0$), le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan \delta < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\epsilon_r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée [6].

1.4.1. Critères de choix du substrat :

Les paramètres à apprendre concernant le choix du substrat diélectrique :

- La Permittivité électrique
- Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion ;
- Stabilité de la température (l'élévation de la température ça peut contribuer à démunie la durée de vie de l'isolant) ;
- Stabilité en fréquence ;
- La dilatation caractéristique magnétique ;

1.4.2. Caractéristiques des matériaux diélectriques :

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

1.4.2.1. Les matériaux céramiques:

Couramment employés pour les circuits microrubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine (Al_2O_3) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité, mais sont cassants et donc fragiles. Leurs permittivités sont pour la plupart élevées et ils présentent de faibles pertes ($\tan \delta < 10^{-3}$) [6].

1.4.2.2. Les matériaux semi-conducteurs:

De type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits M.M.I.C (Monolithic Microwave Integrated Circuit). La surface disponible, généralement réduite pour réaliser des antennes, destinées à des applications dans le domaine millimétrique. [6]

1.4.2.3. Les matériaux ferrimagnétiques:

Ces matériaux comprennent les substrats Ferrite et YIG. L'effet gyromagnétique est mis à profit pour concevoir des circulateurs, des isolateurs ou encore des antennes plaques rayonnant naturellement une onde en polarisation circulaire. Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques [6].

1.4.2.4. Les matériaux synthétiques:

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

À ceux-ci viennent s'ajouter aujourd'hui les mousses ROHACELL dont la permittivité relative est proche de l'air ($\epsilon_r \sim 1$), cependant les pertes deviennent vite importantes lorsque l'on monte en fréquence ($\tan \delta > 0.01$ à 26.5 GHz) un exemple de ces matériaux: le polyéthylène, le polyester, le téflon, le polypropylène, etc... [6]

1.4.2.5. Les matériaux photoniques et BIE :

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

Actuellement les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des micro-ondes (les matériaux à bande interdite électromagnétique : BIE). Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface [6].

1.4.2.6. Les matériaux chiraux :

Les propriétés de chiralité ou de bi-isotropie que possèdent certains matériaux, notamment dans le domaine des microondes et de l'optique, font depuis plusieurs années l'objet d'intenses recherches. Récemment, A. Bossavit prédit qu'on peut construire des matériaux chiraux en incluant périodiquement dans une matrice de matériau diélectrique des inclusions de matériau fortement conducteur. Le comportement souhaité s'obtient alors à la limite 0 où désigne la taille de la cellule de périodicité. Un des points clé pour aboutir au comportement chiral est que la conductivité des inclusions doit être telle que la profondeur de peau dans ces matériaux est de l'ordre de λ . Bossavit a proposé une loi de comportement équivalente à l'aide de techniques formelles à base de développements de Taylor locaux [6].

1.4.2.7. Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material):

Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques, génèrent une gamme de substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10 de faibles pertes ($\tan \delta < 0,0018$) pour des permittivités respectivement égales à 3,25 ; 4,5 ; 6,5 ; 9,8. Rigides et moins cassants que les céramiques, ils conservent leurs dimensions et leurs permittivités à des températures élevées [6].

1.4.2.8. Les matériaux RO 3000:

Ces matériaux sont de permittivité relative stable en température et en fréquence. Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence (> 30 GHz) [6].

1.4.2.9. Les matériaux composites:

Ce type de matériaux s'obtient en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d'un substrat. En ajoutant aux matériaux plastiques de la fibre de verre (cas du DUROID 5870, du TLC, ARLON 320) ou de la poudre de céramique (ARLON 340) les propriétés mécaniques sont améliorées et l'on peut, suivant le dosage, ajuster la permittivité. Des produits comme le DUROID sont couramment utilisés pour réaliser des antennes imprimées [6].

1.5. Les caractéristiques d'une antenne micro ruban à FSS :

• **La directivité** : caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée dans la direction (Θ, Ω) est le rapport entre la densité de puissance surfacique $U(r, \Theta, \Omega)$ rayonnée par l'antenne dans cette direction a la distance r et la densité de puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope rayonnant la même puissance totale P_{ant}

$$D(\Theta, \Omega) = \frac{U(r, \Theta, \Omega)}{U_{iso}(r)} = \frac{U(r, \Theta, \Omega)}{\frac{P_{ant}}{4\pi r^2}}$$

La directivité n'a pas d'unité en général on l'exprime en décibels :

$$D(\Theta, \Omega) = 20 \log_{10} D(\Theta, \Omega)$$

1.5.1. Le rendement de l'antenne : est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, On peut donc calculer le rendement d'une antenne à l'aide de la formule :

$$\rho = \frac{R_r}{R_r + R_p}$$

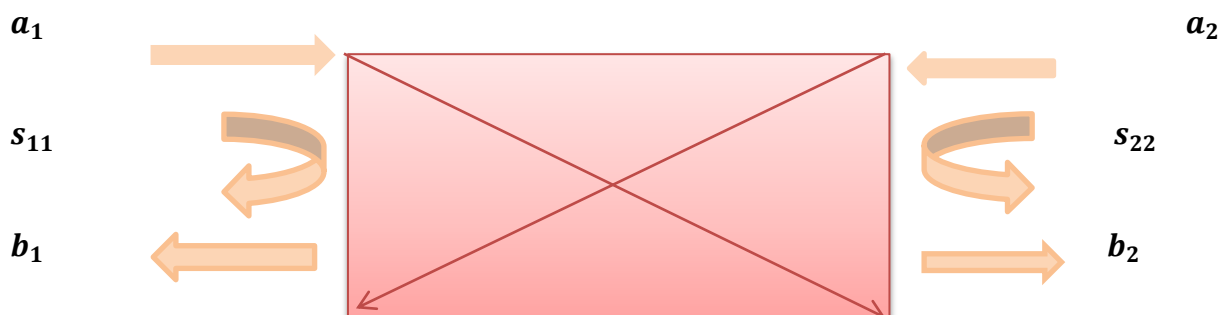
1.5.2. Le gain : On exprime généralement le gain d'une antenne en décibels est le résultat de la directivité sur de la perte, le gain $G(\Theta, \Omega)$ d'une antenne dans une direction (Θ, Ω) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $p(\Theta, \Omega)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes, en général le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (Θ_0, Ω_0) .

Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

$$G(\Theta, \Omega) = 4\pi \frac{P(\Theta, \Omega)}{P_a} \rightarrow G(\Theta, \Omega) = 4\pi \frac{P(\Theta, \Omega)}{P_a}$$

1.5.3. L'impédance d'entrée de l'antenne : est l'impédance vue dans le plan de la ligne d'alimentation au niveau du connecteur SMA

1.5.4. Le coefficient de réflexion s_{11} : Met en évidence le transfert d'énergie par l'antenne. une antenne peut être représentée par un quadripôle défini par des paramètres :



a_1, b_1, a_2, b_2 Sont des ondes de puissance qui donnent les relations suivantes :

$$b_1 = s_{11} * a_1 + s_{12} * a_2$$

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

s_{11} Est le coefficient de réflexion en entrée du quadripôle lorsque a_2 est annulé ;

s_{12} Est le coefficient de transmission de la sortie vers l'entrée lorsque a_1 est annulé ;

s_{21} Est le gain du quadripôle lorsque a_2 est annulé ;

s_{22} Est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque a_1 est annulé ;

Dans notre étude on s'intéresse principalement au coefficient de réflexion s_{11} .

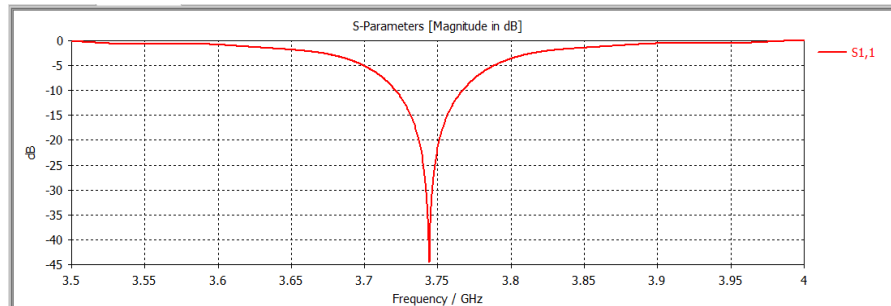


Figure 1.5: Représentation du coefficient de réflexion s_{11}

Dans un système électrique caractérisé par les paramètres S, lorsque le coefficient s_{11} connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance, il y a un maximum de transfert de puissance entre le générateur et la charge. C'est sur ce paramètre que l'on se base pour optimiser l'antenne [7].

1.5.5. Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace, il y'a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se concentre la grande partie de la puissance rayonnée, et des directions secondaires autour desquelles se répartit la puissance restante.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté par une fonction caractéristique de rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée $\mathbf{p}(\Theta, \phi)$ à la puissance \mathbf{Pmax} de la direction où le rayonnement est maximal.

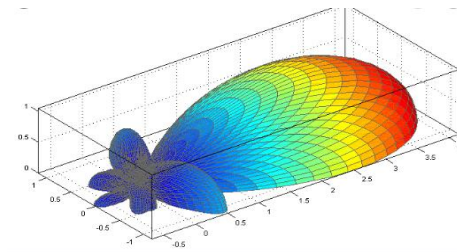


Figure 1.6 : Diagramme de rayonnement d'une antenne micro ruban

1.5.6. Bande passante :

La bande passante définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Elle peut être considérée comme la plage de fréquences qui se situe de part et d'autre d'une fréquence centrale où les caractéristiques de l'antenne

(impédance d'entrée, gain, angle d'ouverture,...) sont acceptables par rapport à celles obtenues avec la fréquence centrale.

$$BP = \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\max} + f_{\min}} * 100\%$$

La bande passante peut être définie en fonction de S_{11} à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas cette bande

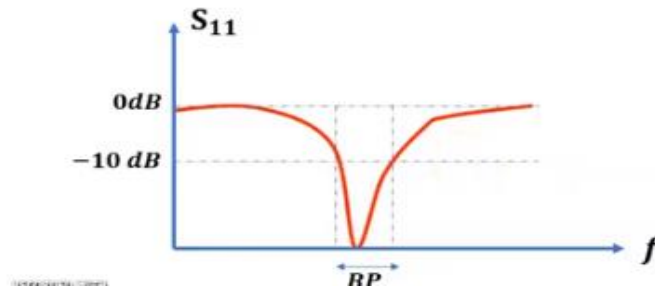


Figure 1.7 : la bande passante

$$Bp = \frac{ros - 1}{Q\sqrt{ros}}$$

1.5.7. Fréquence de résonance : c'est la fréquence où l'antenne rayonne d'une manière maximale efficace

1.6. Techniques d'alimentation des antennes micro rubans

1.6.1. Alimentation directe par une ligne micro ruban :

Dans ce type d'alimentation, une ligne micro-ruban est reliée directement au bord du micro ruban. Cette bande à une plus faible largeur par rapport au patch. [7]
C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées

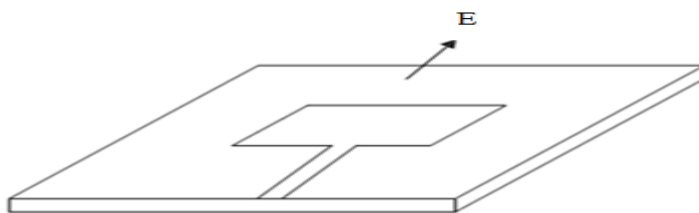


Figure1.8 : Le micro ruban alimenté par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant

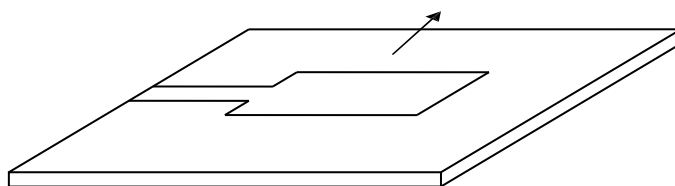


Figure 1.9: Le micro ruban alimenté par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant

1.6.1.1. Les avantages :

- Rayonnement parasite de la ligne réduit ;
- Technologie monolithique ;
- Modélisation facile ;
- Nombre de degrés de liberté très important ;
- Pureté de polarisation (excitation symétrique).

1.6.1.2. Les Inconvénients :

- Technologie complexe (alignement) ;
- Rayonnement arrière (-15/20 dB).

1.6.2. Alimentation coaxiale :

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de 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 micro ruban, 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 micro ruban, 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 plaqué. 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 [8].

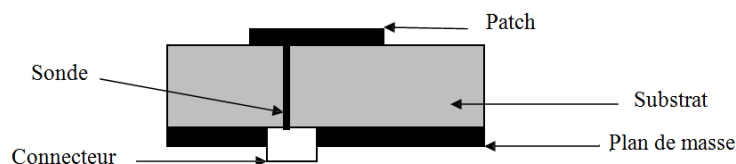


Figure 1.10: Antenne micro ruban alimenté par sonde

1.6.3. Alimentation couplée par ouverture :

Dans ce type d'alimentation, le micro ruban de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indique sur la Figure 1.10 La conjonction entre le micro ruban et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat

inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du micro ruban.

Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante.

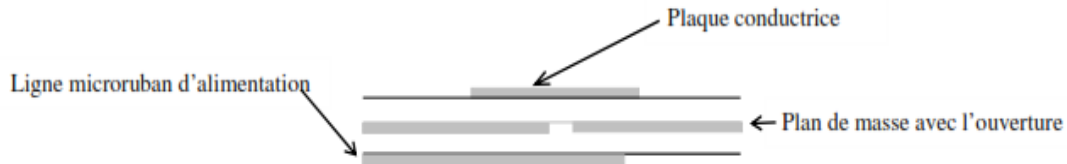


Figure 1.11: Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.

1.6.4. Alimentation Couplée Par Proximité :

Ce type d'alimentation est représenté sur la Figure 1.11, deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le micro ruban de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du faux rayonnement d'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ce par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne.

Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs. [9]

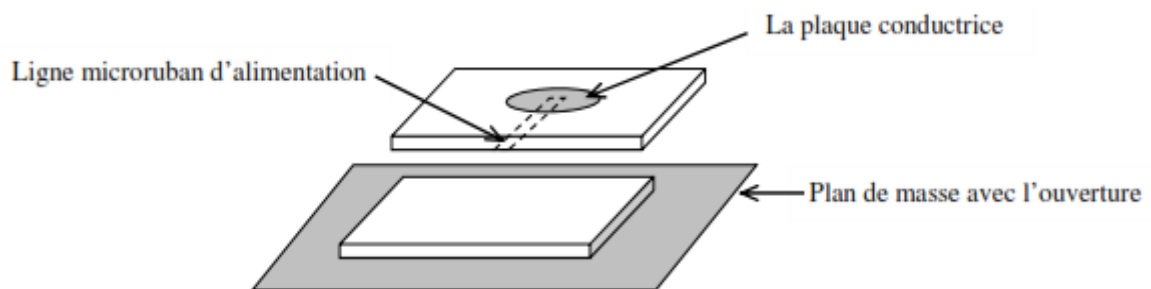


Figure1.12: Alimentation par couplage par proximité

1.7. Méthodes d'analyses :

Il existe de nombreuses méthodes afin d'analyser et de modéliser les antennes imprimées. Les modèles les plus populaires sont : modèle de la ligne de transmission, modèle de la cavité et la méthode de l'onde complète (full wave), qui incluent principalement les équations Intégrales et la méthode des moments.

Plusieurs logiciels de simulation existent sur le marché utilisant l'une ou l'autre de ces Méthodes.

1.7.1. Les méthodes analytiques :

Permettent d'analyser les antennes en utilisant :

- Le modèle de ligne de transmission (valable notamment pour le micro ruban rectangulaire) ;
- Le modèle de la cavité électromagnétique (valable notamment pour tout autre micro ruban de géométrie quelconque simple).

1.7.2. Les méthodes numériques (Full-wave) :

On distingue 4 méthodes, parmi-eux : ce sont des méthodes utilisées en électromagnétisme

1.7.2.1. La méthode des moments (MoM) : c'est une technique permettant de résoudre efficacement un système d'équations intégrales on le transformant en un système matriciel résolu par ordinateur

1.7.2.2. La méthode intégrale associée à la méthode des moments : nous présentons dans ce paragraphe, l'utilisation de la méthode intégrale associée à la méthode des moments, l'association de ces deux méthodes est souvent appelée d'une façon raccourcie : méthode des moments, c'est avant tout le principe de la méthode intégrale qui est utilisé. La méthode des moments apparaît en fin de calcul comme outil de résolution.

Le développement de la méthode s'appuiera sur l'exemple d'une antenne planaire de type micro ruban. La généralisation à d'autres types de technologies (micro fente, coplanaire ...) s'effectue sans difficulté. Cette méthode permet de calculer le champ électromagnétique rayonné par la structure rayonnante considéré à partir d'une estimation des courants sur la surface [9].

1.7.2.3. La méthode des éléments finis (FEM) : c'est une méthode qui s'applique au dispositif microondes de forme quelconque, elle est basée sur la résolution des équations de Maxwell et sur la description géométrique de la structure sous la forme d'un maillage, elle consiste à diviser l'espace en petit élément homogènes mais de taille pratiquement très variable c'est le point fort de cette méthode.

La méthode des éléments finis est une méthode générale, permettant de prendre en compte des géométries très complexes .elle est robuste .pour obtenir la précision désirée, il suffit d'affiner le maillage aux endroits où les champs présentent des gradients importants .ceci est fait dans les logiciels de commerce qui utilisent un maillage adaptatif .cette méthode exige des ordinateurs possédant une mémoire importante et la résolution de problèmes non triviaux requiert des temps de calcul importants .le résultat d'une simulation donne un point de fréquence pour obtenir une réponse dans toute une bande de fréquence il est nécessaire de cumuler plusieurs simulations toutes ces remarques font de la méthode des éléments finis une méthode puissante et précise dont le seul inconvénient est de nécessiter des moyens informatiques importants) [9].

1.7.2.4. La méthode des différences (FDTD) : c'est une méthode qui se produit dans le domaine temporel elle permet de calculer à chaque instant discret de l'espace les différents composants du champ électromagnétique dans chaque cellule élémentaire du volume dimensionnel

(La force de la FDTD réside dans sa simplicité de mise en œuvre et dans le fait que les résultats sont obtenus en fonction du temps, il suffit alors d'une transformée de Fourier pour déterminer les paramètres fréquentiels) [9].

1.7.2.5. La méthode de la matrice des lignes de transmissions (TLM) : elle permet de discrétiser les champs et les courants de la structure étudiée en petit élément chacun de ses éléments est considéré comme un ensemble de ligne de transmission et les calculs s'effectue directement dans le domaine temporel l'un des points forts de cette méthode est la formulation simple qui ne dépend pas beaucoup de la géométrie de la structure étudié

La simulation des FSSs par les méthodes numériques classiques basées sur un discrétisation spatiale (méthode des éléments finis, méthode des différences finies, méthode des moments) ou spectrale (méthodes modales).

Il existe des logiciels comme HFSS et CST permettent d'aider à la conception de ces antennes micro ruban et de réaliser une simulation réaliste de leurs caractéristiques Dans notre simulation on a utilisé le logiciel CST studio 2019 qu'on va décrire par la suite dans le chapitre3

1.8. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter l'essentiel de la théorie des antennes micro ruban, dans notre cas, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées à FSS à base des matériaux à Bandes Interdites Électromagnétiques Métallique (BIE-M), ce type des antennes est toujours en cours d'amélioration au niveau de la limitation dans sa bande passante afin d'obtenir des meilleurs performances avec un budget raisonnable , On a cité quelques applications de ce type d'antennes , l'étude du fonctionnement d'une antenne micro ruban on s'est intéressé par la suite aux techniques utilisées pour son alimentation. Leurs avantages et quelque inconvénients et on a donné une description de ce élément rayonnant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] National Academy Engineering « Memorial tributes », 17th volume in the series memorial tributes, November 7, 2013
- [2] 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.
- [3] Euloge Budet TCHIKAYA," Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique de Changement d'échelle (SCT)", thèse de Doctorat en Micro-onde, Electromagnétisme et Optoélectronique présentée a Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), vendredi 22 octobre 2010
- [4] D. RITTENHOUSE, "An Optical Problem, Proposed by Mr. Hopkinson, and Solved by Mr.Rittenhouse", Trans. Amer. Phil. Soc., vol. 2, p. 201-206, 1786.
- [5] « Research Article Improved Microstrip Antenna with HIS Elements and FSS Superstrate for 2.4GHz Band Applications Hindawi International Journal of Antennas and Propagation »
- [6] BECITA Bachir, « : Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques », mémoire de Master Académique en MICRO-ONDES présentée à l'université de M'sila, en Juin 2014
- [7] DADDA ABDELKADER, « antenne microruban de forme circulaire a substrat cristaux photoniques », mémoire de Master Académique en MICRO-ONDES présentée à l'université de M'sila, en Juin 2014
- [8] 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
- [9] Odile Picon et coll « les antennes théorie, conception et application, préface de Maurice Bellanger, septembre 2009 »

C

H

A

P

I

T

R

E

2

*GENERALITES SUR LES
MATERIAUX BIE*

2.1 Introduction :

Dans le domaine des antennes, les structures composées d'un agencement périodique d'éléments, de type à Bande Interdite Electromagnétique (BIE) ou les Surfaces Sélectives en Fréquences (FSS), ont été sujets de plusieurs travaux de recherches.

Les matériaux BIE sont des structures artificielles dont la constante diélectrique est modulée de façon périodique dans une, deux ou trois dimensions. Les BIE sont des systèmes très utilisés pour des applications dans le domaine des ondes électromagnétiques, dans le domaine des micro-ondes, l'optoélectronique et les télécommunications optiques. C'est donc, sur cette base de matériaux à structuration périodique que l'étude sera réalisée.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la présentation générale des matériaux BIE nous allons présenter les concepts de base et les principales notions concernant les structures périodiques, en insistant sur la notion de bande interdite électromagnétique métallique. Dans la suite on va discuter les structures périodiques dans une, deux et trois dimensions

Nous terminerons par leurs applications dans de nombreux domaines tels que l'optique, les circuits microondes et les antennes.

