

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION (STLC)

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : HERIZI Radhia

HADJ MAKHLOUFI Ilhem

Intitulé

Etude d'une antenne micro ruban BIE-FSS

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. KAHLOUCHE Ahmed	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. KENANE ELHADI	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. DJELID Asma	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" رب اشرح لي صدري * ويسر لي

أمري * واحلل عقدة من لساني *

يفقهوا قولي "

(صدق الله العظيم)

سورة طه، الآيات: 25- 28

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a permis de mener à bien cette recherche scientifique et qui nous a inspiré santé, bien-être et la détermination. Nous remercions Dieu de nous donner la force et la volonté de surmonter toutes les difficultés.

Ensuite, nous exprimons nos remerciements et notre gratitude à notre enseignante et notre encadreur, Dr. Fadila BENMEDDOUR, qui nous a donné beaucoup de son temps, et pour sa générosité, son altesse de caractère et son style distinctif dans le suivi du mémoire ont eu le plus grand impact pour nous aider à terminer ce travail. Nous demandons à Dieu de la récompenser avec la meilleure récompense et d'écrire son acte dans la balance de ses bonnes actions, et nous avouons que nous avons de la chance de vous rencontrer et de travailler avec vous, mais nous n'avons pas trouvé d'expression adéquate pour vous remercier. Nous exprimons nos sincères remerciements à Dr. KENANE E. pour avoir accepté de nous aider à la réalisation de notre travail.

Nous exprimons notre gratitude aux membres du jury qui vont gracieusement examiné et étudié notre travail. Le devoir d'honneur nous appelle à exprimer nos remerciements à tous nos enseignants et professeurs du primaire à université, enseignants et administrateurs de la faculté de technologie, Département d'électronique, et nous adressons nos remerciements aux étudiants de la faculté de technologie et nos camarades du Département (spécialité : Télécommunications) pour la promotion 2020 / 2021.

Nous ne pouvons pas non plus oublier de remercier tous les travailleurs de l'Université de Mohamed Boudiaf, Pôle Universitaire, M'sila.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés et contribué à ce travail, même avec un mot gentil.

Grand Merci

Dédicaces

Loué soit Dieu, qui a illuminé mon chemin et m'a aidé le mieux, à la chose la plus précieuse que je possédais en ce monde, à qui était la raison de mon existence dans la vie, à celui qui a mis le paradis sous ses pieds, à qui Je me suis incliné avec révérence et appréciation, à qui j'espère être satisfaite, ma chère mère "ROUKHAI," que Dieu prolonge Sa vie.

A celui qui je dois la vie A celui qui a un grand cœur et la lumière de mes jours A celui qui m'a soutenu et qui a été une bougie allumée pour éclairer mon chemin, A qui j'ai des sentiments d'appréciation, de respect et de gratitude Mon cher père "DARRADJI" que Dieu prolonge sa vie.

A celle qui est la main droite, le support ferme qui ne bascule pas, et un morceau de la mère, ma tendre sœur "RAHEF".

A ceux qui ont été mon soutien A ceux qui m'ont accompagné dans mon parcours d'étude et ont été les meilleurs compagnons pour moi et m'ont aidé à porter les fardeaux de ce travail Je ne les oublie pas SAMI YOUNES, AHMMED YACINE, CHOUAIB, ABD EL NOUR (sa femme WIDAD et la petite fille de la maison, EMA ALLAH ROUKHAI).

A tous mes proches et mes amies à tous ceux qui pensent et cherchent à faire avancer les connaissances partout.

RADHIA HERIZI

اهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات و الصلاة و السلام على اشرف خلق الله سيدنا محمد عليه افضل الصلاة و ازكى التسليم و على اله و صحبه اجمعين.
الحمد لله الذي وفقنا للوصول الى هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه و بفضلته تعالى مهداة الى :

"وَإخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيْنِي صَغِيرًا"

سورة الاسراء الآية 24

الوالدين الكريمين حفظهما الله وأدامهما نورا لدربي و رعاهما وأطال في عمرهما
الى اخوتي و اختي الكتكوت الصغيرة مرام و الى رفيقة المشوار الزميلة و الصديقة
حريزي راضية حفظها الله و رعاها و الى جميع الاصدقاء و الزملاء.
الى جميع اساتذتي الذين غمرونا بالحب و التقدير و النصيحة و التوجيه و خاصة استاذتنا
المشرفة علينا " د. بن مدور فضيلة " التي سهلت لنا طريق العمل و لم تبخل علينا
بنصائحها القيمة و الى جميع اساتذة قسم الإلكترونيك.

الى كل من كان لهم اثر على حياتي

الى جميع من يعرف الهام

إلهام حاج مخلوفي

Table de Matières

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicaces</i>	ii
<i>اهداء</i>	iii
Table de Matières	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
<i>Liste des Abréviations</i>	xi
<i>ملخص</i>	xiii
Résumé	xiii
Abstract	xiii

Introduction Générale

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

CHAPITRE I Généralité sur les antennes BIE

I.1. Introduction.....	5
I.2. Les antennes existantes	5
I.3. Antennes directives	6
I.3.1. Propriétés des antennes directives.....	6
I.3.2. Principales antennes directives.....	9
I.3.2.1. Les réseaux d'antennes	9
I.3.2.2. Les antennes à ouverture rayonnante.....	10
I.4. Antenne à résonateur BIE directive	10
I.4.1. Matériaux BIE	11
I.4.2. Conception de l'antenne BIE	11
I.4.2.1. Structures BIE sans défaut.....	11
I.4.2.2. Structures BIE avec défaut	12
I.5. Historique et définition des matériaux BIE	12
I.5.1. Bref Historique	12
I.5.2. Définitions et propriétés des matériaux BIE	14
I.5.2.1. Réseaux unidimensionnels 1D.....	15
I.5.2.2. Réseaux bidimensionnels 2D.....	15
I.5.2.3. Réseaux Tridimensionnels 3D	16
I.6. Comportements électromagnétiques	17
I.6.1. Structures diélectriques	17

I.6.2. Structures métalliques :	18
I.7. Caractéristiques des matériaux BIE	19
I.8. Principe de fonctionnement de l'antenne BIE	20
I.8.1. Les structures métalliques à base de FSS	20
I.9. Application les matériaux BIE	21
I.9.1. Fréquences optiques	21
I.9.2. Domaine des fréquences	22
I.10. Conclusion	23
BIBLIOGRAPHIE	24

CHAPITRE II Antennes Patch à FSS

II.1. INTRODUCTION	28
II.2. Description des antennes Patches a FSS	28
II.3. Les différentes formes du patch	29
II.4. Critères de Choix des Substrats	30
II.5. Caractéristiques de l'antenne patch	30
II.6. Différentes techniques d'alimentation	34
II.6.1. Alimentation par contact	34
II.6.1.1. Alimentation par ligne micro-ruban	34
II.6.1.2. Alimentation par sonde coaxiale	35
II.6.2 : Alimentation par proximité	35
II.6.2.1. Alimentation par fente	35
II.6.2.2. Alimentation par couplage de proximité	36
II.7. Mécanismes de Rayonnement de l'Antenne Patch Rectangulaire	37
II.8. Avantages et Limitations des Antennes Patches à FSS	38
II.9. Les Applications des Antennes Patches à FSS	38
II.10. Surface sélective en fréquence (FSS)	39
II.11. Définition des surfaces sélectives en fréquence FSS	39
II.12. Les structures des FSS	40
II.12.1. La propagation dans les structures périodiques	40
II.13. Différents types de FSS	40
II.13.1. Les FSSs à motifs gravés	40
II.13.1.1. Influence des différents paramètres intervenant dans une FSS à motif gravé	41
II.13.1.2. Différentes variantes des FSSs à motif gravé	41
II.13.2. Les FSSs à grille (de type ouvertures)	41

II.13.2.1. Différentes variantes des FSSs à grille.....	42
II.14. Les Applications des FSS	44
II.14.1. Applications des FSS dans les antennes Fabry-Pérot double-bande	44
II.14.2. Applications des FSS dans les antennes Fabry-Pérot pour l'amélioration de la bande de gain $3 - dB$	45
II.14.3. Application des FSS dans les antennes d'irradiation du secteur Fabry-Pérot	45
II.15. Conclusion	46
BIBLIOGRAPHIE	47

CHAPITRE III Simulations et Discussions

III.1. Introduction	51
III.2. Présentation générale du simulateur CST MWS.....	51
III.3. La technologie 5G	51
III.3.1. les avantages des fréquences de la 5G	52
III.4. Antenne patch rectangulaire bi-bande.....	52
III.4.1. Description de l'antenne patch à substrat normal.....	52
III.4.2. Antenne patch rectangulaire bi-bande à substrat normal avec et sans slot « \sqsubset »..	53
III.4.3. Comparaison entre une antenne patch avec slot à substrat BIE et normal	57
III.4.4. Effet de la variation de l'épaisseur du substrat d'une antenne avec slot	59
III.4.5. Effet de la variation de la largeur et la longueur du patch	61
III.4.5.1. La largeur du patch	61
III.4.5.2. La longueur du patch	64
III.4.6. Effet de la variation de la permittivité du substrat.....	66
III.4.7. Effet de la variation de la position de slot	68
III.4.8. Effet de la variation des surfaces du slot	70
III.5. Couche sélective surface en fréquence (FSS)	72
III.5.1. Comment Simuler Une Couche FSS	72
III.5.2. Effet de la couche FSS.....	74
III.5.3. Effet de la variation dans la distance F	76
III.5.4. Effet de la variation dans les permittivités du superstrat.....	78
III.5.5. Effet de la variation de l'épaisseur du superstrat.....	80
III.6 . Conclusion.....	82
BIBLIOGRAPHIE	83

Conclusion Générale

Conclusion générale	85
---------------------------	----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

<i>Figure I.1</i> : (a) un diagramme de rayonnement directif (b) un diagramme de rayonnement omnidirectionnel. (c) un diagramme de rayonnement sectoriel	6
<i>Figure I.2</i> : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch.	8
<i>Figure I.3</i> . Exemples d'antennes réseaux, (a) réseau de patch, (b) réseau de fentes,	9
<i>Figure I.4</i> . réflexion sur l'antenne BIE	11
<i>Figure I.5</i> . (a) matériau BIE diélectrique 1D périodique suivant l'axe z.	11
<i>Figure I.6</i> . Structures BIE sans défaut	12
<i>Figure I.7</i> . Structures BIE à défaut.....	12
<i>Figure I.8</i> . Réflexion et transmission sur un miroir de Bragg.....	14
<i>Figure I.9</i> . Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D.....	15
<i>Figure I.10</i> . Structure 1D et son diagramme de dispersion.....	15
<i>Figure I.11</i> . Exemples De Différents Réseaux 2D	16
<i>Figure I.12</i> . Différentes Structures 3d Comme (1) La Structure Cubique, (2) Le Tas De Bois, (3) La Structure Multicouches, (4) Les Opales Ou Opales Inversées,	16
<i>Figure I.13</i> . Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D.	18
<i>Figure I.14</i> . Coefficient de transmission d'une structure BIEM.....	19
<i>Figure I.15</i> . Antenne BIE.	20
<i>Figure I.16</i> . Motifs élémentaires pouvant constituer une FSS	21

CHAPITRE III

<i>Figure II.1</i> . Structure d'une antenne imprimée.	29
<i>Figure II.2</i> . Onde incidente partiellement réfléchiée par une FSS.	29
<i>Figure II.3</i> . Différentes formes du patch.....	30
<i>Figure II.4</i> . Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion.	31
<i>Figure II.5</i> . Représentation du coefficient de réflexion S_{11}	32
<i>Figure II.6</i> . Formes typiques de diagramme de rayonnement.	33
<i>Figure II.7</i> . Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.....	33
<i>Figure II.8</i> . Alimentation par ligne micro-ruban.	35
<i>Figure II.9</i> . Alimentation par sonde coaxiale.....	35
<i>Figure II.10</i> . Alimentation par fente	36
<i>Figure II.11</i> . Alimentation par couplage de proximité.	36
<i>Figure II.12</i> . Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.	37
<i>Figure II.13</i> : Antenne Patch à FSS.	40
<i>Figure II.14</i> . Surface Sélective en Fréquence constituée d'une couche métallique.....	42
<i>Figure II.15</i> . Surface Sélective en Fréquence constituée de deux couches métalliques ayant des ouvertures arbitraires.	42
<i>Figure II.16</i> . Surface Sélective en Fréquence constituée d'une seule couche métallique ayant plusieurs ouvertures dans la cellule élémentaire	43

Figure II.17. Surface Sélective en Fréquence constituée d'une couche de métal avec des ouvertures échelonnées	43
Figure II.18. Principe de la phase inversée (a) deux couches de diélectrique, (b) phase inversée, (c) directivités	44
Figure II.19. Croissance de phase (a) Couches de diélectrique, (b) Magnitude et phase de réflexion, (c) directivité.....	45
Figure II.20. Antenne Fabry-Pérot avec rayonnement sectoriel (a) forme planaire, (b) forme cylindrique.....	46

CHAPITRE III

Figure III.1. Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne patch rectangulaire à substrat normal sans (en rouge) et avec slot	54
Figure III .2. Directivité D_1 en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal (sans slot).....	55
Figure III .3. Directivité $D_1 D_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot.....	55
Figure III. 4. Gain G_1 en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal.....	55
Figure III .5. Gain $G_1 G_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot	56
Figure III .6. Coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne avec slot à substrat BIE et substrat normal.....	57
Figure III .7. Directivité $D_1 D_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire avec slot à substrat BIE	57
Figure III .8. Directivité $D_1 D_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire avec slot	58
Figure III .9. Gain $G_1 G_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire BIE.....	58
Figure III .10. Gain $G_1 G_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire avec slot	58
Figure III.11. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents épaisseurs du substrat.....	59
Figure III.12. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1 = 2.024 mm$	59
Figure III.13. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.224 mm$	60
Figure III.14. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1 = 2.024 mm$	60
Figure III.15. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.224 mm$	60
Figure III .16. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents largeurs du patch	61
Figure III.17. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une largeur de patch $W_1 = 66mm$	62
Figure III.18. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une largeur de patch $W_2 = 74mm$	62
Figure III.19. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une largeur de patch $W_1 = 66mm$	62
Figure III.20. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une largeur de patch $W_2 = 74mm$	63
Figure III.21. Coefficient de réflexion S_{11} pour longueur du patch	64
Figure III .22. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une la longueur $L_1 = 46 mm$	64
Figure III .23. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une la longueur $L_2 = 36 mm$	64
Figure III .24. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une la longueur $L_1 = 46 mm$	65
Figure III .25. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une la longueur $L_2 = 36 mm$	65
Figure III.26. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents matériaux du substrat (ϵ_r).....	66
Figure III.27. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour Paper (oil impregnated) $\epsilon_r = 3.87$	66

Figure III.28. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour G-10 (loss free) $\epsilon_r = 4.8$	67
Figure III.29. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour Paper (oil impregnated) $\epsilon_r = 3.87$	67
Figure III.30. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour G-10 (loss free) $\epsilon_r = 4.8$	67
Figure III. 31. Coefficient de réflexion S_{11} pour variation de la position du slot.	68
Figure III.32. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la position de slot à la coté droite.	69
Figure III.33. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la position de slot à la côté gauche.	69
Figure III.34. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour la position de slot à la coté droite.	69
Figure III.35. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour la position de slot à la côté gauche.	70
Figure III.36. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents surface du slot.	70
Figure III.37. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour différents surface du slot $S = 26mm^2$	71
Figure III.38 : Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour surface du slot $S = 38mm^2$	71
Figure III.39. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour surface du slot $S = 26mm^2$	71
Figure III.40. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour surface du slot $S = 38mm^2$	72
Figure III.41. Les motifs de la couche FSS.	73
Figure III.42. Antenne patch a FSS.	74
Figure III.43. Coefficient de réflexion S_{11} pour antenne patch avec slot simple et antenne patch avec slot à FSS.....	74
Figure III.44. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 50mm$	75
Figure III.45. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 50mm$	75
Figure III.46. Coefficient de réflexion S_{11} pour varier dans F	76
Figure III.47. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 55mm$	76
Figure III.48. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 42mm$	77
Figure III.49. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 55mm$	77
Figure III.50. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour la couche FSS $F = 42mm$	77
Figure III.51. Coefficient de réflexion S_{11} pour la permittivité du superstrat ϵ_r	78
Figure III.52. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour Quartz (Fused)(lossy) $\epsilon_r = 3.75$	78
Figure III.53. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour Arlon AD 4305(lossy) $\epsilon_r = 4.3$	79
Figure III.54. gain $G_1 G_2$ en 3D pour Quartz (Fused)(lossy) $\epsilon_r = 3.75$	79
Figure III.55. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour Arlon AD 4305(lossy) $\epsilon_r = 4.3$	79
Figure III.56. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents l'épaisseur du superstrat h	80
Figure III.57. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pou différents l'épaisseurs du superstrat h_1	81
Figure III.58. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour l'épaisseur du superstrat h_2	81
Figure III.59. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour l'épaisseur du superstrat h_1	81
Figure III.60. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour différents l'épaisseurs du superstrat h_2	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.III.1. Dimensions de l'antenne patch rectangulaire à substrat normal	53
Tableau III .2. La structure d'antenne patch rectangulaire à substrat normal avec et sans slot	54
Tableau III.3. Caractéristiques de l'antenne patch rectangulaire à substrat normal avec et sans slot.	56
Tableau III.4. Antenne substrat BIE et antenne avec slot	59
Tableau III.5. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de l'épaisseur du substrat.	61
Tableau III.6. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la largeur du patch	63
Tableau III.7. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la longueur du patch.	65
Tableau III.8. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la permittivité du substrat.	68
Tableau III.9. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la position du slot	70
Tableau III.10. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la surface du slot.	72
Tableau III.11. Caractéristiques et dimensions du motif.....	74
Tableau III.12. Antenne patch avec slot à FSS et antenne patch avec slot.	75
Tableau III.13. Caractéristique de l'antenne patch à FSS en fonction de la variation du F... ..	78
Tableau III.14. Caractéristique de l'antenne patch à FSS en fonction de la permittivité du superstrat.	80
Tableau III.15 : Caractéristique de l'antenne patch avec slot à FSS en fonction de l'épaisseur du superstrat.	82

Liste des Abréviations

CHAPITRE I

- **BIE** : Bande Interdite Électromagnétique.
- **BIP** : Bande Interdite Photonique.
- **LHM** : Left-Handed Material (matériau main gauche).
- **GPS** : Globale Position System.
- **1D, 2D,3D** : Une, Deux, Trois Dimensions.
- **TE** : Champ Electrique Parallèle Aux Barreaux De La Structure.
- **TM** : Champ Electrique Perpendiculaire Aux Barreaux.
- **CFC** : Cubique à Face Centrée (CFC).
- **FDTD** : Finité Différence Time Domain.
- **S₂₁** : Coefficient de Transmission.
- **BIEM** : Bande Interdite Électromagnétique Métallique.
- **PRS** : Surfaces Partiellement Réfléchissantes.
- **PEC** : Perfect Electric Conductor (conducteur électrique parfait).
- **FSS** : Fréquence Sélective Surface.
- **WDM** : Wavelength Division Multiplexing.

CHAPITRE II

- **FSS** : Surface Sélective En Fréquence
- **FSS 3D** : Surface Sélective En Fréquence 3 Dimensions.
- **VSWR** : Voltage Standing Wavre Radio (Rapport d'onde stationnaire de tension).
- **TOS** : Taux D'onde Stationnaire
- **MMIC**: Microwave Monolithic Integrated Circuit.
- **TE** : Transverse Electric
- **TM** : Transverse Magnetic.
- **RF** : radiofréquence
- **θ et φ** : (Angle De Site : Plan Vertical) et (Angle D'azimut : Plan Horizontal).
- **1D, 2D, 3D** : Une, Deux, ou Trois Dimensions.
- **SSF** : Surfaces Sélectives en Fréquence.

CHABITRE III

- **CST** : Computer Science Technology.

- **MWV** : MICROWAVE STUDIO.
- **5G** : Cinquième Génération.
- **FIT** : Technique Intégration Finis.
- **IMT** : Télécommunication Mobile International.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه المذكرة هو معالجة تقنية الهوائي المطبوع بطريقة دقيقة، ومعرفة الخصائص المأثرة فيه من أجل تحقيق الاداء الذي يمكن ان يوفره في مجال الاتصالات.

هذه المذكرة مخصصة بشكل اساسي لدراسة وتصميم هوائي دقيق BIE-FSS، بواسطة برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST الذي يعتمد على طريقة التكاملات المنتهية، ليتم تطبيقه على الهوائيات من اجل تحسين الاداء.

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

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est d'aborder la technologie des antennes imprimées de manière précise et de connaître les caractéristiques qui y sont affectées et afin d'atteindre les performances qu'elles peuvent fournir pour les communications mobiles.

Ce mémoire est principalement consacré à l'étude et la conception de l'antenne patch BIE-FSS à l'aide du programme de simulation électromagnétique CST qui dépend de la méthode des intégrales finies à appliquer aux antennes afin d'améliorer leurs performances.

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

Abstract

The main objective of this work is to study the technology of the micro strip antennas in a precise way and to know the characteristics which are affected there, and in order to achieve the performances which it can provide for the mobile communications.

This work is mainly devoted to the study and design of the BIE-FSS patch antenna using the CST electromagnetic simulation program which depends on the finite integrals method to be applied to the antennas in order to improve their performance.

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

Introduction Générale

Introduction générale

À travers des siècles, l'homme a cherché inlassablement à développer des moyens de communication. Après l'invention de l'électricité, il a réfléchi à la manière de la développer pour en bénéficier dans le domaine de la communication, le développement technologique a donné un grand intérêt à ce domaine, jusqu'à ce que les réseaux de communication interviennent dans divers domaines d'applications.

Au début, les communications filaires ont vu le jour et comprenaient des fils, des fibres optiques et des câbles coaxiaux jusqu'à ce qu'on atteigne les communications sans fils.

Les communications sans fils terme large qui comprend toutes les procédures et formes d'une communication entre deux ou plusieurs appareils utilisant un signal sans fil. D'autre part, il peut être classé en communications sans fil guidées et communications sans fil non guidées.

Les communications sans fil guidées, reposent sur des antennes directives, et à titre d'exemple simple, dans le réseau de téléphonie mobile. L'utilisation de ces antennes présente de nombreux avantages, notamment :

- Elles contribuent à réduire le bruit et les interférences entre les fréquences ;
- La direction contribue à réduire la puissance de l'émetteur car elle est spécifique et non aléatoire ;
- Grande intimité.

De là commence la course vers le domaine des antennes, qui a connu une grande croissance au cours des récents progrès. Les utilisateurs ont tendance à recourir à des appareils légers, compacts et peu encombrants à faible coût. Ces spécifications s'appliquent aux antennes BIE car elles répondent aux exigences d'une zone relativement plus mince contrairement à de nombreuses autres antennes.

Le but de notre travail est d'étudier et de concevoir une antenne bi-bandes BIE et à FSS qui présente de nombreux avantages.

Nous avons divisé notre mémoire en trois chapitres :

Nous avons consacré **le premier chapitre** à une présentation générale des antennes BIE, avant de nous y lancer, qui peuvent être utilisées pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques, comme on l'appelle le milieu de transition entre espace et dispositifs dirigés. Son histoire remonte à James Clark Maxwell, avec ses équations, et des théories du magnétisme qui ont été développées. Nous mentionnerons également les antennes existantes

et mettrons en évidence ses caractéristiques et ses types. Nous donnons une grande part aux antennes BIE directives.

Dans Le **deuxième chapitre** nous avons présenté l'antenne patch (micro ruban) à FSS, qui est constitué de l'antenne patch au-dessous d'un superstrat qui contient la couche FSS, cette dernière est constituée d'un ensemble de motifs. Apparue au début des années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970, qui étaient principalement destinées à des applications militaires. Mais aujourd'hui il est implanté dans de nombreux appareils électroniques à micro-ondes.

Quant au **troisième chapitre**, il est consacré à la présentation des résultats et différentes simulations. Nous avons utilisé le programme de simulation électromagnétique CST que nous allons le décrire brièvement.

Nous terminerons notre travail, la grâce de Dieu, par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralité sur les antennes BIE

I.1. Introduction

Notre vie aujourd'hui est devenue fortement dépendante des antennes, et c'est ce qui a poussé les scientifiques à s'employer davantage et à travailler sur leur développement afin d'atteindre de meilleures performances.

Dans ce chapitre, nous présenterons une compilation d'informations, y compris une description des antennes et mentionnant leurs différents types, jusqu'à ce que nous atteignons l'antenne BIE, qui sera notre sujet dans ce chapitre, nous mentionnerons son historique et des informations précieuses à son sujet.

Nous décrivons des matériaux BIE, qui sont des agencements périodiques de structures isolantes ou métalliques qui ont la propriété d'empêcher la propagation des ondes électromagnétiques, quelle que soit la direction de leur propagation.

L'introduction d'un défaut de périodicité au sein de la structure BIE se traduit par la création d'une bande de transmission (la plage admissible) où ce défaut peut être exploité pour concevoir des antennes à gain élevé.

On citera également les antennes BIEM qui seront une introduction du deuxième chapitre.

I.2. Les antennes existantes

L'antenne est un dispositif capable d'émettre et de recevoir des ondes électromagnétiques véhiculant des informations. Le système antenne est donc l'un des maillons les plus importants du réseau de télécommunications sans fil, il doit être adapté de manière à réaliser la couverture souhaitée selon la norme du réseau utilisée.

Un grand nombre de paramètres permettent de classifier les antennes tels que la directivité et le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, l'agilité, ... etc.

Une des classifications possibles permet de distinguer les antennes selon leurs diagrammes de rayonnement. Il existe donc les antennes directives, les antennes omnidirectionnelles et les antennes sectorielles. Les diagrammes de rayonnement de ces antennes sont représentés **(Figure I-1)**.

Les antennes directives sont des dispositifs capables de concentrer l'énergie dans une direction particulière, elles sont surtout utilisées pour des liaisons de type point à point où l'émetteur et le récepteur sont connus comme pour des liaisons terre – satellites.

Dans le cas des antennes omnidirectionnelles, le type de couverture recherché est uniforme. Ce type d'antennes est destiné à des liaisons de téléphonie mobile. Ces antennes sont généralement positionnées au centre de la cellule du réseau de télécommunications et

l'énergie rayonnée est équi-répartie dans l'espace.

Les antennes sectorielles sont utilisées pour le même type de liaison que les antennes omnidirectionnelles mais leur zone de couverture en azimut correspond généralement à un secteur de 60° ou 90° . Le gain est plus important que celui d'une antenne omnidirectionnelle. L'utilisation de six antennes d'ouverture 60° ou d'une antenne omnidirectionnelle. L'utilisation de six antennes d'ouverture 60° ou de quatre antennes d'ouverture 90° permet de retrouver une couverture omnidirectionnelle [1].

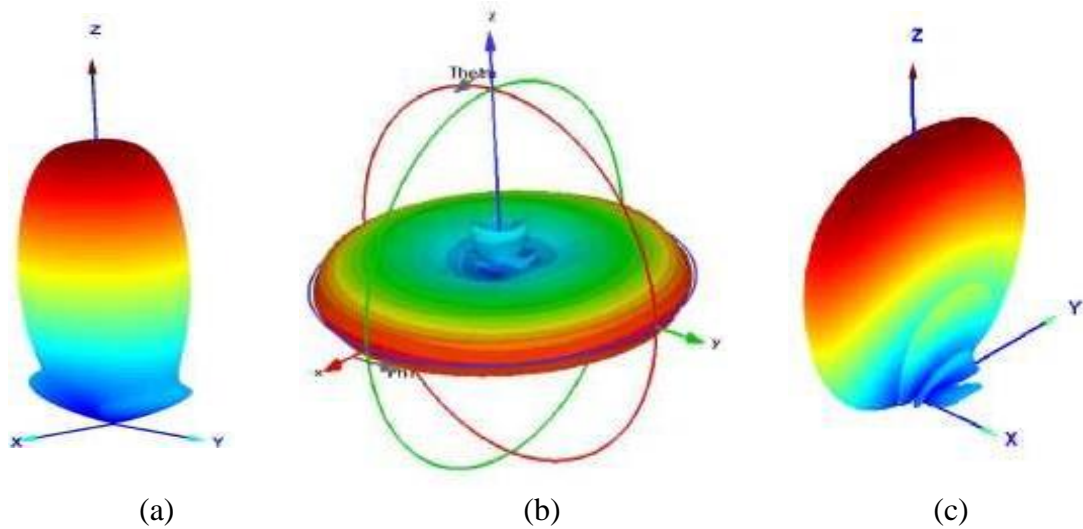


Figure I.1. (a) un diagramme de rayonnement directif

(b) un diagramme de rayonnement omnidirectionnel. (c) un diagramme de rayonnement sectoriel.

I.3. Antennes directives

Les antennes directives sont des dispositifs capables de focaliser l'énergie dans une direction particulière de l'espace. La puissance rayonnée se trouve concentrée dans un ou plusieurs lobes.

I.3.1. Propriétés des antennes directives

- **Directivité**

La notion de directivité permet de mesurer la propriété d'un dispositif antennaire à rayonner dans une direction donnée, une puissance plus forte ou plus faible qu'une antenne isotrope. La directivité d'une antenne est donc le rapport de la densité stérique de puissance rayonnée par unité d'angle solide et la densité de puissance délivrant la même puissance rayonnée par une source isotrope.

- **Bande en rayonnement**

Une autre propriété des antennes directives est la bande en rayonnement, définie à -3 dB de la directivité maximale. La bande en rayonnement constitue généralement une problématique importante pour les antennes directives. Une forte directivité implique souvent une faible bande passante.

- **Gain intrinsèque**

Le gain apporte une information supplémentaire par rapport à la directivité : la capacité de l'antenne à transformer la puissance qui lui est délivrée en puissance rayonnée. Le gain dit intrinsèque est défini en tenant compte des pertes dans l'antenne.

- **Adaptation et gain réalisé**

L'adaptation est une autre caractéristique de l'antenne qui traduit sa capacité d'accepter la puissance fournie par le générateur. Pour maximiser le transfert d'énergie entre le générateur et l'antenne, les deux dispositifs doivent présenter des impédances conjuguées $Z_g = Z_a^*$. Z_g est l'impédance du générateur, Z_a l'impédance de l'antenne.