2.2 Historique :

Le terme de bande interdite (ou « band gap »), a été introduit par Lord Rayleigh en 1887 [1]. Ce nouveau type de structures a été développé par Eli Yablonovitch et Sajeev à la fin des années quatre-vingt

En réalité les tout premiers matériaux BIE a été réalisé sans le savoir par le physicien anglais William Laurence Bragg. En 1915.

Ce dernier a réussi par l'empilement périodique de couches transparentes à indices de réfraction différents à réfléchir (99,5%) de l'énergie incidente, ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce phénomène s'explique par de multiples réflexions à l'intérieur même de chaque interface. Elles sont constructives pour une épaisseur particulière des différentes couches.

Ces matériaux dont la constante diélectrique est structurée de manière périodique possèdent des fréquences pour lesquelles il n'existe aucun mode de propagation possible à l'intérieur du matériau, autrement appelé bande de fréquence interdite. Ces structures périodiques à une dimension sont déjà connues sous le nom de miroirs de Bragg. Depuis, "E. Yablonovitch" [2] a eu l'idée d'étendre leur fonctionnement à plusieurs dimensions. Pour simplifier les réalisations, un prototype a été défini avec des bandes interdites mesurables en micro-ondes. Depuis cette innovation, les études qui ont pour objet ces

matériaux se sont considérablement accrues. Les domaines de fréquences où ces matériaux sont étudiés correspondent aux fréquences optiques de (1THz jusqu'à 1000THz) et aux fréquences micro-ondes ou hyperfréquences. La gamme de fréquences facilite la conception et la réalisation de ces matériaux.

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

A l'image des semi-conducteurs, dont la régularité du paysage atomique entraîne l'existence d'une bande d'énergie interdite, nous pouvons donc obtenir des bandes de fréquences interdites pour des matériaux diélectriques périodiques. Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré selon la structure étudiée. Ces plages de fréquences ont pris le nom générique de Bande Interdite Photonique. Le principe du miroir de Bragg est présenté sur la (*Figure2-1*).[3]

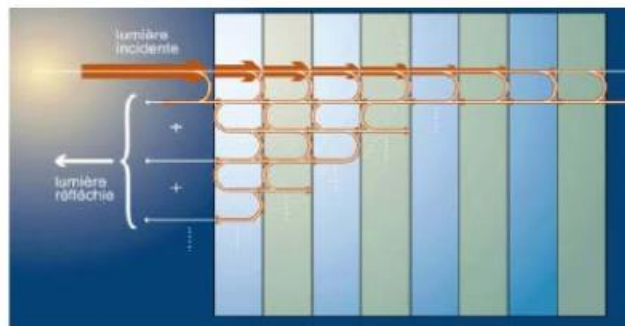


Figure 2.1 Principe Du Miroir De Bragg.

2.3 Description des matériaux BIE:

2.3.1. Description des matériaux BIE diélectriques :

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétiques .[4]

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques **Figure (2-2)**. Ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial [6].

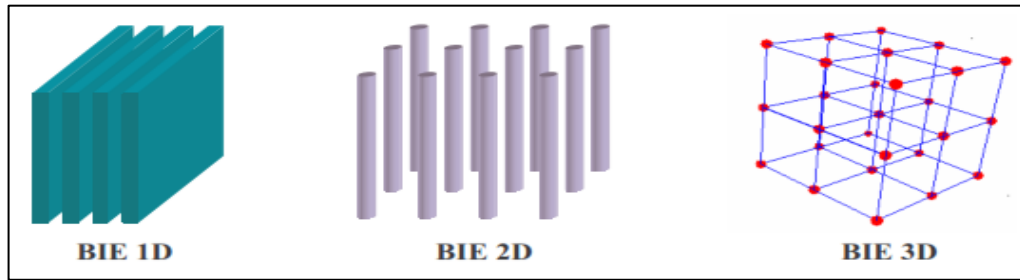


Figure 2.2 : Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D.

Puisque l'incidence des ondes est un facteur limitant les performances de ces structures, les chercheurs travaillent dans les domaines utilisant ces matériaux. Ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes.[3]

2.3.1.1. Réseaux unidimensionnels :

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

Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée [3] **Figure (2.3).**

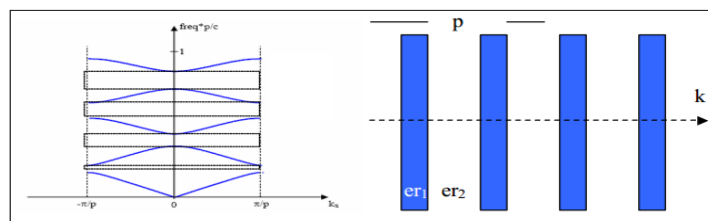


Figure 2.3 : Structure 1D et son diagramme de dispersion

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 [3]

2.3.1.2. Réseaux bidimensionnels :

Les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidentes à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux).[5]

Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau.

Nous présentons sur la **Figure (2.4)**, plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

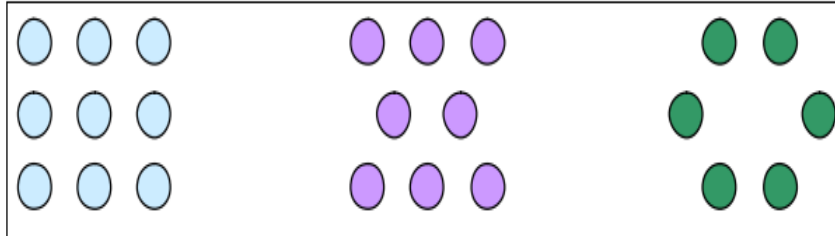


Figure 2.4 : Exemples de différents réseaux 2D.

Ce sont les paramètres géométriques c'est-à-dire le pas du réseau, le diamètre des tiges (par conséquent le taux de remplissage de la structure), le motif élémentaire et le contraste d'indice qui fixent les largeurs et les positions des bandes interdites et des bandes permises. Les diagrammes de la **Figure (2.5)** représentent :

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

Dans les deux cas, nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites dans les deux polarisations (en étudiant ici les diagrammes de bande d'une structure 2D en Polarisation TE et TM). Mais, lorsque les bandes interdites correspondant à chacune des polarisations se recouvrent même de façon partielle, nous parlons alors de bandes interdites complètes.

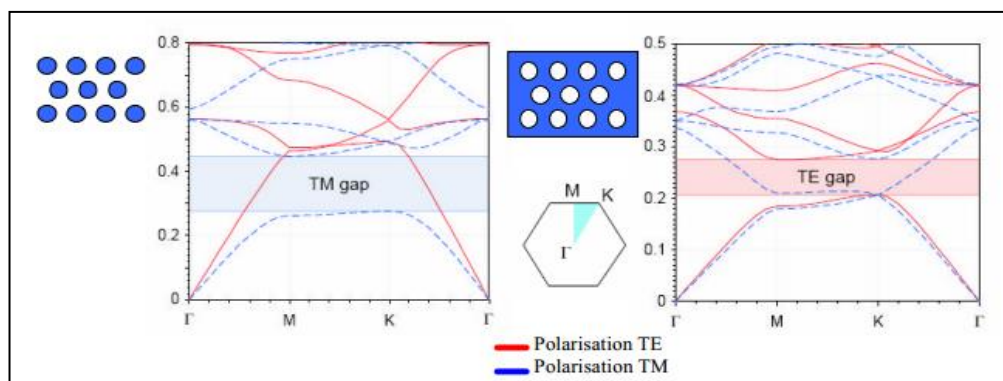


Figure 2.5 : Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation.

En réalité, il n'y a que dans le cas des structures en trois dimensions que nous pouvons obtenir théoriquement une vraie bande interdite complète, c'est-à-dire dans le cas où il n'y a

aucune propagation possible quelles que soient la polarisation et la direction de l'onde incidente[3].

2.3.1.3. Réseaux tridimensionnels :

Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite électromagnétique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles [6]. **Figure (2.6).**

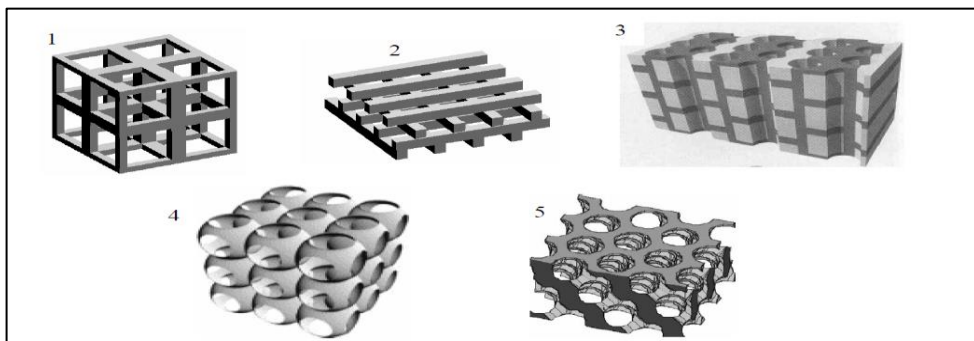


Figure 2.6 : Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonoite (5)

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

Les deux types de structures BIE 3D réalisées dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique sont la Yablonoite (un diélectrique percé de trous d'air) et la structure tas de bois.

Cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des micro-ondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de 90° à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble. [8]

Auguste Bravais a établi un classement des différentes familles de cristaux. Il a montré qu'ils peuvent se répartir en 7 types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux.[3]

2.3.2 Description des structures BIE métalliques :

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau d est très faible devant la longueur d'onde qui est bien en dessous des fréquences optiques. [3]

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 .[3]

2.3.3.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 .[9]

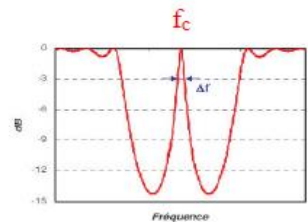
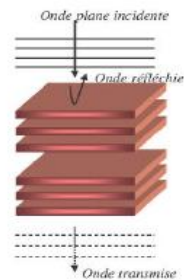
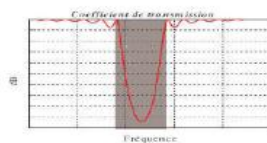
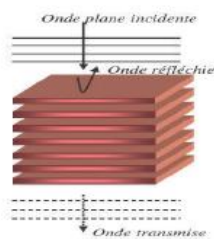


Figure 2.7: Matériau B.I.E sans défaut

Figure 2.8: 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 2.9*).

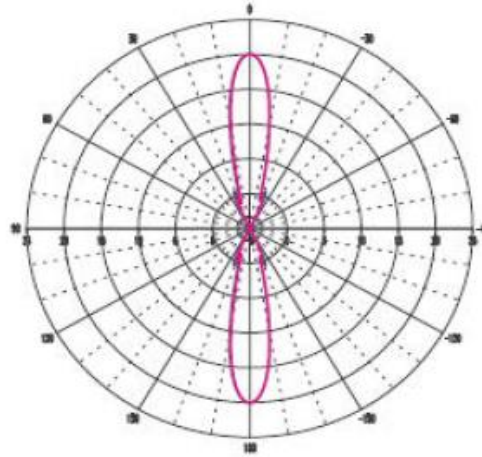


Figure 2.9: Diagramme d'une antenne à matériau BIE

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 2.10* représentant ce champ dans un matériau B.I.E à défaut, ces conditions sont obtenues. .[9]

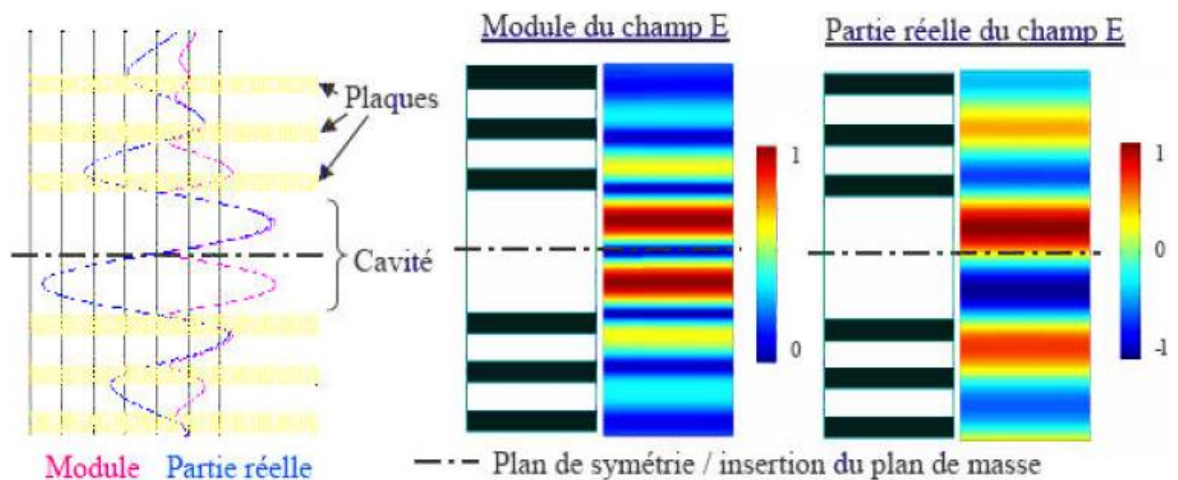


Figure 2.10: Distribution du champ électrique tangentiel

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 2.11**).

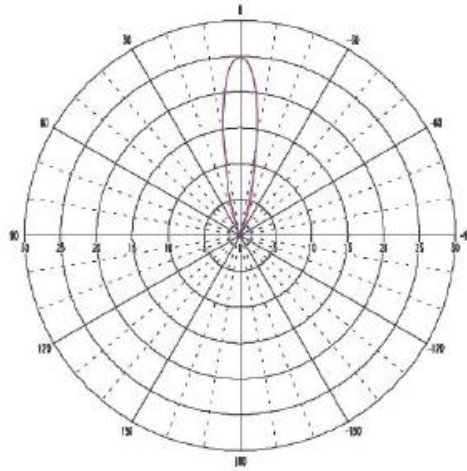


Figure 2.11: Diagramme d'une antenne à demi-matériau B.I.E (plan de masse) .[9]

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

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

(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 :

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} * \eta \quad (2.2)$$

avec η correspondant au rendement de la loi d'éclairement. Pour une antenne BIE, 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[4]. 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. [9]

La distance h est donnée par l'expression suivante :

$$h = \left(\frac{\varphi_{PRS}}{360^\circ} + \frac{\varphi_G}{360^\circ} \right) * \frac{\lambda}{2} \quad (2.3)$$

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 2.12)

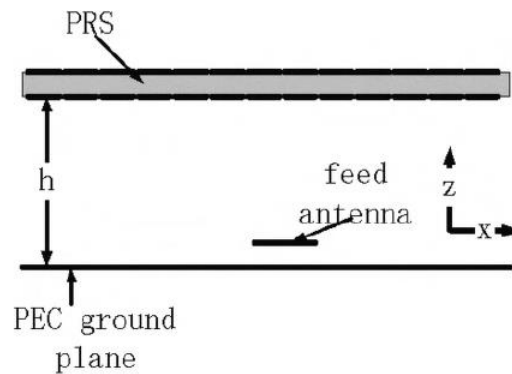


Figure 2.12: Antenne BIE.

2.3.4. Différents types des FSS :

2.3.4.1. Structures métalliques (à grille) :

Les matériaux métalliques périodiques peuvent se présenter sous la forme de tiges ou de grilles possédant un ou plusieurs axes de périodicité.

Toutes les grilles possèdent une bande interdite basse fréquence dans laquelle elles se comportent comme de parfaits miroirs. En effet, aux fréquences basses, l'impédance dérivée représentant la grille métallique est plus forte que l'impédance caractéristique de la ligne de transmission représentant le vide. Ce comportement présente une nouveauté par rapport aux réseaux périodiques BIE diélectriques. En effet, ils possèdent une bande permise basse fréquence jusqu'à leur première bande interdite fixée par leur périodicité et leur permittivité [3]Figure 2.13.

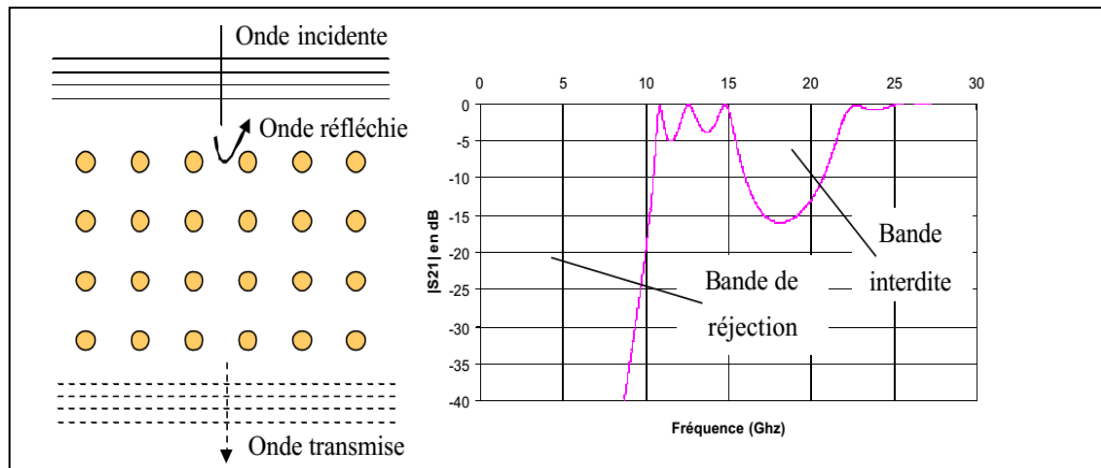


Figure 2.13 : Coefficient de transmission d'une structure BIEM

2.3.4.1.1. Grilles métalliques 1D et 2D :

L'étude des grilles métalliques n'est pas récente et elle a depuis déjà bien longtemps mis en évidence les propriétés en basses fréquences de ces structures [12].

Les grilles unidimensionnelles sont formées de fils métalliques parallèles d'une épaisseur (h), d'une largeur (a) (ou de diamètre dans le cas de tiges) et le pas du réseau (p).

Présenté ci-dessous **Figure 2.14**.

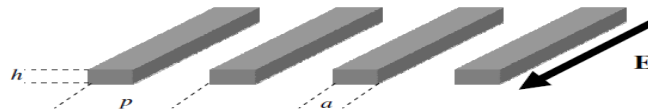


Figure 2.14. Grille métallique unidimensionnelle formée de tiges avec des sections rectangulaires

Dans le cas où le pas du réseau « p » est inférieur à la longueur d'onde, le comportement de ces grilles suit la théorie des lignes qui consiste à utiliser un schéma électrique équivalent. Pour une grille 1D infinie, le circuit général d'une grille métallique mince est une ligne de transmission représentant le vide avec en parallèle dans le plan de référence une admittance normalisée par rapport à l'admittance caractéristique de la ligne représentant la grille. Si la grille est sans perte, l'admittance est purement susceptance. Pour réaliser des structures métalliques insensibles à la polarisation de l'onde (polarisation circulaire), nous pouvons envisager de passer d'une grille unidimensionnelle à une grille bidimensionnelle.

La **Figure 2.15** montre deux réseaux périodiques bidimensionnels de symétrie carrée correspondant à l'extension à deux dimensions des structures précédemment illustrées. Si la structure (celle de droite) est constituée d'un réseau de carrés métalliques, nous pouvons alors parler d'un réseau de type déconnecté. En revanche si la structure (celle de gauche) possède des intersections entre les éléments métalliques, nous pouvons parler d'un réseau connecté.

La grille bidimensionnelle de la **Figure 2.15** est en fait la superposition de deux grilles unidimensionnelles perpendiculaires. Nous pouvons facilement comprendre que quelle que soit l'onde incidente parallèle à l'une des deux grilles unidimensionnelles, l'onde réagira avec seulement un réseau de grilles. En effet, il y aura une interaction entre les deux grilles 1D si une des grilles est complémentaire à l'autre. Donc elle a une influence négligeable sur le comportement du réseau. Et selon sa polarisation, le fonctionnement de la grille bidimensionnelle est identique à celui de la grille unidimensionnelle.

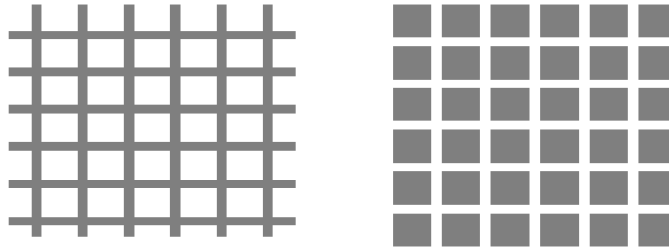


Figure 2.15. Grilles métalliques bidimensionnelles formées de grilles ou de plaques

Après avoir présenté les propriétés des grilles métalliques unidimensionnelles ou bidimensionnelles, nous allons davantage nous attacher à la création de bandes interdites et leurs positions.

2.3.4.2. Les structures métalliques à base de FSS (imprimé) :

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:

$$\varphi_P + \varphi_G - \frac{2\pi}{\lambda} 2h = 2k\pi, \mathbf{k} = \mathbf{0}, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (2.4)$$

Où φ_P et φ_G ($= 180^\circ$) sont les coefficients de réflexion de la PRS et du plan de masse respectivement [9].

2.4. Domaine d'applications :

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 [9] .

2.4.1. Dans le domaine de l'optique les fibres optiques :

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. [9]

2.4.2. 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. [9]

2.5 Evolution des antennes BIE-M :

2.5.1. Antenne bibande :

L'utilisation d'une FSS au-dessus du plan de masse peut permettre d'obtenir une antenne bibande. (**Figure 2.18**). En utilisant une couche FSS au-dessous des grilles métalliques, on peut créer deux fréquences de résonance pour la cavité et donc deux bandes de fonctionnement pour l'antenne .[13] Cette méthode permet l'utilisation d'une antenne à résonateur pour une application nécessitent deux bandes distinctes. Le principe d'une telle antenne est présenté (**Figure 2.19**).

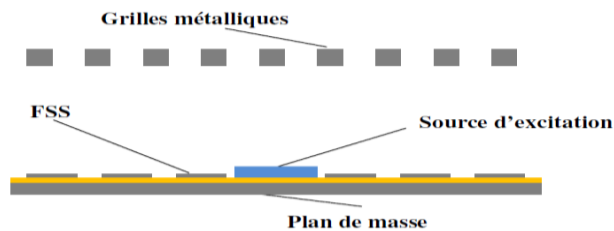


Figure 2.16. Principe de l'antenne bibande

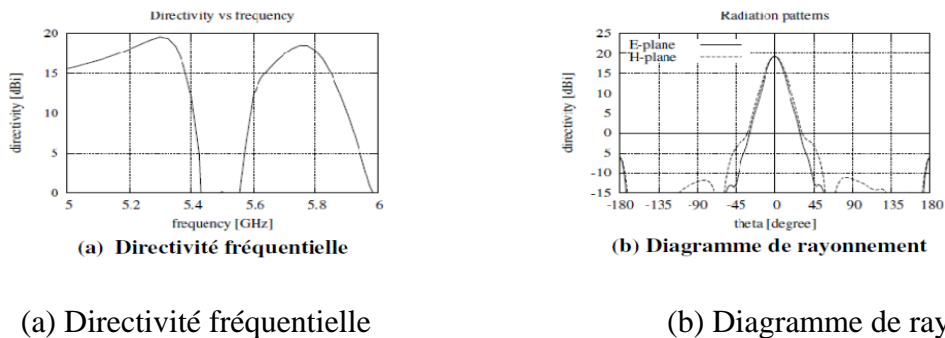
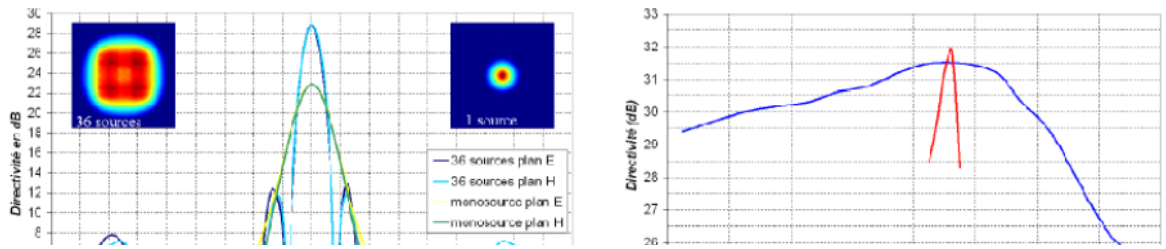


Figure 2.17 Performances de l'antenne bibande

2.5.2. Antenne multisource :

Le principe des multiples sources d'excitation repose sur la théorie des réseaux, qui permet non seulement de former un diagramme de rayonnement, mais également, d'augmenter la directivité par la sommation des contributions des différents éléments. Ainsi, en excitant la cavité avec plusieurs sources, un réseau d'antennes à ouvertures rayonnantes entrelacées est réalisé, ce qui permet d'obtenir une directivité plus importante par sommation des contributions de chaque ouverture. En excitant une structure peu résonante par de multiples sources, il est possible d'obtenir à la fois une forte directivité et une bande de rayonnement plus importante [14] (**Figure 2.20**).



(a) diagrammes de rayonnement comparé en monosource et en multisource (b) Directivité fréquentielle comparée entre antennes BIE de directivité équivalente

Figure 2.18. Comparaison entre une antenne BIE monosource et une antenne BIE multisource

2.5.3. Antenne omnidirectionnelle :

Un autre développement récent sur les antennes BIE est la mise au point d'une antenne à rayonnement omnidirectionnel [15] [16] [17] destinée principalement à répondre au besoin croissant en antenne fort gain à rayonnement omnidirectionnel pour des stations de base. Pour cette application, les antennes BIE omnidirectionnelles se posent en concurrentes des réseaux de dipôles utilisés dans la plupart des cas.

La conception des antennes BIE omnidirectionnelles en azimut a débuté intensivement à Limoges en 2004. En Mai 2004, L. Freytag a proposé des études d'une antenne à matériau BIE à paroi latérale entourant un axe [15] [16] [17]. Ces études ont fait l'objet d'un brevet. [18]

La structure conçue est déduite de l'antenne BIE directive. En courbant cette dernière sur 360° , elle a réussi à concevoir une antenne omnidirectionnelle dite « **coaxiale** » composée d'une âme centrale métallique qui représente le plan de masse et des cylindres diélectriques représentant le matériau BIE planaire (Figure 2.19).

Compte tenu des difficultés liées à la mise au point des matériaux diélectriques et de la fabrication de structures diélectriques cylindriques et de leur coût de fabrication, des travaux qui ont ensuite été poursuivis par L. Freytag et E. Pointereau en 2005, ont visé des matériaux BIE métalliques (BIE-M). Les cylindres diélectriques ont été remplacés par des grilles métalliques. [19][20]

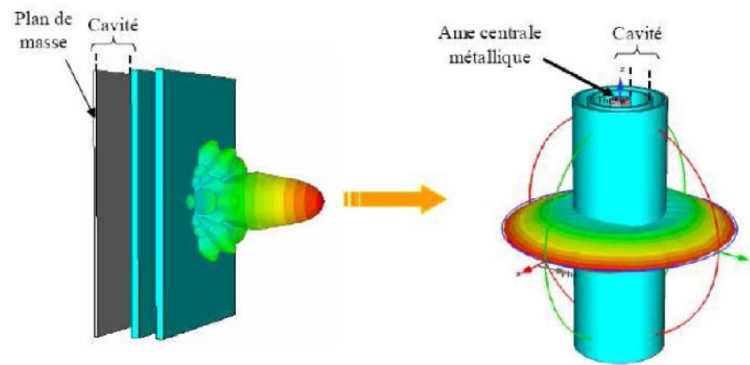


Figure 2.19. Méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle
 Une première réalisation d'une antenne BIE-M cylindrique omnidirectionnelle a été effectuée.
 [21][19]Le prototype et ses diagrammes de rayonnement sont présentés sur la **Figure 2.22**

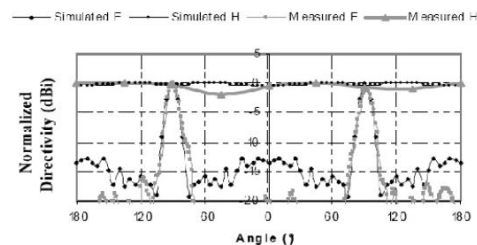


Figure 2.20. Antenne BIE-M coaxiale omnidirectionnelle et ses diagrammes de rayonnement

2.6 Conclusion:

Ce chapitre est consacré brièvement sur les matériaux périodiques BIE : leur histoire, propriétés, et l'évolution technologique des antennes microrubans à BIE, ainsi que le principe de fonctionnement en citant les différents domaines d'application.

Les matériaux BIE diélectrique et métalliques ont été décrits.

Dans ce chapitre on a pu comprendre et mettre en évidence les propriétés attractives des matériaux BIE-M, et ces matériaux intéressent de nombreux chercheurs car ce sujet est très vague.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Zakia, “Conception d’une Antenne Microruban Reconfigurable à base de Diode PIN et des Structures EBG,” 2019.
- [2] E. Yablonovitch, “Photonic crystals: semiconductors of light,” *Sci. Am.*, vol. 285, no. 6, pp. 46–55, 2001.
- [3] T. Jaffré, “Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multipériodiques et leurs applications aux antennes.” Limoges, 2005.
- [4] A. Polman and P. Wiltzius, “Materials science aspects of photonic crystals,” *MRS Bull.*, vol. 26, no. 8, pp. 608–613, 2001.
- [5] M. Plihal and A. A. Maradudin, “Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice,” *Phys. Rev. B*, vol. 44, no. 16, p. 8565, 1991.
- [6] G. S. Smith, M. P. Kesler, and J. G. Maloney, “Dipole antennas used with all-dielectric, woodpile photonic-bandgap reflectors: Gain, field patterns, and input impedance,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 191–196, 1999.
- [7] M. M. Sigalas, C. T. Chan, K. M. Ho, and C. M. Soukoulis, “Metallic photonic band-gap materials,” *Phys. Rev. B*, vol. 52, no. 16, p. 11744, 1995.
- [8] G. Kiriakidis and N. Katsarakis, “Fabrication of 2-D and 3-D photonic band-gap crystals in the GHz and THz regions,” *Mater. Phys. Mech.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–26, 2000.
- [9] R. SEGHIOUR and L. CHERIFI, “Conception d’une antenne BIE bi-bande.” Univ M’sila, 2020.
- [10] M. Thevenot, A. Reineix, and B. Jecko, “FDTD approach for modelling PBG structures,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 1, no. 4, p. 495, 1999.
- [11] M.-S. Denis, “Contribution à l’étude des matériaux à Bande Interdite Photonique: Application dans le domaine des antennes imprimées.” Limoges, 1998.
- [12] J. Danglot, O. Vanbésien, and D. Lippens, “Matériaux à gap de photons reconfigurables,” 2000.
- [13] E. Rodes, “Nouveaux concepts d’antenne à base de matériaux BIE métalliques: Application aux réseaux de télécommunications.” Limoges, 2006.
- [14] L. Leger, T. Monediere, and B. Jecko, “Enhancement of gain and radiation bandwidth for a planar 1-D EBG antenna,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 15, no. 9, pp. 573–575, 2005.
- [15] M. W. TABBARA, “Conception, réalisation et caractérisation d’antennes pour stations de base des réseaux de télécommunication sans fil.” UNIVERSITE DE LIMOGES, 2004.
- [16] L. Freytag, E. Pointereau, and B. Jecko, “Novel dielectric EBG antenna with omnidirectional pattern in azimuth,” in *2004 URSI EMTS International symposium on Electromagnetic Theory*, 2004, vol. 1, p. 600.

-
- [17] L. Freytag, E. Pointereau, and B. Jecko, “Omnidirectional dielectric electromagnetic band gap antenna for base station of wireless network,” in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004.*, 2004, vol. 1, pp. 815–818.
- [18] L. Freytag, B. Jecko, and E. Pointereau, “Antenne à matériau BIP (Bande Interdite Photonique) à paroi latérale entourant un axe.” 2005.
- [19] H. Chreim, E. Pointereau, B. Jecko, and P. Dufrane, “Omnidirectional electromagnetic band gap antenna for base station applications,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 499–502, 2007.
- [20] L. Freytag, E. Pointereau, and B. Jecko, “Dielectric and metallic Electromagnetic Band Gap antennas for omnidirectional coverage of telecommunication networks,” in *11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM 2005]*, 2005, pp. 1–3.
- [21] E. Pointereau, “Etude d’antennes à bande interdite électromagnétique omnidirectionnelles en azimut,” 2007.

C

H

A

P

I

T

R

E

3

*RESULTATS ET
DISCUSSIONS*

3.1 Introduction :

Dans ce troisième chapitre, qui constitue l'essentiel de notre travail, nous avons conçu une antenne patch rectangulaire bibandes à ouverture et avec une couche FSS alimentée par une ligne micro ruban.

Nous avons étudié l'influence des différents paramètres de cette structure sur ces caractéristiques : la fréquence de résonance, la bande passante la directivité et le gain en utilisant le logiciel **CST Microwave Studio** pour notre simulation.

3.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO :

En 1992, la société allemande CST STUDIO a été fondée. Après de nombreuses recherches. La première version de CST Microwave studio fut apparue en 1998. Cette dernière a pour but la conception magnétique. Elle permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence tel que : les antennes, les filtres ...etc.

CST Microwave studio est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Intégration Technique).

Comme tous les simulateurs 3D, l'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée. [1]

3.3 La méthode d'intégration finie

La technique d'intégration finie (FIT) a été présentée pour la première fois en 1977 par le professeur Thomas Weiland (TU Darmstadt) [2].

Il fournit une reformulation discrète des équations de Maxwell dans leur forme intégrale adaptée aux ordinateurs et permet de simuler des problèmes de champ électromagnétique du monde réel avec des géométries et est un schéma de discrétisation.

Les propriétés algébriques de base de cette théorie du champ électromagnétique discret permettent de prouver analytiquement et algébriquement les propriétés de conservation par rapport à l'énergie et à la charge de la formulation discrète et donnent une explication des propriétés de stabilité des formulations numériques dans le domaine temporel.

La discrétisation des dérivées temporelles est faite par le schéma leap-frog. L'utilisation ici de la forme intégrale locale permet d'appliquer la technique des PBA (Perfect Boundary Approximation). Cette technique découpe une cellule élémentaire en deux et assigne à chacune des parties un matériau différent.

La frontière entre les deux matériaux peut être une surface de forme quelconque. Pour des structures relativement complexes géométriquement ou contenant des singularités, la technique PBA diminue significativement le nombre de mailles nécessaires.

Grace à cette technique de maillage, Microwave Studio peut prendre par exemple en compte les épaisseurs des feuilles métalliques sans avoir besoin de les mailler directement et ce qui nous fait gagner du temps en termes de calcul.

Donc FIT est une méthode de simulation numérique pour les solutions sans approximation des équations de Maxwell dans leur forme intégrale. C'est aussi la base mathématique des logiciels de simulation MAFIA et CST MICROWAVE STUDIO

3.4 Présentation de la structure:

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat d'une permittivité de $\epsilon_{r1}=4$ (Epoxy resin), d'un patch supérieur de forme rectangulaire qui constituera l'élément rayonnant.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
h : épaisseur du substrat	1.635
W : largeur du substrat	62
L : longueur du substrat	86
W : largeur de patch	30
L : longueur de patch	40
h_1 : épaisseur du patch	1.670
t : épaisseur du plan de masse	0.035
Longueur ligne alimentation, L_f	4
Largueur ligne alimentation, W_f	6
Largeur des fentes rectangulaires	12
Longueur des fentes rectangulaires	12.25
Grand diamètre de slot	5
Petit diamètre de slot	3.2

Tableau 3.1 Dimension de l'antenne micro ruban rectangulaire

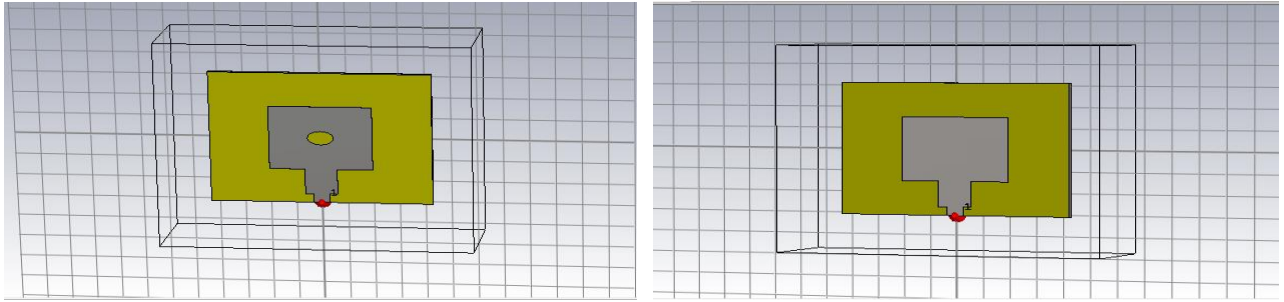


Figure 3.1 La structure d'antenne rectangulaire avec et sans slot

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

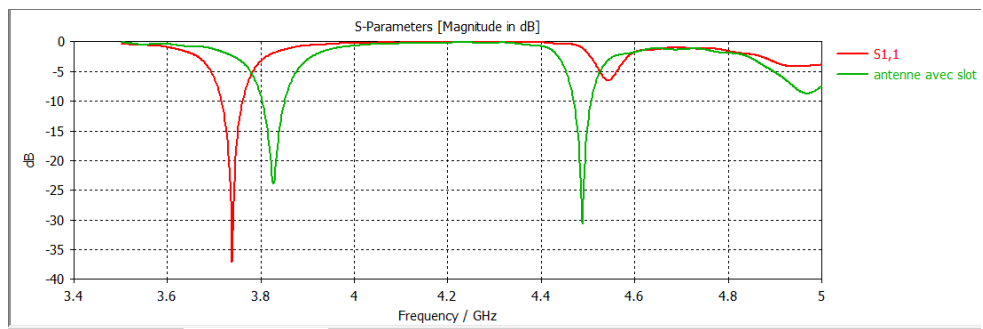


Figure 3.2 Coefficient de réflexion S_{11} pour une antenne micro ruban rectangulaire sans et avec slot (bi-bande)

B)-Directivité et gain :

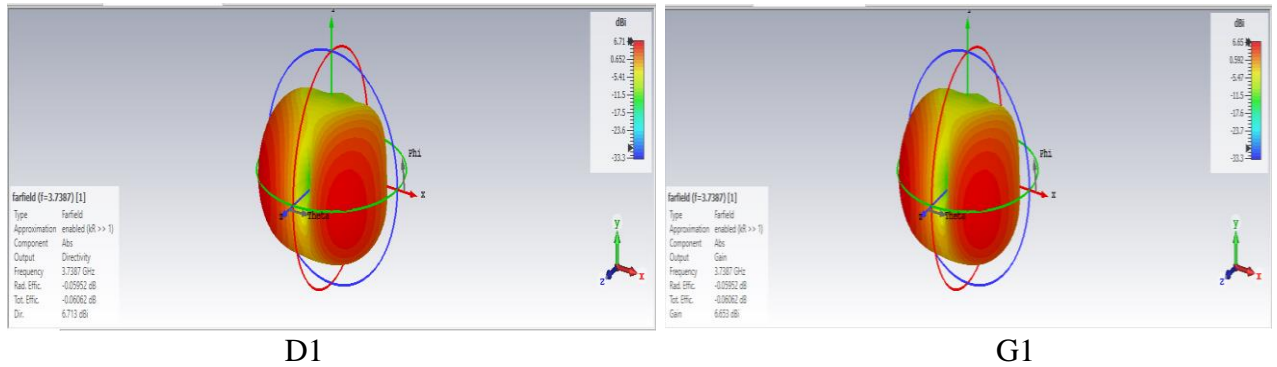


Figure 3.3 Directivité et gain d'une antenne micro ruban rectangulaire sans slot

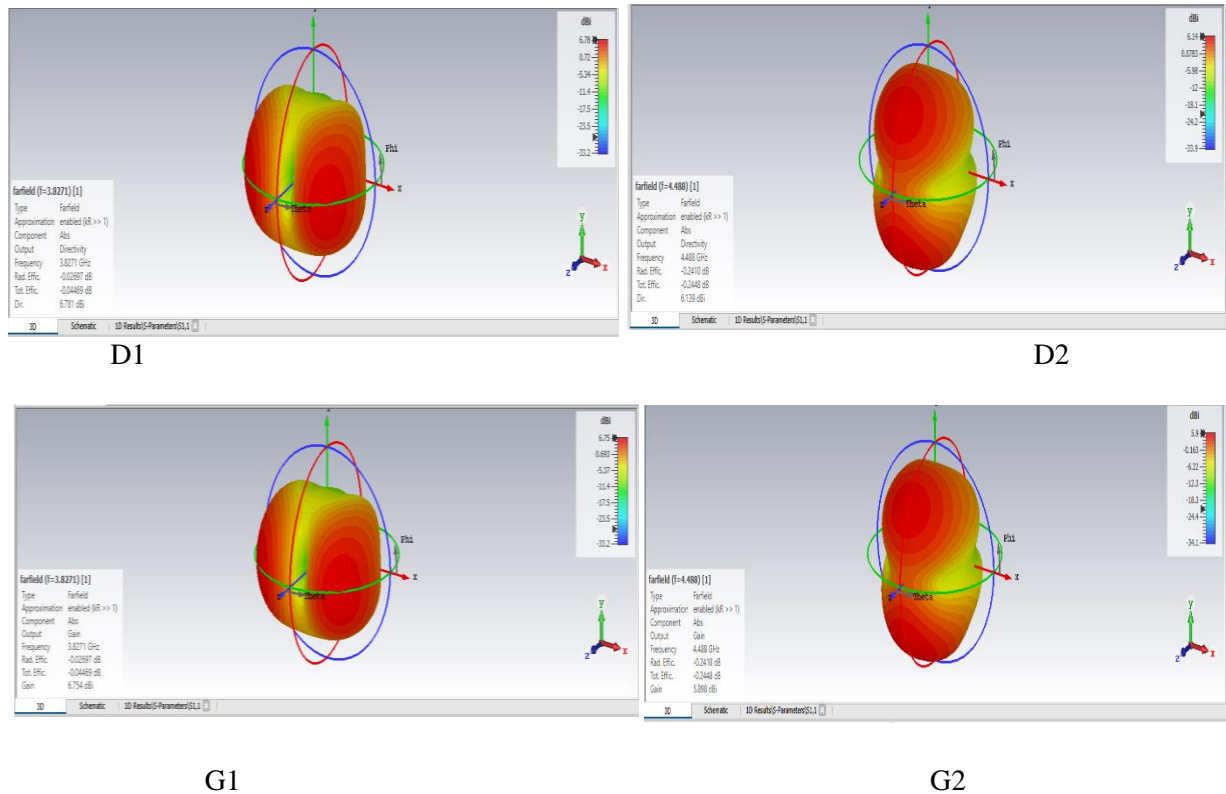


Figure 3.4 Directivités et gains d’une antenne micro ruban rectangulaire avec slot

	fr_1 (GHz)	fr_2 (GHz)	BP_1 (GHz)	BP_2 (GHz)	S_{11-1} (dB)	S_{11-2} (dB)	D1 (dB)	D2 (dB)	G1 (dB)	G2 (dB)
Antenne sans slot	3.7387	/	1.20%	/	-36.27	/	6.71	/	6.65	/
Antenne (bi-bande) avec slot	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9

Tableau 3.2 Caractéristiques d’une antenne rectangulaire avec et sans slot.