Le paramètre S_{11} est le rapport entre l'onde incidente appliquée à l'entrée de l'antenne et l'onde réfléchie vers la source. Il s'exprime en fonction des impédances caractéristiques du générateur et de l'antenne ou encore en fonction de la puissance réfléchie P_{ref} et la puissance incidente P_{inc} . Ce paramètre est jugé satisfaisant généralement à partir d'une valeur seuil de 0.1 en linéaire ou -10 dB.

$$S_{11} = \frac{Z_a - Z_g}{Z_a + Z_g} \quad (I.1)$$

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.2)$$

$$(S_{11})_{dB} = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.3)$$

Le gain réalisé est une autre caractéristique de l'antenne qui tient compte de toutes les pertes y compris les pertes de désadaptation.

$$G_r(\theta, \varphi) = \frac{dP_{\Omega}(\theta, \varphi)}{P_g / 4\pi} = (1 - |S_{11}|^2) G(\theta, \varphi). \quad (I.4)$$

P_g est la puissance délivrée par le générateur, avec :

$$P_a = (1 - |S_{11}|^2) P_g. \quad (I.5)$$

- **Surface effective**

Certaines antennes directives peuvent être assimilées à des ouvertures rayonnantes avec une certaine répartition des champs électromagnétiques en amplitude et en phase. Cette ouverture correspond à la surface rayonnante plane équivalente de l'antenne : Diagramme de rayonnement.

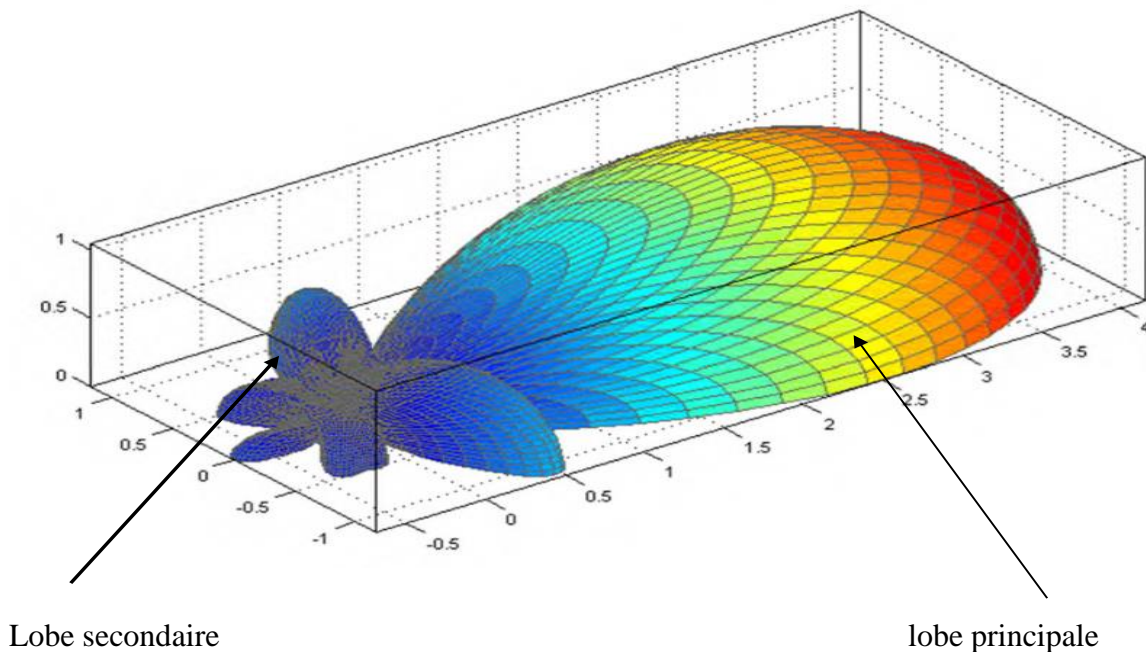


Figure I.2 : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch.

Un lobe principal : C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.

Des lobes secondaires : Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau du lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprimé en dB.

- **Polarisation**

La polarisation de l'onde représente l'évolution temporelle du vecteur champ électrique dans un plan d'onde. Ainsi si le vecteur champ électrique décrit une droite, nous parlons de

polarisation rectiligne ou linéaire, s'il décrit une ellipse ou un cercle, nous parlons de polarisation elliptique ou circulaire.

I.3.2. Principales antennes directives

Dans cette section nous allons donner un aperçu général sur les principales antennes qui présentent des directivités importantes.

I.3.2.1. Les réseaux d'antennes

Les antennes réseaux sont ordinairement formées d'un groupement de plusieurs éléments rayonnants, en général identiques et travaillant dans la même bande de fréquences, pour former une ouverture rayonnante [2][3]. Le renforcement du nombre d'éléments rayonnants dans les réseaux d'antennes permet d'augmenter la directivité et le gain. Les éléments rayonnants peuvent être des patches imprimés, des fentes, des cornets ou des dipôles distribués dans l'espace [4]. La figure (I.3) représente quelques exemples d'antennes réseaux. Si l'augmentation du nombre de sources a pour avantage l'augmentation du gain, son inconvénient est qu'il influe négativement sur l'efficacité de l'antenne, à cause du système d'alimentation complexe utilisé et des pertes.

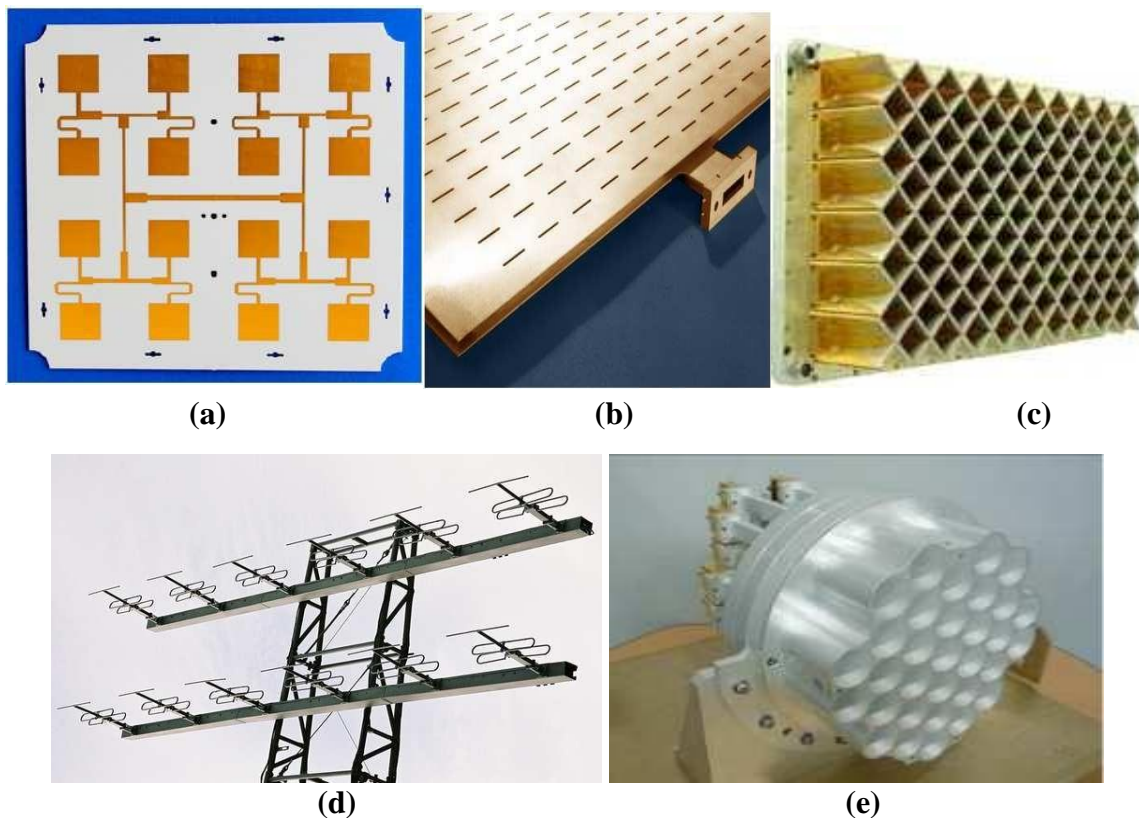


Figure I.3. Exemples d'antennes réseaux, (a) réseau de patch, (b) réseau de fentes, Réseau d'antennes actif, (d) réseau de dipôles, (e) réseau de cornets.

Les réseaux d'antennes sont utilisés pour exciter l'antenne BIE permettent de pallier au problème de la faible bande en rayonnement dû au caractère sélectif de l'antenne [5][6].

I.3.2.2. Les antennes à ouverture rayonnante

Parmi les antennes à ouverture rayonnante, nous trouvons les cornets, les antennes à réflecteur parabolique, les antennes lentilles, les fentes...

Les cornets sont des guides d'onde à section progressivement croissante se terminant par une ouverture rayonnante de forme rectangulaire ou circulaire [7].

Les antennes à réflecteur parabolique sont constituées d'une source disposée à la focale d'un réflecteur. Les ondes électromagnétiques provenant de la source se réfléchissent sur la surface du réflecteur, les ondes sphériques se transforment en ondes planes, un front d'onde plan avec une surface équiphase est créé et représente l'ouverture rayonnante de l'antenne.

La source d'excitation du réflecteur parabolique est en général un cornet mais ça peut être une batterie de cornets dans le but de créer un fonctionnement multifaisceaux. Les antennes à réflecteur parabolique sont par excellence les antennes de réception satellitaire.

Les antennes lentilles sont constituées d'une source primaire illuminant la lentille. Elles fonctionnent en transmission mais le principe est similaire à celui des antennes à réflecteur parabolique, une antenne lentille permet de transformer une onde sphérique en une onde plane à l'émission et inversement à la réception.

Les antennes à ouverture rayonnante peuvent servir de sources d'excitation de l'antenne BIE. Une excitation par cornet de l'antenne est utilisée pour réduire le niveau des lobes secondaires [8,9]. L'antenne BIE est employée pour entrelacer les tâches rayonnées par un réseau de cornets. Le système est placé à la focale d'un réflecteur parabolique à ouverture cellulaire [10] [11].

I.4. Antenne à résonateur BIE directive

L'antenne à résonateur BIE étudiée dans ce mémoire fait partie de la famille des antennes directives. Une des particularités de cette antenne est sa forte directivité. L'antenne peut fournir des valeurs de directivité supérieures à 30 dB en présence d'une simple source d'excitation et permet donc de pallier au problème du système d'alimentation complexe nécessaire pour alimenter un réseau de patches. Cependant, ces antennes présentent des bandes en rayonnement extrêmement réduites pour des valeurs de directivité très importantes.

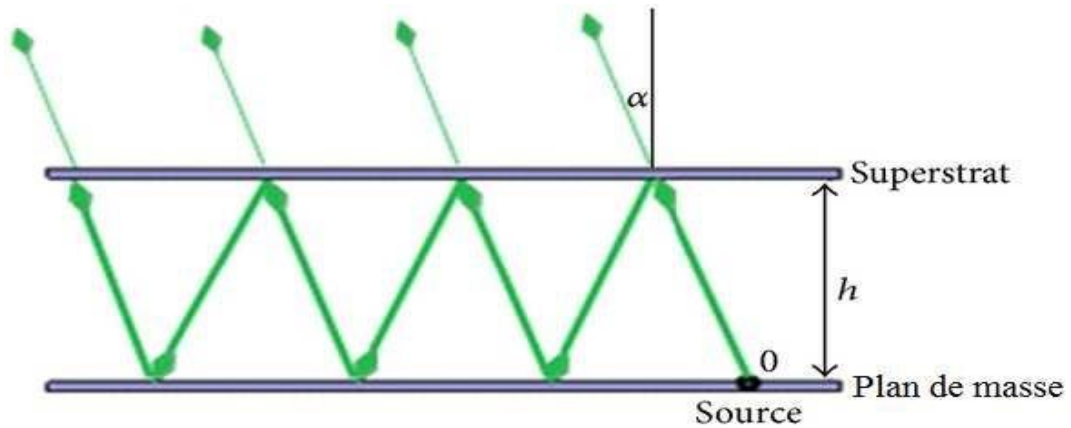


Figure I.4. Réflexion sur l'antenne BIE.

L'antenne BIE étudiée dans ce travail est plane et donc moins encombrante en hauteur qu'une antenne à réflecteur parabolique 3D. Elle est formée à partir des matériaux périodiques appelés matériaux BIE.

I.4.1. Matériaux BIE

Les matériaux dits à Bande Interdite Electromagnétique BIE, ou en anglais EBG pour Electromagnetic Band Gap sont des structures périodiques 1D, 2D, ou 3D (Figure I-5). En effet, dans les matériaux BIE, le champ électromagnétique est la solution d'une équation de même type que l'équation de Schrödinger donnant naissance à des bandes de fréquences interdites dans les semi-conducteurs.

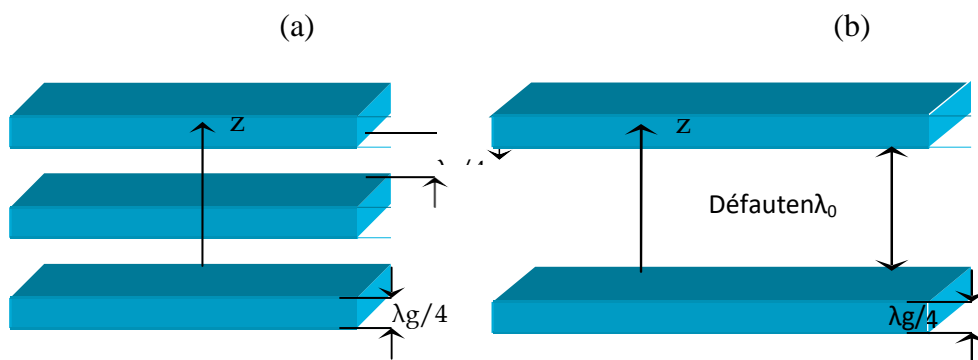


Figure I.5. (a) matériau BIE diélectrique 1D périodique suivant l'axe z.

(b) matériau BIE à défaut.

I.4.2. Conception de l'antenne BIE [12]

I.4.2.1. Structures BIE sans défaut

Le point fort des matériaux BIE est leur possibilité d'agir comme un filtre c'est-à-dire :

leur capacité de réfléchir partiellement ou totalement les ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquence.

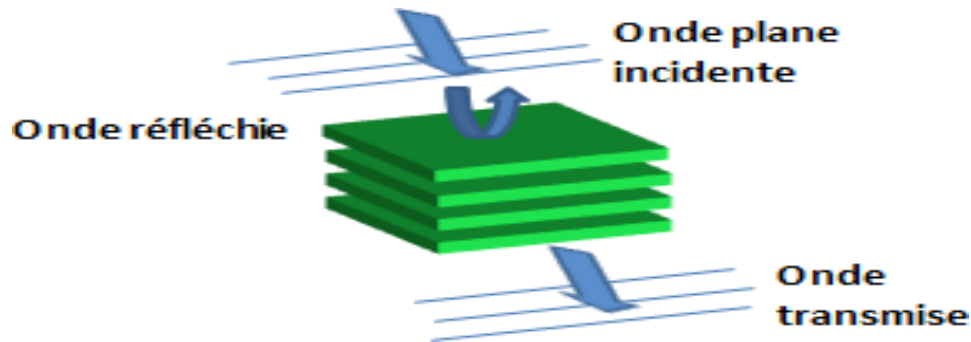


Figure I.6. Structures BIE sans défaut

I.4.2.2. Structures BIE avec défaut

La façon la plus simple pour créer un défaut est l'introduction d'une couche d'air λ_0 au sein du matériau. L'insertion d'un défaut (rupture) dans cette structure entraîne la création d'une étroite bande passante au milieu de la bande interdite.

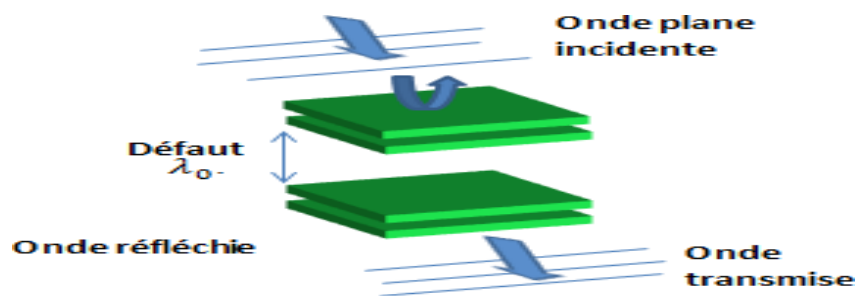


Figure I.7. Structures BIE à défaut

I.5. Historique et définition des matériaux BIE

I.5.1. Bref Historique

Ce nouveau type de structure a été développé par E. Yablonovitch [13,14] à la fin des années quatre-vingts. En réalité, le tout premier matériau BIP ou cristal photonique a été réalisé sans le savoir par le physicien anglais William Lawrence 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.

Le miroir de Bragg mis au point par William Lawrence Bragg est un parfait exemple de l'exploitation de ce phénomène en une dimension. Le concept du contrôle de l'onde par des

structures périodiques comme nous venons de le décrire, et l'on parlait alors de matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE).

Le principe s'est ensuite rapidement étendu aux longueurs d'ondes supérieures, donnant lieu aux cristaux électromagnétiques, qui sont plus couramment appelés les matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE). En effet, les équations de Maxwell obéissent à une loi d'échelle, et les mêmes propriétés peuvent par conséquent être observées quelle que soit la longueur d'onde. Actuellement, ces matériaux BIE sont classés sous une famille des matériaux plus large, de nommés méta matériaux.

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

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

Les structures BIE se classifient plutôt dans le dernier cas.

Dans le domaine des microondes et des hyperfréquences, les propriétés exotiques d'une structure à bande interdite électromagnétique (l'anisotropie, l'effet de réfraction négative, la bande interdite électromagnétique) reçoivent des attentions particulièrement importantes pour les applications dans les dispositifs de télécommunications (antennes, téléphones mobiles, GPS haute précision etc...) [15].

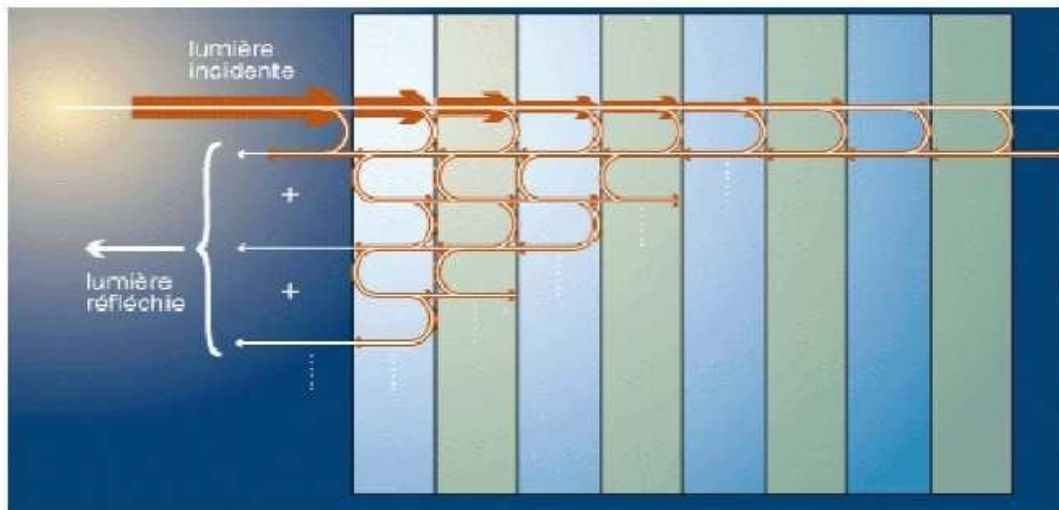


Figure I.8. Réflexion et transmission sur un miroir de Bragg.

I.5.2. Définitions et propriétés des matériaux BIE

Les structures périodiques sont abondantes dans la nature, qui a fascinées les artistes et les scientifiques. Lorsqu'ils interagissent avec des ondes électromagnétiques, des phénomènes passionnants apparaissent et des caractéristiques étonnantes se produisent. En particulier, des caractéristiques telles que des bandes d'arrêt de fréquence, des bandes passantes et des intervalles de bande pourraient être identifiées.

Les structures électromagnétiques sont définies comme des objets périodiques artificiels (ou parfois non périodiques) qui empêchent ou aident la propagation d'ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence spécifiée pour tous les angles d'incidence et tous les états de polarisation. Les structures de bande interdite électromagnétique (BIE) sont des structures périodiques qui peuvent interdire la propagation d'ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquence. Ils peuvent être noyés dans le substrat diélectrique ou gravés sur les couches métalliques. Les structures BIE sont toujours utilisées pour aider à supprimer les ondes de surface pour obtenir une bonne bande passante ou une bande d'arrêt. Il y a deux types de structure BIE à discuter. Tout d'abord est un diélectrique perforé et le second sont les structures Métallo-diélectrique

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux [16]. Il existe une grande variété de matériaux à bande interdite électromagnétique. Ils sont construits à partir d'objets élémentaires, agencés périodiquement dans l'espace. Dans la (**figure I.9**), nous avons des exemples de réseaux BIE de périodicité selon une, deux et trois dimensions [17].

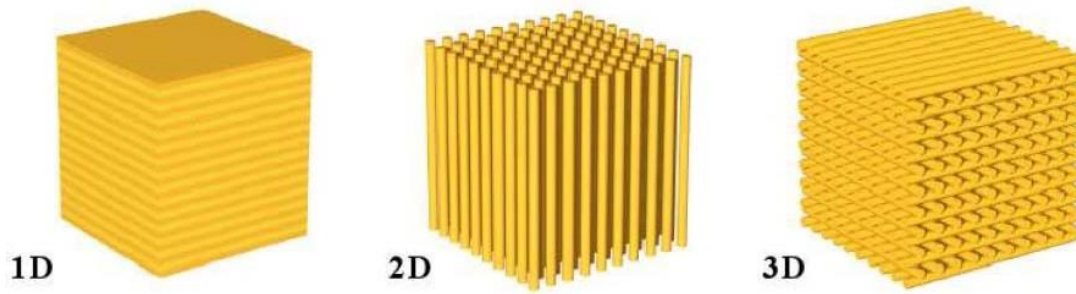


Figure I.9. Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D.

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 [18].

I.5.2.1. Réseaux unidimensionnels 1D

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 (**Figure I.10**).



Figure I.10. Structure 1D et son diagramme de dispersion.

I.5.2.2. Réseaux bidimensionnels 2D

Les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons

donc étudier les ondes électromagnétiques incidente à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux).

Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau. Nous présentons sur la (**Figure I.11**), plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

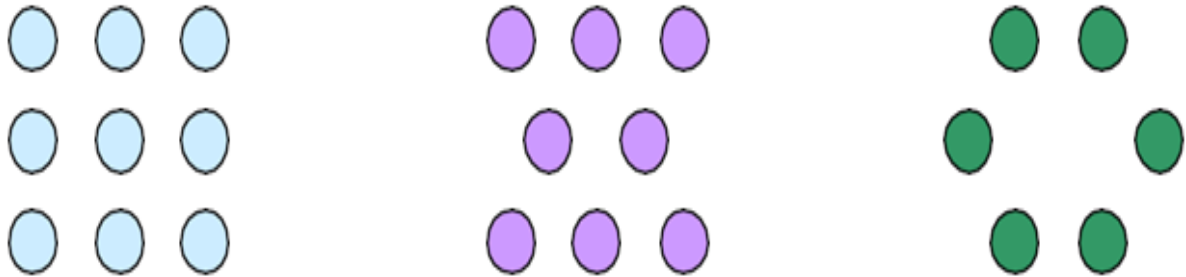


Figure I.11. Exemples De Différents Réseaux 2D.

I.5.2.3. Réseaux Tridimensionnels 3D

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

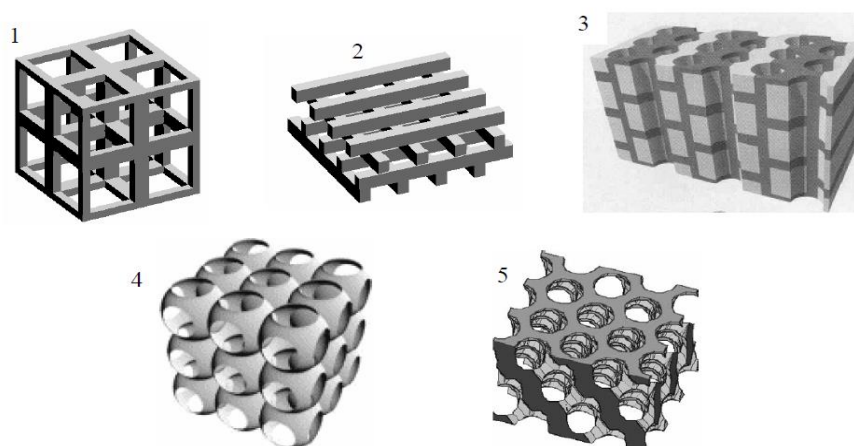


Figure I.12. Différentes Structures 3d Comme (1) La Structure Cubique, (2) Le Tas De Bois, (3) La Structure Multicouches, (4) Les Opales Ou Opales Inversées, (5) La Yablonovite

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 [19].

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 Yablonovite (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.

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 [20].

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

I.6. Comportements électromagnétiques

Nous étudions les comportements fréquentiels des structures périodiques et les propriétés électromagnétiques. Nous éclairons le matériau avec une onde plane en incidence normale et nous en déduisons les coefficients de réflexion et de transmission. Cette étude peut être réalisée soit par la méthode numérique FDTD, soit par la méthode des impédances ramenées.

I.6.1. Structures diélectriques

La principale caractéristique de ces structures est leur aptitude à fonctionner comme un miroir. Elles permettent de réfléchir partiellement ou quasi totalement les ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquences et cela pour des incidences particulières selon les types de matériaux utilisés [21]. La **(Figure I.13)** montre le module du coefficient de transmission $|S_{21}|$ et le module du coefficient de réflexion S_{11} d'une structure 1D sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.

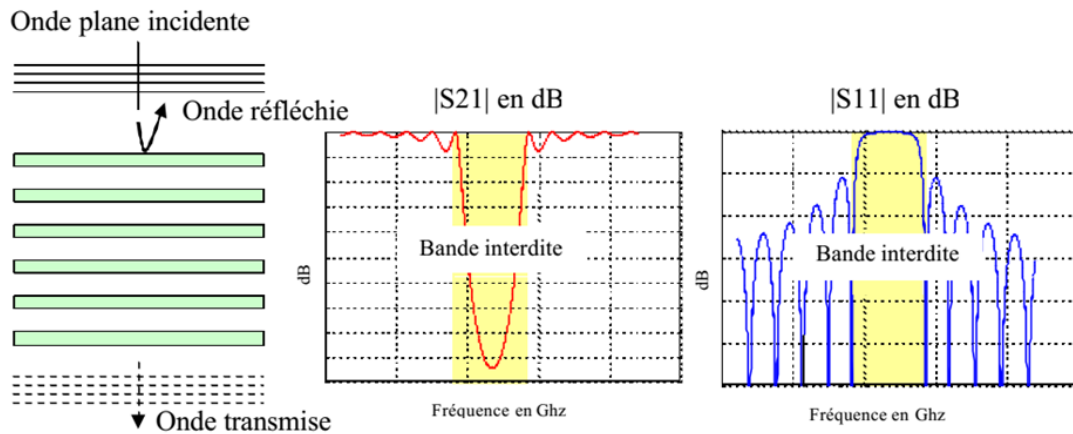


Figure I.13. Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D.

I.6.2. Structures métalliques :

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. Tout en ayant tendance à 0, le module du coefficient de réflexion tend vers 1. 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 (**Figure I.14**).

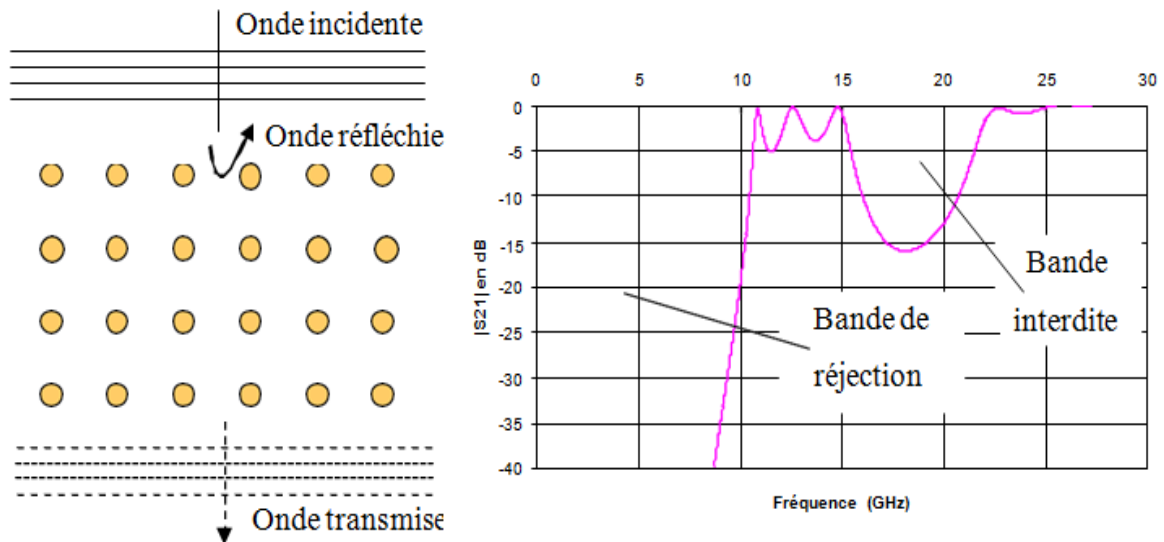


Figure I.14. Coefficient de transmission d'une structure BIEM

Lorsque le pas du réseau métallique diminue, cela permet de creuser la réflexion basse fréquence. Si les tiges sont très espacées, le réseau de grilles équivaut à une surface métallique seulement pour les très grandes longueurs d'ondes. La bande de réjection dépend de la périodicité des éléments métalliques.

Dans le cas où nous modifions le diamètre ou la section des tiges constituant ces structures métalliques, nous accroissons la réjection à basse fréquence. Cela revient à diminuer la distance entre les tiges et par conséquent le pas du réseau [22] [23]. Grâce à cet effet à basse fréquence, ces grilles sont un bon moyen de réaliser des filtres passe-bas.

Le comportement fréquentiel de ces structures dépend de la géométrie et de la polarisation de l'onde incidente.

I.7. Caractéristiques des matériaux BIE

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

- Le contraste d'indice Rapport entre les indices des deux matériaux, qui peut être comparé à la hauteur de la barrière de potentiel de la physique de solide.

$$\delta = \eta_h / \eta_t \quad (I.6)$$

Avec :

η_h : L'indice de réfraction du matériau de haut indice.

η_t : L'indice de réfraction du matériau de base indice.

I.8. Principe de fonctionnement de l'antenne BIE

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.