On peut dire qu’une antenne est bien adaptée si le coefficient de réflexion $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$, à partir des figures (3.2-3.3-3.4) et le tableau 3.2 on remarque que les deux antennes simulées sont bien adaptées, aussi 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 supérieure à celle de l’antenne sans slot ;
- On observe pour une antenne avec slot les deux bandes sont proches et étroites ($BP_1 = \frac{f_2 - f_1}{f_r} = \frac{0.048169}{3.8271} * 100 = 1.12\%$ et $BP_2 = 0.83\%$), et pour l’antenne sans slot une seule bande étroite ($BP = 1.20\%$) ;

➤ La directivité et le gain pour l'antenne avec slot est presque la même par rapport à une antenne avec slot

3.4.1 Effet de la variation de la longueur de patch X :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

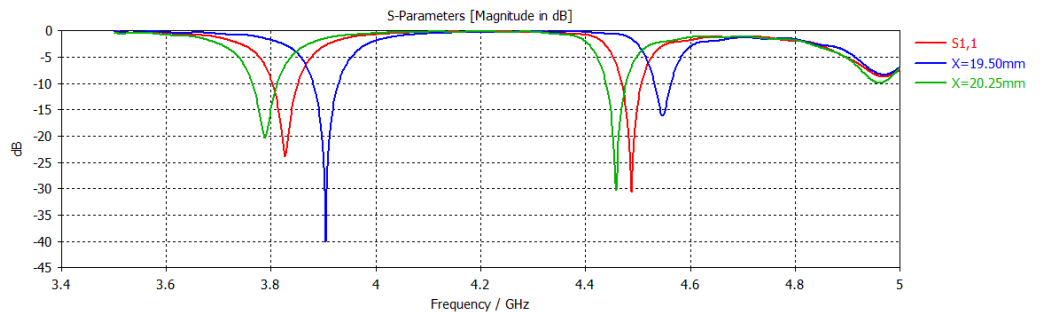


Figure 3.5 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes longueurs du patch

B) Directivité et le Gain :

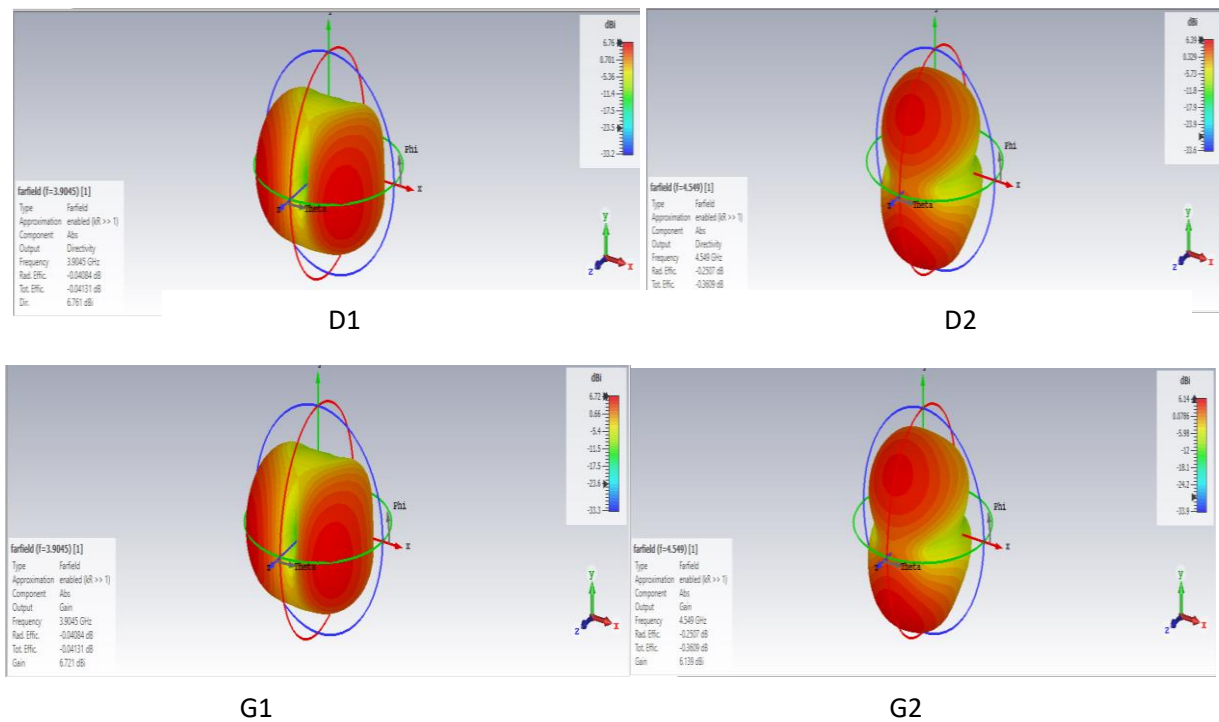


Figure 3.6 Directivités et gains pour une longueur de patch $X_2=19.50\text{mm}$

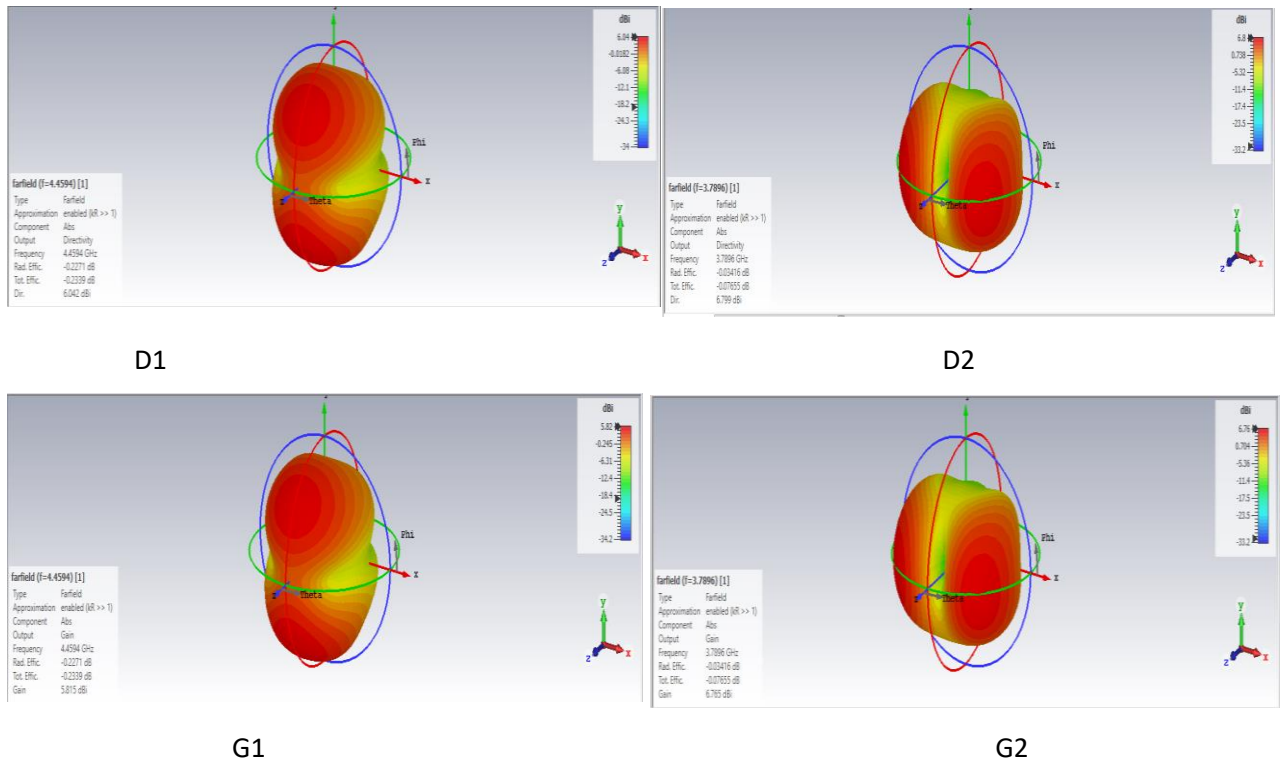


Figure 3.7 Directivités et gains pour une longueur de patch $X1=20.25\text{mm}$

	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)	G_1 (dB)	G_2 (dB)
X1=20.25	3.7896	4.4594	1.26%	0.85%	-20.11	-28.37	6.8	6.04	6.76	5.82
X0=20	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
X2=19.50	3.9045	4.549	1.23%	0.69%	-39.62	-16.00	6.76	6.39	6.72	6.14

Tableau 3.3 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec Slot en fonction de la longueur du patch

A partir du Tableau 3.3 et les figures (3.5-3.6-3.7) on remarque :

- ✓ Coefficients de réflexion S_{11} change avec la variation de la longueur de patch
- ✓ La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la longueur du patch.
- ✓ Directivité et le gain :
 - Pour la première fréquence: Lorsque la longueur diminue, la directivité et le gain diminuent
 - Pour la deuxième fréquence: Lorsque la longueur diminue, la directivité et le gain augmentent.
- ✓ La bande passante est étroite avec la diminution de longueur de patch

3.4.2 Effet de la variation de largeur du patch Y :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

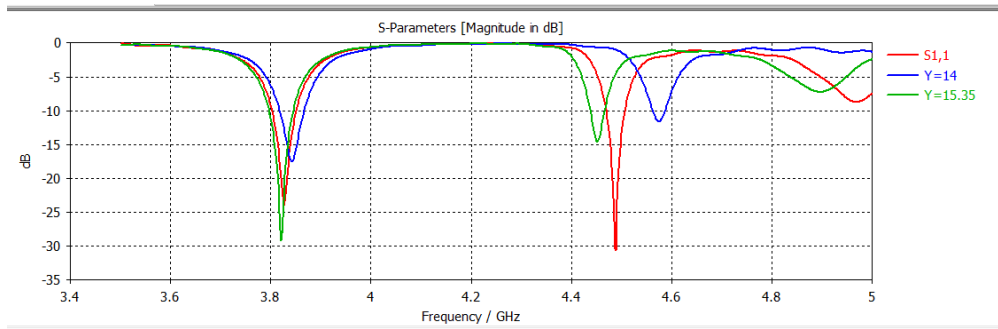


Figure 3.8 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes largeurs du patch

B) Directivité et gain :

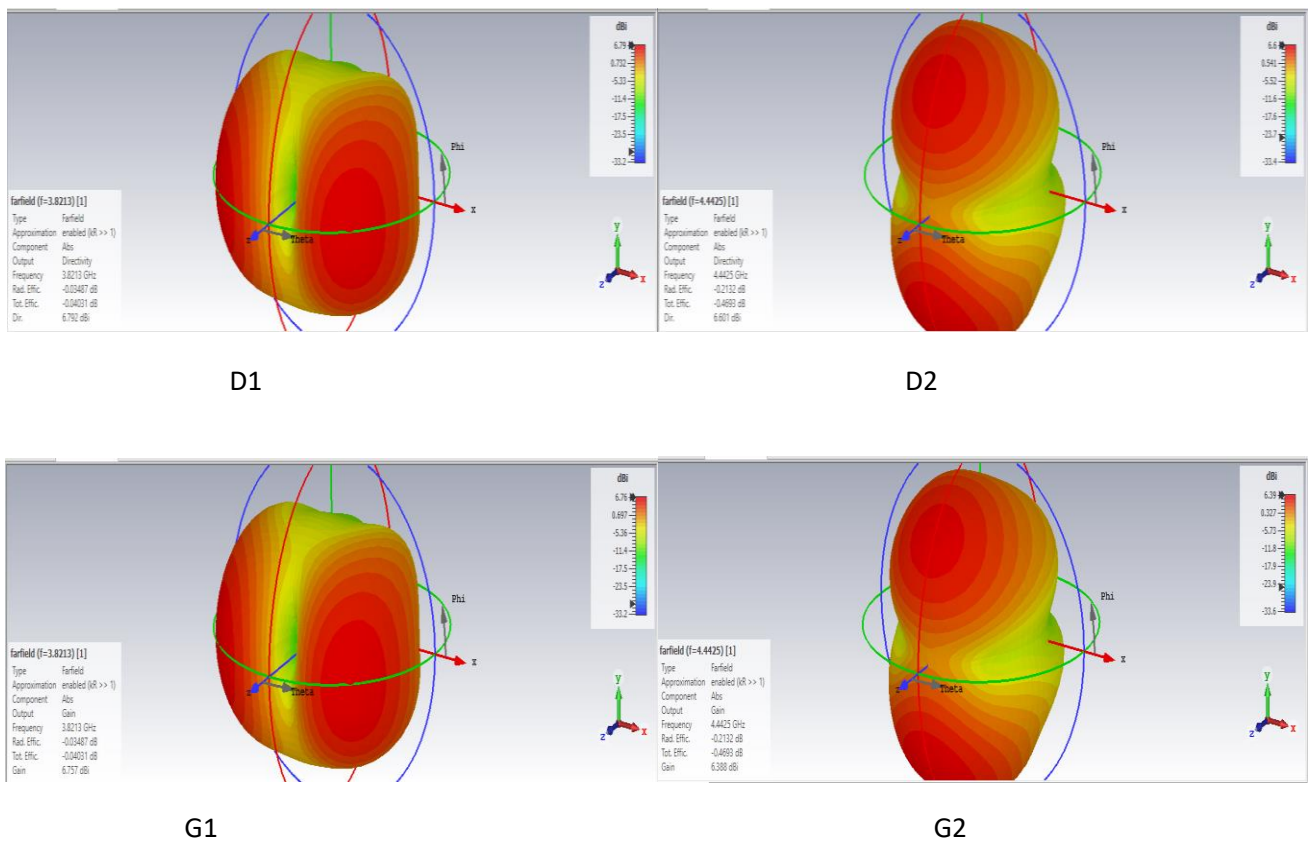


Figure 3.9. Directivités et gains pour une largeur de patch $Y=15.35\text{mm}$

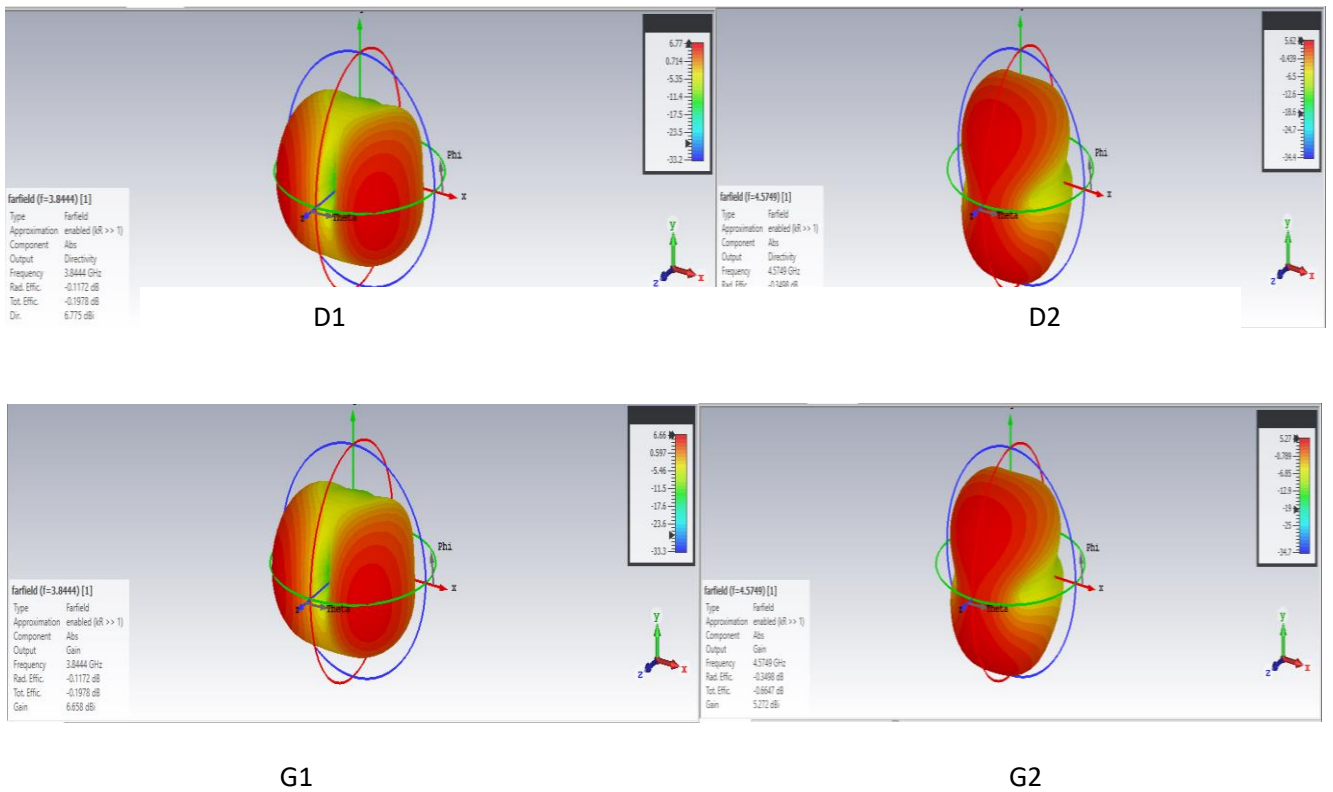


Figure 3.10 Directivités et gains pour une largeur de patch Y=14 mm

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
Y1=15. 35	3.8213	4.4425	1.26%	0.51%	-29.36	-12.42	6.79	6.6	6.76	6.39
Y0=15	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
Y2=14	3.8444	4.5749	1.26%	0.53%	-17.35	-11.55	6.77	5.62	6.66	5.27

Tableau 3.4 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec slot en fonction de la largeur du patch

A partir du Tableau 3.4 et les figures (3.8-3.9-3.10) on remarque :

- ✓ La variation du coefficient de réflexion S_{11} et la bande de passante est non uniforme avec la largeur du patch ;
- ✓ Lorsque la largeur du patch diminue, la fréquence de résonance augmente ;
- ✓ Lorsque la largeur du patch diminue, la directivité et le gain diminuent ;

3.4.3 Effet de la variation de l'épaisseur h du substrat :

A)- Coefficients de réflexion S_{11}

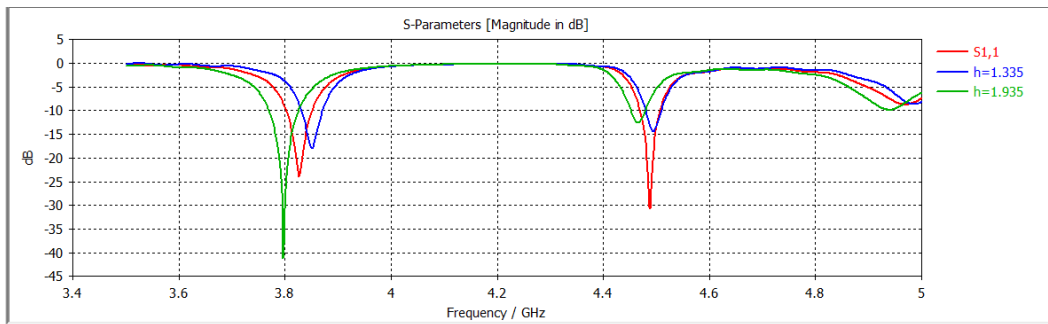


Figure 3.11 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes épaisseurs du substrat

B) Directivité et gain :

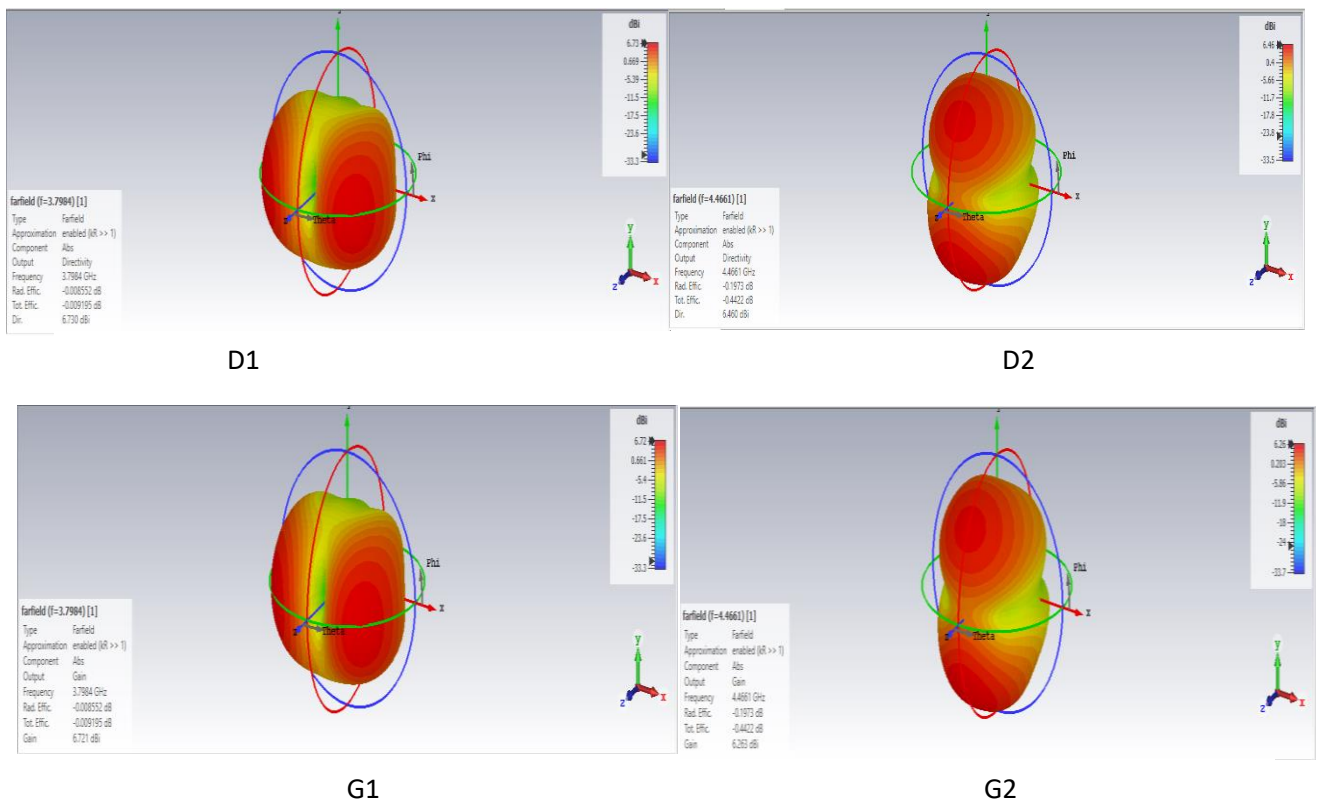


Figure 3.12 Directivités et gains pour l'épaisseur du substrat $h=1.935$ mm

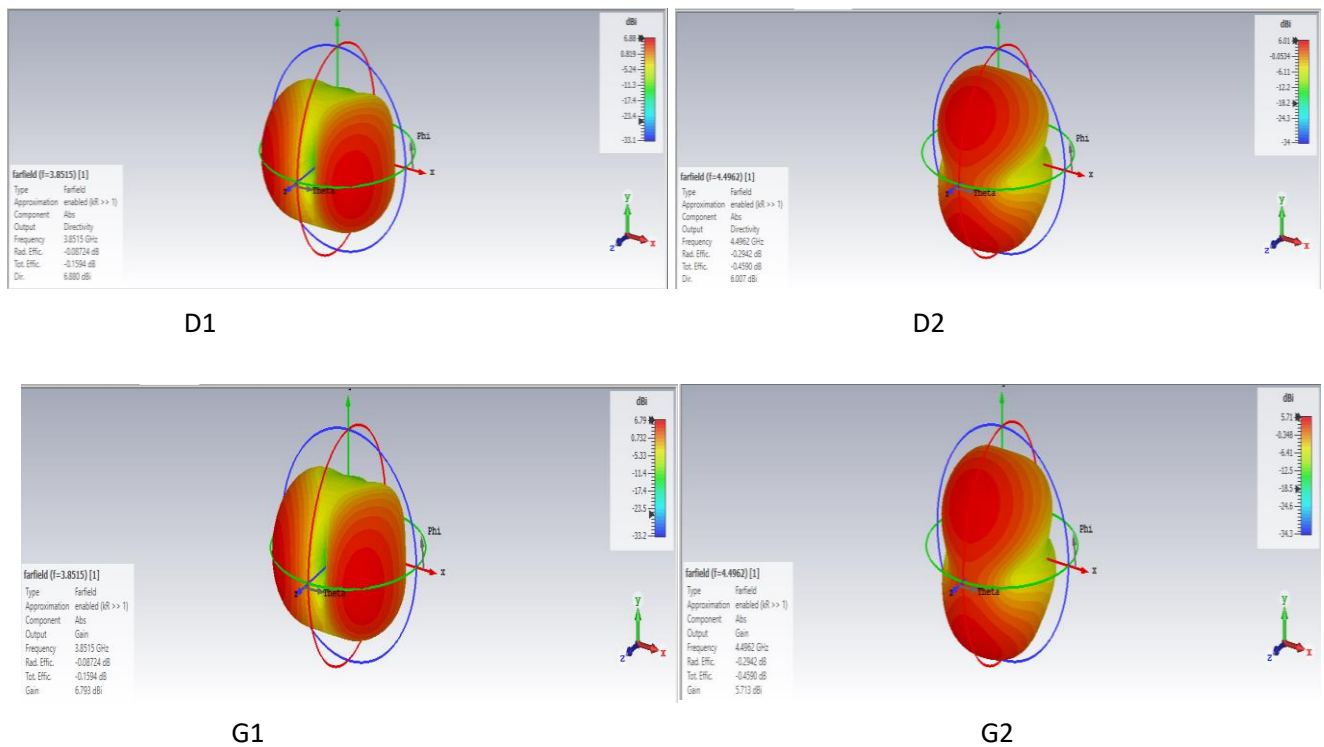


Figure 3.13 Directivités et gains pour l'épaisseur du substrat $h=1.335\text{mm}$

	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)	G_1 (dB)	G_2 (dB)
H1=1.935	3.7984	4.4661	1.45%	0.59%	-38.41	-12.60	6.73	6.46	6.72	6.26
H=1.635	3.8271	4.488	1.26%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
H2=1.335	3.8515	4.4962	1.02%	0.65%	-17.85	-14.31	6.88	6.01	6.79	5.71

Tableau 3.5 Caractéristiques de l'antenne micro ruban avec slot en fonction de l'épaisseur du substrat

A partir du Tableau 3.5 et les figures (3.11-3.12-3.13) On remarque :

- ✓ Pour la première fréquence: Lorsque l'épaisseur diminue, le coefficient S_{11} et la bande passante diminuent, par contre la directivité et le gain augmentent ;
- ✓ Pour la deuxième fréquence: la variation du coefficient S_{11} et la bande passante est non uniforme par contre la directivité et le gain diminuent avec la diminution de l'épaisseur du substrat;
- ✓ Lorsque l'épaisseur diminue, la fréquence de résonance augmente

3.4.4. Effet de la variation de la permittivité ϵ_p du substrat :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

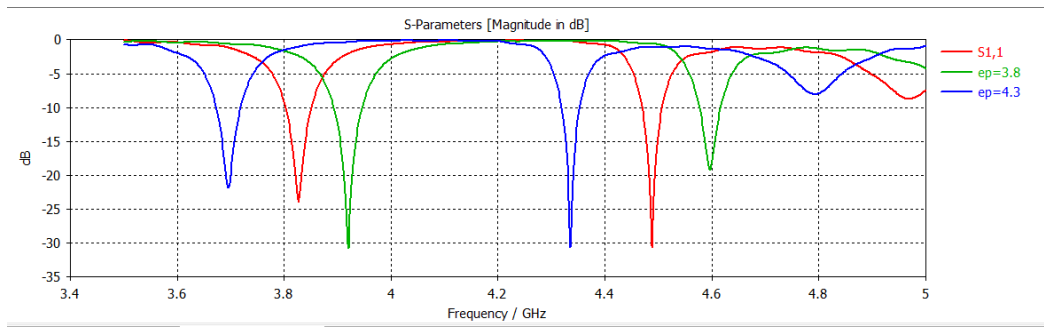


Figure 3.14 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes permittivité du substrat

B) Directivité et gain :

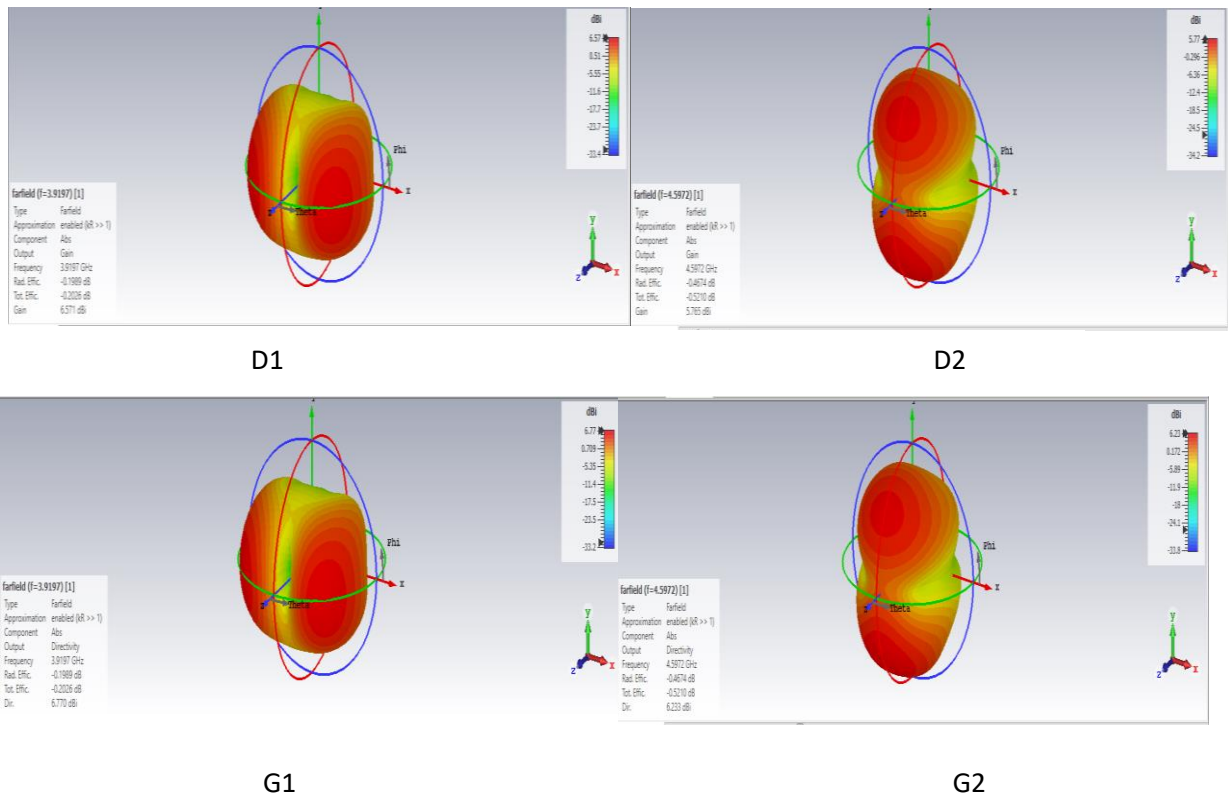


Figure 3.15 Directivités et gains pour la permittivité du substrat $\epsilon_p = 3.8$

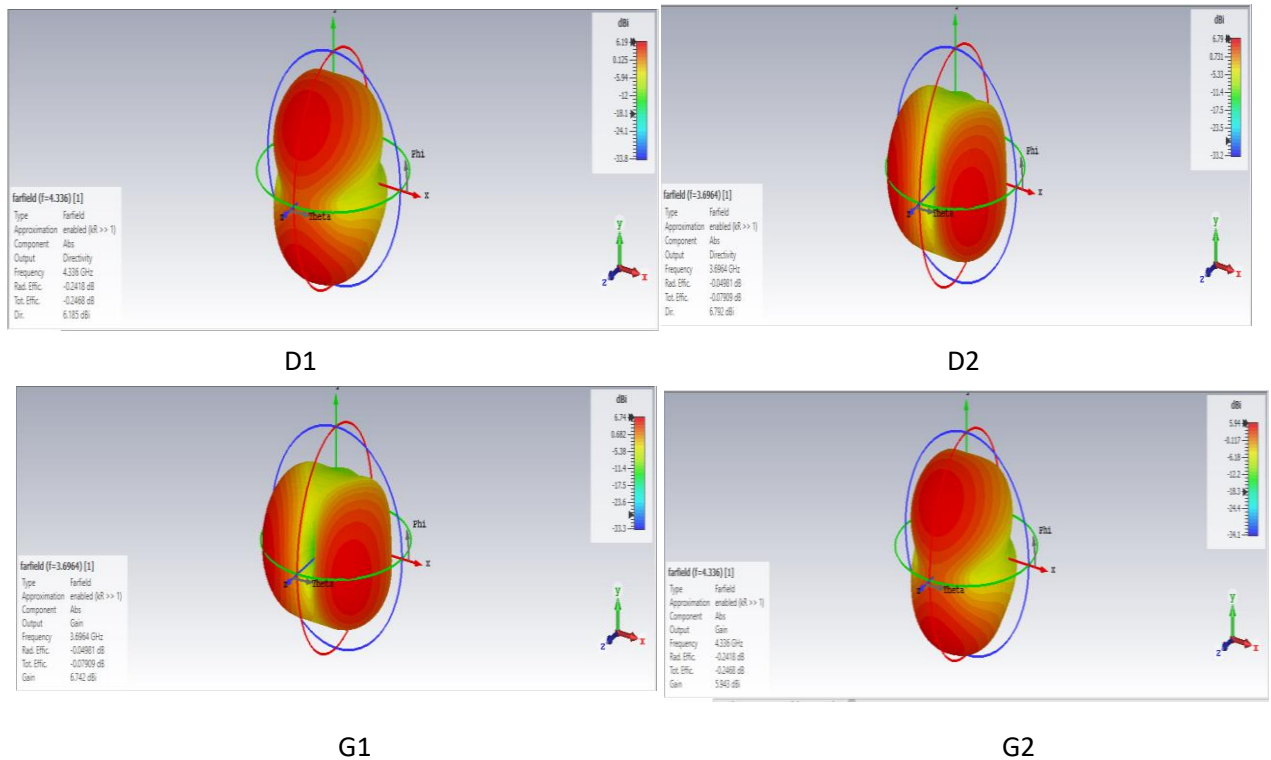


Figure 3.16 Directivités et gains pour la permittivité du substrat $\epsilon_p = 4.3$

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
Preperm (lossy) Ep=3.8	L380 3.9197	4.5972	1.35%	0.86%	-30.66	-19.11	6.77	6.23	6.57	5.77
Epoxy resin Ep =4	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
Tonic RF43(loss free) Ep=4.3	3.6964	4.336	1.23%	0.77%	-21.72	-29.60	6.79	6.19	6.74	5.94

Tableau 3.6 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec slot en fonction de la permittivité du substrat

A partir du Tableau 3.6 et les figures (3.14-3.15-3.16) on remarque :

✓ Pour la première fréquence : La fréquence de résonance et la bande passant ainsi que le coefficient de réflexion S11 diminuent avec l’augmentation de la permittivité ; par contre la directivité et le gain augmentent ;

✓ Pour la deuxième fréquence: La fréquence de résonance et la bande passant diminuent avec l’augmentation de la permittivité par-contre le gain augmente ;

- La variation de la directivité et le coefficient de réflexion est non uniforme avec l’augmentation de la permittivité

3.4.5 Effet de la variation de longueur x'' du slot :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

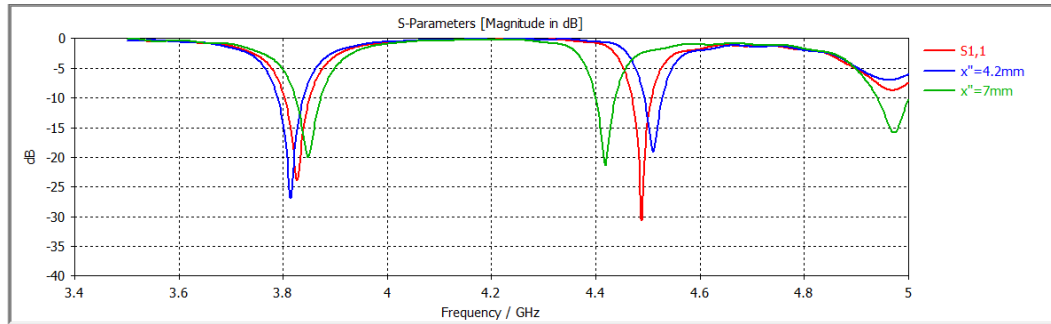


Figure 3.17 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes longueurs du slot

B) Directivité et gain :

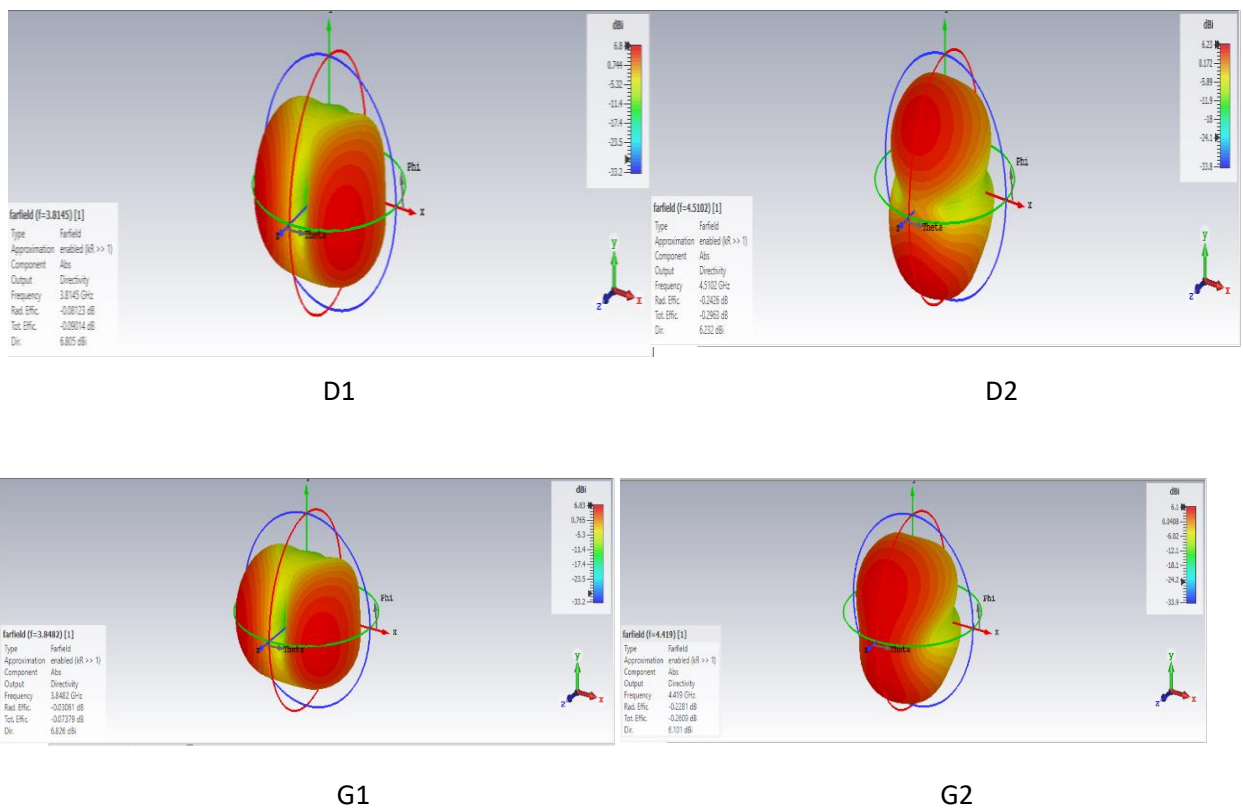


Figure 3.18 Directivités et gains pour la longueur du slot $x''=4.2\text{mm}$

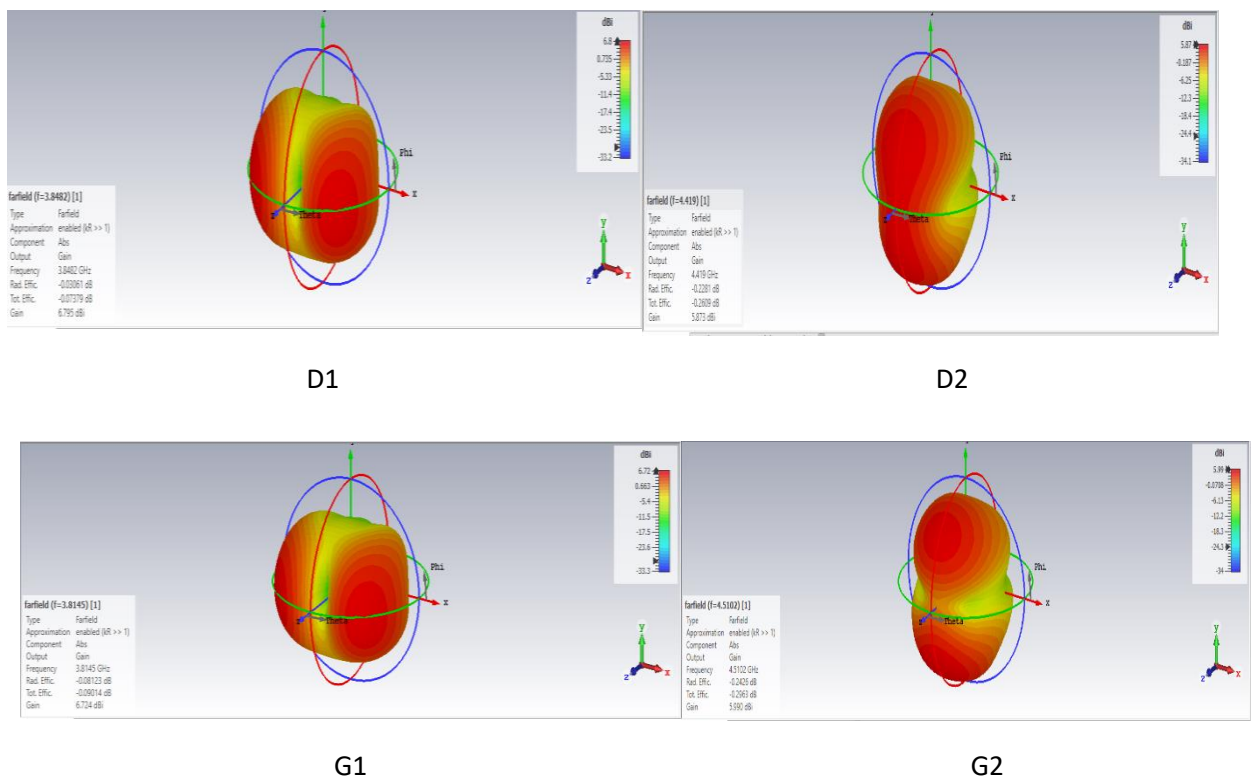


Figure 3.19 Directivités et gains pour la longueur du slot $x''=7\text{mm}$

	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)	G_1 (dB)	G_2 (dB)
$x''=4.2$	3.8145	4.5102	1.28%	0.76%	-26.88	-19.10	6.8	6.23	6.72	5.99
$x''=5$	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
$x''=7$	3.8482	4.419	1.25%	0.85%	-20.04	-21.23	6.83	6.1	6.8	5.87

Tableau 3. 7 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec slot en fonction de sa longueur

A partir du Tableau 3.7 et les figures (3.17-3.18-3.19) on remarque :

- ✓ Pour la première fréquence : Lorsque la longueur augmente: la fréquence de résonance et le gain augmentent par contre le coefficient de réflexion S_{11} et la bande de passante diminuent, et la variation de la directivité est non uniforme
- ✓ Pour la deuxième fréquence: la fréquence de résonance, la directivité et le gain diminuent avec l’augmentation de la longueur de slot par contre la bande passante augmente avec l’augmentation de la longueur de slot, et la variation du coefficient de réflexion non uniforme.