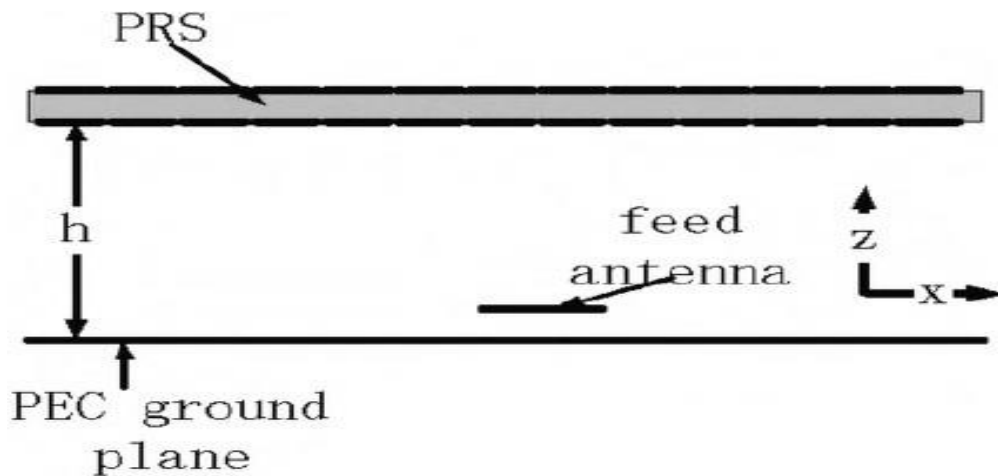


Figure I.15. Antenne BIE.

I.8.1. Les structures métalliques à base de FSS [24]

Le superstrat de l'antenne BIE qu'on a conçu est composé de structures métalliques à base de FSS. Les surfaces sélectives en fréquence ou FSS sont des structures imprimées d'un arrangement périodique de motifs (éléments) métalliques sur un substrat diélectrique suivant un ou deux axes de périodicité. Selon la forme du motif métallique, différentes propriétés de réflexion peuvent être obtenues avec ce type de structure. Ces différentes structures sont présentées dans la (figure I.16).

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

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

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

$$\varphi_P + \varphi_G - \frac{2\pi}{\lambda} 2h = 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (I.7)$$

Où φ_P et $\varphi_G = (180^\circ)$ sont le coefficient de réflexion de la PRS et du plan de masse respectivement.

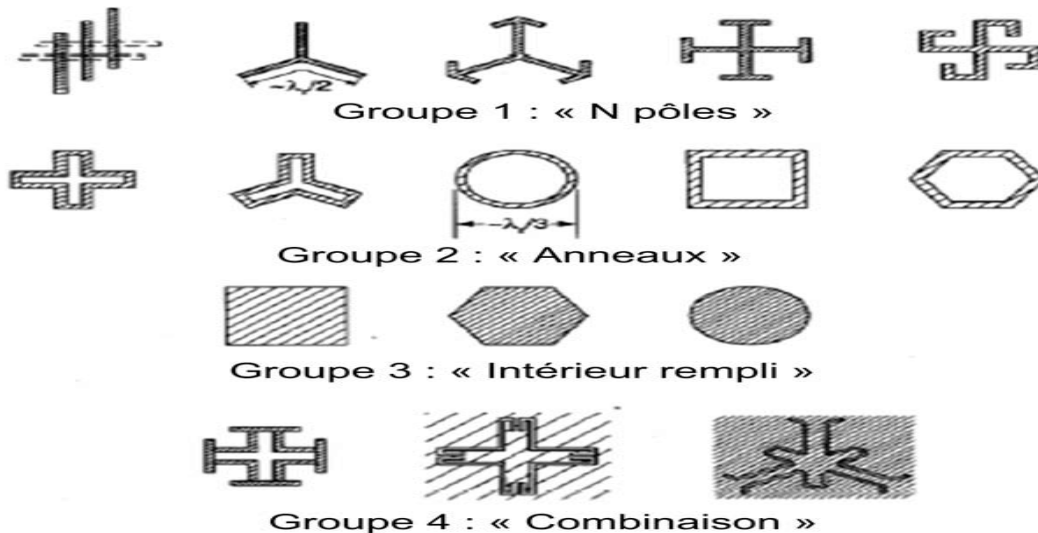


Figure I.16. Motifs élémentaires pouvant constituer une FSS.

I.9. Application des matériaux BIE

L'application de la technologie BIE ou structures BIE (Bande Interdite Electromagnétique) est devenue un thème exaltant plus important pour les ingénieurs spécialisée dans le domaine d'antennes et les chercheurs vu quelle porte des améliorations aux caractéristiques des petites antennes et leurs performances telles que l'augmentation du gain et de l'efficacité de rayonnement.

I.9.1. Fréquences optiques

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

- **Les micro-résonateurs**

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

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

Les guides d'onde : l'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999 [25]. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes. Il existe un autre type de guide qu'on appelle guide (coudé guide avec virage).

- **Filtres et multiplexeurs**

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

- **Les fibres optiques [26]**

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

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

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

I.9.2. Domaine des fréquences

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

- Substrats d'antennes : les premières expériences visant à exploiter les BIE diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par E.R. Brown et al. Surfaces à hautes impédances, qui peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes.
- Peuvent aussi être utilisés dans la réalisation des circuits microondes tels que :

filtres planaires, guides, multiplexeurs et amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des matériaux BIE ultra-réfractifs [27].

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents types d'antennes, essayé de présenter l'antenne BIE et ses caractéristiques et ses comportements et nous avons essayé de citer certaines de ses applications en soulignant ses avantages et ses inconvénients.

Les antennes BIE sont une recherche innovante et en constante évolution qui a occupé de nombreux sujets de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lina Moustafa « Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes » de doctorat présentée à l'université de Limoges, le 22 septembre 2009.
- [2] E-H. Kenane, F. Djahli, A. Bartil, "Synthesis of cosecant linear antenna array pattern using a novel modified invasive Weeds optimization", *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 21, no. 5, 86–89, 2015.
- [3] E-H. Kenane, F. Djahli, "Optimum design of non-uniform symmetrical linear antenna arrays using a novel modified invasive weeds optimization", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 1, 5–18, 2016.
- [4] A E. Ahmad, "Conception d'antennes réseaux aux performances optimisées par la prise en compte des couplages inter éléments. Application à la formation de faisceau" 2010.
- [5] L. Bernard. « Techniques d'amélioration du gain par empilements diélectriques. Applicabilités à la réduction de la taille des antennes pour station de base UMTS ». Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, 2003.
- [6] L. Leger. « Nouveaux développements autour des potentialités de l'antenne BIE planaire ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, n° 27-2004, 2004.
- [7] A.W. Love. *Electromagnetic Horn Antennas*. New York, 1976.
- [8] R. Sauleau, Ph. Coquet, T. Matsui. Low-profile directive quasi-planar antennas based on millimeter wave Fabry-Perot cavities. *IEEE Proceedings in Microwave Antennas and Propagation*, Volume 150 n°4: 274-278, 2003
- [9] R. Sauleau, Ph. Coquet, T. Matsui. Radiation characteristics and performances of millimetre-wave hornfed gaussian beam antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 51 n°3 : 378-387, 2003.
- [10] R. Chantalat. Optimisation d'un réflecteur spatial à couverture cellulaire par l'utilisation d'une antenne à bande interdite électromagnétique multi sources. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [11] R. Chantalat, P. Dumon, B. Jecko, M. Thevenot, T. Monediere. « Interlaced feeds design for a multibeamreflector antenna using a 1-D dielectric PBG resonator". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003.
- [12] Taieb El Karkraoui " Réalisation d'antennes hybrides de type BIE à base de résonateurs diélectriques à 60 GHz" Thèse de Doctorat en génie électrique Philosophai doctor (PhD.) Québec, Canada 2017.

- [13] E. YABLONOVITCH "Photonic Band-Gap crystals" Phys.: Condens. Matter 5, No 16, April 1993, pp. 2443-2460
- [14] E. YABLONOVITCH "Photonic Band-Gap structure" J. Opt. Society Vol 10, p.283-293, Fev 1993
- [15] MANSOUR. R et HADJI MOHAMMED, « Bande interdite électromagnétique(BIE) 1D à défauts » mémoire master université M'silla, 2018/2019
- [16] A. POLMAN, P. WITZIUS "Materials science aspects of photonic crystals" Guest editors MRS bulletin August 2001
- [17] Juslan LO étude de la reconfigurable d'une structure à bande interdite électromagnétique (BIE) métallique par plasmas de décharge doctorat de l'université de Toulouse Le 14 mai 2012.
- [18] Etude D'une Antenne Micro-Ruban Circulaire à Bie 2d A Défauts Mémoire De Master Mai 2017
- [19] M.M SIGALAS, R. BISWAS, Q.LI, D. CROUCH, W. LEUNG, R. JACKOB SWOODBURY, B. LOUGH, S. NIELSEN, S. McCALAMONT, G. TUTTLE, K.M. HO "Dipole antennas on photonic band gap crystals- Experiment and simulation
- [20] G. KIRIAKIDIS, N. KATSARAKIS "Fabrication of 2-D and 3-D PBG crystals in the GHz and THz regions" Mater. Phys. Mech (2000)
- [21] Tanguy JAFFRE caractérisation des matériaux a bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes. Docteur de l'université de LIMOGES le 04 Février 2005
- [22] O. VANBESIEN, J. DANGLLOT, J. CARBONELL, M. FERNANDEZ et D. LIPPENS "Matériaux à gap de photons" Congrès JCMM-LeTouquet 2001
- [23] G. POLASNE, L. DESCLOS, M. MADIHIAN, J. LENORMAND, Ph. GESLIN "Etude paramétrique des matériaux à bande interdite photonique métallique (BIPM)" Congrès JCMM- Le Touquet 2001
- [24] MENKHERFIS. S et ZEMMOURA .H " Conception d'une antenne BIE bi-bande à haut gain Mémoire de master Université Abderrahmane MIRA-Bejaïa 2016/2017
- [25] T. BABA, N. FUKAYA, et J. Yonekura, observation of light propagation in photonic crystal optical waveguides with bends, Electron. Lett », vol. 35, p. 654-655, 1999.
- [26] ABDELWAHEB OURIR, « applications de matériaux bandes interdites photoniques et de métamatériaux en télécommunications » " thèse de doctorat, université de paris xi d'orsay, december 2006.

[27] S. ROWSON A. CHELNOOV, et J. M. Lourtioz, “Macroporous silicon photonic crystals: photonic crystal substrates at $1.55\mu\text{m}$ ”, 25th European Conference On Optical Communication ECOC’98, Nice, 1999

CHAPITRE II

Antennes patchs à FSS

II.1. INTRODUCTION

Ces dernières années, les chercheurs se sont particulièrement intéressés aux matériaux synthétiques dans le but d'améliorer les performances des composants électriques fonctionnant dans les bandes de fréquences micro-ondes ou dans les bandes de fréquences millimétriques. Champ concurrentiel pour l'accès à des antennes plus petites et plus performantes. Ce dernier a connu un grand développement de diverses natures avec l'application de différentes techniques d'alimentation dans le but d'améliorer les performances de ce type d'antennes dans diverses applications. Ici, l'antenne imprimée (Micro ruban à FSS) Les antennes micro rubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou micros trip en anglais) sont apparues dans les années cinquante et ont été développées au cours des années soixante-dix. a été conçue, et ce qui la distingue est son caractère miniature, qui permet la possibilité d'être intégrée dans les systèmes de réception et d'émission.

Dans ce chapitre, nous allons collecter de nombreuses informations importantes pour visualiser les antennes micro ruban à FSS et en donner une description simple en mentionnant ses différents types et caractéristiques, et nous mettrons également en évidence les différentes techniques d'alimentation de ces antennes, leurs avantages et certaines applications. Nous présenterons également une compilation sur les FSSs dans laquelle nous essaierons de remplir nos esprits avec la plus grande quantité d'informations représentées par le concept et la structure du FSS et les différents de type de FSS, comme nous avons essayé de mentionner ses différentes applications.

II.2. Description des antennes Patches à FSS

Une antenne patch est une antenne à profile réduit destinée aux communications mobiles, constituée d'un élément rayonnant (appelé aussi micro ruban) imprimé déposé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est complètement métallisé (plan de masse ou ground plane en anglais), **Figure II.1.**

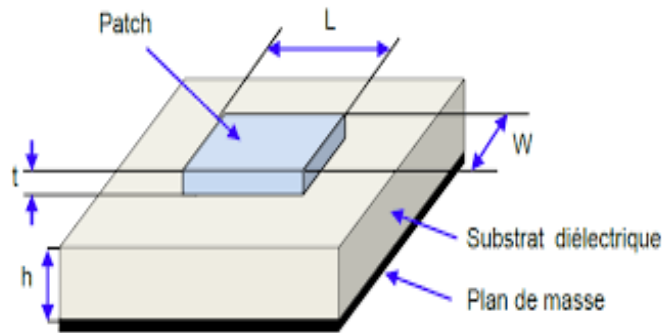


Figure II.1. Structure d'une antenne imprimée.

L : longueur du patch.

W : largeur du patch.

t : épaisseur du patch.

h : épaisseur du substrat

Une surface sélective en fréquence (FSS) est une structure composée de motifs périodiques infinis dans une ou deux dimensions. Ces éléments sont excités lorsqu'une onde vient frapper la surface. Une portion de l'énergie est alors transmise au travers, tandis que le reste est réfléchi (**Figure.II.2**).

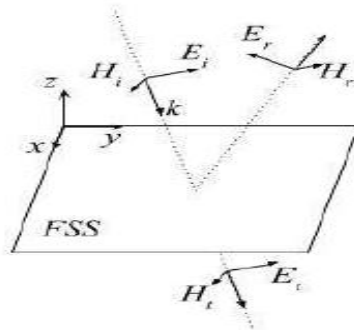


Figure II.2. Onde incidente partiellement réfléchie par une FSS.

II.3. Les différentes formes du patch

En pratique, l'élément rayonnant peut prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont montrées dans la figure ci-dessous (**Figure II.3**) : on peut citer : la forme circulaire, triangulaire, carrée et rectangulaire ...

Parmi toutes ces formes On a choisi de travailler avec la forme rectangulaire en raison de faciliter la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro rubans. Si on les compare aux antennes microondes.

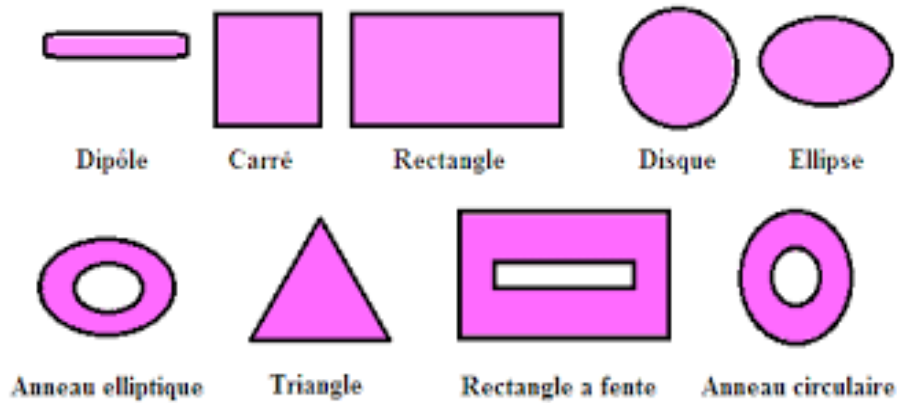


Figure II.3. Différentes formes du patch

II.4. Critères de Choix des Substrats

Le substrat est un composant essentiel dans la conception des antennes patchs. Ses caractéristiques physiques et géométriques définissent en grande partie les performances de l'antenne. Un soin bien particulier doit donc être attribué à cet élément, il doit, par conséquent, satisfaire quelques exigences et conditions restrictives [1] :

- Conservation de la forme originale ;
- Stabilité envers le changement de la température (pour soudure) et aux conditions atmosphériques ;
- Uniformité de la permittivité relative et de la hauteur (sur de grandes plaques) ;
- Faibles pertes diélectriques (typiquement $\tan \alpha \leq 3 \cdot 10^{-3}$) pour une meilleure efficacité,
- Résistance aux produits chimiques (pour les phases de photolithographie).

II.5. Caractéristiques de l'antenne patch

• La bande passante

La largeur de bande ou la bande passante en adaptation d'une antenne peut être définie comme une bande de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil donné. Elle est souvent considérée comme une gamme de fréquences positionnée de part et d'autre de la fréquence centrale f_0 . Elle peut aussi être définie comme correspondant à la bande de fréquences où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est supérieur à un seuil. On parle alors de bande passante absolue, est donnée par [2] :

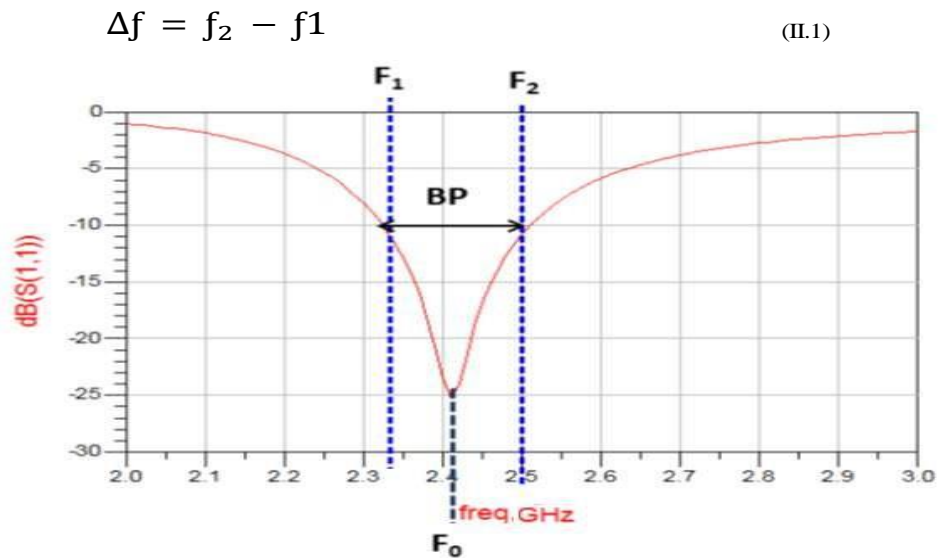
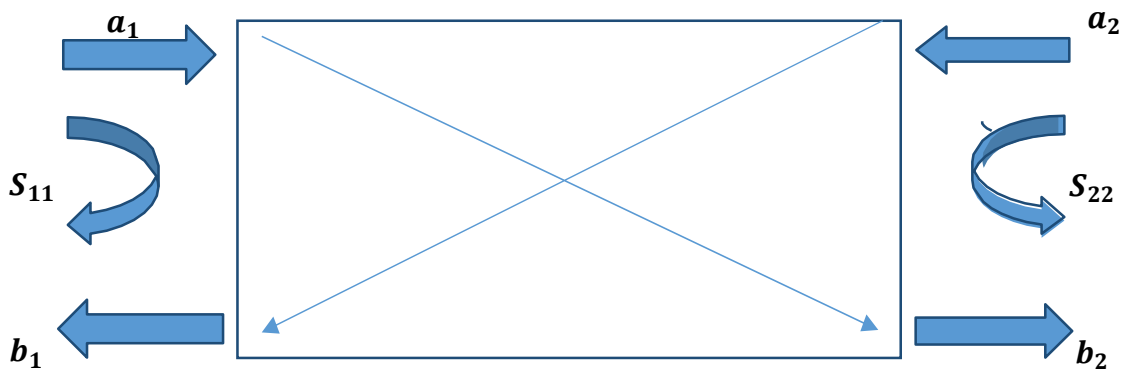


Figure II.4. Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion.

- Coefficient de réflexion et TOS (VSWR) [3]

On considère un système constituant un générateur, une ligne de transmission d'impédance caractéristique, Z_c , et une antenne d'impédance Z_{ant} .



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

$$b_1 = S_{11} \times a_1 + S_{12} \times a_2$$

$$b_2 = S_{21} \times a_1 + S_{22} \times a_2$$

S_{11} Est le coefficient de réflexion en entrée du quadripôle lorsque $a_2 = 0$.

S_{12} Est le coefficient de transmission de la sortie vers l'entrée lorsque $a_1 = 0$.

S_{21} Est le gain du quadripôle lorsque $a_2 = 0$.

S_{22} Est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $a_1 = 0$.

Dans notre étude on s'intéresse principalement au coefficient de réflexion. Ce coefficient représente l'énergie qu'absorbe l'antenne c'est un paramètre essentiel lors de l'optimisation.

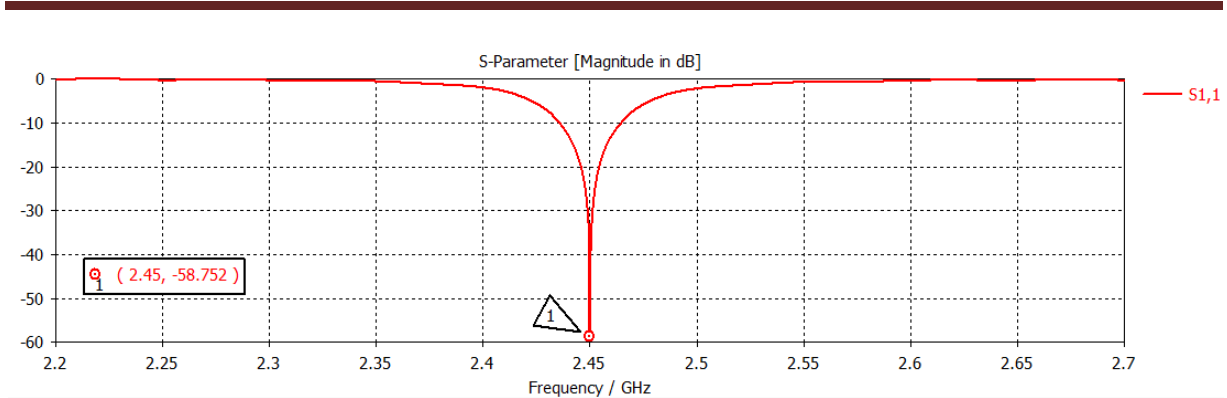


Figure II.5. Représentation du coefficient de réflexion S_{11} .

- **Impédance d'entrée**

D'un point de vue circuit, une antenne est caractérisée par son impédance d'entrée. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_{ant} et une partie imaginaire X_{ant} et s'écrit comme suit [2] :

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (\text{II.2})$$

La partie réelle de l'impédance R_{ant} regroupe la résistance de pertes R_{pertes} et la résistance de rayonnement de l'antenne R_{ray} et elle s'écrit comme suit :

$$R_{ant} = R_{pertes} + R_{ray} \quad (\text{II.3})$$

- **Diagramme de rayonnement**

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « *Diagramme de rayonnement* ». C'est une représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à une grande distance qui est en fonction de θ (angle de Site : plan vertical) et φ (angle d'Azimut : plan horizontal).

Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : **le plan E** et **le plan H**. Ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales [4].

Il y a trois formes typiques de diagramme de rayonnement : isotrope, omnidirectionnel et directif.

La **figure II.6** ci-dessous donne une représentation des trois formes typiques de diagramme de rayonnement.

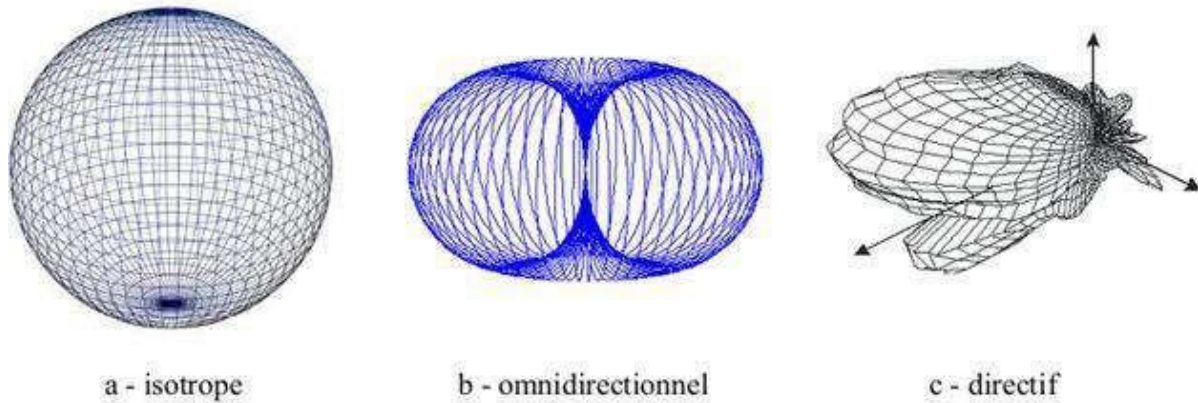


Figure II.6. Formes typiques de diagramme de rayonnement.

- **Angle d'ouverture**

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable [5].

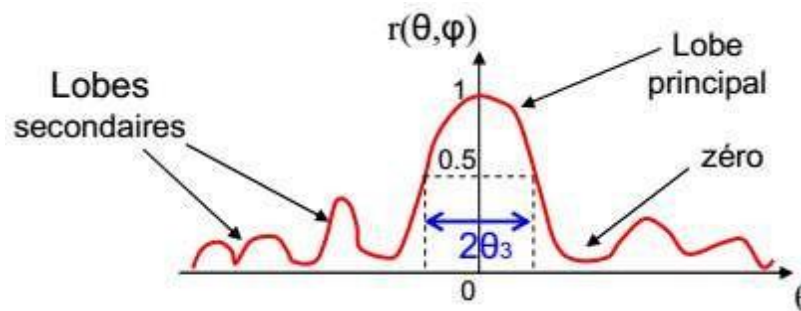


Figure II.7. Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.

- **Directivité**

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) donnée est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. Avec cette définition, une antenne fortement directive admet une faible ouverture de rayonnement, et une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [5].

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \times \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{II.4})$$

- **Rendement**

Le rendement d'une antenne est le rapport entre la puissance totale (moyenne) rayonnée par une antenne P_R et la puissance injectée P_I qu'on lui a fournie [6]. Donnée par :

$$\eta = Pr / Pi \quad (\text{II.5})$$

- **Gain**

Le gain (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait la source isotrope (P_0) à condition que les puissances d'alimentations soient les mêmes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction donnée [5].

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times P(\theta, \varphi) \quad (\text{II.6})$$

II.6. Différentes techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes patch est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but. En effet, elles peuvent être classées en deux grandes catégories [7], [8] :

- Par contact :

Ligne micro-ruban ;

Câble coaxial.

- Par proximité :

- Couplage électromagnétique ;

- Couplage à ouverture (fente).

II.6.1. Alimentation par contact

II.6.1.1. Alimentation par ligne micro-ruban.

L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne microbande (**Figure. II.8**), dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [4].

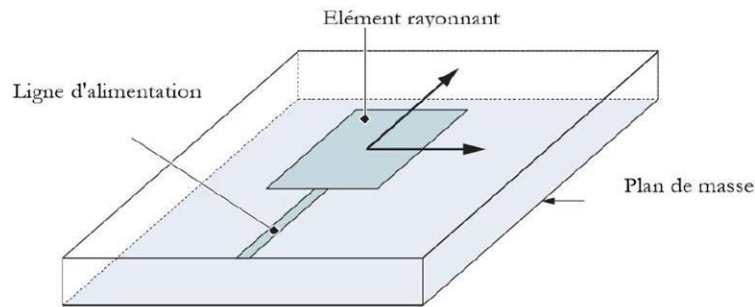


Figure II.8. Alimentation par ligne micro-ruban.

II.6.1.2. Alimentation par sonde coaxiale

Le câble traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est soudé sur l'élément rayonnant. Le conducteur extérieur quant à lui est soudé au plan de masse, (**Figure II.9**). Cette alimentation est très utilisée dans les antennes imprimées qui ont des patchs de formes circulaire et annulaire [9].

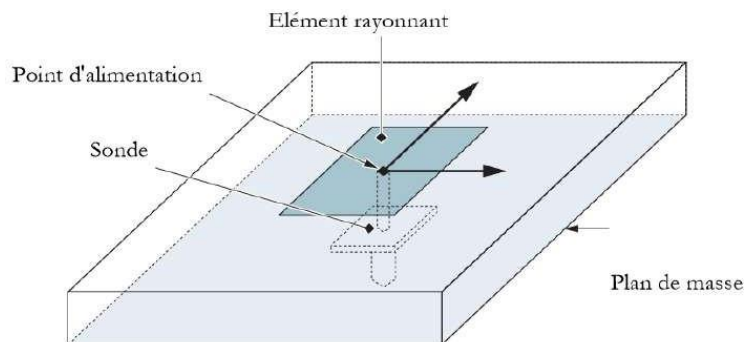


Figure II.9. Alimentation par sonde coaxiale.

II.6.2 : Alimentation par proximité

II.6.2.1 : Alimentation par fente

Cette structure (**figure II.10**) est constituée par deux substrats séparés par un plan de masse, le patch est imprimé sur le substrat supérieur et le ruban d'alimentation est imprimé sur le substrat inférieur, avec une fente non résonnante fendue dans le plan de masse [10].

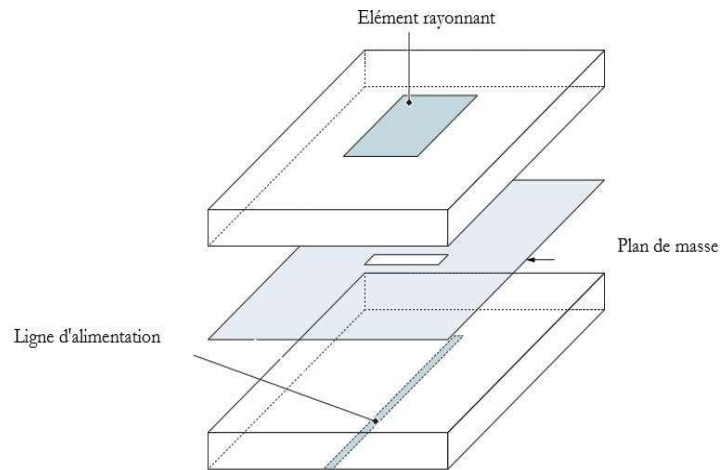


Figure II.10. Alimentation par fente.

II.6.2.2 : Alimentation par couplage de proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats et le patch est imprimé sur le substrat supérieur (**figure II.11**). L'avantage principal de cette technique est qu'elle élimine le rayonnement parasite due à l'alimentation et fournit une largeur de bande élevée, en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [11].