3.4.6 Effet de la variation de largeur y " du slot :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

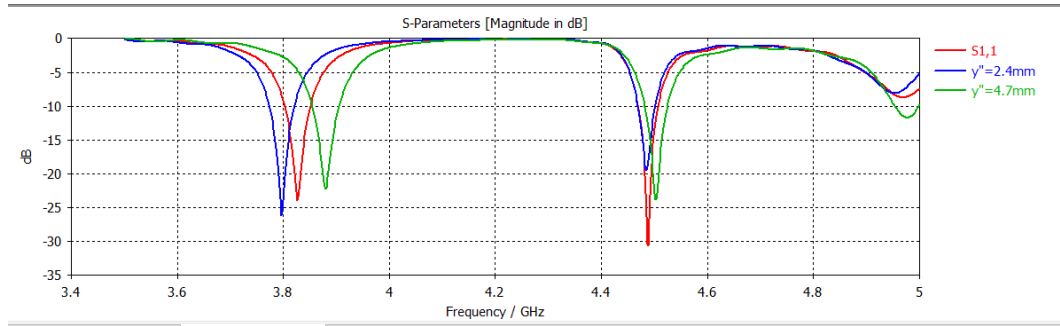


Figure 3.20 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes largeurs du slot

B)- Directivité et gain :

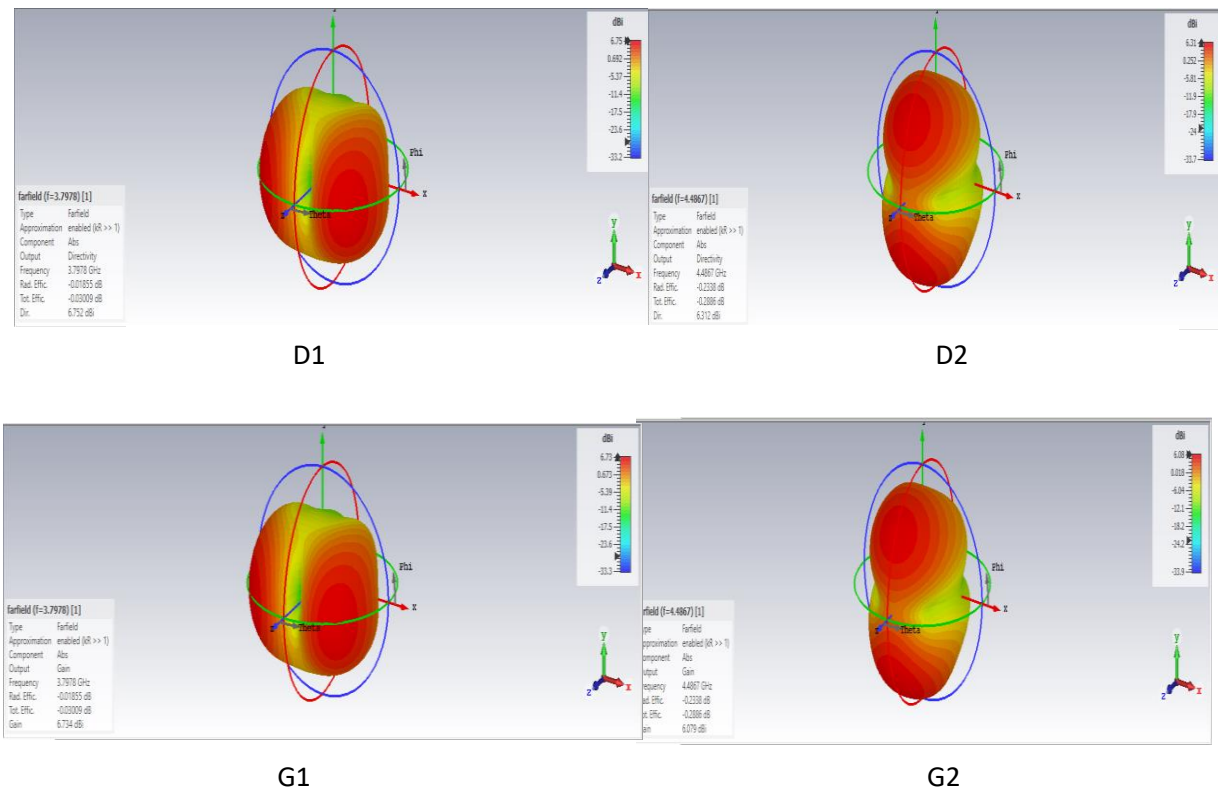


Figure 3.21 Directivités et gains pour la largeur du slot $y=2.4\text{mm}$

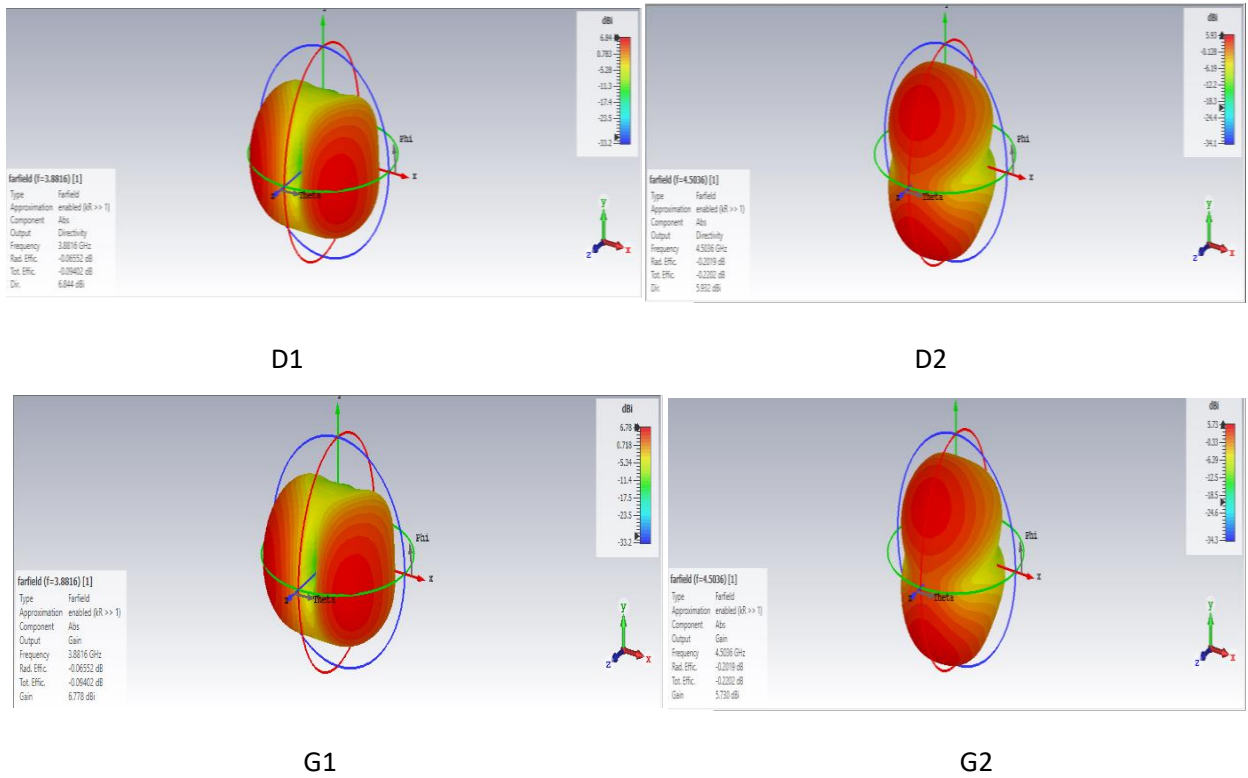


Figure 3.22 Directivités et gains pour la largeur du slot $y=4.7\text{mm}$

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
$y=2.4$	3.7978	4.4867	1.23%	0.72%	-25.79	-19.00	6.75	6.31	6.73	6.08
$y=3.2$	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
$y=4.7$	3.8816	4.5036	1.29%	0.94%	-21.87	-23.74	6.84	5.93	6.78	5.73

Tableau 3.8 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec Slot en fonction de sa largeur.

A partir du Tableau 3.8 et les figures (3.20-3.21-3.22) On remarque :

✓ Pour la première fréquence: lorsque la largeur de slot augmente:la fréquence de résonance, la bande passante, directivité et le gain est augmenté par contre le coefficient de réflexion diminue avec l’augmentation de largeur de slot

✓ Pour la deuxième fréquence: la fréquence de résonance, la bande passante augmentent avec l’augmentation de la largeur de slot par contre la directivité et le gain diminuent.

- La variation du coefficient de réflexion est non uniforme avec la largeur de slot

3.4.7 Effet de la variation de l'emplacement de slot suivante x :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

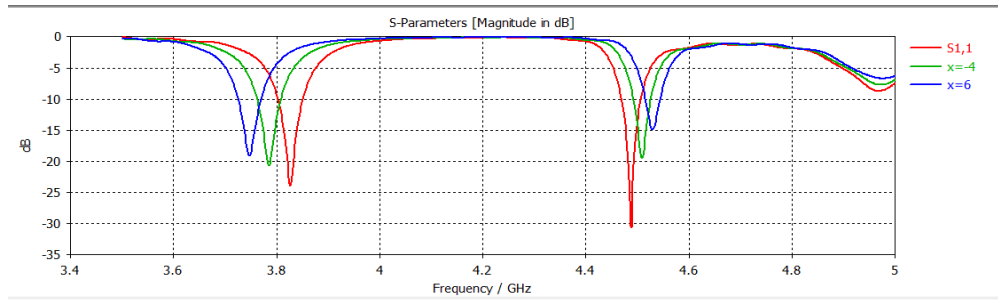


Figure 3.23 Coefficient de réflexion S_{11} pour différents emplacements de slot suivant x

B)- Directivité et gain :

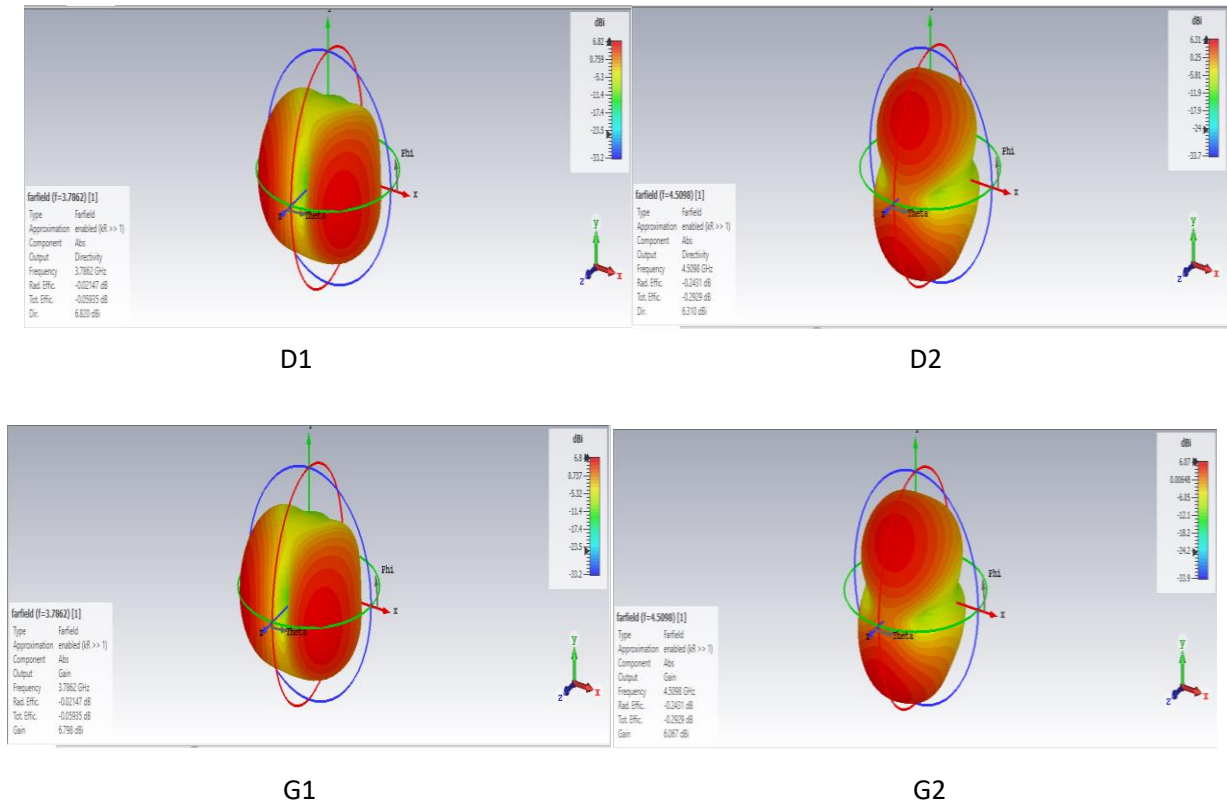


Figure 3.24 Directivités et gains pour l'emplacement du slot $x=-4$ mm

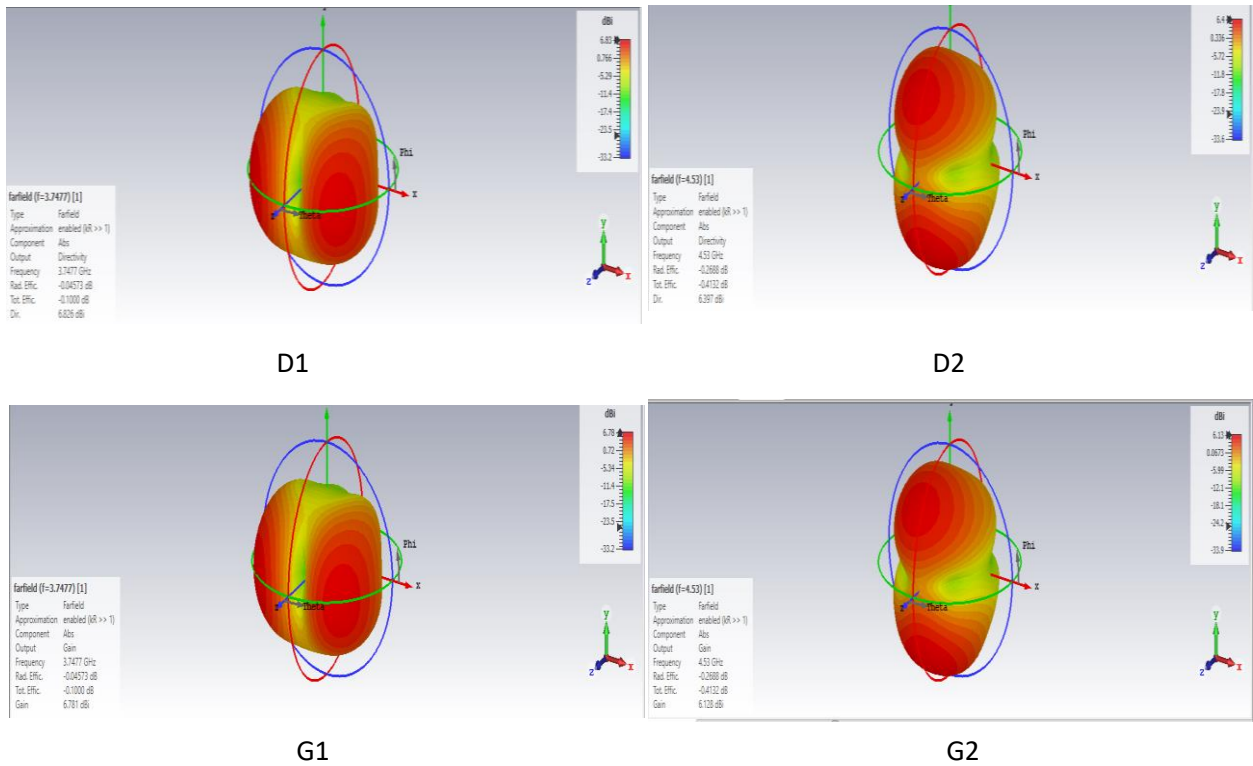


Figure 3.25 Directivités et gains pour l'emplacement du slot x=6mm

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
La gauche x=-4	3.7862	4.5098	1.21%	0.74%	-20.61	-19.43	6.82	6.31	6.8	6.07
Cas initiale x=0	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
La droite x=6	3.7477	4.53	1.18%	0.67%	-19.06	-14.85	6.83	6.4	6.78	6.13

Tableau 3.9 Caractéristiques de l’antenne microruban avec Slot en fonction l'emplacement du slot suivant x

A partir du Tableau 3.9 et les figures (3.23-3.24-3.25) On remarque :

- ✓ L'emplacement de slot suivant x influe sur toutes les caractéristiques de l’antenne (la fréquence de résonance, la bande passante, coefficient de réflexion S11, la directivité et le gain)

3.4.8 Effet de la variation de l'emplacement de slot suivante y :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

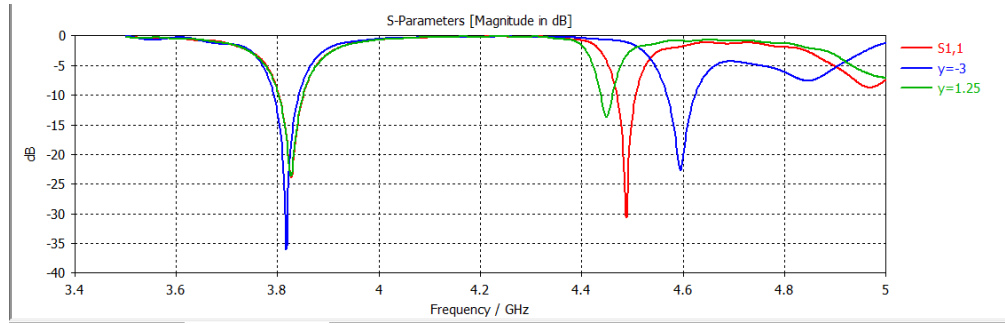


Figure 3.26 Coefficients de réflexion S_{11} pour différents emplacements du slot suivant y

B)- Directivité et gain :

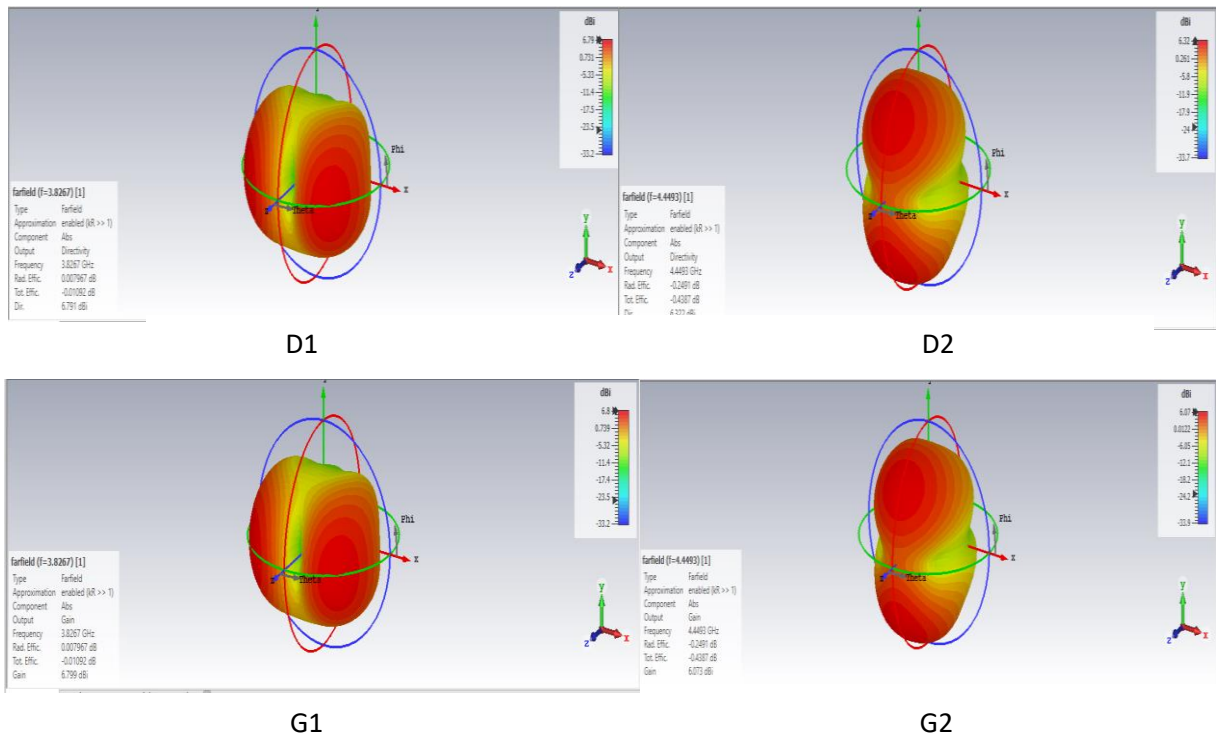


Figure 3.27 Directivités et gains pour l'emplacement du slot $y=1.25\text{mm}$

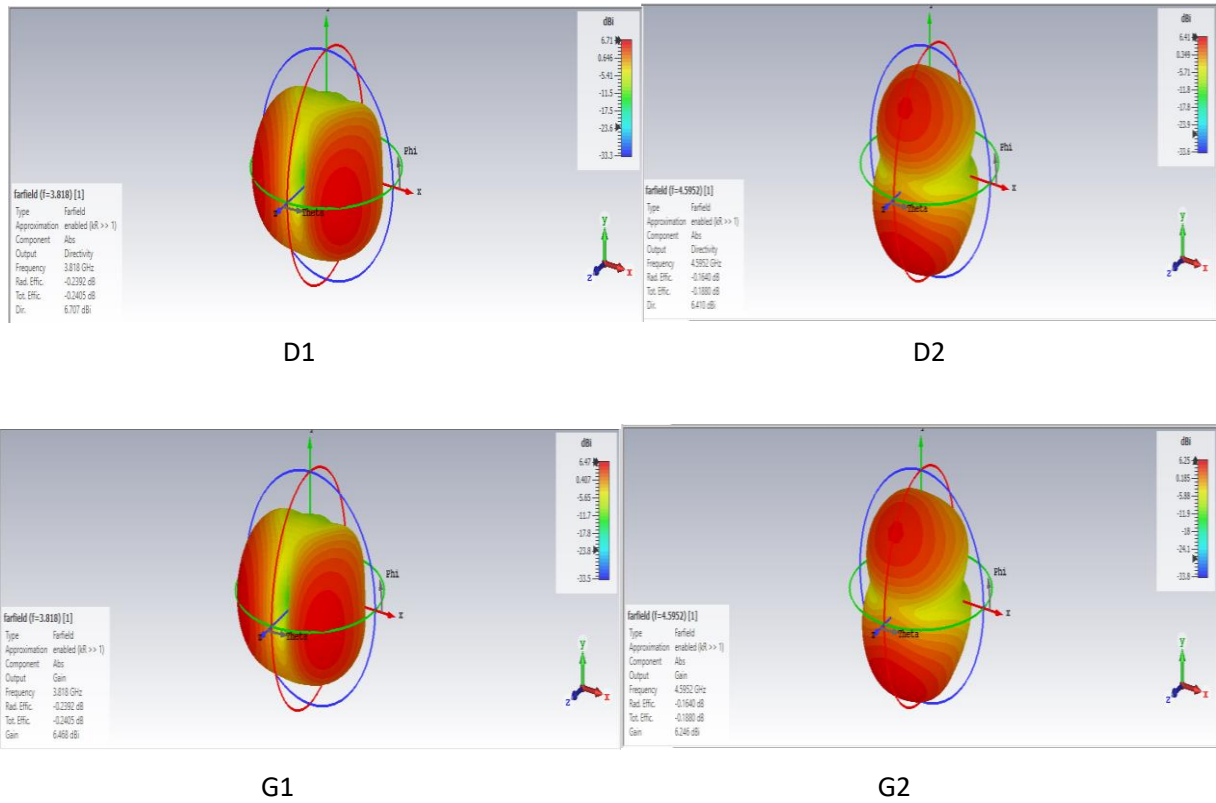


Figure 3.28 Directivités et gains pour l'emplacement du slot $y=-3\text{mm}$

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
Au haut $y=1.25$	3.8267	4.4493	1.25%	0.56%	-23.62	-13.69	6.79	6.32	6.8	6.07
Cas initiale $y=0$	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9
Au bas $y=-3$	3.818	4.5952	1.28%	1.2%	-35.41	-22.62	6.71	6.41	6.47	6.25

Tableau 3.10 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec slot en fonction son emplacement suivant y

A partir du Tableau 3.10 et les figures (3.26-3.27-3.28) on remarque :

- ✓ L'emplacement du slot suivant y influe sur toutes les caractéristiques de l’antenne (la fréquence de résonance, la bande passante, coefficient de réflexion S_{11} , la directivité et le gain)

3.5 Présentation de la structure avec FSS :

A l'origine, la technologie des Surfaces Sélectives en Fréquences (SSF, en anglais Frequency Selective Surfaces, FSS) faisait partie du domaine militaire. Aujourd'hui, les FSSs ont trouvé de nombreuses applications en électromagnétisme, micro-ondes, antennes, radar, et communications par satellite. En général leur analyse est faite pour des surfaces planes [3]

Nous avons pris une structure d'une antenne microbande à FSS c'est-à-dire en plus de la structure de base de l'antenne microbande page 43 nous avons ajouté une couche superstrat au-dessus dont la couche FSS est imprimée au-dessous de cette couche (La FSSs contient des motifs de matériau conducteur)

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
h : épaisseur du superstrat	1.6
largeur du FSS	62
longueur du FSS	86
L: Longueur de côté	16.67
A1: Longueur de la boucle carrée extérieure	13.50
R1: rayon de la bague extérieure	5.5
A2: Longueur de la boucle carrée intérieure	6.83
R2: rayon de l'anneau intérieur	2.165

Tableau 3.11 dimensions de la FSS

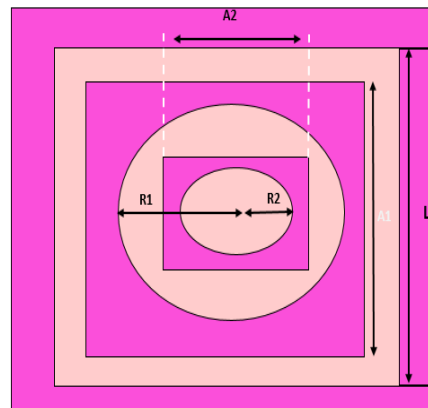


Figure 3.29 Cellule unitaire FSS

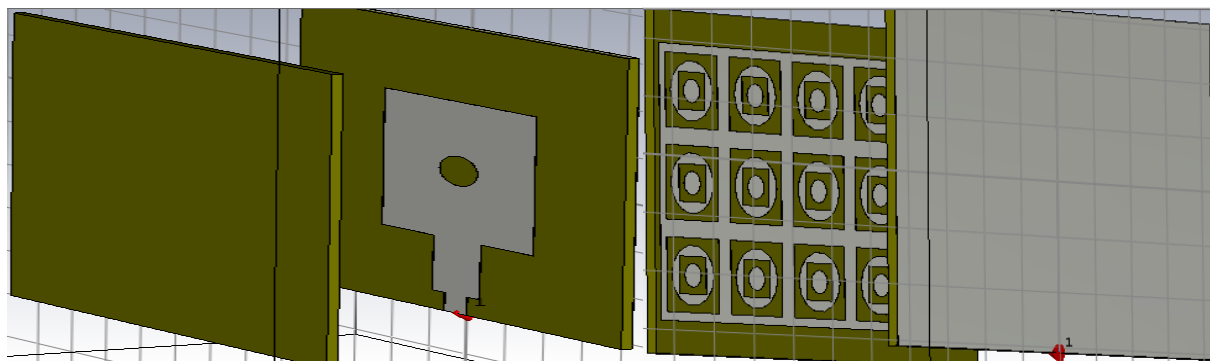


Figure 3.30 Antenne microruban bi-bande à FSS

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

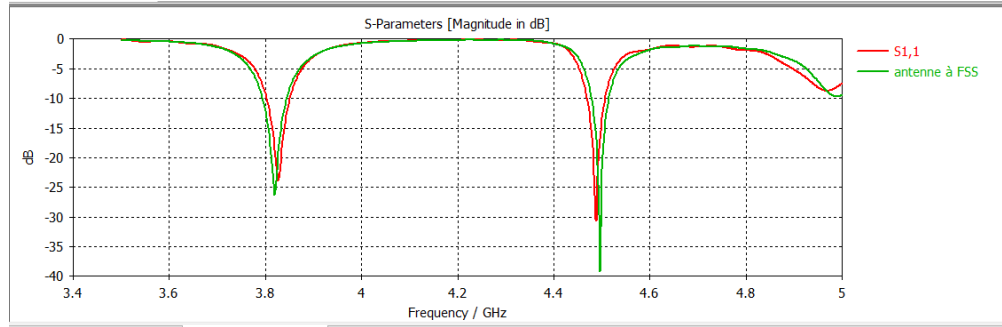


Figure 3.31 Coefficients de réflexion S_{11} pour antenne microruban rectangulaire avec slot et antenne microruban rectangulaire à FSS

B)- Directivité et gain :

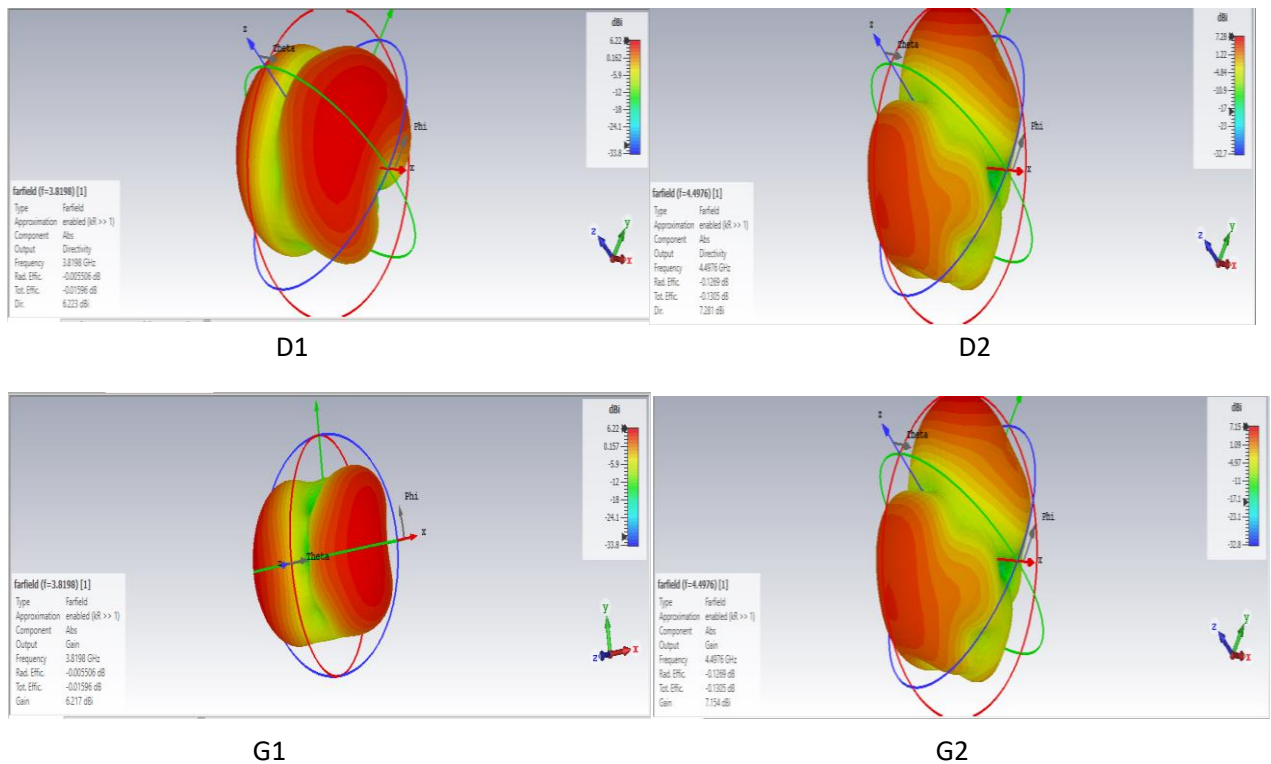


Figure 3.32 Directivités et gains pour antenne microruban à FSS

	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)	G_1 (dB)	G_2 (dB)
Antenn à FSS	3.8198	4.4976	1.30%	0.87%	-26.19	-37.71	6.22	7.28	6.22	7.15
Antenne avec slot	3.8271	4.488	1.25%	0.83%	-23.90	-30.59	6.78	6.14	6.75	5.9

Tableau 3.12 Caractéristiques de l’antenne micro ruban avec Slot en fonction l'emplacement du slot suivant y

A partir du Tableau 3.12 et les figures (3.32-3.33) On remarque :

- Les caractéristiques d'une antenne micro ruban à FSS sont mieux que celle d'une antenne sans FSS.

3.5.1 Effet de la variation de l'épaisseur H de superstrat:

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

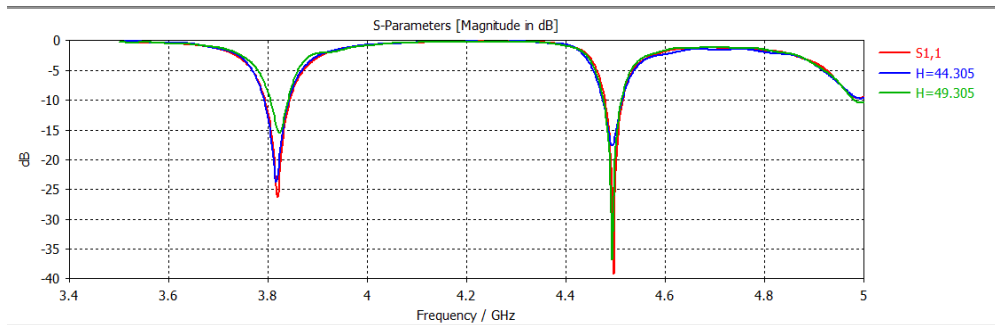


Figure 3. 33 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes épaisseurs du superstrat

B)- Directivité et gain:

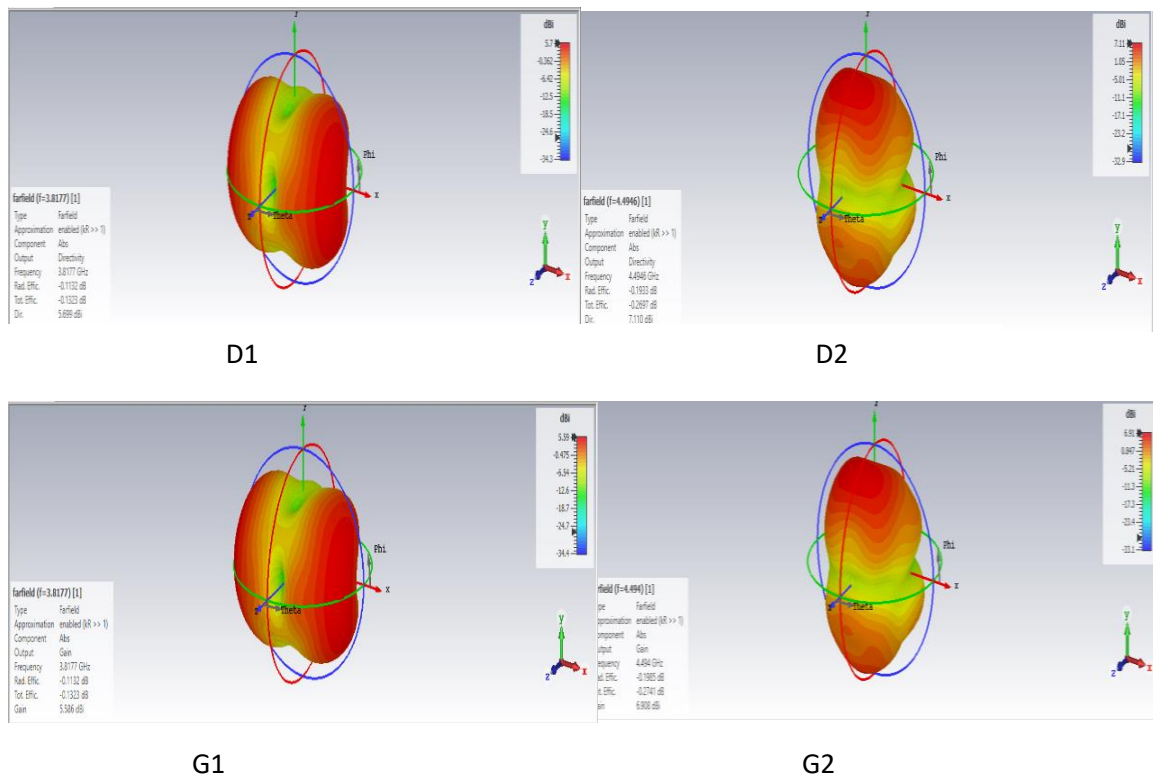


Figure 3.34. Directivités et gains pour l'épaisseur de superstrat H_1

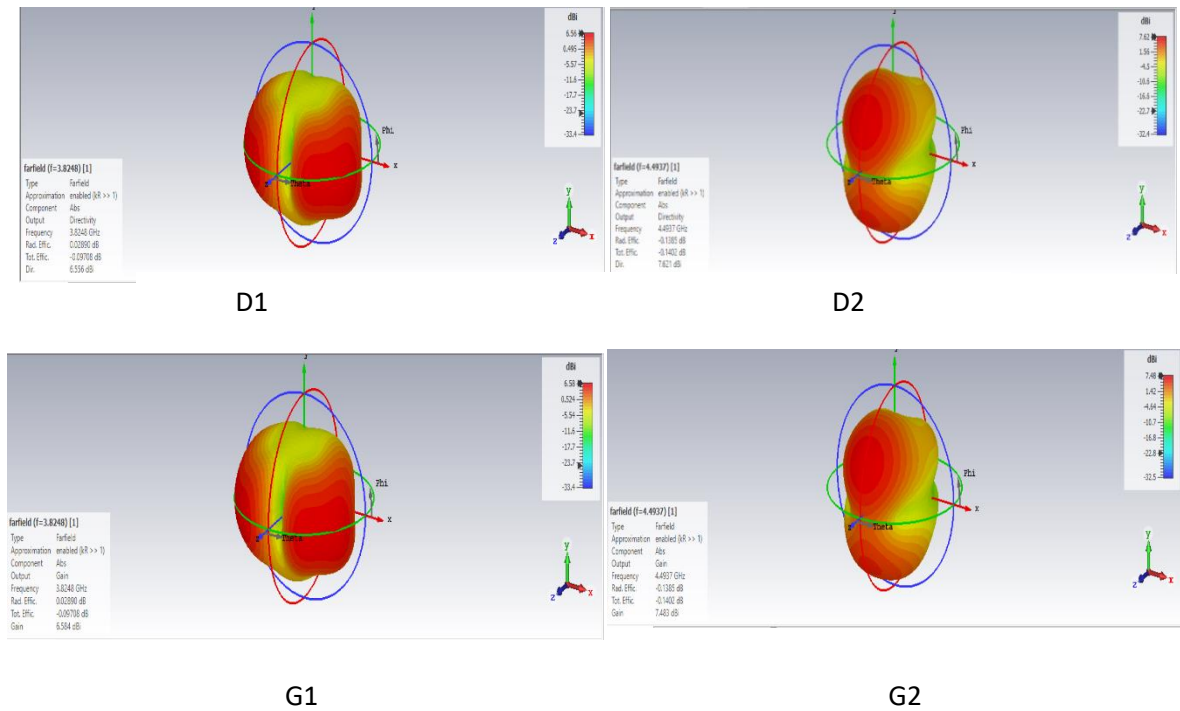


Figure 3.35 Directivités et gains pour l'épaisseur de superstrat H2

	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)	$G1$ (dB)	$G2$ (dB)
H1=44.350	3.8177	4.494	1.31%	0.87%	-23.56	-17.63	5.7	7.11	5.59	6.91
H initiale =45.305	3.8198	4.4976	1.30%	0.87%	-26.19	-37.71	6.22	7.28	6.22	7.15
H2=49.305	3.8248	4.4937	0.92%	0.81%	-15.43	-34.78	6.56	7.62	6.58	7.48

Tableau 3.13 Caractéristiques de l'antenne à FSS en fonction l'épaisseur du superstrat

A partir du Tableau 3.13 et les figures (3.34-3.35-3.36) On remarque :

✓ Pour la première fréquence: lorsque l'épaisseur de superstrat augmente, la fréquence de résonance, la directivité et le gain augmentent par contre la bande passante diminue et la variation du coefficient de réflexion est non uniforme.

✓ Pour la deuxième fréquence : la bande passante diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de superstrat et le gain augmente, par contre la variation de la fréquence de résonance, le coefficient de réflexion et la directivité est non uniforme.