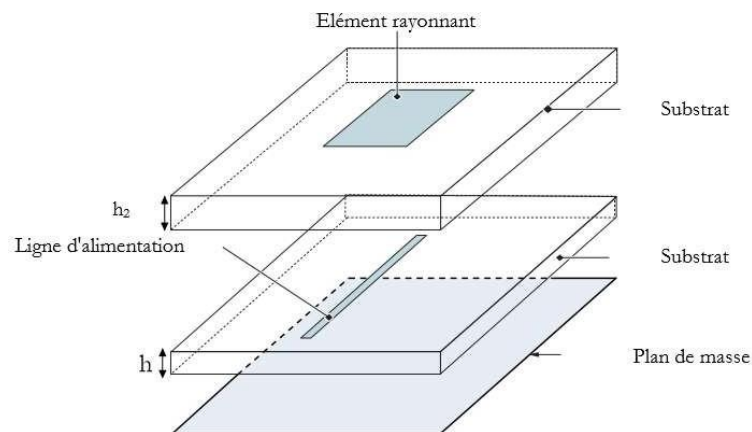


Figure II.11. Alimentation par couplage de proximité.

II.7. Mécanismes de Rayonnement de l'Antenne Patch Rectangulaire

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire s'effectue à partir de forme géométrique. Une fois, la ligne d'alimentation excitée par une source RF, une onde électromagnétique se propage sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant.

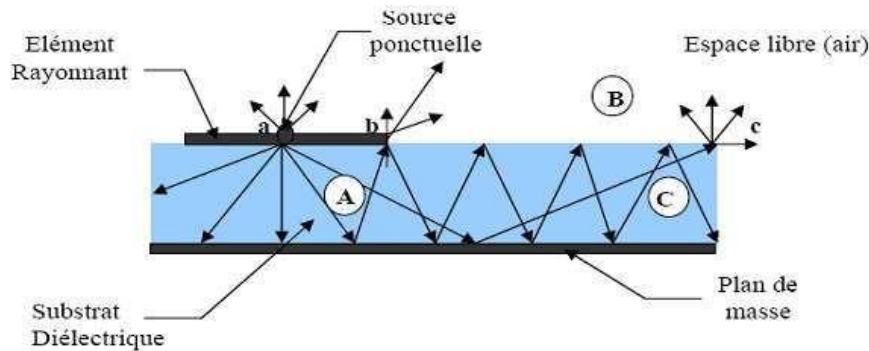


Figure II.12. Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

L'élément rayonnant est une multitude de sources ponctuelles similaires à celle qui se trouve au point « *a* ». Ces sources isotropes vont rayonnées dans toutes les directions.

Une partie de celui-ci est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. Certains de ces rayons aboutissent sur l'arrête du conducteur (point « *b* ») qui les diffracte et par conséquent le champ se décompose en deux composantes normale et tangentielle par rapport au plan de masse [12]. On peut donc envisager trois régions :

Région A : C'est la plus dense en rayons. Dans cette région le champ électromagnétique s'accumule plus fortement. Cette propriété est d'ailleurs utilisée pour la propagation le long des lignes micro-rubans. Lorsque les fréquences sont basses ; le champ électromagnétique est concentré dans cette zone. Donc il y a propagation sans rayonnement.

Région B : Région de l'espace libre au-dessus du substrat dans laquelle il y a dispersion libre du champ. La contribution des sources ponctuelles est faible. La partie la plus grande du rayonnement provient des rayons à l'extrémité du conducteur supérieur (point « *b* »), le reste du champ demeure à l'intérieur du substrat et sera considéré comme perte dans le diélectrique. Nous obtenant ainsi une antenne dont le rendement en rayonnement est très limité.

Région C : Certains rayons atteignent les surfaces de séparation (air-diélectrique) avec une incidence rasante et restent piégés à l'intérieur du diélectrique. Il peut arriver que certains de ces rayons soit diffracté en atteignant le bord (point « *c* ») du substrat, engendrant ainsi, un

rayonnement parasite. Cette dernière est à l'origine du couplage inter éléments, lorsque l'antenne imprimée sont mise en réseau. Au de la d'une certaine fréquence, ce phénomène affecte considérablement le rayonnement de l'antenne.

II.8. Avantages et Limitations des Antennes Patches à FSS

Les antennes patches présentent de nombreux avantages et leurs utilisations couvrent un large domaine de fréquence allons de 100 MHz jusqu'à 100 GHz. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids ;
- Encombrement réduit ;
- Faible coût de fabrication, production en masse possible ;
- Antennes multi bandes, multi polarisation possibles ;
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Micro wave Monolithic Integrated Circuit).
- Cependant, ces antennes ont aussi des inconvénients et des limitations d'utilisations suivantes :
- Bande passante étroite ;
- Un gain moyen ;
- Un rayonnement limité à un demi-plan d'espace ;
- Supportent uniquement des faibles puissances ;
- Pertes de rayonnement par onde de surfaces.

II.9. Les Applications des Antennes Patches à FSS

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes patches classiques devient incapable de répondre à ces exigences [13]. Pour cette raison, les antennes patches remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications. Parmi ces applications on cite :

- Les télécommunications par satellites ;
- La commande et contrôle ;
- La télémessure par missile ;
- Les équipements portatifs ;
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes ;

- Les antennes d'émission utilisées en médecine.

II.10. Surface sélective en fréquence (FSS) [14]

Mis à part certains travaux sur les structures périodiques datant du début du XXème siècle [15], l'étude intensive des surfaces sélectives en fréquence remonte aux années 1950-1960. Technologie intéressante dans le cadre de la maîtrise des caractéristiques de rayonnement des antennes, elle est largement favorisée par les efforts fournis à l'époque dans les domaines du RADAR et de la furtivité. Depuis, un très grand nombre d'articles scientifiques a été publié, introduisant de nouveaux motifs, modèles et méthodes d'analyse des FSS. Ce dynamisme s'explique notamment par un vaste champ d'applications, qui s'étend des radômes aux polariseurs, en passant par les dispositifs absorbants.

II.11. Définition des surfaces sélectives en fréquence FSS

Une surface sélective en fréquence (SSF) est une structure constituée le plus généralement d'éléments périodiques bidimensionnels, qui présente des propriétés de filtrage de fréquence similaires à celles des filtres de fréquence dans les circuits radiofréquences (RF) traditionnels. Ici, le faisceau périodique de fentes (ou d'ouvertures) dans une feuille conductrice parfaite agit comme un filtre passe-bande, à savoir, faisant passer les ondes à la fréquence de résonance des fentes mais les rejetant à des fréquences plus élevées et plus basses. Au contraire, le réseau de patches conducteurs agit comme un filtre coupe-bande, à savoir, rejetant les ondes à la fréquence de résonance des patches mais les faisant passer à des fréquences plus élevées et plus basses. Dans le cas de grilles libres et minces sans diélectrique, les performances de filtrage de l'élément patch FSS et de l'ouverture FSS sont exactement complémentaires l'une de l'autre. En raison de cette propriété de filtrage, il existe deux applications majeures du FSS. La première concerne les systèmes d'antennes à réflecteur, où des réflecteurs SFS sont utilisés pour séparer les alimentations des différentes bandes. L'autre application consiste à utiliser le SFS comme radôme d'antenne pour un meilleur contrôle des ondes électromagnétiques émises et réfléchies [16–18].

La FSS peut également être classé dans la catégorie des FSS à écran épais ou mince, en fonction de l'épaisseur de l'élément.

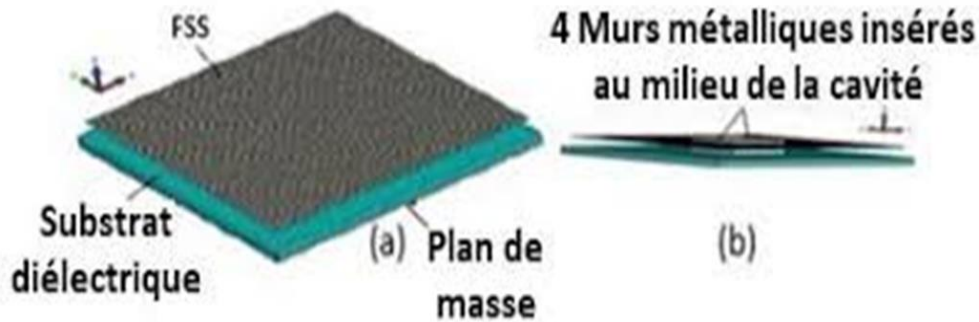


Figure II.13: Antenne Patch à FSS.

II.12. Les structures des FSS [19]

II.12.1. La propagation dans les structures périodiques

Les structures FSS sont des structures périodiques, leurs cellules unitaires sont semblables et se répètent avec un, deux ou trois vecteurs de translation. À cause de cette similarité, l'amplitude du champ électromagnétique à chaque cellule est égale. Concernant la phase entre les cellules, celle-ci est incrémenté de manière régulière vue la régularité du décalage entre elles. Cette répétition permet de simplifier l'analyse de ce réseau en l'analyse d'une simple cellule.

II.13. Différents types de FSS [20]

II.13.1. 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. Pour les fréquences hautes, le motif entre alors en résonance, le courant induit sur les métallisations est important et provoque la réflexion de l'onde incidente. L'efficacité de la réflexion dépend de différents paramètres, comme la géométrie des gravures, leur taille vis à vis de la période du réseau, mais aussi de la permittivité ou de l'épaisseur du substrat sur lequel est imprimé le motif.

II.13.1.1. Influence des différents paramètres intervenant dans une FSS à motif gravé

a) Période du réseau

Lorsque l'on varie la période du réseau, la variation est surtout présente au niveau de la largeur de bande de la réponse. Pour une même taille de motif, plus la période est petite, plus la largeur de bande sera importante [21].

Influence de l'épaisseur du substrat : La variation de l'épaisseur du substrat provoque un décalage de la fréquence de résonance du motif. Mais ce déplacement tend vers une limite lorsque le substrat atteint une épaisseur de quelques millimètres [21].

b) Influence de la permittivité du substrat

Une variation de la permittivité du substrat a les mêmes conséquences qu'une modification des dimensions du motif : la fréquence de résonance est modifiée. En augmentant la permittivité du substrat, la fréquence de résonance des patches baisse. Ce constat est très problématique, car la plupart des fabricants ne peuvent certifier la valeur de permittivité de leurs matériaux à moins de $\pm 2\%$ près pour les forts indices [21].

II.13.1.2. Différentes variantes des FSSs à motif gravé

Il existe une multitude de variantes aussi bien au niveau des motifs, qu'au niveau des empilements de matériaux.

Il y'a des FSSs à une seule couche formée par des patches imprimés sur du substrat ; des FSSs à plusieurs couches, ou les patches sont mis en sandwich entre les substrats, et bien d'autres configurations.

II.13.2. Les FSSs à grille (de type ouvertures)

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 réfléchie.

Pour les fréquences hautes, l'effet prépondérant est celui des trous. La fréquence de l'onde incidente étant supérieure à la fréquence de coupure du guide, nous avons donc une propagation guidée. Le signal est alors principalement transmis.

Les FSSs à grille sont largement utilisées dans le domaine des micro-ondes [22-24]. La forme et la taille des ouvertures, leur périodicité, l'épaisseur de l'écran métallique, déterminent le comportement fréquentiel de la FSS. Les ouvertures les plus courantes sont rectangulaires

ou circulaires [25], des ouvertures en forme de Croix sont également utilisées.

II.13.2.1. Différentes variantes des FSSs à grille

La configuration la plus courante de la FSS à grille est celle formée d'une couche métallique perforée périodiquement avec des ouvertures. Dans la plupart des cas, les ouvertures sont de formes rectangulaires [26] ou circulaires [27], en raison de la facilité de la modélisation électromagnétique, et aussi le fait que ce soit les formes de motifs qui permettent la concentration de trous la plus forte.

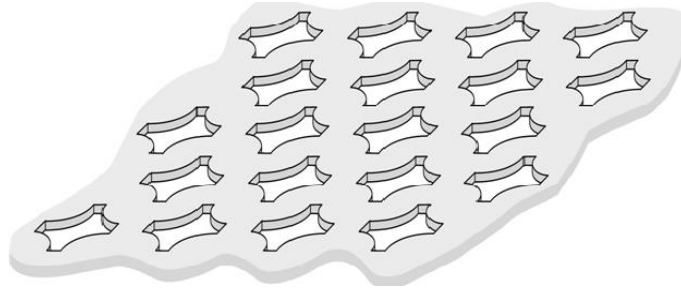


Figure II.14. Surface Sélective en Fréquence constituée d'une couche métallique.

Une configuration multi écrans est parfois utilisée, elle consiste en l'empilement de deux ou plusieurs couches métalliques perforées (grille métallique). Les FSSs à écran multiple fournissent plus de degrés de liberté, permettant ainsi de répondre aux exigences de conception strictes : la configuration multi écrans permet d'une part, d'obtenir une réponse en fréquence plus sélective, d'autre part, elle permet de mieux contrôler à la fois la bande de réflexion et la bande de transmission.

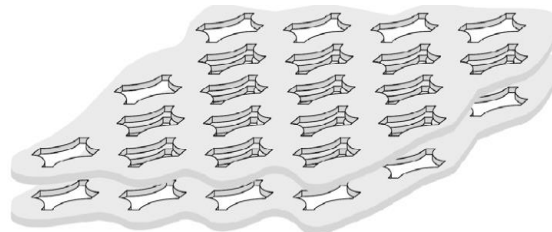


Figure II.15. Surface Sélective en Fréquence constituée de deux couches métalliques ayant des ouvertures arbitraires.

Une grille métallique avec des ouvertures multiples par cellule élémentaire (voir **figure II.15**) [28], peut être utilisée afin d'obtenir une réponse à double bande de fréquence. Une grille métallique avec des ouvertures multiples au sein d'une cellule élémentaire présente certains avantages. En fait, en considérant deux ouvertures par cellule élémentaire, la grille

métallique peut fonctionner dans deux bandes de fréquence rapprochées, et deux polarisations orthogonales peuvent être ajustées séparément.

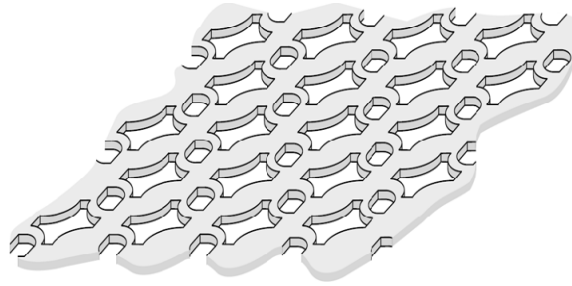


Figure II.16. Surface Sélective en Fréquence constituée d'une seule couche métallique ayant plusieurs ouvertures dans la cellule élémentaire.

Des grilles métalliques avec des ouvertures intensifiées peuvent parfois être utilisées (voir **figure II.16**), notamment pour les applications de radioastronomie [56], : elles permettent l'obtention de transition très raide, de la coupe-bande à la passe-bande, avec des taux de fréquence faible [29]. Cela est dû à l'effet de filtrage supplémentaire de l'ouverture intensifiée.

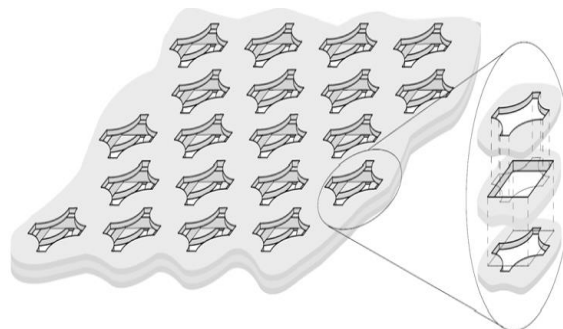


Figure II.17. Surface Sélective en Fréquence constituée d'une couche de métal avec des ouvertures échelonnées.

D'autres solutions apparaissent comme celle qui consiste à incliner les trous lorsque la plaque est éclairée sous incidence oblique. Cette solution a pour principal inconvénient de réduire notablement la largeur de bande utile.

D'autres conceptions utilisant des matériaux diélectriques favorisant l'adaptation de la grille ont également été testées [30]. Les sections de guides sont alors remplies de diélectriques et, des couches de même permittivité sont alors placées de part et d'autres de la grille. Cette architecture permet d'améliorer les performances de la grille, mais présentement, il est assez difficile de trouver un matériau diélectrique homogène intéressant.

Il serait intéressant d'indiquer que pour certaines applications des Surfaces Sélectives en Fréquence non planaires sont utiles (par exemple l'antenne CASSINI avec sub-rélecteur hyperbolique).

II.14. Les Applications des FSSs

Les applications FSS vont de l'ordinaire (fours à micro-ondes) à l'une des technologies contemporaines qui comprend des structures actives et reconfigurables telles que le cuir intelligent.

Le FSS a également des applications très importantes dans les antennes Fabry-Pérot Parmi eux :

II.14.1. Applications des FSS dans les antennes Fabry-Pérot double-bande [46]

Les antennes Fabry -Pérot sont des antennes à base de cavités résonnantes, généralement formées entre un plan de masse métallique et une paroi semi-réfléchissante, cette dernière étant une disposition périodique bidimensionnelle d'un groupe d'éléments FSS. Son principe est d'utiliser deux résonances de même hauteur pour produire la résonance, et ici les applications FSS sont montrées où une couche d'un carré SFS a été utilisée comme indiqué sur (la figure II.18). Deux couches diélectriques se chevauchant sont utilisées pour produire une réponse de phase inverse. La phase de réflexion des isolateurs est traversée par la phase optimale en deux endroits, cela permet de produire deux résonances de directions 14,5 dB et 15 dB. L'inconvénient de ce concept est que les croisements sont très étroits, ce qui a abouti à deux résonances avec des plages de profit très faibles de 3 dB, 4,5% et 4,6%. Les résultats de la tendance sont illustrés sur (la figure II.18 (c)).

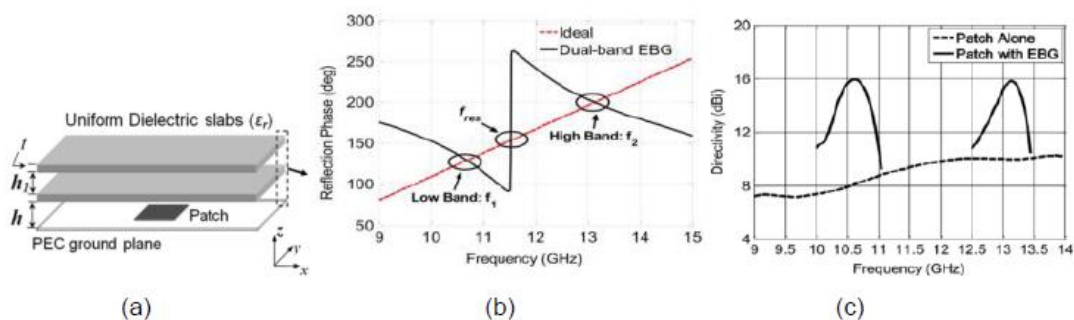


Figure II.18. Principe de la phase inversée (a) deux couches de diélectrique, (b) phase inversée, (c) directivités.

II.14.2. Applications des FSS dans les antennes Fabry-Pérot pour l'amélioration de la bande de gain 3-dB [46]

Nous allons également introduire des applications FSS pour optimiser la plage de gain de 3 dB. Pour une puissance maximale, c'est-à-dire une résonance, la phase de réflexion de la paroi du SFS doit répondre à une équation qui lui est propre. Dans le cas d'un mur FSS classique, cette équation est prise en compte avec une fréquence unique qui produit une résonance à petite échelle. Si nous voulons résonner sur une large plage, nous devons satisfaire l'équation sur une large plage de fréquences. Cela signifie que l'étage de réflexion doit avoir une réponse linéaire croissante selon cette équation. Sur cette conclusion, plusieurs antennes ont été développées pour améliorer la plage de gain de 3 dB. La croissance en phase de réflexion a été réalisée en utilisant deux couches de FSS carrées de dimensions différentes. La cellule FSS double couche apparaît, Triple couche pour étendre la gamme de fréquences dans laquelle l'inversion de phase est augmentée. Une cellule unitaire FSS a été utilisée et ainsi, la plage de gain double d'environ 3 dB par rapport à l'ajout d'une troisième couche FSS pour la même valeur de gain maximale.

II.14.3. Application des FSS dans les antennes d'irradiation du secteur Fabry-Pérot [46]

Il existe deux types de cavités Fabry-Beyrouth qui ont été utilisées pour produire un rayonnement sectoriel, la première est plane et la seconde est cylindrique.

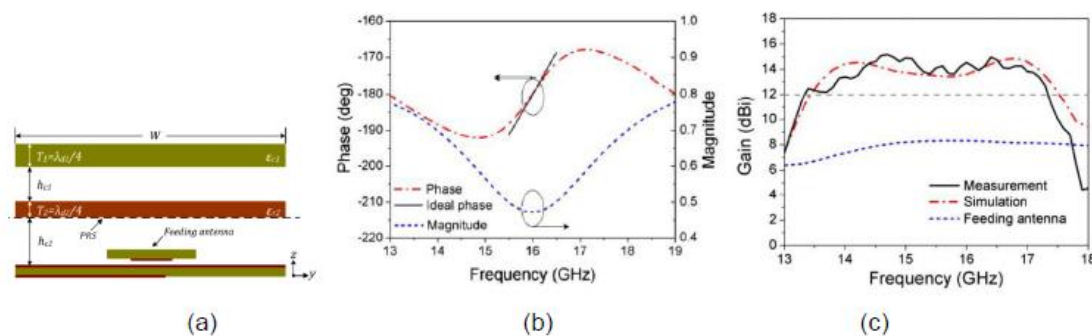


Figure II.19. Croissance de phase (a) Couches de diélectrique, (b) Magnitude et phase de réflexion, (c) directivité

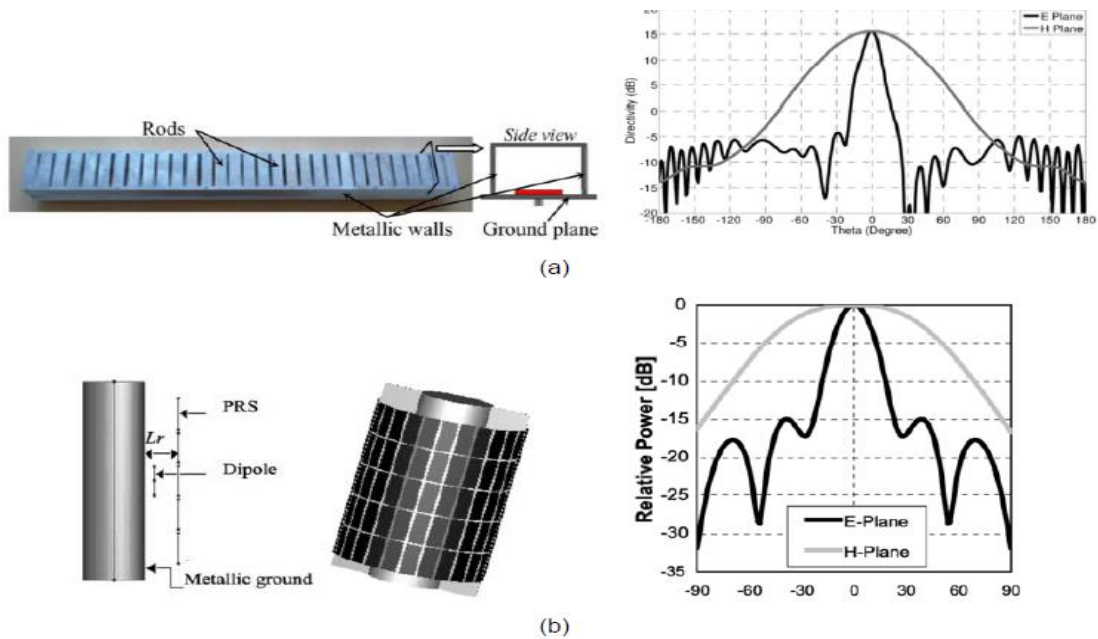


Figure II.20. Antenne Fabry-Pérot avec rayonnement sectoriel (a) forme planaire, (b) forme cylindrique.

Dans ces antennes, la forme de la lumière est rectangulaire avec des parois métalliques fixées de chaque côté de la lumière. La forme de la cavité ainsi que les parois métalliques favorisent la répartition elliptique du courant électrique à la surface des FSS utilisés. Cette distribution elliptique est responsable de l'irradiance sectorielle. Le gain maximal produit par ces structures est d'environ 15 dB. La forme cylindrique est présentée dans la figure, la cavité est formée entre un niveau de sol métallique et une paroi FSS également cylindrique. Le diagramme segmentaire est obtenu avec un gain maximum de 13,4 dB. Les deux antennes avec leurs diagrammes de rayonnement sont illustrées sur la **figure II.20**.

II.15. Conclusion

Les antennes patch jouent un grand rôle dans l'apport de notre confort car elle est compatible avec les derniers outils de communication. Malgré cela, elle fait face à de nombreuses pannes telles que faible gain et restrictions de bande passante, et ce que nous cherchons, c'est l'amélioration pour obtenir de meilleures performances.

Dans ce chapitre, nous décrivons les antennes patch à FSS et incluons ses caractéristiques, ainsi que nous essayons de collecter les informations les plus importantes sur le FSS en mentionnant ses principes les plus importants et ses différentes formes, et nous avons montré quelques domaines de ses applications.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Tebache Sofiane, " Méthode De Caractérisation Hyperfréquence Des Biskra, Juin 2013.
- [2] Oumy DIOP, "Etude et Minimisation du Facteur de Qualité d'Antennes Miniatures conçues pour de Petits Objets Communicants", Thèse de Doctorat, Université De Nice-Sophia Antipolis, Septembre 2013.
- [3] MENKHERFIS. S et ZEMMOURA .H '' Conception d'une antenne BIE bi-bande à haut gain Mémoire de master Université Abderrahmane MIRA-Bejaïa 2016/2017
- [4] AZZAZ RAHMANI Salima, " ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES IMPRIMEES MULTIBANDES EN ANNEAUX CONCENTRIQUES POUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS ", Thèse De Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, Juillet 2013.
- [5] Hedi RAGAD, "Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF", Thèse de Doctorat, 'Université de Tunis El Manar Tunisie, novembre 2013
- [6] Quentin VITALE, " Modélisation et conception d'antennes radar large bande pour la cartographie de la teneur en eau volumique des sols agricoles ", Thèse De Doctorat, 'université Pierre Et Marie Curie, juin 2014.
- [7] REFICE Mohamed Lamine, "Modélisation et simulation des antennes en onde Millimétrique à base de méta-matériaux.", mémoire de Magister, Université Ziane Achour de Djelfa, 2014
- [8] D. Khedrouche, "Modélisation des antennes microbandes par une analyse Tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juin 2009.
- [9] ABLA BEHLOUL," Contribution à l'étude des antennes micros trip Supraconducteur de forme triangulaire", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Avril 2010
- [10] Rabia Yahya," 'Etude et la réalisation des antennes ultra LARGE BANDE À DOUBLE POLARISATION". Mémoire pour l'obtention grade Maître ès sciences, Université du Québec INRS- ÉMT, 2011
- [11] KAID OMAR Omar, " Conception et modélisation d'une antenne pour les Communications pour -Ultra Large Bande-" thèse doctorat, Université Des Sciences Et De Technologie D'Oran, avril 2013
- [12] OULAD MANSOUR Houria," Les Effets De L'anisotropie Uni axiale Et De La Tangente De Perte Sur La Résonance Des Antennes Microbandes", Mémoire De Master,

Université Kasdi Mer bah Ouargla, 2015

[13] Abla. B, "Contribution A L'étude Des Antennes Micros trip Supraconducteur De Forme Triangulaire", Mémoire De Magister, Université Mentouri Constantine, 2010.

[14] Paul Le Behan" Analyse Et Conception De Nouvelles Structures Antennaires FILTRANTES "Elève Ingénieur de l'INSA Rennes Spécialité SRC – Master I-MARS PFE soutenu le 20/06/2017

[15] Franklin, Marconi, "Reflector for use in wireless telegraphy and telephony", US Patent, 1919

[16] R. Mettra, C. Chan et T. Cwik," Techniques d'analyse surfaces sélectives de fréquence - une revue", IEEE Proc. 76 (23): 1593-1615 (décembre 1988)

[17]. T. K. Wu, éd., "Frequency Selective Surface and Grid Array", Wiley, New York, 1995

[18]. B. A. Munk, "Surface sélective en fréquence - Théorie et conception", Wiley, New York, 2000

[19] Mohamed lamine Abdelghani" Etude Et Conception D'antennes Directives Large Bande A Base De Meta-Surfaces" Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophie D'doctorat (PhD.) en Télécommunications Avril 2017

[20] Eulogie Baudet "TCHIKAYA Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique de Changement d'Echelle (SCT)" Doctorat de l'université de Toulouse vendredi 22 octobre 2010

[21] Bertrand. Debonne. Modélisation et Intégration d'un écran Dichroïque dans un système d'antennes spatiales, Université Blaise pascal-Clermont II

[22] T. K. Wu, Frequency Selective Surface and Grid Array, John Wiley and Sons, 1995.

[23] J. C. Vardaxoglou, Frequency Selective Surfaces, John Wiley and Sons, 1997.

[24] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, Wiley Interscience, 2000

[25] C. C. Chen, "Transmission of Microwave Through Perforated Flat Plates of Finite Thickness," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-21, No. 1, pp. 1-6, Jan. 1973

[26] C. C. Chen, "Transmission Through a Conductive Screen Perforated Periodically with Apertures", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-18, No. 9, pp. 627-632, Sept. 1970

[27] C. C. Chen," Diffraction of Electromagnetic Waves by a Conducting Screen Perforated Periodically with Circular Holes," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-19, No. 5, pp. 475-481, May 1971

[28] J. A. Reed and D. M. Byrne, "Frequency Selective Surfaces with Multiple Apertures within a Periodic Cell," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 15, No. 3, pp. 660-668, Mar. 1998

[29] J. C. Chen, P. H. Stanton, and H. F. Reilly, Jr., "A Prototype Ka-Band Dichroic Plate with Stepped Rectangular Apertures," TDA Progress Report 42-124, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 143-152, Feb. 1996

[30] C. Mias, C. Tsakonas, C. Oswald "An Investigation into the Feasibility of designing Frequency Selective Windows employing periodic structures" (Ref. AY3922), The Nottingham Trent University, Department of Electrical and Electronic Engineering

CHAPITRE III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des différentes simulations et résultats qui sont concentré sur le but d'améliorer les performances des antennes micro rubans. Nous allons donner une description du programme CST MWS que nous avons utilisé, montrant la gamme de fréquences que nous avons choisie qui est la 5G. Nous allons comparer une antenne patch sans et avec slot (mono-bande et double bande). Les caractéristiques de l'antenne BIE ont été étudié (coefficient de réflexion S_{11} , fréquence de résonance, bande passante, gain et directivité). Comme, nous avons inséré une couche FSS et étudié l'influence de ses différents paramètres.

III.2. Présentation générale du simulateur CST MWS

CST MICROWAVE STUDIO est un logiciel complet pour l'analyse et la conception électromagnétique dans la gamme haute fréquence. Il simplifie l'insertion des structures en fournissant un solide en 3D pour modéliser à la fin chaque élément.

Il est un simulateur électromagnétique basé sur la technique des intégrations finis (FIT). Cette méthode numérique fournit un arrangement spatial de discrétisation, applicable à des divers problèmes électromagnétiques, s'étendant du calcul des champs statiques aux applications haute fréquence dans le domaine temporel ou fréquentiel. À la différence de la plupart des méthodes numériques, la méthode FIT discrétisée spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Afin de résoudre ces équations numériquement, un domaine fini, de calcul est défini. L'espace est donc divisé en cellules élémentaires. Le maillage généré est donc volumique et chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles par des différentielles. Cet outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageux en termes de temps de calcul [1].

III.3. La technologie 5G [2]

Les technologies IMT-2020 de la cinquième génération (5G) est en cours, et elles possèdent un potentiel de transformation immense pour rendre nos vies meilleures.

De meilleurs soins de santé, des villes plus intelligentes, une industrie bien plus efficace tout cela devient possible à l'heure où l'Internet prend de l'ampleur et s'accompagne d'une large gamme de solutions innovantes, qui font tourner notre économie moderne. Toutefois, sans les réseaux 5G, aucun de ces éléments ne peut exprimer tout son potentiel. Bientôt, en effet, les

systèmes 5G intelligents deviendront indispensables pour satisfaire la forte demande de données des milliards de personnes qui utilisent des quantités de vidéos chaque jour plus importantes.

La 5G permettra des débits de données nettement plus rapides, une connectivité fiable ainsi qu'une faible latence pour les télécommunications mobiles internationales (IMT) autant de points nécessaires à notre nouvel écosystème de communications mondial, constitué de dispositifs connectés envoyant de grandes quantités de données via la large bande à ultra-haut débit [3].

La bande des 3,5 GHz a été attribuée en exclusivité à la 5G. Les opérateurs pourront également faire de la 5G dans la bande des 700 MHz et celle des 2,1 GHz, déjà attribuées à la 4G, mais à condition d'avoir du spectre disponible. À termes, la bande des 26 GHz sera également attribuée à la 5G.

III.3.1. Les avantages des fréquences de la 5G

Les quatre bandes de fréquences utilisées par la 5G ont toutes des propriétés différentes. La bande des 700MHz est celle qui va assurer la meilleure couverture mobile. La bande des 26GHz est celle qui offrira les meilleurs débits. Et, la bande des 3,5GHz et celle des 2,1GHz sont celles qui offrent le meilleur compromis entre débit et portée du signal.

III.4. Antenne patch rectangulaire bi-bande

III.4.1. Description de l'antenne patch à substrat normal

Nous avons choisi une antenne patch rectangulaire qui est constituée de plusieurs couches, dont la première est le plan de masse, qui faisait de long 100mm et de large 140mm, et son épaisseur $T = 0,017mm$.

Au-dessus c'est la couche de substrat (diélectrique) avec une épaisseur $h = 1,524mm$ avec la même largeur et longueur que le plan de masse, puis nous avons créé un patch de largeur $w = 40mm$ et longueur de $L = 70mm$.

Ainsi, nous avons une antenne patch simple, et nous avons ajouté un slot, avec des dimensions ajustables.


III.4.2. Antenne patch rectangulaire bi-bande à substrat normal avec et sans slot

«  ».

L'antenne qu'on a simulée fonctionne dans la bande 3.5 GHz (5G), dont les dimensions sont résumées dans le **Tableau III.1.**

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
h : épaisseur du substrat	1.524
W : largeur du substrat	140
L : longueur du substrat	100
X_0 : position du point d'alimentation	0.1
T : épaisseur du plan de masse	0.017
S : surface du patch	2800mm^2

Tableau.III.1. Dimensions de l'antenne patch rectangulaire à substrat normal.

Après avoir effectué plusieurs simulations et après avoir changé plusieurs fois les paramètres. Nous avons atteint des résultats acceptables fixant les valeurs des paramètres, à savoir la longueur de l'antenne $L = 40\text{mm}$, largeur $w = 70\text{mm}$, et cela pour avoir une fréquence dans la bande 3.5 GHz et avec une très bonne adaptation de l'antenne. Le type du diélectrique qui forme le substrat, $\epsilon_r = 4$ « **Epoxy resin** » et enfin, la position du point d'alimentation $X_0 = 0,1$ et $Y_0 = -1$. Cela nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants d'une antenne bi-bande en utilisant les dimensions mentionnées ci-dessus. Nous avons ajouté un slot (ouverture) ayant une forme «  ».

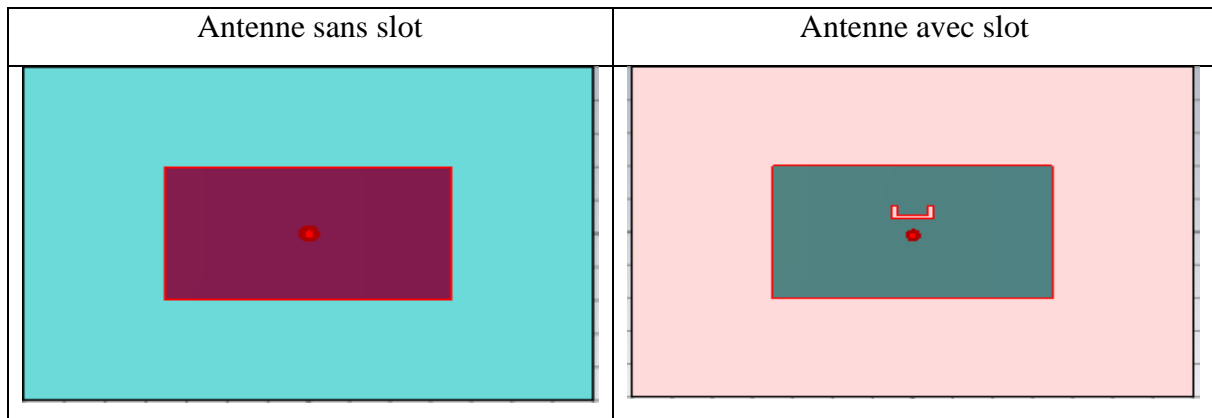


Tableau III .2. La structure d'antenne patch rectangulaire à substrat normal avec et sans slot.

On commence par comparer une antenne sans et avec slot de forme « \sqsubset ».

A) Fréquence de résonance

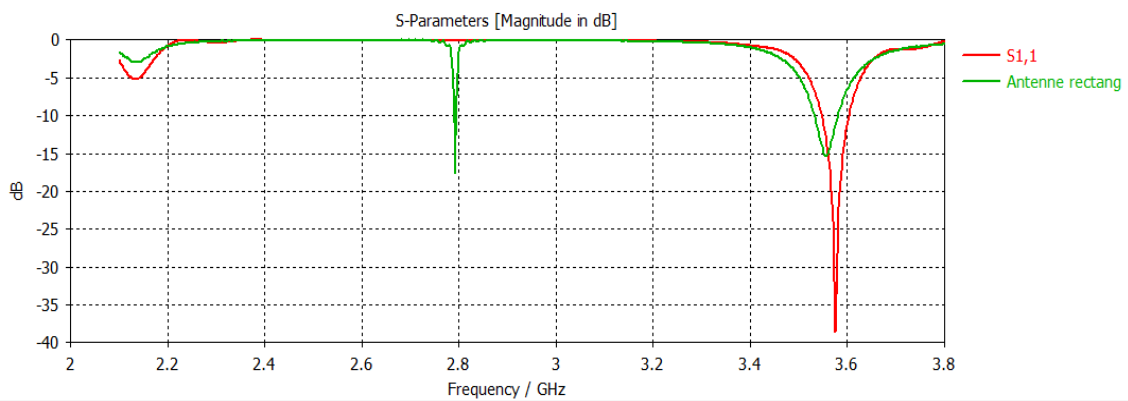


Figure III.1. Coefficients de réflexion S_{11} pour antenne patch rectangulaire à substrat normal sans (en rouge) et avec slot.

B) Directivité :

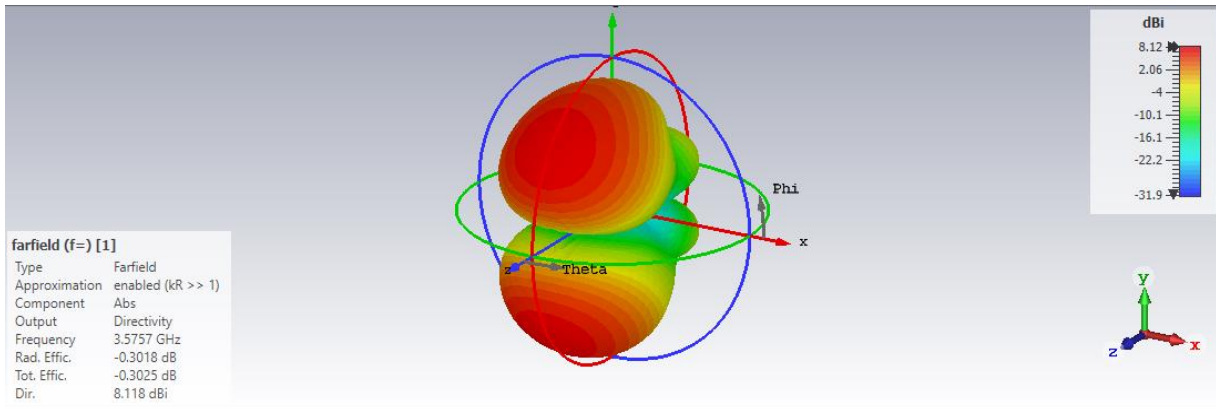


Figure III .2. Directivité D_1 en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal (sans slot).

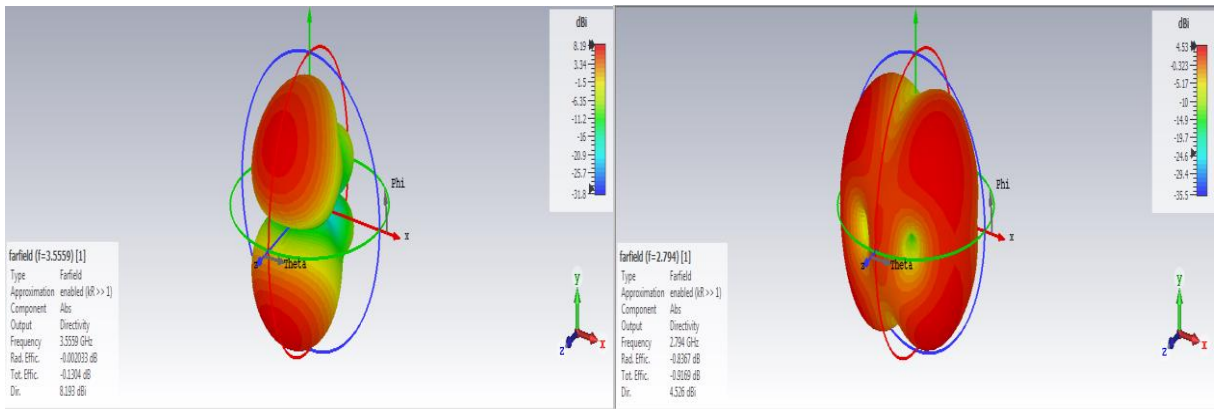


Figure III .3. Directivité D_1 D_2 en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot.

C) Gain

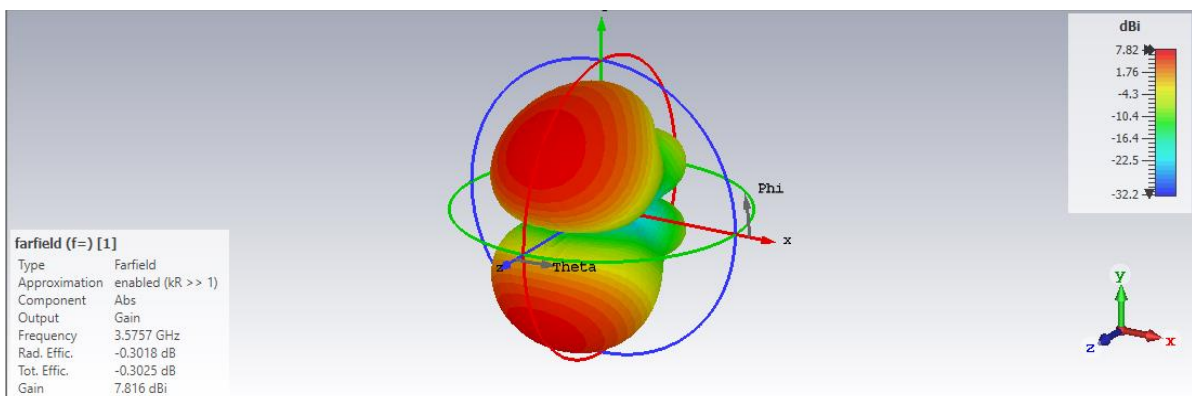


Figure III. 4. Gain G_1 en 3D d'une antenne patch rectangulaire à substrat normal.

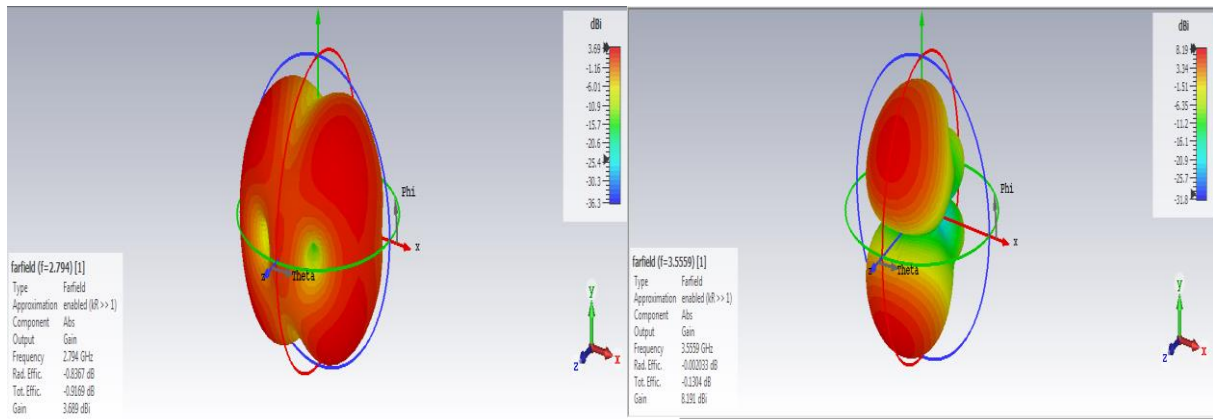


Figure III .5. Gain G_1 et G_2 en 3D d’une antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
Antenne sans slot	3.575	/	0.055	/	-38.14	/	8.12	/	7.82	/
Antenne avec slot	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19

Tableau III.3. Caractéristiques de l’antenne patch rectangulaire à substrat normal avec et sans slot.

On dit que l’antenne est bien adaptée si le facteur de réflexion est $S_{11} < -10\text{dB}$ donc c’est le cas pour les deux antennes.

On remarque :

- Il y a une bande pour l’antenne patch rectangulaire à substrat normal sans slot et deux bandes pour une antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot (double bandes) ;
- Les fréquences de résonance d’antenne avec slot sont inférieures à la fréquence d’antenne sans slot ;
- Les valeurs du coefficient de réflexion S_{11} pour l’antenne sans slot et l’antenne avec slot sont inférieur à -10dB ;
- Quant à l’antenne sans slot, il n’y a qu’une seule bande étroite par rapport à l’antenne avec slot qui a deux bandes proches et étroites ;
- La directivité de l’antenne sans slot est presque là même par rapport à la deuxième fréquence de l’antenne avec slot et est supérieure à la directivité de la première fréquence. La même remarque concernant le gain.

III.4.3. Comparaison entre une antenne patch avec slot à substrat BIE et normal

A) Coefficient de réflexion S_{11}

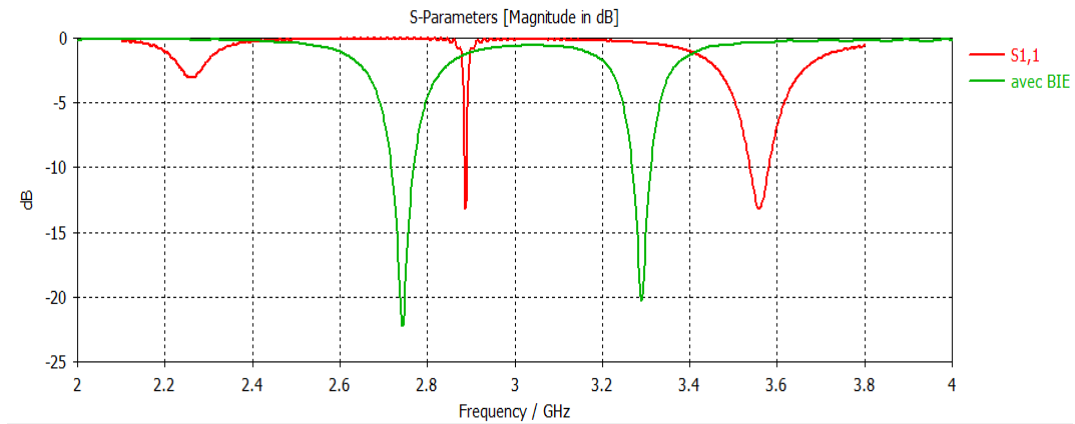


Figure III .6. Coefficients de réflexion S_{11} d’une antenne avec slot à substrat BIE et substrat normal.

B) Directivité

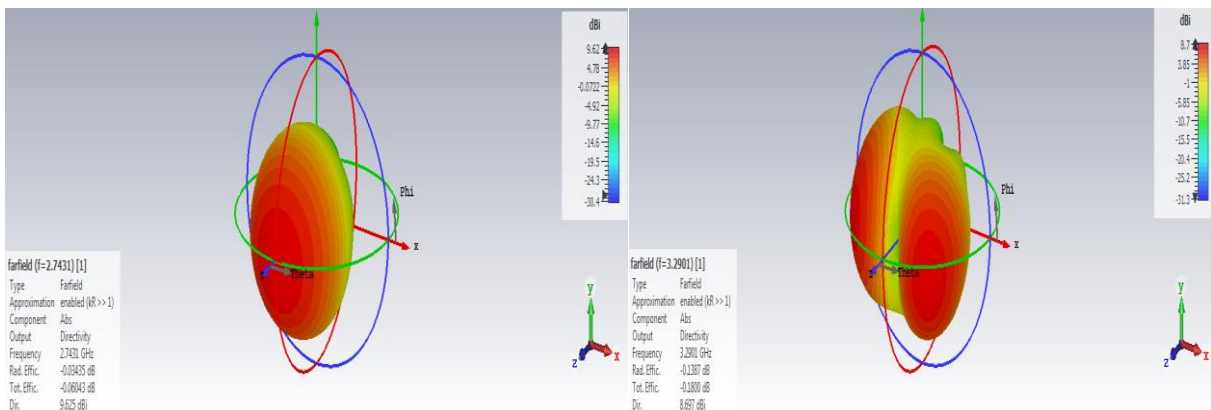


Figure III .7. Directivité D_1, D_2 en 3D d’une antenne patch rectangulaire avec slot à substrat BIE.

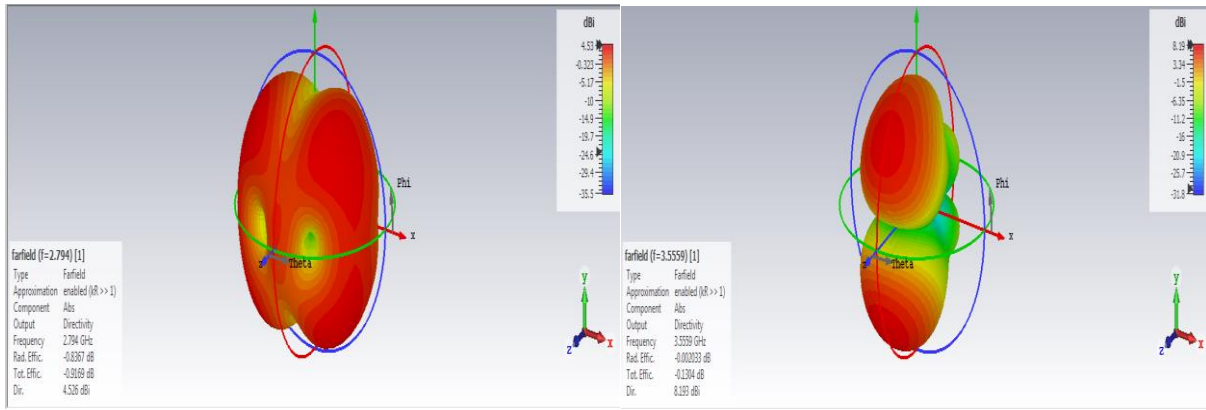


Figure III .8. Directivité D_1, D_2 en 3D d'une antenne patch rectangulaire avec slot.

C) Gain

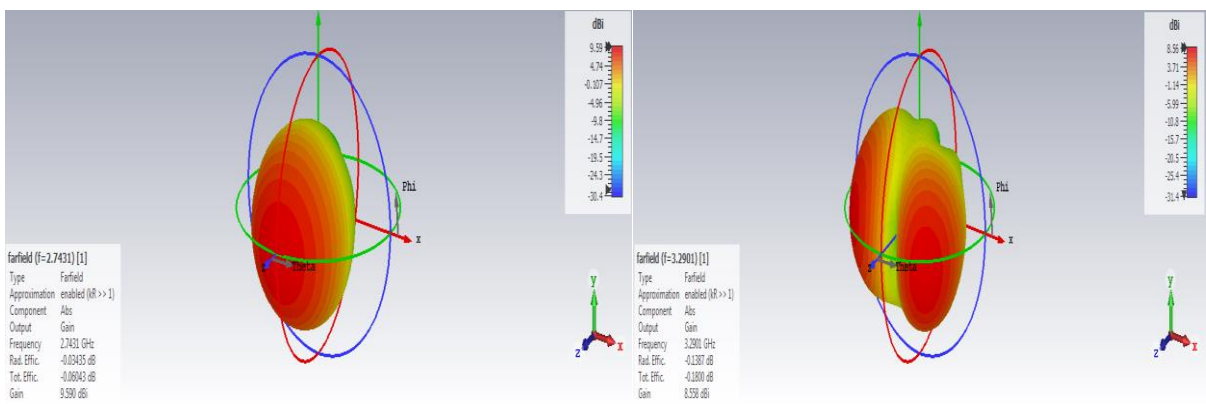


Figure III .9. Gain $G_1 et G_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire BIE.

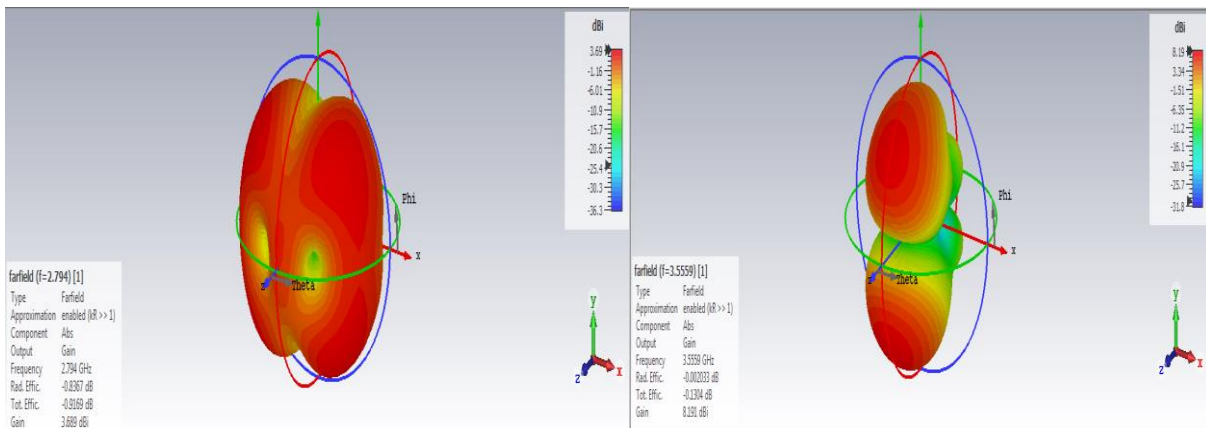


Figure III .10. Gain $G_1 G_2$ en 3D d'une antenne patch rectangulaire avec slot.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
Antenne substrat BIE	2.743	3.29	0.051	0.042	-22.2	-20.23	9.62	8.7	9.59	8.56
Antenne avec slot	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19

Tableau III.4. Caractéristiques de l’antenne substrat BIE et antenne avec slot.

- On constate que les fréquences pour une antenne à substrat BIE sont inférieures par rapport à celles de l’antenne avec slot ;
- La bande passante pour une antenne à substrat BIE est plus large par rapport à l’antenne à substrat normal ;
- Le gain et la directivité pour une antenne à substrat BIE sont plus importants.

III.4.4. Effet de la variation de l’épaisseur du substrat d’une antenne avec slot

A) Coefficients de réflexion S_{11}

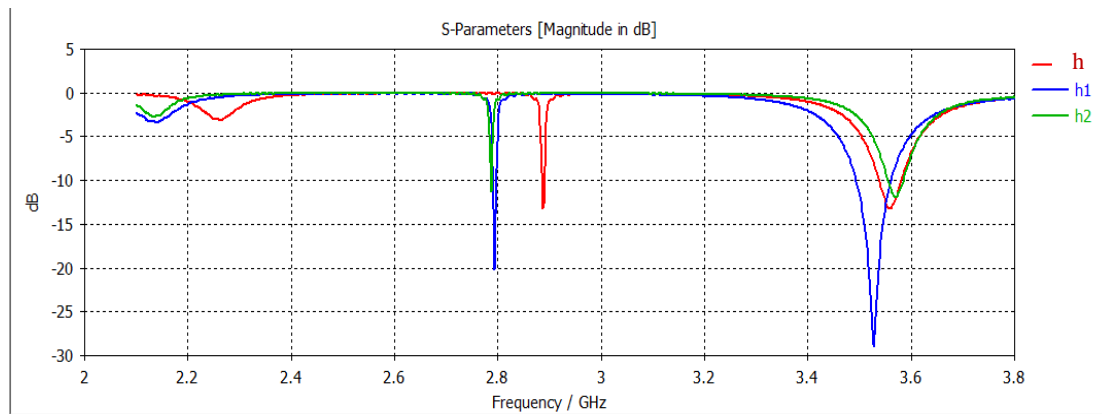


Figure III.11. Coefficients de réflexion S_{11} pour différents épaisseurs du substrat.

B) Directivité :

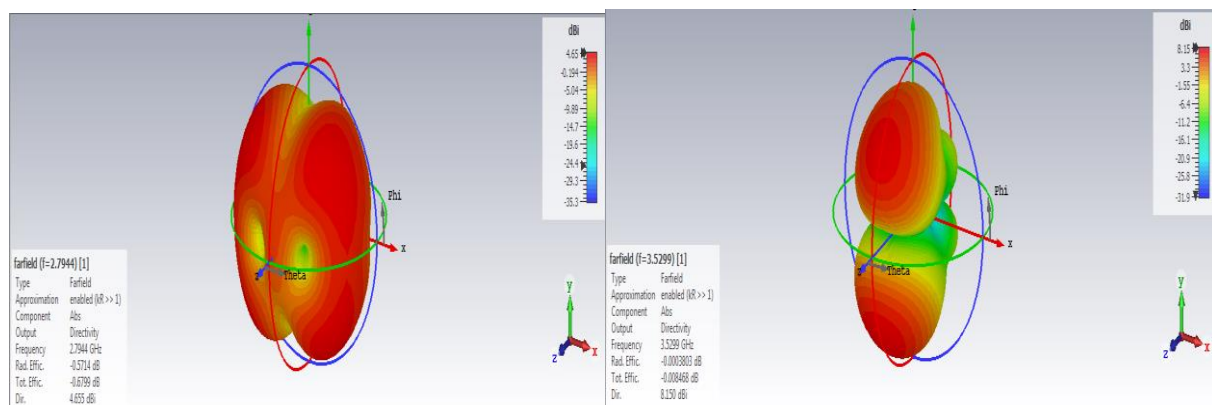


Figure III.12. Directivité D_1D_2 en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1=2.024\text{ mm}$.

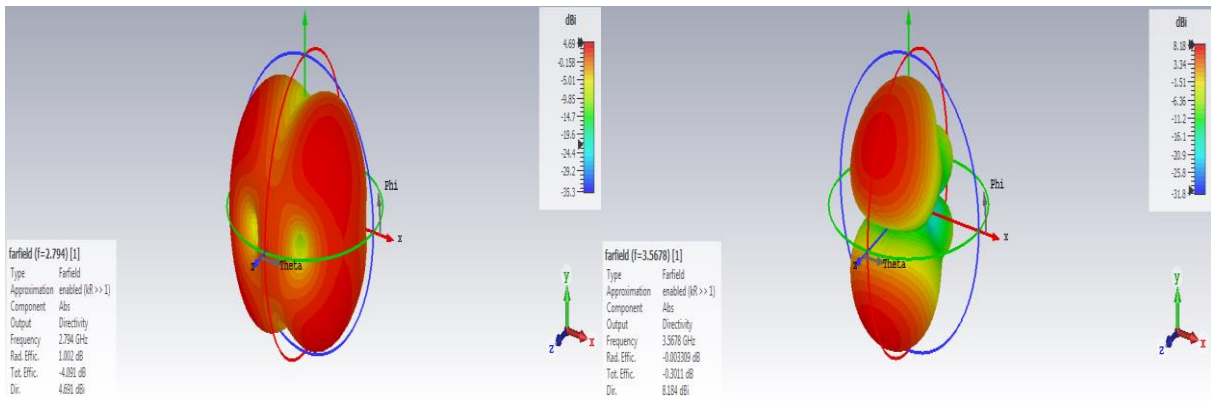


Figure III.13. Directivité D_1, D_2 en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.224 \text{ mm}$.