3.5.2 Effet de la variation de la distance entre le patch et FSS :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

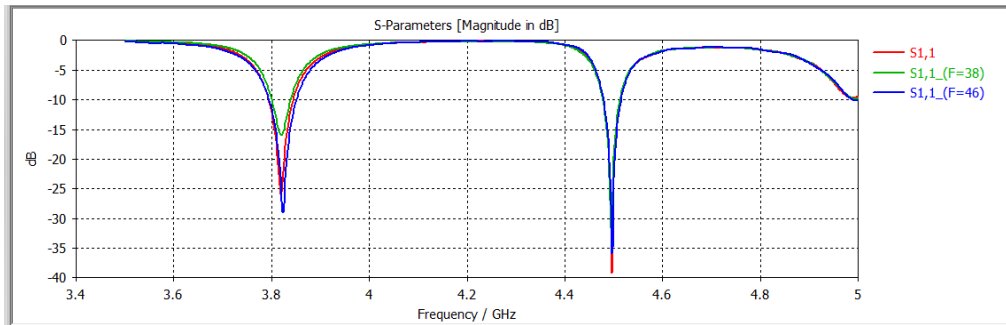


Figure 3.36 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes distance entre le patch et la FSS

B)- Directivité et gain :

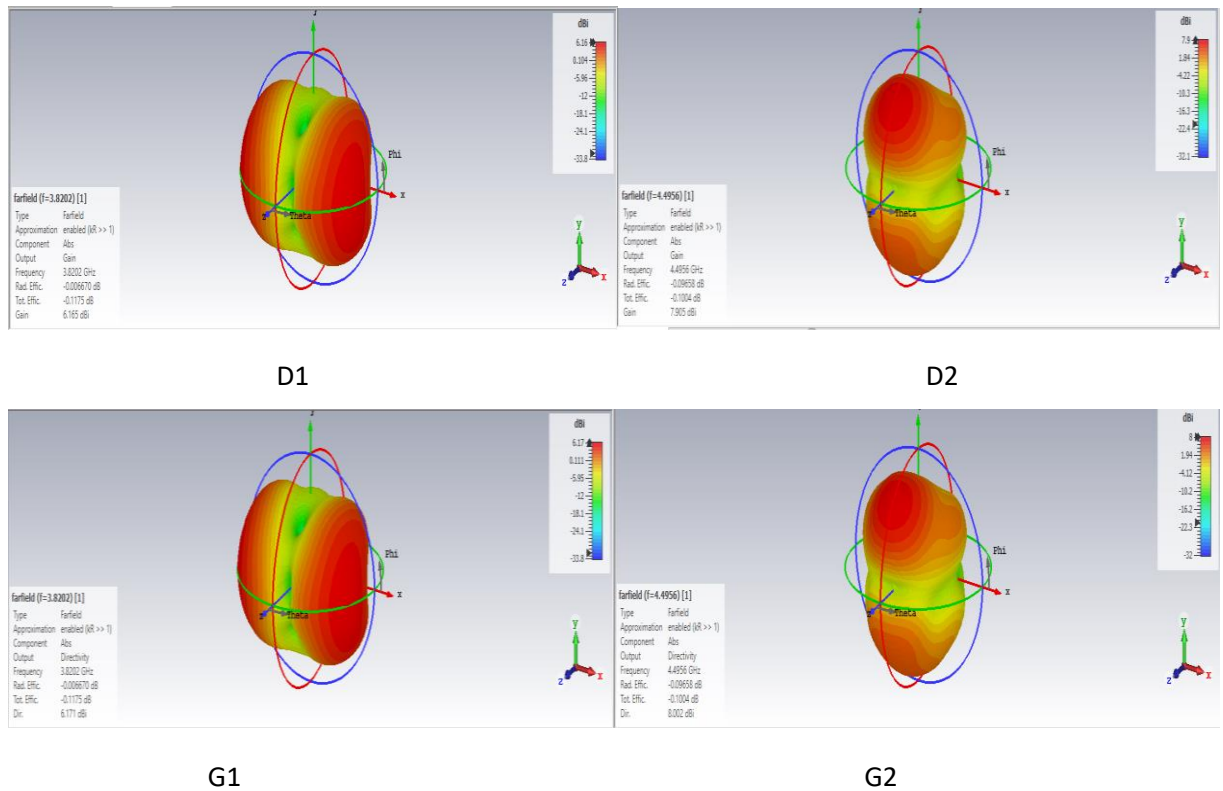


Figure 3.37 Directivités et gains pour une distance entre le patch et la FSS F=38mm

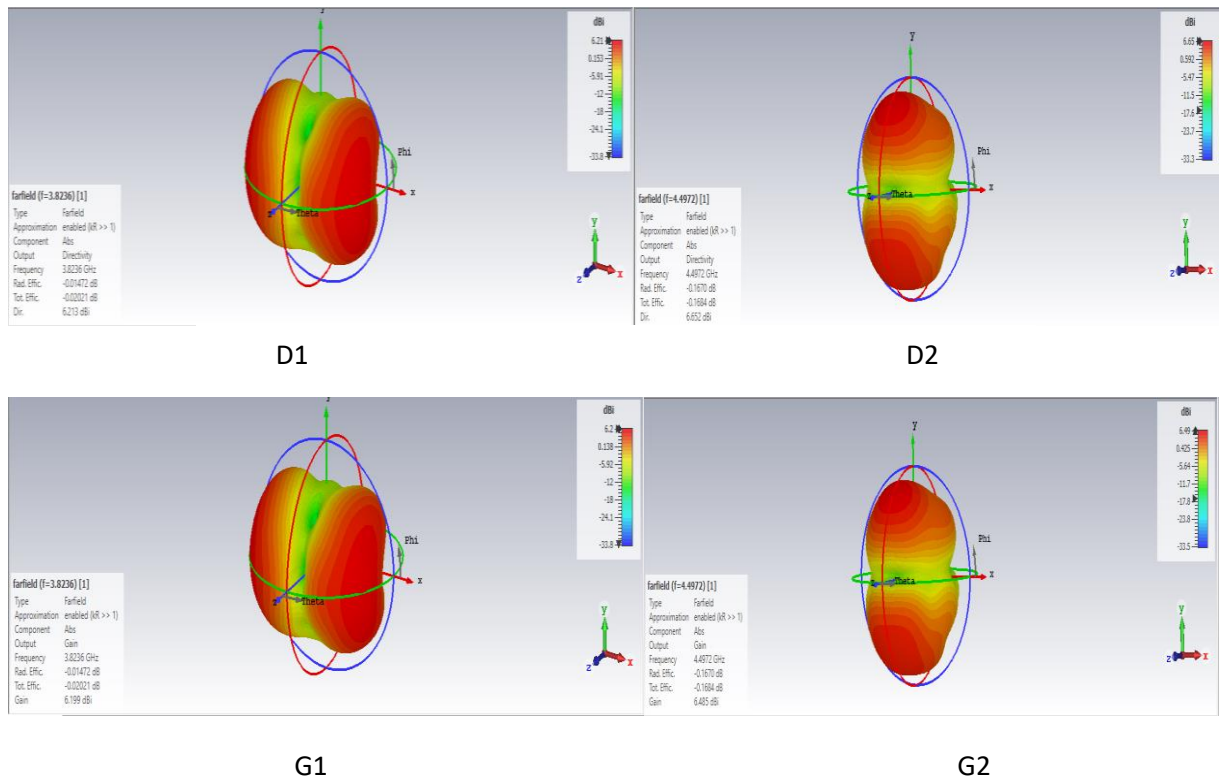


Figure 3.38 Directivités et gains pour la distance entre le patch et FSS F=46mm

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
F=38	3.8202	4.4956	1.02%	0.79%	-15.98	-30.54	6.17	8	6.16	7.9
F=42	3.8198	4.4976	1.30%	0.87%	-26.19	-37.71	6.22	7.28	6.22	7.15
F=46	3.8236	4.4972	1.46%	0.80%	-28.98	-35.08	6.21	6.65	6.2	6.49

Tableau 3.14 Caractéristiques de l’antenne à FSS en fonction de la distance entre le patch et la FSS

A partir du Tableau 3.14 et les figures (3.37-3.38-3.39) on remarque :

✓ Pour la première fréquence:la bande passante et le coefficient augmentent avec la distance F, par contre la variation de la fréquence de résonance, la directivité et le gain est non uniforme avec l’augmentation de distance F ;

✓ Pour la deuxième fréquence: la directivité et le gain diminuent avec l’augmentation de la distance F, le coefficient de réflexion, la variation de la bande passante et la fréquence de résonance est non uniforme.

3.5.3 Effet de la variation de la permittivité du superstrat ϵ_p :

A)- Coefficients de réflexion S_{11} :

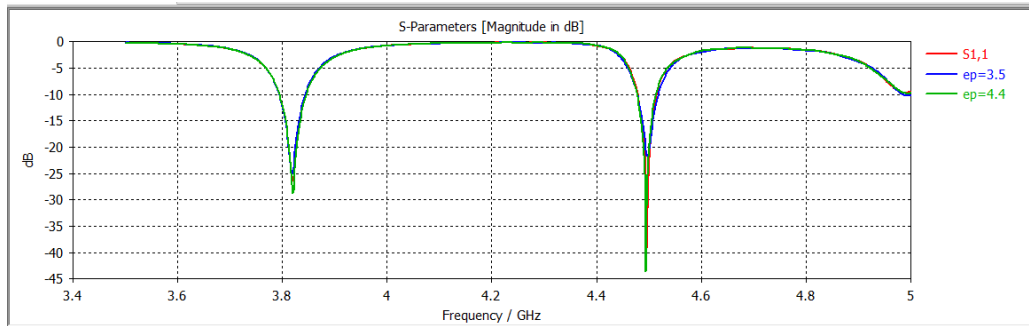


Figure 3.39 Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes permittivités du superstrat

B)- Directivité et gain :

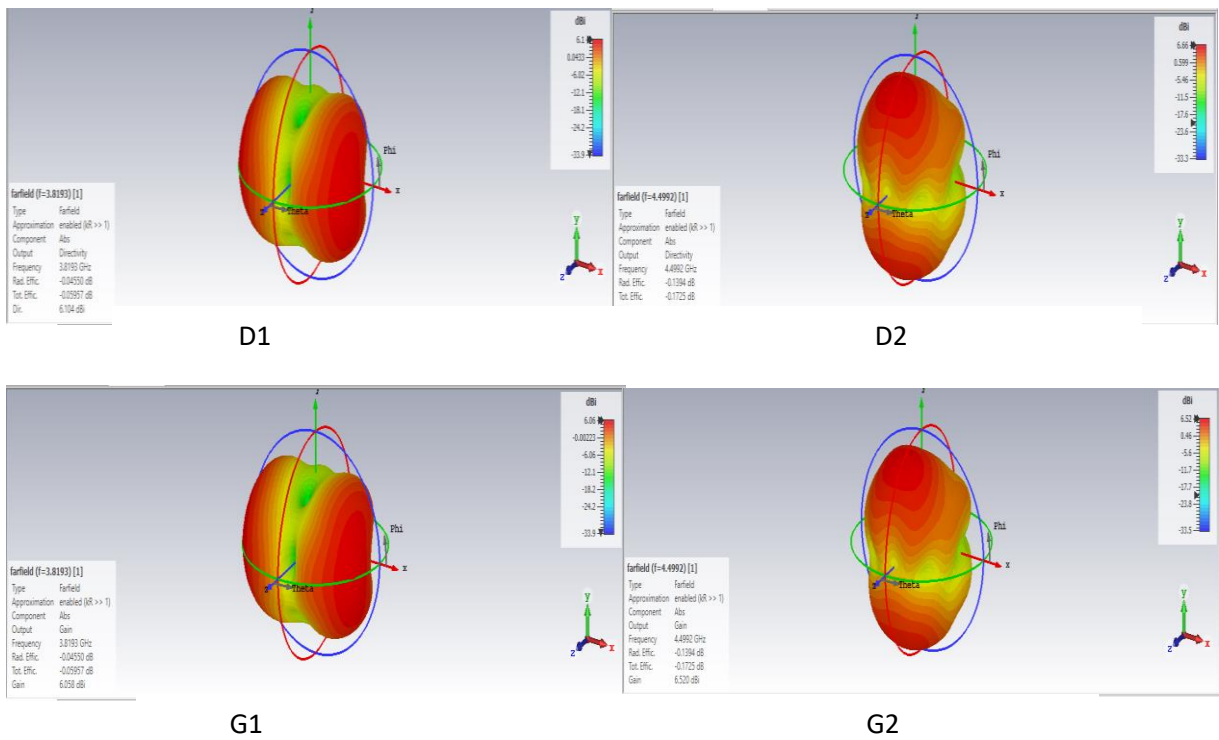


Figure 3.40 Directivités et gains pour une permittivité $\epsilon_p=3.5$

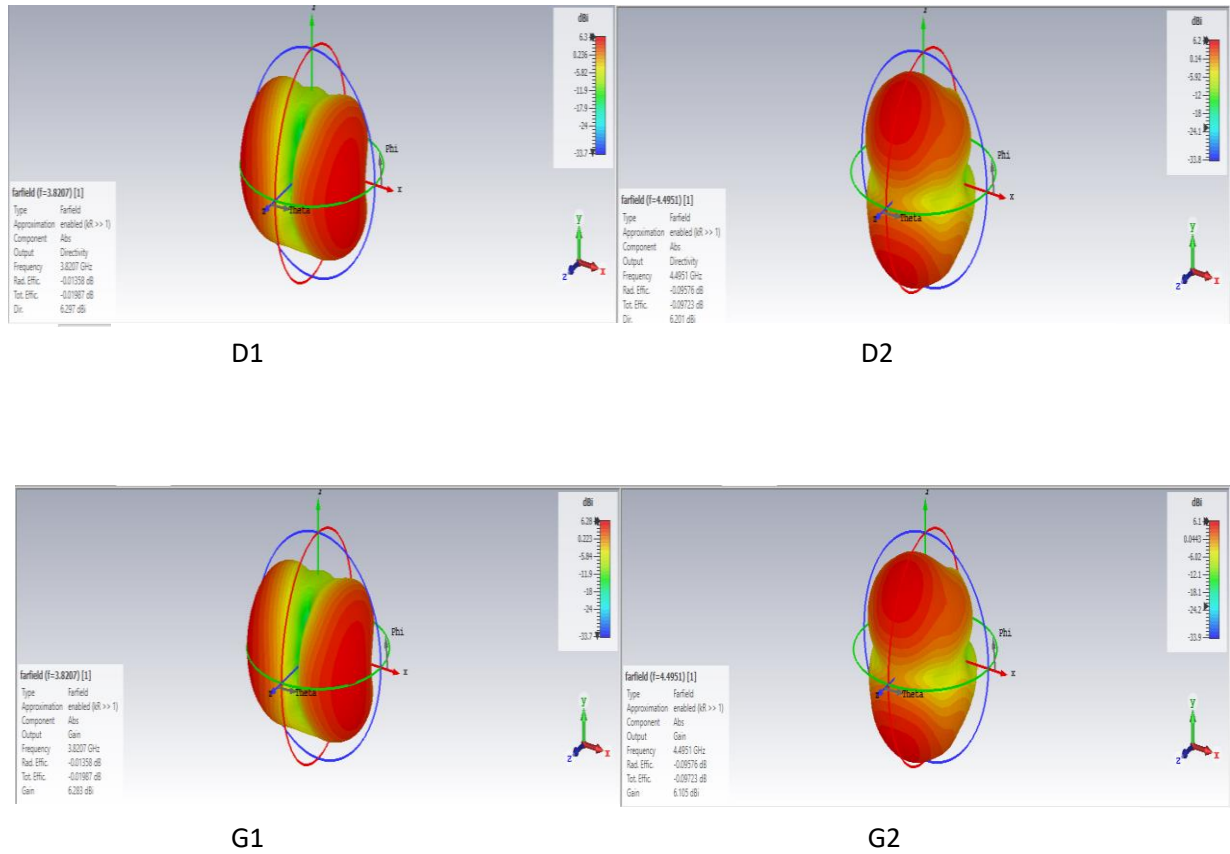


Figure 3.41 Directivités et gains pour permittivité $\epsilon_p=4.4$

	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)	G1 (dB)	G2 (dB)
Arlon AD 350A(loss free) Ep=3.5	3.8193	4.4992	1.30%	0.90%	-24.90	-21.19	6.1	6.66	6.06	6.52
Epoxy resin Ep =4	3.8198	4.4976	1.30%	0.87%	-26.19	-37.71	6.22	7.28	6.22	7.15
Preperm L440(loss free) Ep=4.4	3.8207	4.4951	1.35%	0.80%	-28.40	-39.01	6.3	6.2	6.28	6.1

Tableau 3.15 Caractéristiques de l’antenne à FSS en fonction permittivité du superstrat

A partir du Tableau 3.15 et les figures (3.40-3.41-3.42) On remarque :

- ✓ Pour la première fréquence: lorsque la permittivité augmente la fréquence de résonance, la bande passante, le coefficient de réflexion, la directivité et le gain est augmentent
- ✓ Pour la deuxième fréquence: Fréquence de résonance, la bande passante diminue avec l’augmentation de la permittivité par contre la variation du coefficient de réflexion, la directivité et le gain est non uniforme.

3.6. La « cinquième génération »:

L'expression « 5G » fait référence à la « cinquième génération » de communication cellulaire. Le « G » sert à décrire les générations de technologies de communication pour appareils cellulaires existantes ou à venir.

Il est validé par l'ITU, l'International Telecommunication Union et le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Il entre officiellement en vigueur en 2020.

La 5G est capable de fonctionner sur ondes millimétriques (un spectre à très haute fréquence situé entre 24 et 100 GHz), la largeur de spectre disponible pour la 5G signifiant que les données peuvent être transférées beaucoup plus rapidement qu'avec les technologies actuelles.

Avec elle, la transmission des données sur connexions haut débit sans fil pourrait atteindre, selon certaines estimations, une vitesse de 20 Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires, La bande de fréquences des 3,5 GHz (3,4 - 3,8 GHz) est celle qui sera utilisée en priorité pour le réseau mobile 5G. C'est la bande cœur de la 5G.



3.7. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié l'antenne micro rubane bi-bande rectangulaire avec slot sans et avec FSS (Frequency Selective Surface) qui est utilisé dans les application 5G , et nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physique de l'antenne: l'épaisseur ,la permittivité de la couche du substrat et du superstrat , dimension du patch ,dimension du slot et son emplacement sur la fréquence de résonance, la bande passante ,la coefficient de réflexion , la directivité et le gain.

Nous avons utilisé pour notre travail l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel (CST) qui intègre la simulation et la visualisation. À partir des résultats nous avons conclu:

A) - Pour la fréquence de résonance :

✓ La fréquence de résonance augmente avec la diminution de la longueur et la largeur de patch et l'épaisseur du substrat, mais diminue avec l'augmentation de la permittivité du substrat

✓ La fréquence de résonance varie avec la variation de la dimension du slot et son emplacement

B)-Pour la bande passante :

✓ la bande passante diminue lorsque la longueur de patch diminue et la permittivité est augment

✓ la bande passante augment avec l'augmentation du la largeur du slot

✓ la bande passante varie avec la variation de largeur de patch, l'épaisseur de substrat, longueur de slot et son emplacement

C)- Pour la directivité et le gain :

✓ la directivité et le gain diminue avec diminue de la largeur de patch

✓ la directivité et le gain varie avec la variation de la longueur de patch, l'épaisseur et la permittivité du substrat, la dimension du slot et son emplacement

La couche FSS :

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

✓ La fréquence de résonance varie avec la variation de l'épaisseur et la permittivité du superstrat et la distance entre le patches et FSS

✓ La bande passante diminue avec l'augmentation d'épaisseur du superstrat et varie pour la variation de permittivité du superstrat et la distance entre le patch et FSS

B)- Pour la directivité et le gain :

- ✓ La directivité et le gain augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur du superstrat ;
 - ✓ La directivité et le gain varient avec la variation de la permittivité du superstrat et la distance entre le patch et la FSS
- La présence de la FSS améliore le coefficient de réflexion et le gain.
 - Il n'y a pas une grande variation pour les autres caractéristiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Belgacem Nassima, Mémoire de fin d'étude de master académique: « Conception des Antennes PIFA mono-bande et multi-bande GSM, DCS, PCS, UMTS et WIFI » Université de Tlemcen, 2013
- [2] Thomas Weiland, "A discretization method for the solution of Maxwells équations for six-component Fields," Electronics and Communications AEU, Vol. 31, No. 3, 116–120, 1977
- [3] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00133825>

C
O
N
C
L
U
S
I
O
N
G
E
N
E
R
A
L
E

CONCLUSION GENERALE


Conclusion générale

Ce mémoire nous a permis d'étudier une antenne microruban BIE bi-bande (fonctionnant dans deux bandes) avec slot, de forme rectangulaire, le superstrat BIE est à base de FSS (Frequency Surface Selectifs).

Nous avons étudié l'influence des différents paramètres physiques et géométriques de l'antenne tel que (les dimensions du patch, l'épaisseur du substrat et du superstrat (FSS), dimensions et emplacement du slot, permittivité ϵ_r du substrat et du superstrat) sur les caractéristiques de l'antenne microruban : l'adaptation de l'antenne (S_{11}), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

Nous avons cité le principe de rayonnement de l'antenne microruban, ainsi que les avantages, les inconvénients et les domaines d'application de cette antenne. Après, nous avons défini les surfaces en fréquence sélectives (FSS) et ses différents types et leurs applications.

Afin d'étudier cette antenne microruban nous avons utilisé l'outil de simulation électromagnétique : le logiciel CST MICROWAVE STUDIO qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

Nous avons commencé par effectuer plusieurs simulations sous CST pour arriver à obtenir une antenne microruban rectangulaire fonctionnant dans la bande requise (5G), bien adaptée (on a cherché à obtenir le coefficient de réflexion le plus petit possible), après nous avons ajouté le slot (ouverture) à cette antenne microruban rectangulaire à substrat normale pour avoir deux bandes de fréquence (bi-bande), le slot est de forme elliptique «  » sur le plan du patch et pour avoir une adaptation presque parfaite, nous avons effectué plusieurs modifications aux différents paramètres de l'antenne.

Ensuite, nous avons ajouté une couche à FSS, qui est le but principal de notre travail, cette couche FSS, placée au-dessus du patch avec slot à une distance de $F = 42 \text{ mm}$, composé de (3×5) motifs, imprimées sur une couche superstrat.

Le dernier chapitre a été consacré à l'étude paramétriques d'une antenne microruban avec slot et avec et sans couche FSS, les résultats obtenus sont :

- Le slot est important pour avoir deux bandes de fréquences ;
- La fréquence de résonance augmente avec l'augmentation des dimensions du patch (la variation est inversement proportionnelle à la longueur et la largeur du patch), l'épaisseur du substrat et la largeur de slot ;

- La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de la permittivité ;
- Diminution de la directivité et du gain avec la diminution de la largeur du patch ;
- La directivité dépend de la longueur du patch, de l'épaisseur et la permittivité du substrat, ainsi que des dimensions du slot et son emplacement ;
- La bande passante s'élargie avec l'augmentation de la largeur du slot ;
- La bande passante diminue lorsque la longueur de patch diminue et la permittivité augmente ;
- L'emplacement du slot influe sur toutes les caractéristiques de l'antenne micro ruban.

Influence de la couche à FSS

- L'augmentation de l'épaisseur du superstrat diminue la bande passante et augmente la directivité et le gain ;
- La variation de la permittivité du superstrat et la distance entre le patch et la couche FSS influent sur la bande passante, la directivité, le gain et la fréquence de résonance ;

La distance entre le patch et la couche FSS ($f = 38mm$) donne une bonne directivité et gain.

En fin, on peut dire que la présence de la couche du FSS influe sur toutes les caractéristiques de l'antenne microruban, considérablement sur le coefficient de réflexion s_{11} et le gain.