C) Gain

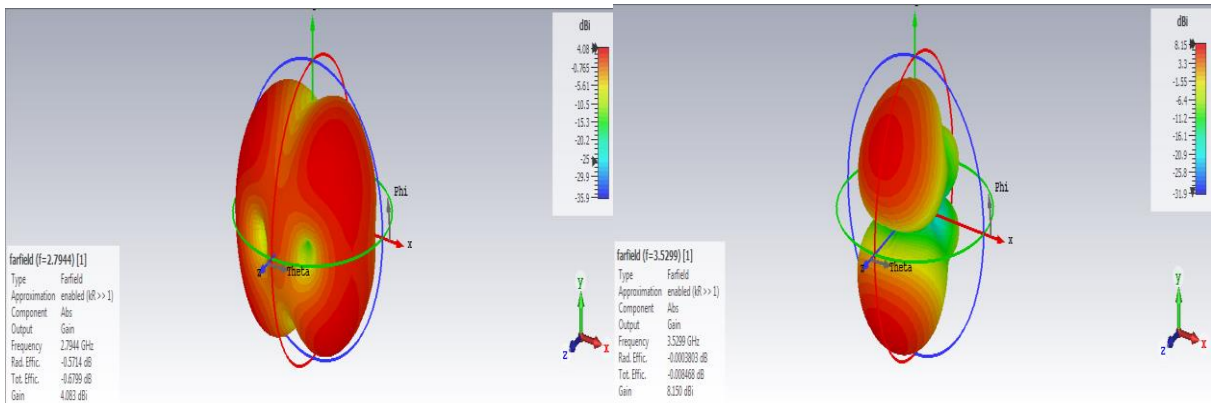


Figure III.14. Gain G_1, G_2 en 3D pour une épaisseur du substrat $h_1 = 2.024 \text{ mm}$.

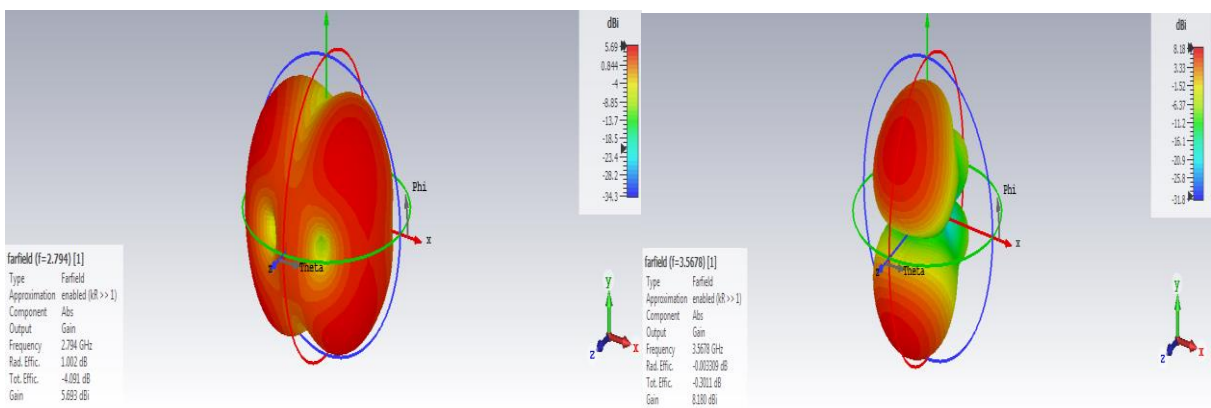


Figure III.15. Gain G_1, G_2 en 3D pour une épaisseur du substrat $h_2 = 1.224 \text{ mm}$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$h_1=2.024$	2.794	3.529	0.0059	0.068	-20.44	-28.91	4.65	8.15	4.08	8.15
$h=1.524$	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19
$h_2=1.224$	2.794	3.567	0.002	0.029	-10.45	-11.8	4.69	8.18	5.69	8.18

Tableau III.5. Caractéristiques de l'antenne patch avec slot en fonction de l'épaisseur du substrat.

A partir du tableau III.5. On remarque :

- Coefficients de réflexion S_{11} change avec la variation de l'épaisseur du substrat ;
- Notez que la fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat ;
- Nous constatons un élargissement de la bande passante à mesure que l'épaisseur du substrat augmente ;
- Le gain et la directivité varient non-uniformément avec la diminution de l'épaisseur du substrat.

III.4.5. Effet de la variation de la largeur et la longueur du patch

III.4.5.1. La largeur du patch

A) Coefficients de réflexion S_{11}

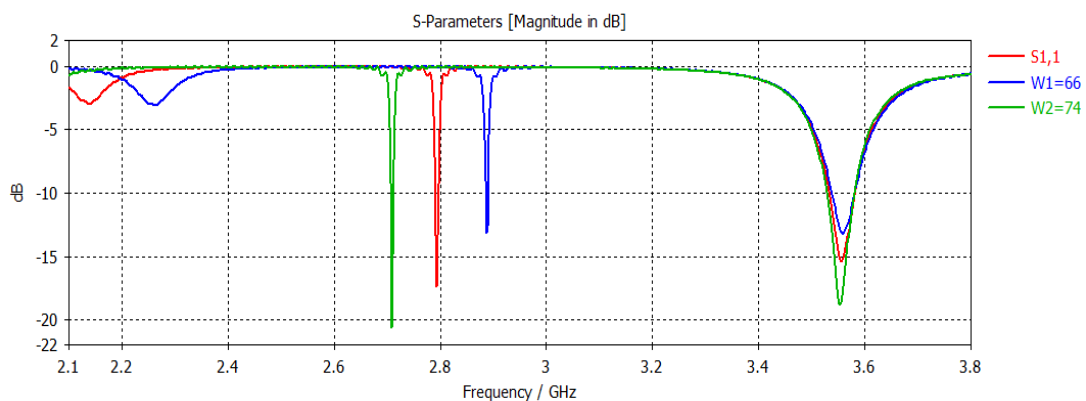


Figure III .16. Coefficients de réflexion S_{11} pour différentes largeurs du patch.

B) Directivité :

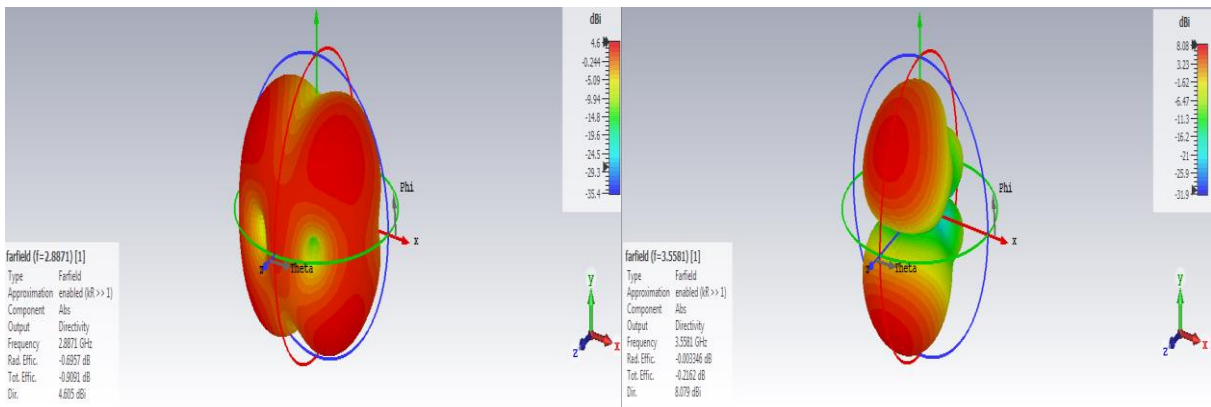


Figure III.17. Directivité D_1, D_2 en 3D pour une largeur de patch $W_1 = 66mm$.

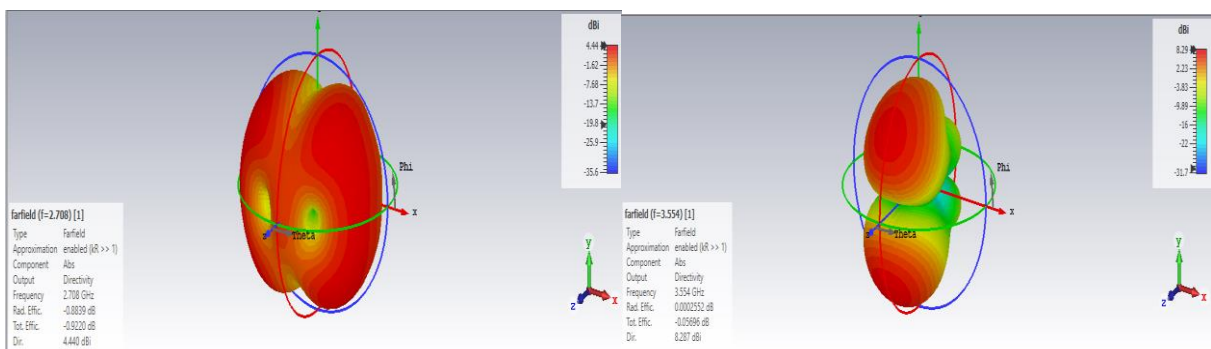


Figure III.18. Directivité D_1, D_2 en 3D pour une largeur de patch $W_2 = 74mm$.

c) Gain

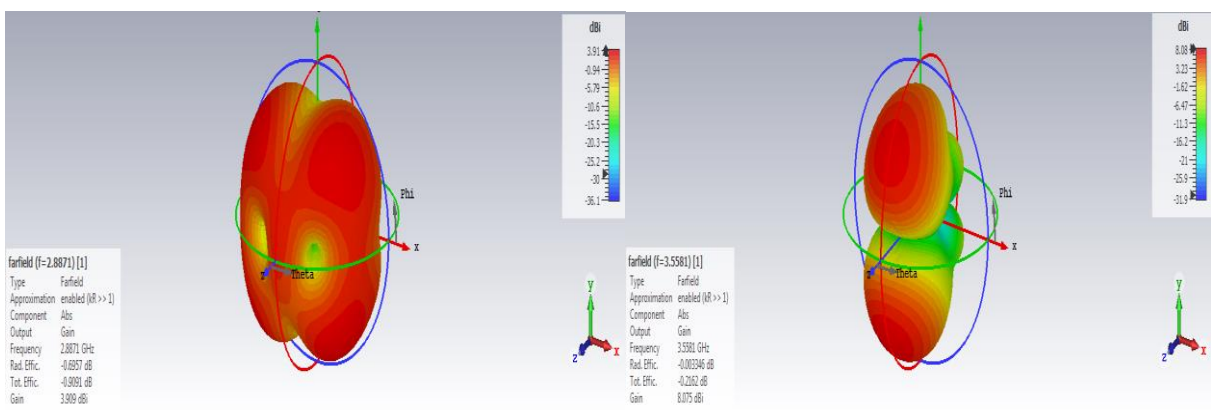


Figure III.19. Gain G_1, G_2 en 3D pour une largeur de patch $W_1 = 66mm$.

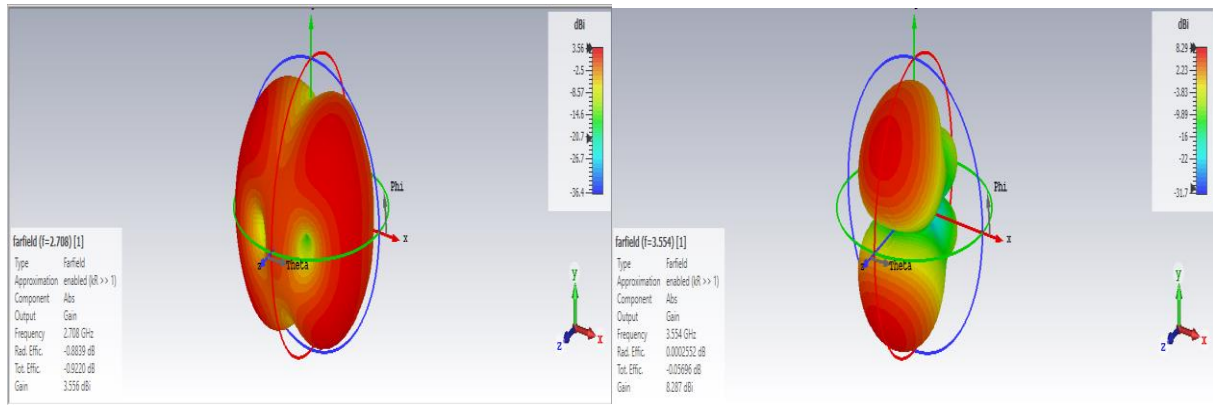


Figure III.20. Gain G_1, G_2 en 3D pour une largeur de patch $W_2 = 74mm$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$W_1=66$ mm	2.887	3.558	0.0047	0.0433	-13.18	-13.2	4.6	8.08	3.91	8.08
$W=70$ mm	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19
$W_2=74$ mm	2.708	3.554	0.0054	0.051	-20.59	-18.85	4.44	8.29	3.56	8.29

Tableau III.6. Caractéristiques de l’antenne patch avec slot en fonction de la largeur du patch.

A partir du tableau, on peut dire :

- Lorsque nous diminuons la largeur de l'antenne, nous remarquons une augmentation des fréquences de résonance (des deux bandes) ; Une diminution à la fois du coefficient de réflexion et la bande passante ; Une légère augmentation de gain et de directivité pour la première fréquence F_{r1} , et on remarque le contraire à la fréquence F_{r2} ;
- Quant à l'augmentation de la largeur de l'antenne, on retrouve une diminution des fréquences de résonance, une augmentation de la bande passante, et une amélioration de l'adaptation (S_{11}) ;
- Directivité et gain sont élevés surtout à la fréquence F_{r2} et faible à la fréquence F_{r1} .

III.4.5.2. La longueur du patch

A) Coefficient de réflexion S_{11}

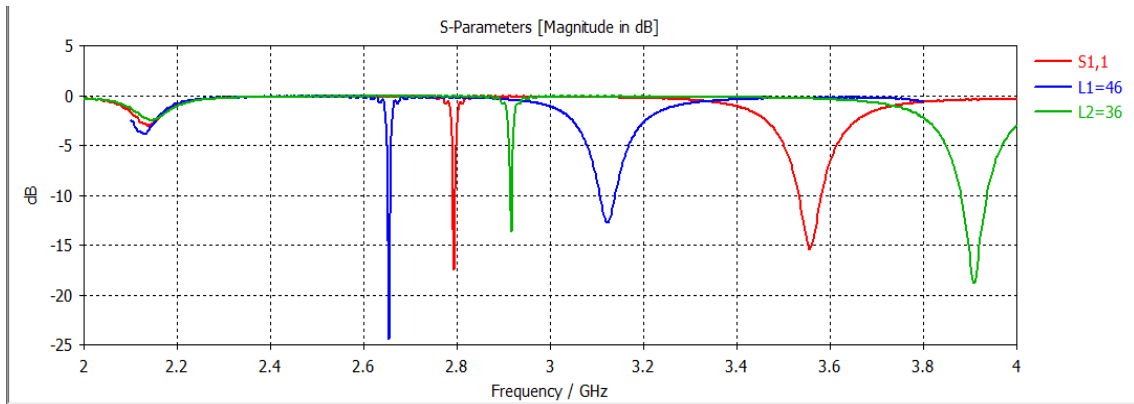


Figure III.21. Coefficients de réflexion S_{11} pour longueur du patch.

B) Directivité

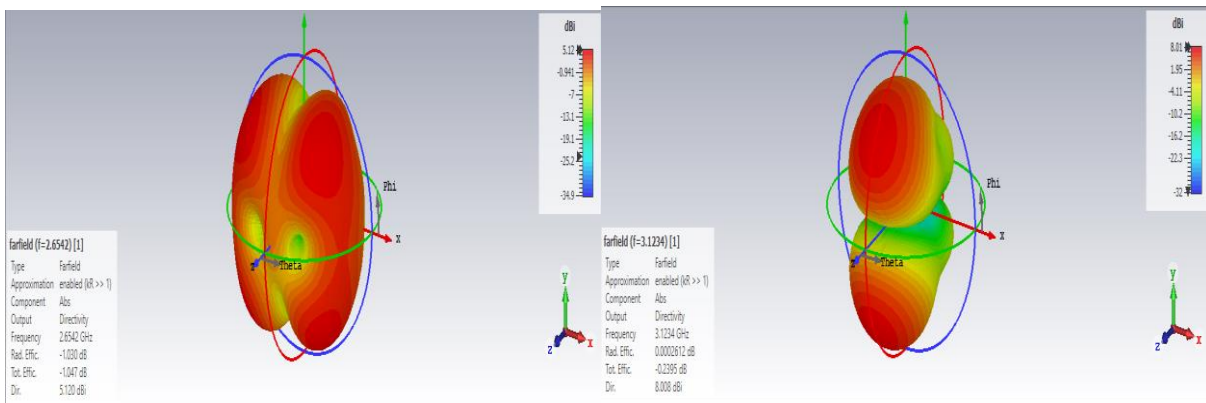


Figure III .22. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une la longueur $L_1 = 46 \text{ mm}$.

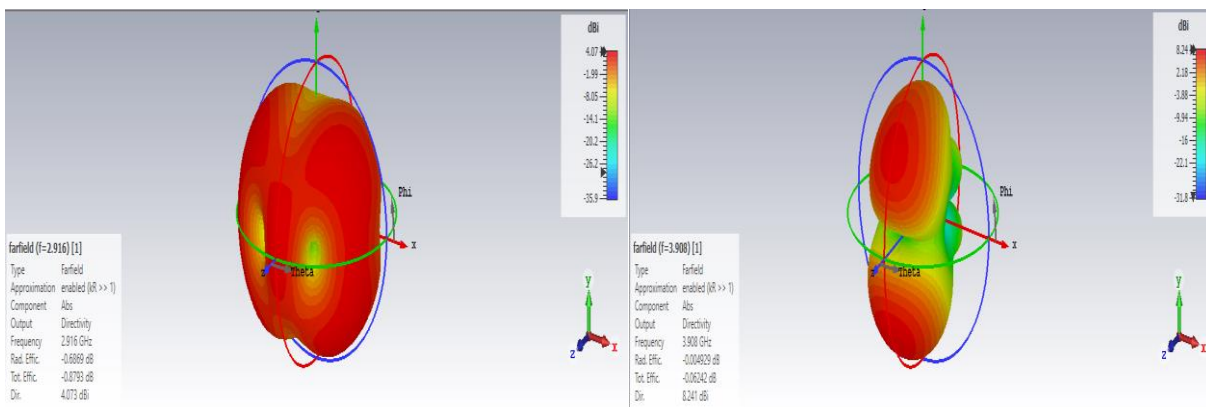


Figure III .23. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour une la longueur $L_2 = 36 \text{ mm}$.

C) Gain

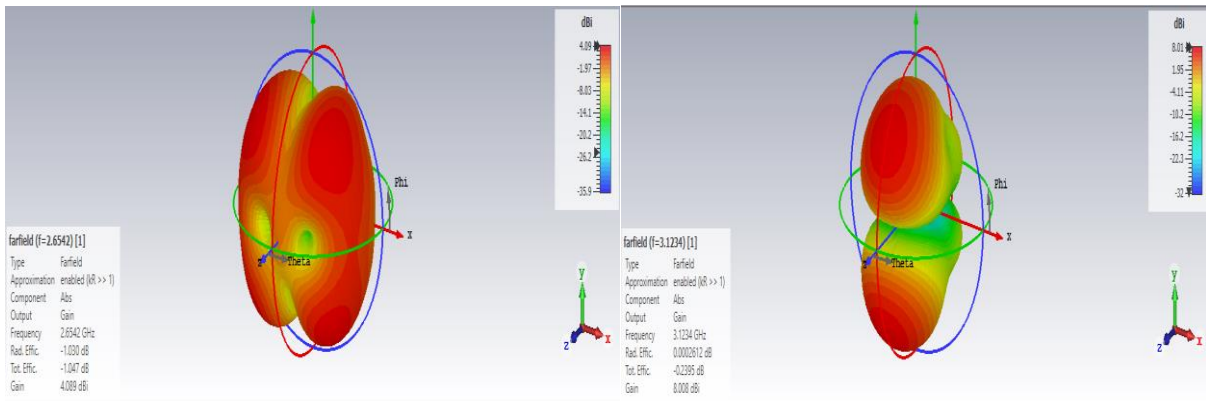


Figure III .24. Gain G_1, G_2 en 3D pour une la longueur $L_1 = 46 \text{ mm}$.

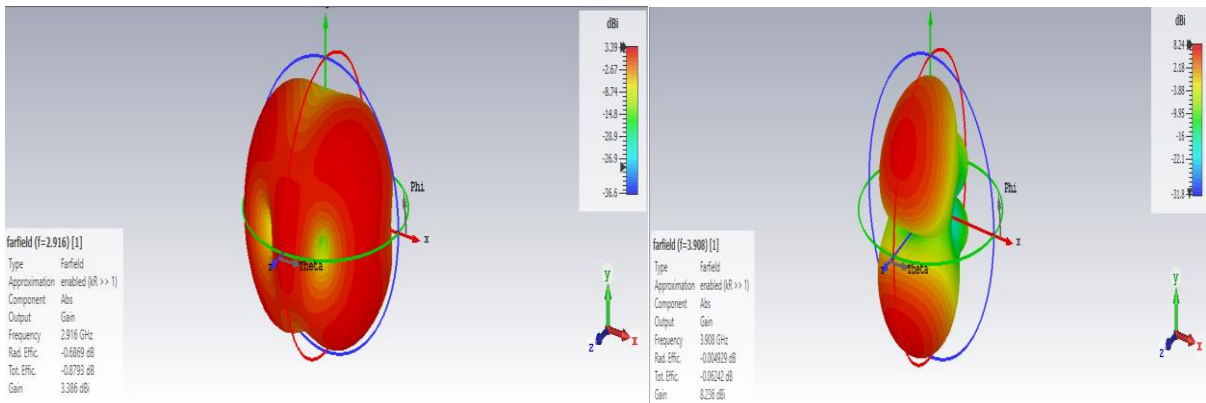


Figure III .25. Gain $G_1 G_2$ en 3D pour une la longueur $L_2 = 36 \text{ mm}$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$L_1=46 \text{ mm}$	2.654	3.12	0.005	0.033	-24.35	-12.71	5.12	8.01	4.09	8.01
$L=40 \text{ mm}$	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19
$L_2=36\text{mm}$	2.916	3.908	0.004	0.055	-13.62	-18.80	4.07	8.24	3.39	8.24

Tableau III.7. Caractéristiques de l’antenne patch avec slot en fonction de la longueur du patch.

Après avoir varié les la longueur de l’antenne et effectué les simulations, on a pu résumer ce qui suit :

- En augmentant la longueur, on constate que les fréquences de résonances et la bande passante BP_2 diminuent et la bande passante BP_1 augmente légèrement.

- Quant au gain et à la directivité, on retrouve une augmentation pour la première fréquence F_{r1} et une diminution pour la seconde fréquence F_{r2} .

III.4.6. Effet de la variation de la permittivité du substrat

A) Coefficient de réflexion S_{11}

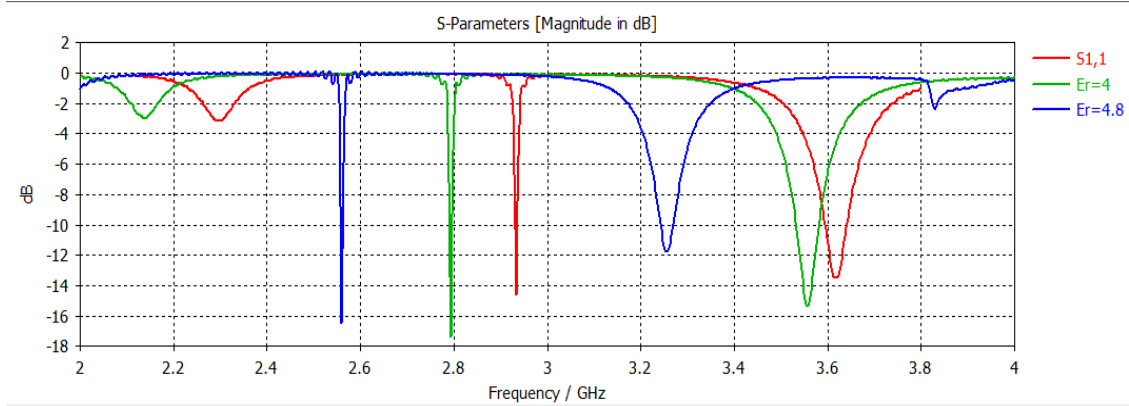


Figure III.26. Coefficients de réflexion S_{11} pour différents matériaux du substrat (ϵ_r).

B) Directivité

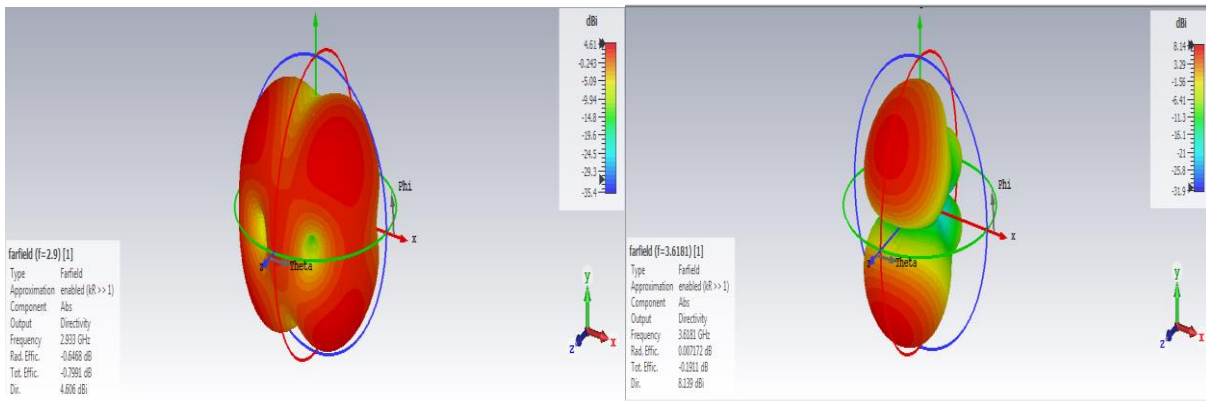


Figure III.27. Directivité D_1, D_2 en 3D pour Paper (oil impregnated) $\epsilon_r = 3.87$.

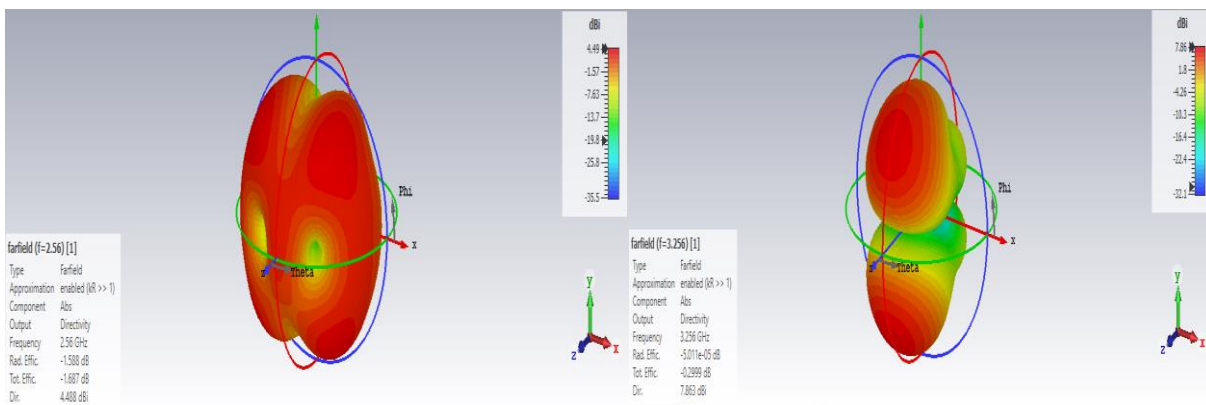


Figure III.28. Directivité D_1, D_2 en 3D pour G-10 (loss free) $\epsilon_r = 4.8$.

C) Gain

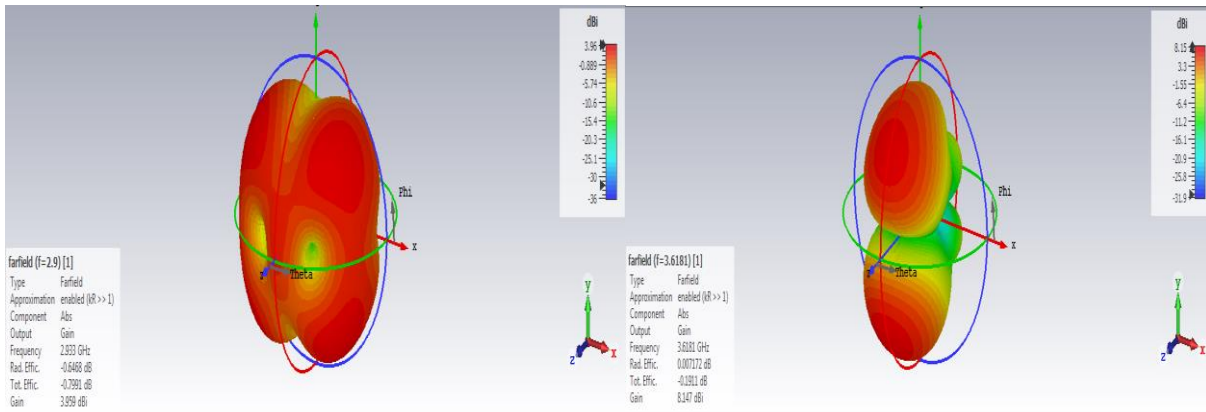


Figure III.29. Gains G_1, G_2 en 3D pour Paper (oil impregnated) $\epsilon_r = 3.87$.

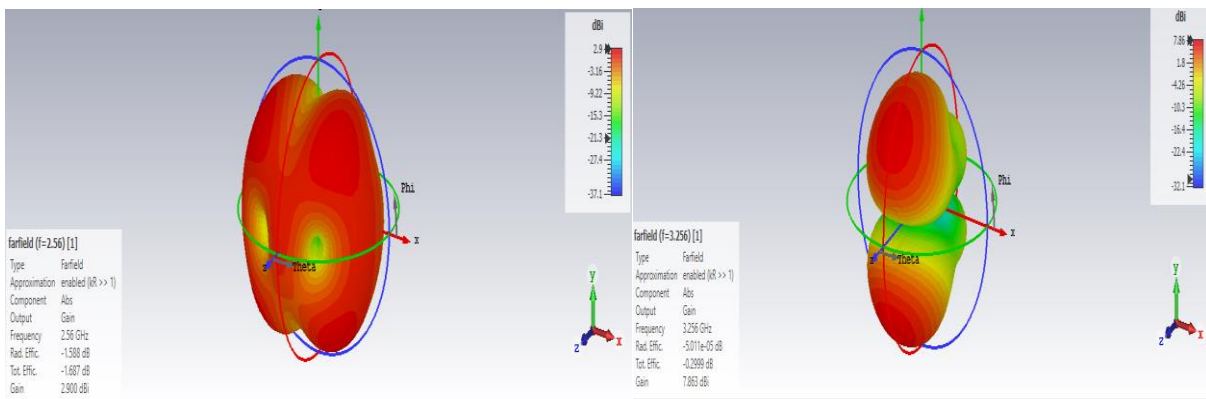


Figure III.30. Gains G_1, G_2 en 3D pour G-10 (loss free) $\epsilon_r = 4.8$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$\epsilon_r = 3.87$	2.933	3.6181	0.005	0.047	-14.62	-13.50	4.61	8.14	3.9	8.15
$\epsilon_r = 4$	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19
$\epsilon_r = 4.8$	2.56	3.256	0.0042	0.028	-16.49	-11.75	4.49	7.86	2.9	7.86

Tableau III.8. Caractéristiques de l'antenne patch avec slot en fonction de la permittivité du substrat.

Après la simulation, nous constatons que :

- Lors du changement de matériau avec $\epsilon_r = 3.87$, on observe un léger changement dans tous les caractéristiques non uniforme ;

- En le remplaçant par $\epsilon_r = 4.3$, on remarque une expansion de la bande passante et amélioration de l'adaptation, ainsi que le gain et la directivité, mais le gain à la fréquence F_{r1} diminue.

III.4.7. Effet de la variation de la position du slot

A) Coefficient de réflexion S_{11}

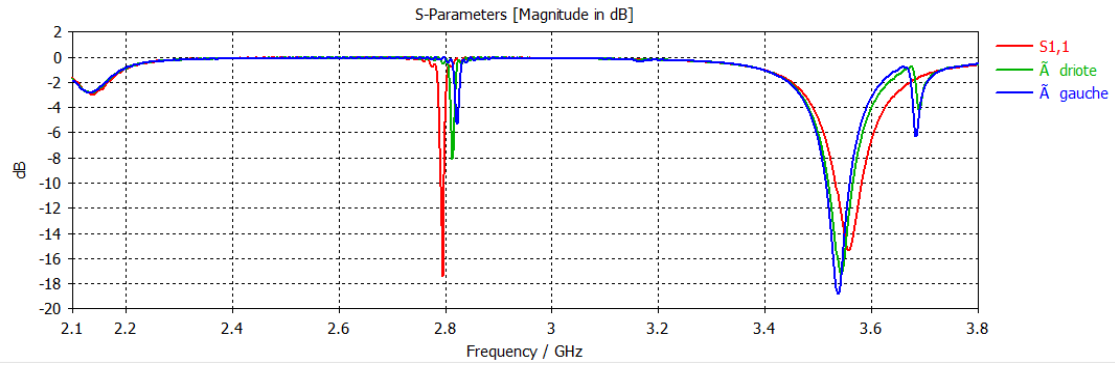


Figure III. 31. Coefficients de réflexion S_{11} pour variation de la position du slot.

B) Directivité

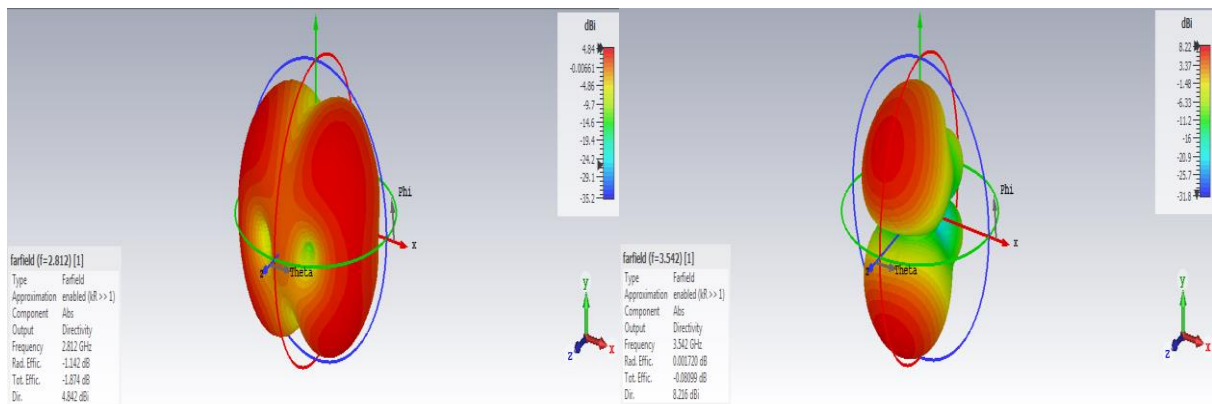


Figure III.32. Directivités D_1 , D_2 en 3D pour un décalage de la position de slot à droite.

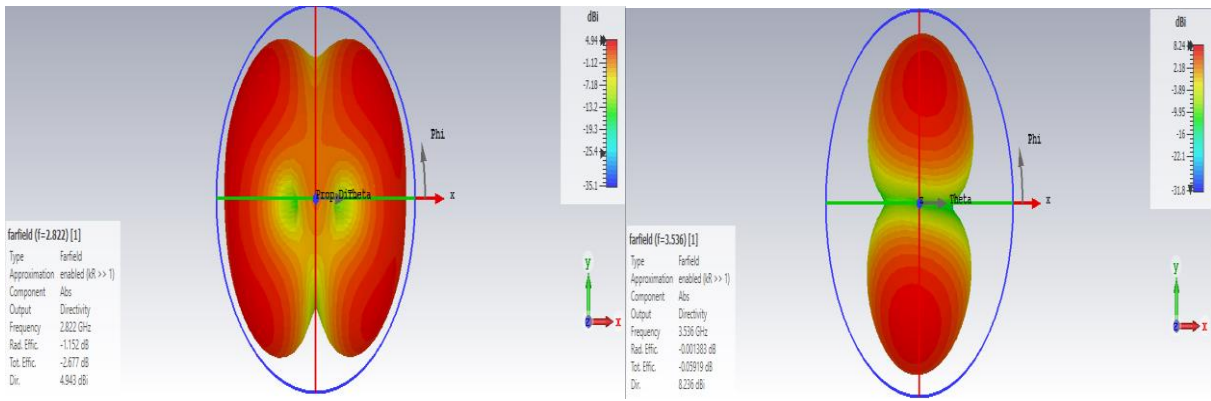


Figure III.33. Directivité D_1, D_2 en 3D pour un décalage de la position de slot à gauche.

C) Gain

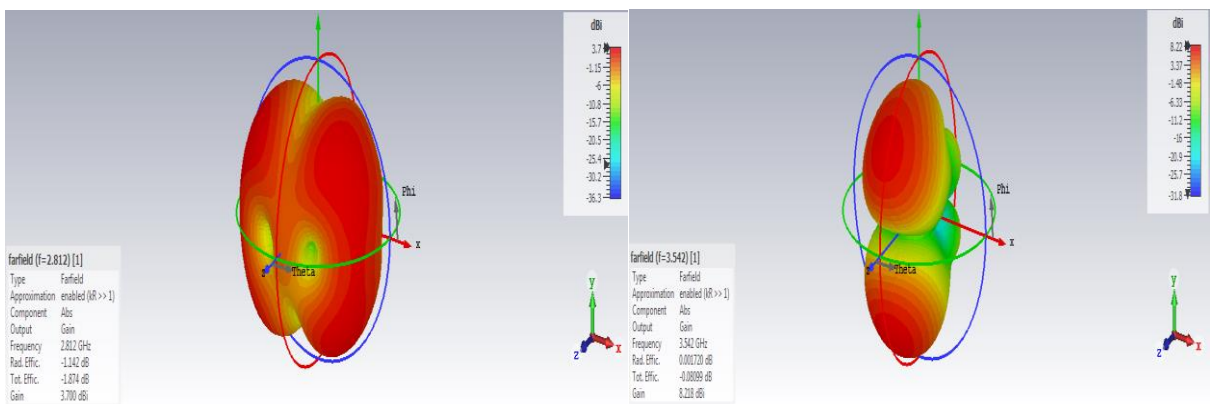


Figure III.34. Gains G_1, G_2 en 3D pour un décalage de la position de slot à droite.

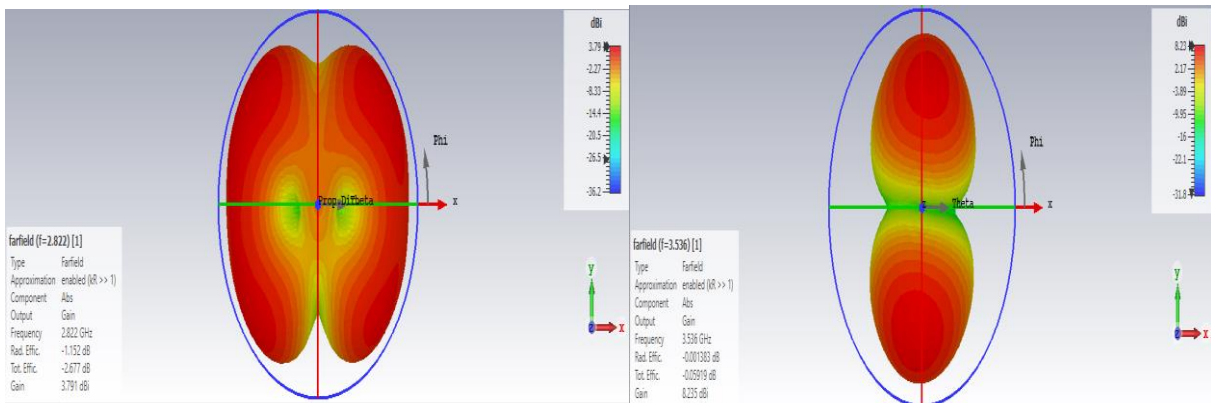


Figure III.35. Gains G_1, G_2 en 3D pour un décalage de la position de slot à la côté gauche.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
à droite	2.812	3.542	/	0.045	-8.1	-17.26	4.84	8.22	3.7	8.22
au milieu	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19
à gauche	2.822	3.536	/	0.044	-5.30	-18.81	4.94	8.24	3.79	8.23

Tableau III.9. Caractéristique de l'antenne patch avec slot en fonction de la position du slot.

Lors du changement de position du slot (la fente) :

- On dit qu'il y a des changements non-uniforme, les valeurs sont proches les unes des autres.

III.4.8. Effet de la variation des surfaces du slot

A) Coefficient de réflexion S_{11}

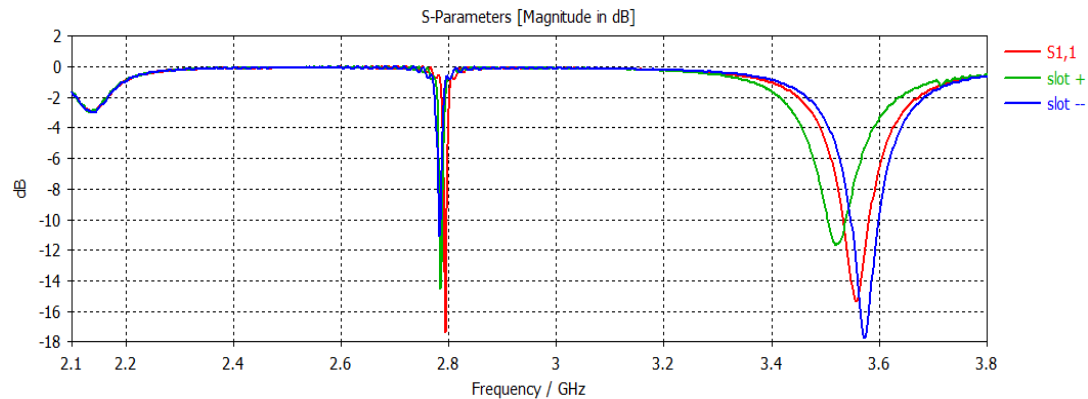


Figure III.36. Coefficient de réflexion S_{11} pour différents surfaces du slot.

B) Directivité

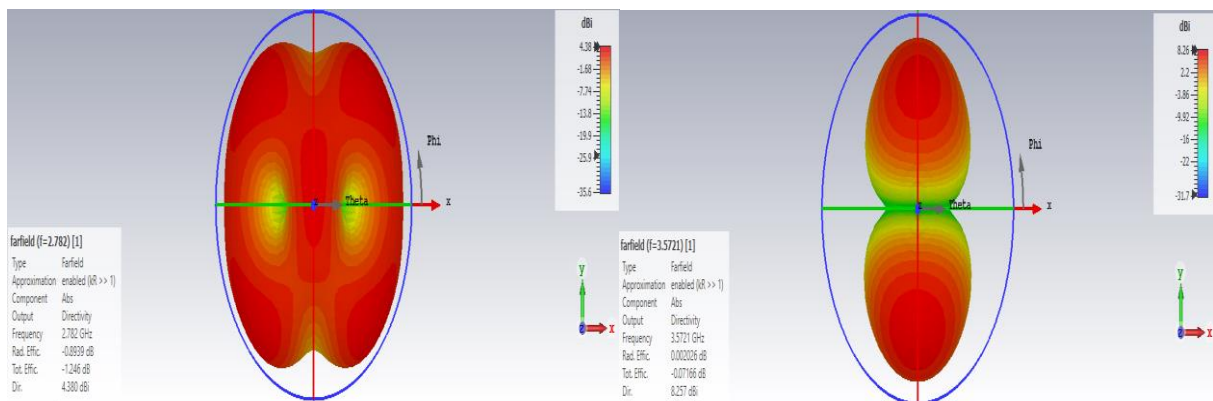


Figure III.37. Directivités D_1 , D_2 en 3D pour une surface du slot $S = 26mm^2$.

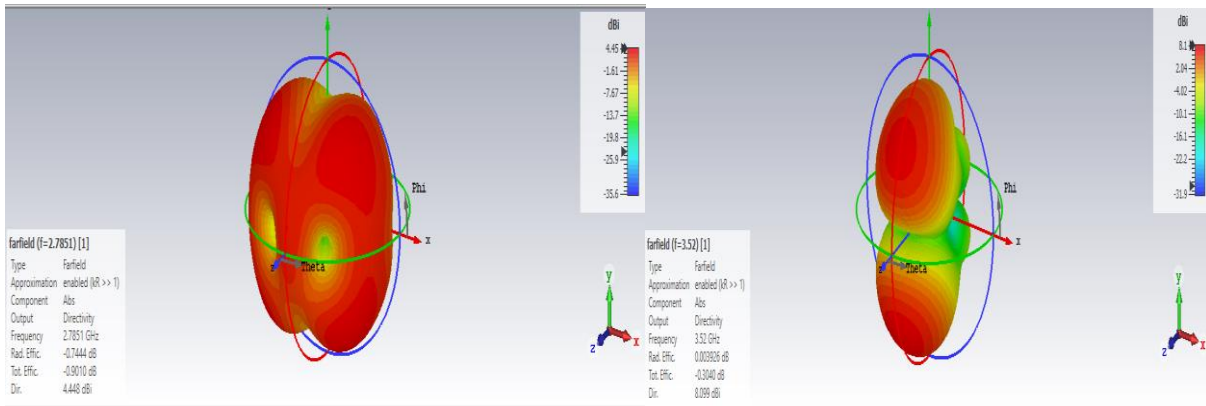


Figure III.38 : Directivités D_1, D_2 en 3D pour une surface du slot $S = 38mm^2$.

C) Gain

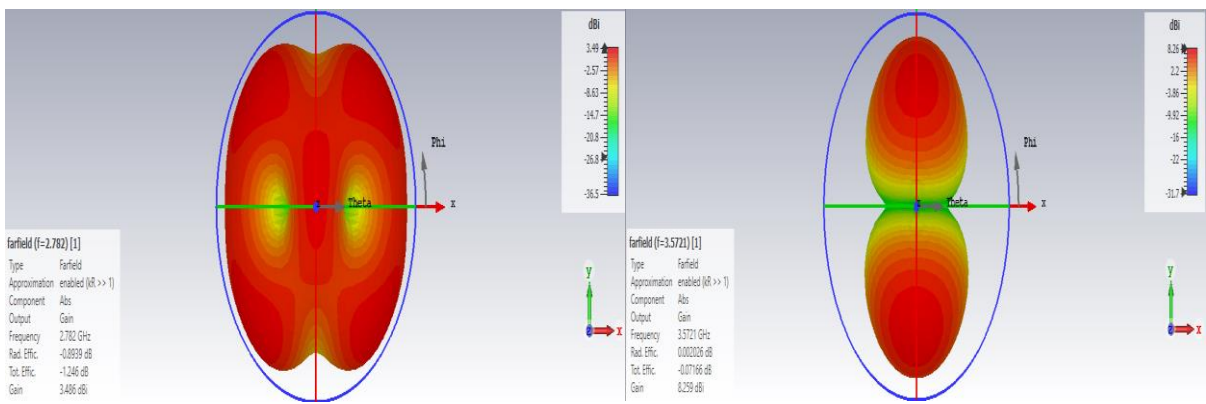


Figure III.39. Gains G_1, G_2 en 3D pour une surface du slot $S = 26mm^2$.

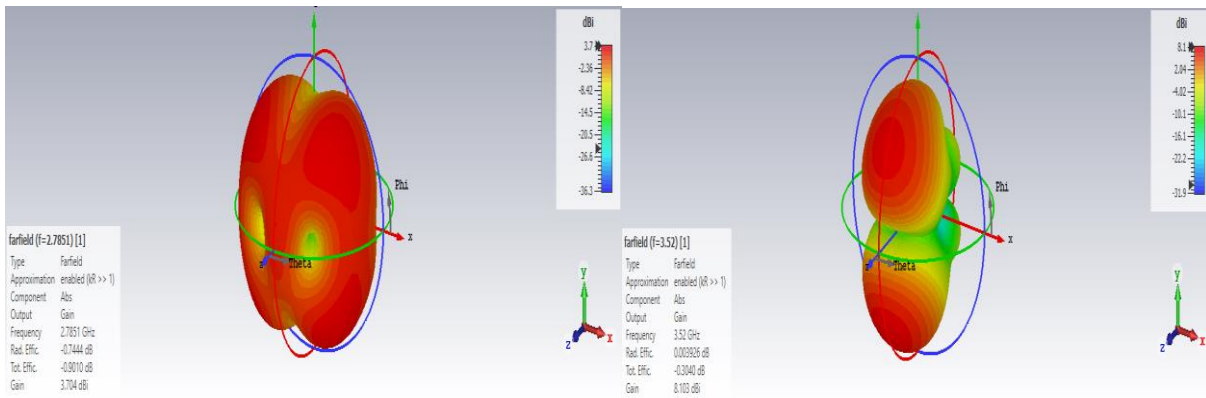


Figure III.40. Gains G_1, G_2 en 3D pour surface du slot = $38mm^2$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
slot $S = 26mm^2$	2.782	3.572	0.0028	0.032	-11.09	-17.74	4.38	8.26	3.49	8.26
Slot normal	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19

slot S = $38mm^2$	2.785	3.52	0.0042	0.034	-14.5	-11.64	4.45	8.1	3.7	8.1
------------------------	-------	------	--------	-------	-------	--------	------	-----	-----	-----

Tableau III.10. Caractéristiques de l'antenne patch avec slot en fonction de la surface du slot.

Après avoir changé les dimensions du slot (la fente), nous remarquons :

- Lorsque nous avons augmenté la surface du slot (la fente), nous avons remarqué une légère baisse de tous les caractéristiques ;
- Quant à la diminution la surface du slot (la fente), la plupart des caractéristiques ont diminué, à l'exception de la deuxième fréquence F_{r1} , du gain G_2 et de la direction D_2 .

III.5. Couche sélective surface en fréquence (FSS)

La couche FSS est une couche au-dessus du patch d'antenne que nous avons décrite précédemment avec une distance de $F = 50 \text{ mm}$ au-dessus du patch, constituée d'un groupe de motifs que nous présenterons ultérieurement.

Au-dessus d'eux vient une couche appelée superstrat qui est de la même longueur et largeur que le substrat et l'épaisseur différente.

III.5.1. Comment Simuler Une Couche FSS

Au-dessus du patch d'antenne qui a été créé et à une distance de $F = 50 \text{ mm}$, nous avons commencé par la première étape qui consiste à créer un motif avec ses dimensions exactes et des formes superposées disposées dans l'ordre suivant :

Tout d'abord, nous avons créé la première forme, qui est le plus grand carré d'une longueur de $L = 16,67 \text{ mm}$ de matériau PEC ;

Deuxièmement, nous avons ajouté un autre carré, plus petit que le premier, avec une longueur de $A_1 = 13,50 \text{ mm}$ du matériau vacuum ;

Troisièmement, nous avons créé un cercle avec un diamètre de $R_1 = 5,5 \text{ mm}$ et en matériau PEC ;

Quatrièmement, nous avons ajouté un dernier carré d'une longueur de $A_2 = 6,83 \text{ mm}$ c'est la substance du vacuum ;

Enfin, nous avons créé un cercle avec $R_2 = 2,165 \text{ mm}$ de diamètre de matériau de PEC.

Ensuite, nous avons collecté ces formes puis avons commencé à répéter ce motif suivant X 5 fois et Y nous avons répété 8 fois avec l'instruction TRANSFER.

Puis nous avons ajouté la dernière couche superstrat avec les mêmes dimensions que le substrat et le plan de masse, en tenant compte d'un changement de Z pour compléter notre structure à FSS.

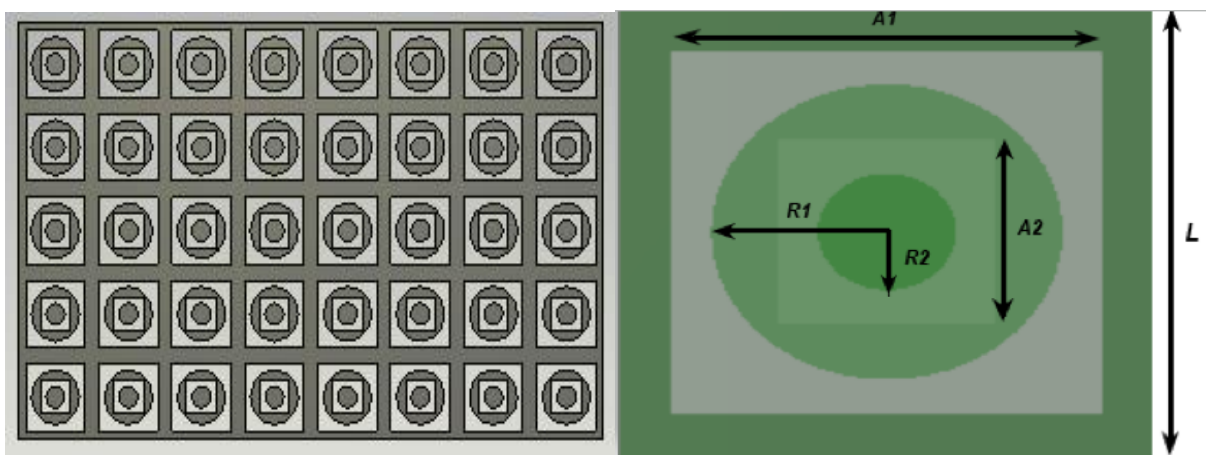


Figure III.41. Les motifs de la couche FSS.

Nous listerons les dimensions dans le tableau suivant :

Paramètres	Dimension (mm)
Longueur de côté	$L = 16.67$
Longueur de la boucle carrée extérieure	$A_1 = 13.5$
Rayon de la bague extérieure	$R_1 = 5.5$
Longueur de la boucle intérieure	$A_2 = 6.83$
Rayon de l'anneau intérieur	$R_2 = 2.165$
Distance entre antenne patch et FSS	$F = 50$

Tableau III.11. Caractéristiques et dimensions du motif.

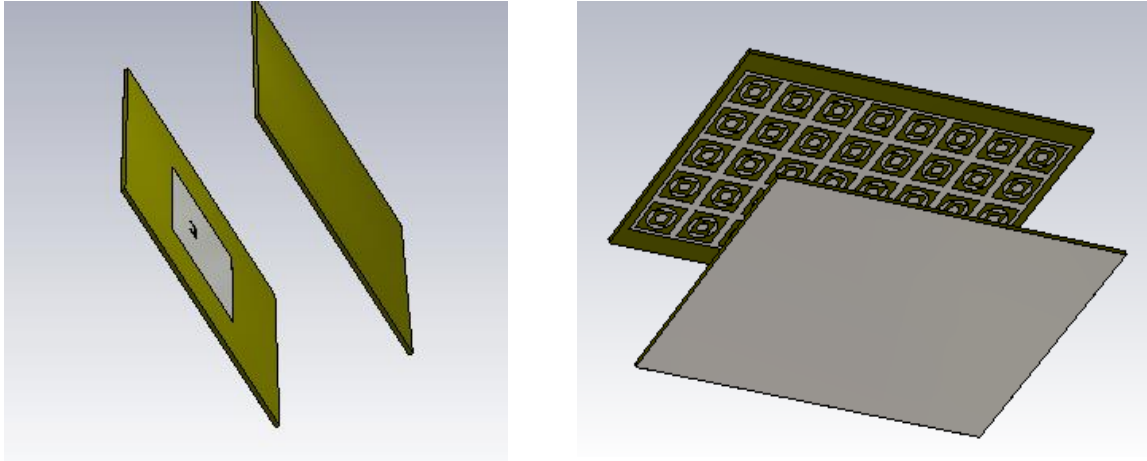


Figure III.42. Antenne patch à FSS.

III.5.2. Effet de la couche FSS

A) Fréquences de résonance

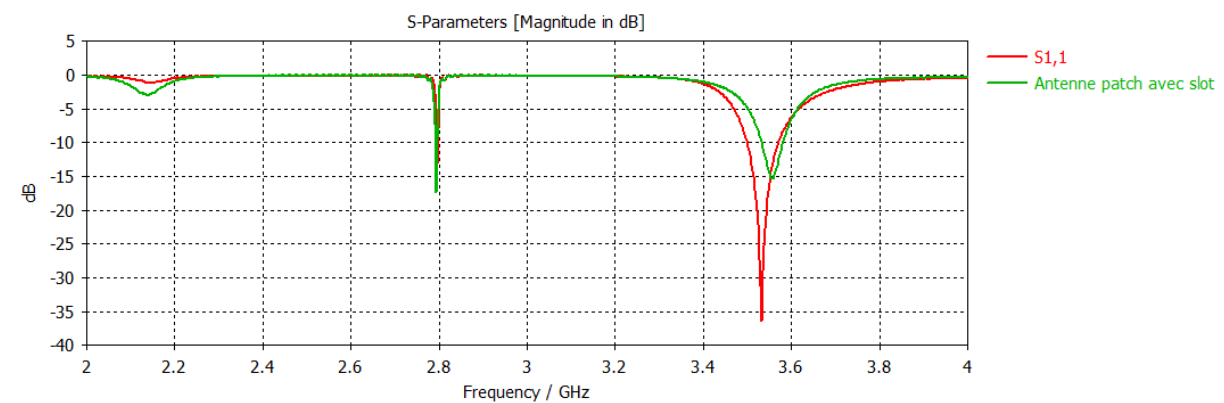


Figure III.43. Coefficients de réflexion S_{11} pour une antenne patch avec slot simple et antenne patch avec slot à FSS.

B) Directivité

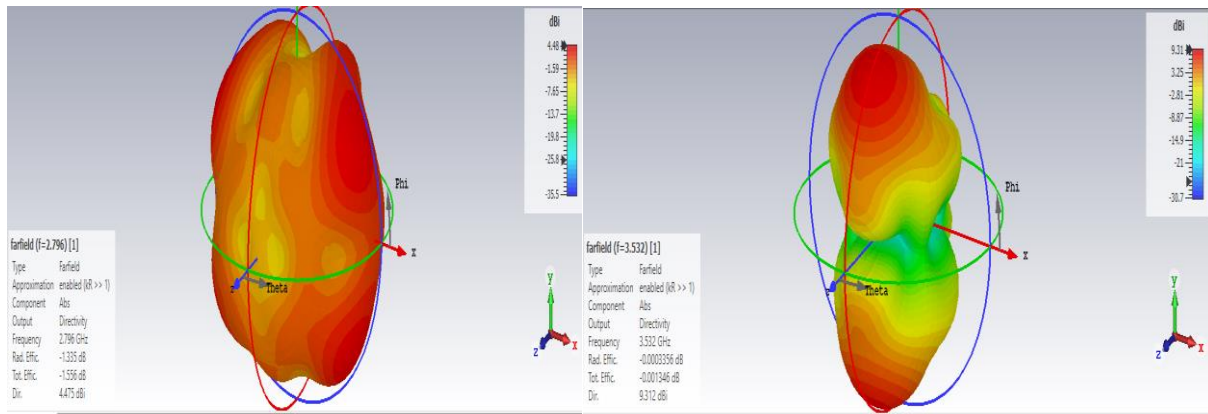


Figure III.44. Directivités D_1, D_2 en 3D pour une antenne à FSS $F = 50mm$.

C) Gain

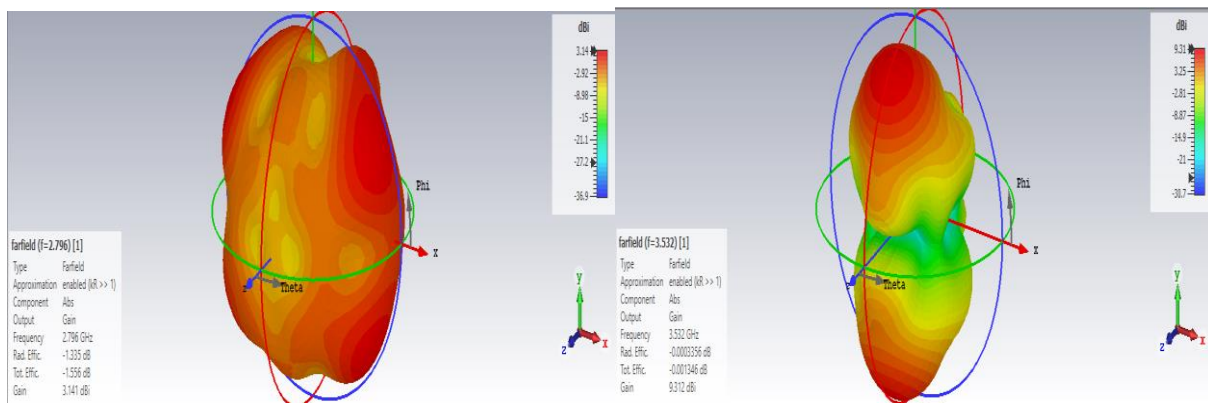


Figure III.45. Gains G_1, G_2 en 3D pour une antenne à FSS $F = 50mm$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
Antenne patch à FSS	2.796	3.532	0.0034	0.071	-13.11	-36.41	4.48	9.31	3.14	9.31
Antenne avec slot	2.794	3.555	0.005	0.048	-17.30	-15.36	4.53	8.19	3.69	8.19

Tableau III.12. Caractéristiques d’une antenne patch avec slot à FSS et antenne patch avec slot.

Après avoir ajouté une couche FSS, nous avons obtenu une antenne patch à FSS, et nous l’avons comparé avec l’antenne patch avec slot.

- Notez que la première fréquence F_{r1} de l’antenne patch à FSS est approximativement la même que celle de la seconde antenne ;

- Quant à la seconde fréquence F_{r2} , elle diminue légèrement et la bande passante augmente et l'adaptation s'améliore (S_{11}). Le gain G_2 et la directivité D_2 s'améliorent, contrairement à ce que l'on voit par rapport à la première fréquence ;

A travers les valeurs enregistrées dans le tableau, on peut dire que l'antenne patch à FSS à de meilleures performances que l'antenne patch avec slot.

III.5.3. Effet de la variation dans la distance F

A) Coefficient de réflexion S_{11}

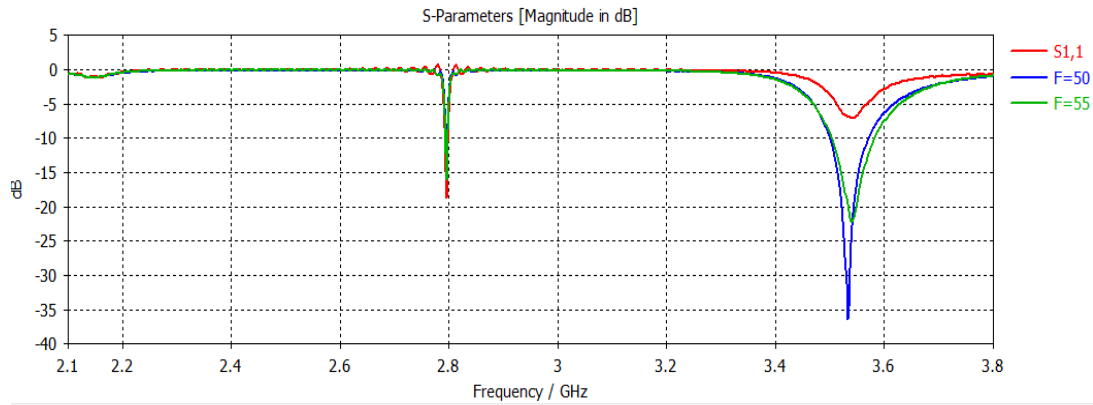


Figure III.46. Coefficients de réflexion S_{11} pour différents valeurs de la distance F .

B) Directivité

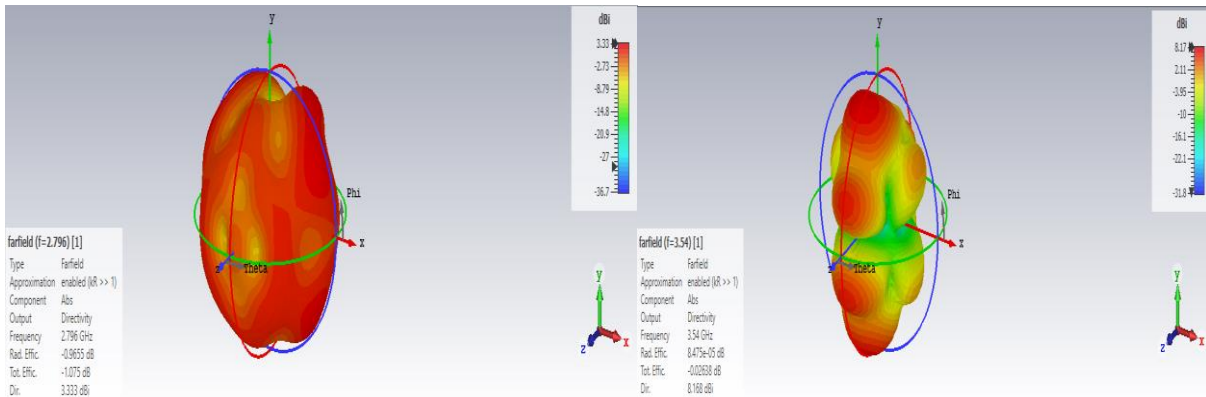


Figure III.47. Directivité $D_1 D_2$ en 3D pour la distance de la couche FSS $F = 55\text{mm}$.

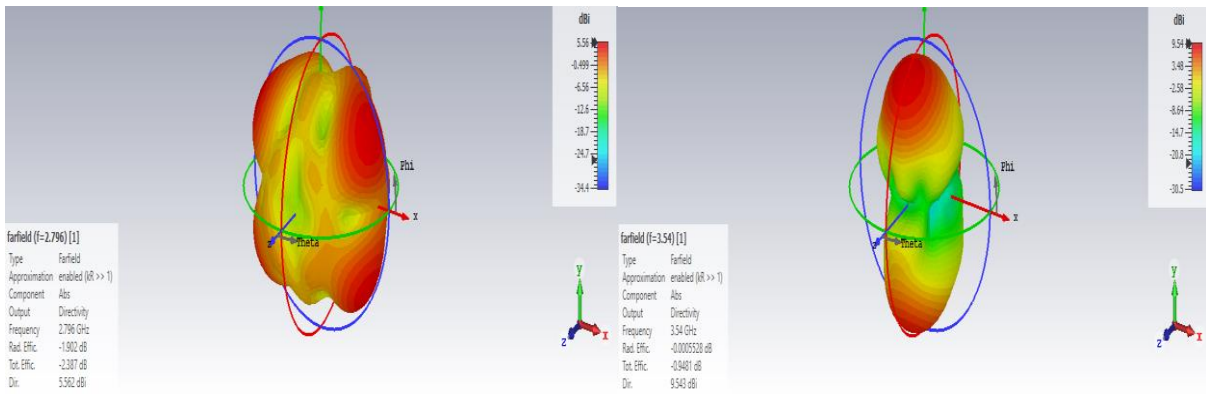


Figure III.48. Directivités D_1, D_2 en 3D pour la distance de la couche FSS $F = 42\text{mm}$.

C) Gain

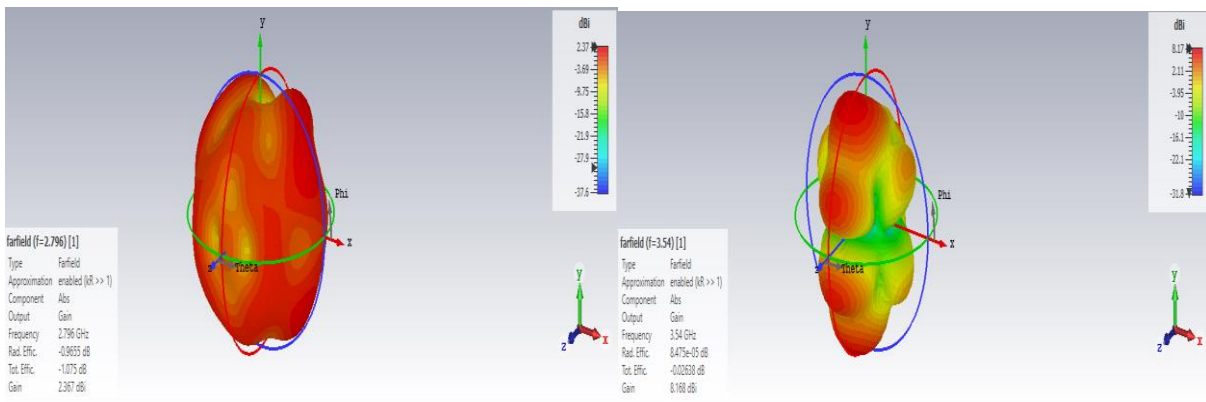


Figure III.49. Gains G_1, G_2 en 3D pour la distance de la couche FSS $F = 55\text{mm}$.

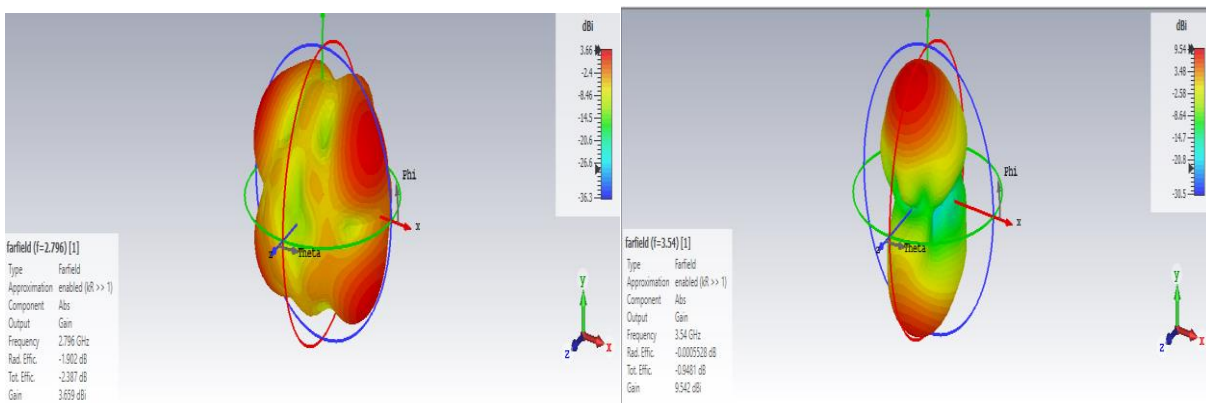


Figure III.50. Gains G_1, G_2 en 3D pour la distance de la couche FSS $F = 42\text{mm}$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$F= 42 \text{ mm}$	2.796	3.54	/	/	-9.76	-7.07	5.56	9.53	3.66	9.53
$F= 50 \text{ mm}$	2.796	3.532	0.0034	0.071	-13.11	-36.41	4.48	9.31	3.14	9.31
$F= 55 \text{ mm}$	2.796	3.54	0.0045	0.078	-16.07	-22.18	3.33	8.17	2.37	8.17

Tableau III.13. Caractéristiques de l’antenne patch à FSS en fonction de la variation du F .

Après le changement de la distance F on extrait :

- Qu’en augmentant la distance F on obtient une augmentation de la bande passante et amélioration de l’adaptation (S_{11}), peu de diminution du gain et de la directivité ;
- Quant à la diminution de distance F , l’antenne n’est plus adapté.

III.5.4. Effet de la variation des permittivités du superstrat

A) Coefficient de réflexion S_{11}

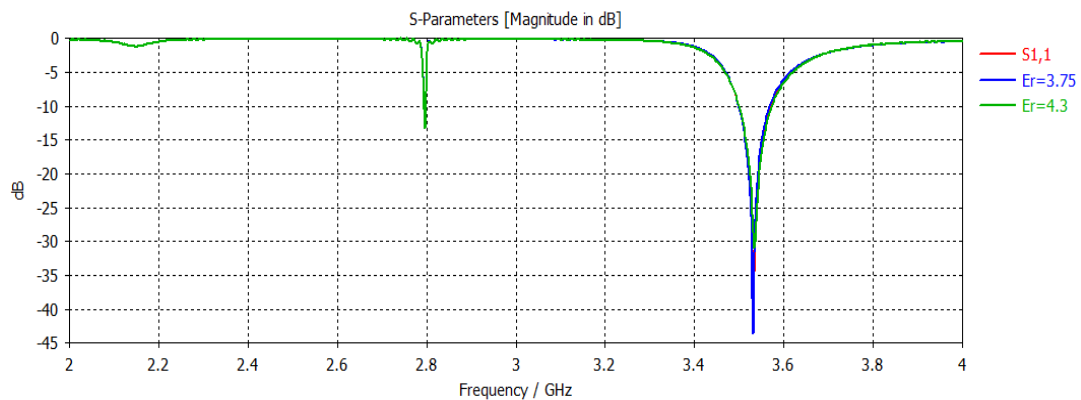


Figure III.51. Coefficients de réflexion S_{11} pour la permittivité du superstrat ϵ_r .

B) Directivité

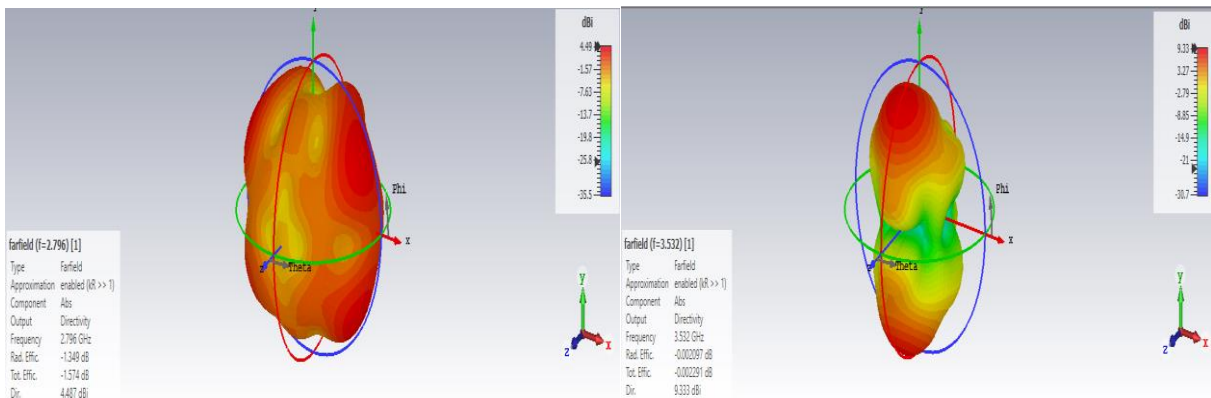


Figure III.52. Directivités D_1, D_2 en 3D pour Quartz (Fused)(lossy) $\epsilon_r=3.75$.

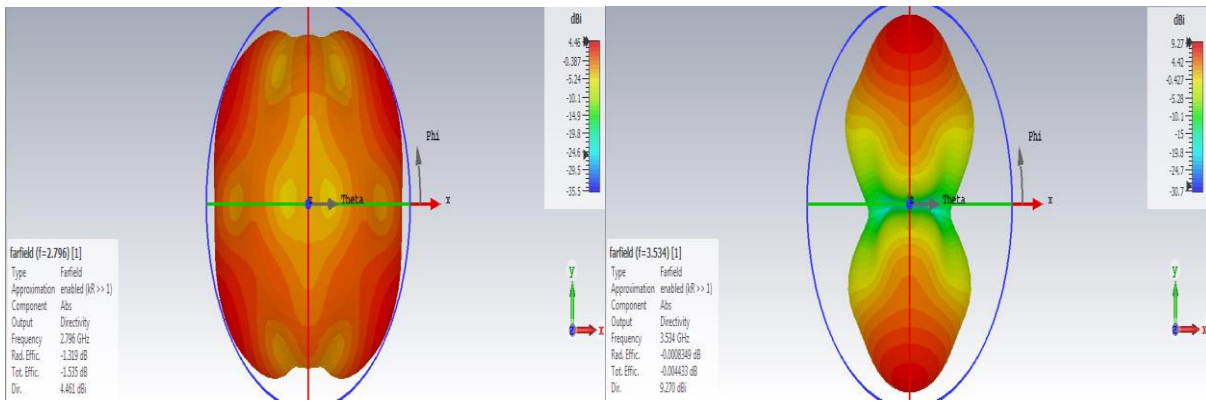


Figure III.53. Directivités D_1, D_2 en 3D pour Arlon AD 4305(lossy) $\epsilon_r=4.3$.

C) Gain

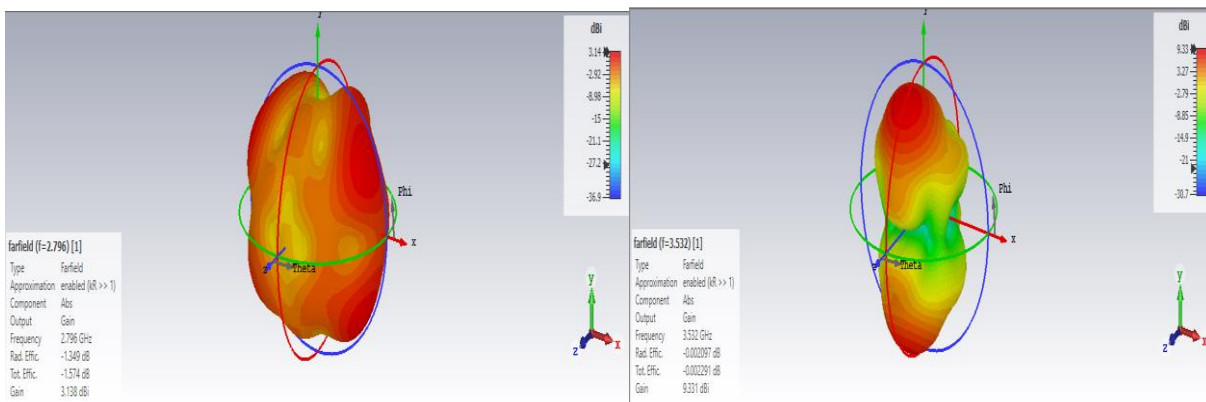


Figure III.54. Gais G_1, G_2 en 3D pour Quartz (Fused)(lossy) $\epsilon_r=3.75$.

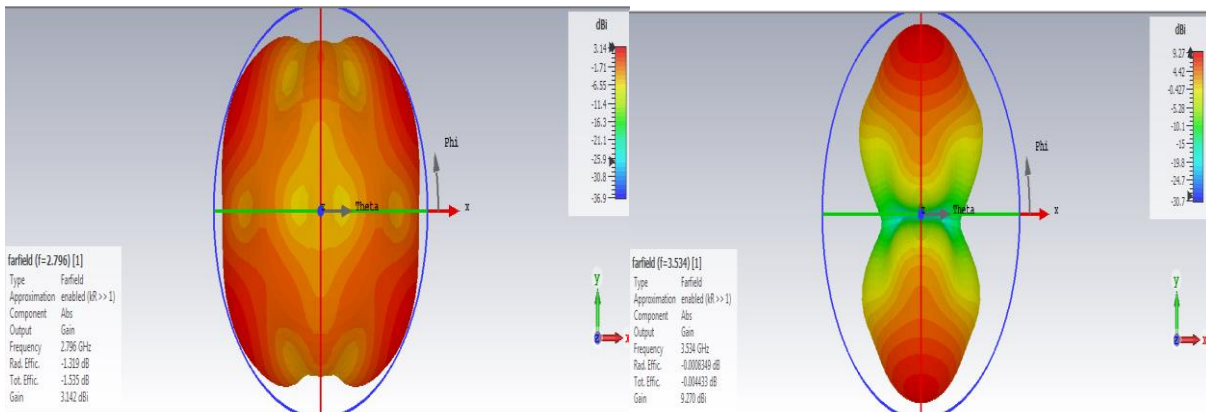


Figure III.55. Gains G_1, G_2 en 3D pour Arlon AD 4305(lossy) $\epsilon_r=4.3$.

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
$\epsilon_r = 3.75$	2.796	3.532	0.0042	0.070	-13.02	-43.59	4.49	9.33	3.14	9.33
$\epsilon_r = 4$	2.796	3.532	0.0034	0.071	-13.11	-36.41	4.48	9.31	3.14	9.31
$\epsilon_r = 4.3$	2.796	3.534	0.0037	0.074	-13.2	-30.88	4.46	9.27	3.14	9.27

Tableau III.14. Caractéristiques de l'antenne patch à FSS en fonction de la permittivité du superstrat.

Après avoir changé le matériau du superstrat :

- Nous constatons que tous les caractéristiques sont presque identiques, mais nous avons remarqué une différence dans l'adaptation surtout S_{11-2} pour $\epsilon_r = 3.75$;
- De même pour $\epsilon_r=4.3$, tous les caractéristiques conservent leurs valeurs sauf l'adaptation, donc le coefficient de réflexion diminue légèrement.

III.5.5. Effet de la variation de l'épaisseur du superstrat

A) Coefficient de réflexion S_{11}

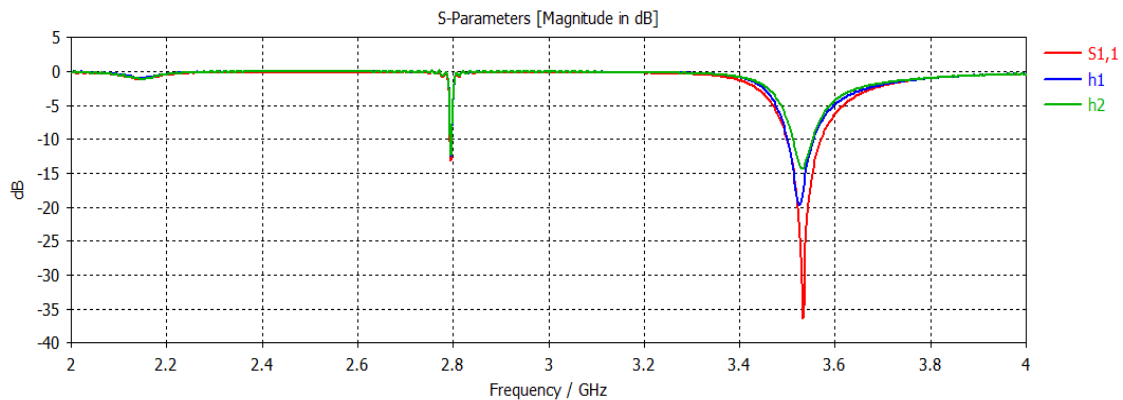


Figure III.56. Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes l'épaisseur du superstrat h .

B) Directivité

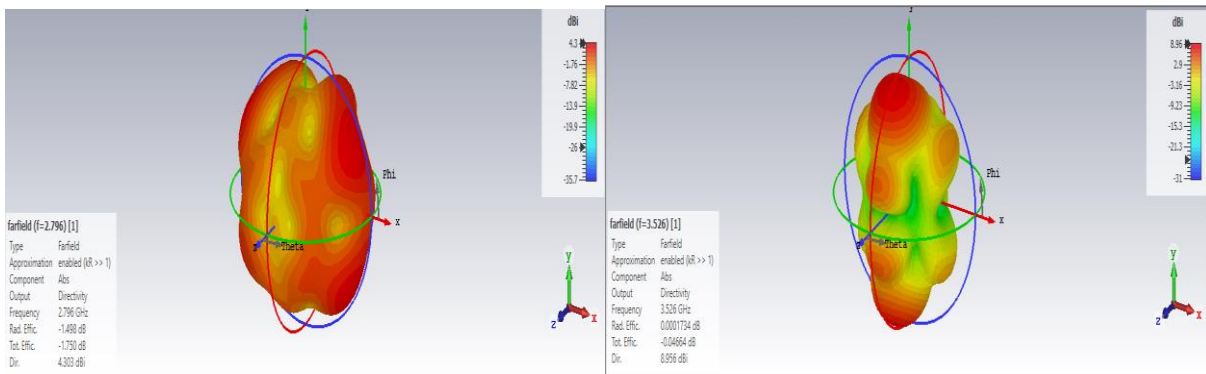


Figure III.57. Directivités D_1 , D_2 en 3D pour l'épaisseurs du superstrat h_1 .

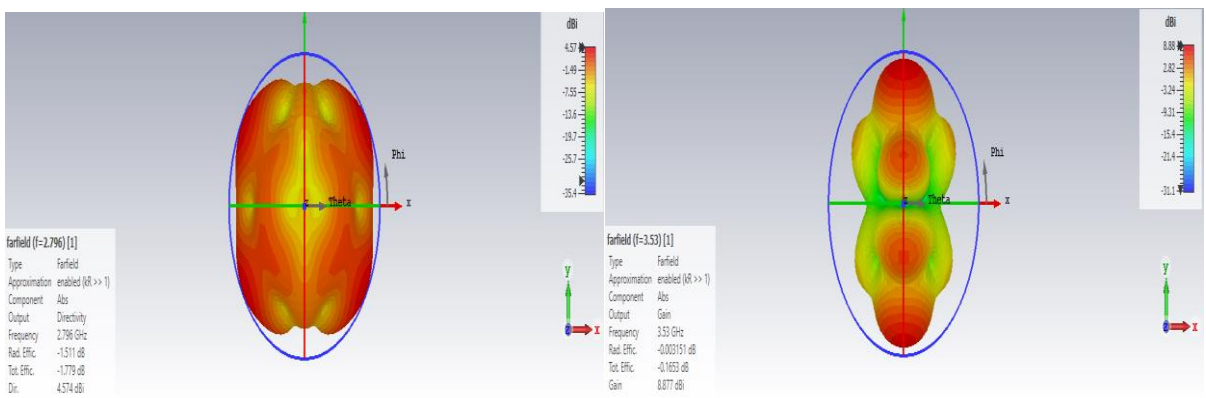


Figure III.58. Directivités D_1 , D_2 en 3D pour l'épaisseur du superstrat h_2 .

C) Gain

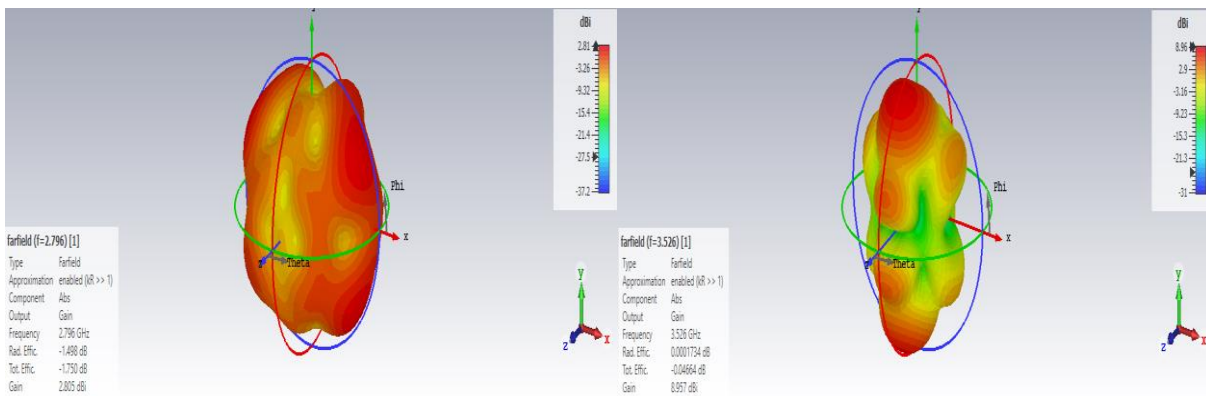


Figure III.59. Gains G_1 , G_2 en 3D pour l'épaisseur du superstrat h_1 .

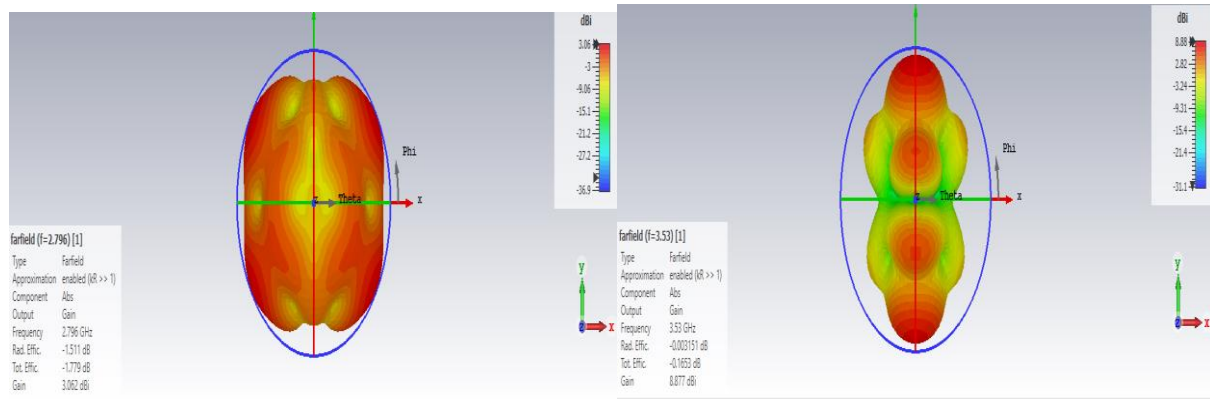


Figure III.60. Gain G_1 G_2 en 3D pour différents l'épaisseur du superstrat h_2 .

	F_{r1}	F_{r2}	BP_1	BP_2	S_{11-1}	S_{11-2}	D_1	D_2	G_1	G_2
H_1	2.796	3.526	0.0025	0.056	-12.48	-19.69	4.3	8.96	2.81	8.96
H	2.796	3.532	0.0034	0.071	-13.11	-36.41	4.48	9.31	3.14	9.31
H_2	2.796	3.53	0.0025	0.041	-12.23	-14.35	4.57	8.88	3.06	8.88

Tableau III.15 : Caractéristiques de l'antenne patch avec slot à FSS en fonction de l'épaisseur du superstrat.

Après avoir changé l'épaisseur du superstrat, nous avons constaté que :

- Toutes les valeurs sont proches (légère diminution) sauf la première fréquence qui maintient sa valeur.

III.6. Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons présenté les différentes simulations que nous avons effectuées sur l'antenne patch avec slot, l'antenne BIE et à FSS, nous avons pu obtenir un gain élevé (9,62dB) pour une antenne BIE bi-bande concentrées aux fréquences :2,7 GHz et 3,2 GHz qui appartiennent à la bande 5G.

On sait que la position du point d'alimentation influe sur l'adaptation d'une antenne haute performance. Ainsi que l'épaisseur du substrat. Après avoir ajouté la dernière couche FSS, nous avons trouvé que la distance entre cette dernière couche et l'antenne patch avec slot contrôle la qualité des performances. Aussi l'épaisseur du superstrat contrôle l'adaptation de notre structure à FSS.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Computer Simulation Technology (CST), Microwave Studio, Version 2011

[2] O. OUASSIM et D. SALAH DINE « Etude des performances de modulation UFMC pour le réseau 5G » mémoire Master en Télécommunication, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juin 2019

[3] <https://blog.ariase.com/mobile/dossiers/5g-frequences>

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet et à travers le thème que nous avons convenu de choisir sous le titre « Etude d'une antenne micro ruban à BIE-FSS », nous avons pu développer nos capacités, ainsi nous avons su nous adapter au projet approche, se soumettre à des restrictions et faire face à des difficultés afin d'atteindre un travail modeste et acceptable.

L'objectif principal de notre travail était d'étudier et de concevoir une antenne patch à FSS rectangulaire avec slot à substrat normal fonctionnant dans deux bandes selon la fréquence de résonance, la bande passante la directivité et le gain.

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé le logiciel de de simulation électronique CST (Computer Science Technology), qui est basé sur la méthode d'intégration finie. Nous nous sommes concentrés sur les paramètres, qui sont le matériau du substrat (substrat BIE et substrat normal simple), les dimensions du patch, permittivités ϵ_r , l'épaisseur du substrat, surfaces et l'emplacement du slot à forme « \sqcup ».

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un ensemble de connaissances sur les antennes dans leur forme générale. Ensuite, nous avons exposé les antennes BIE en mentionnant certaines de leurs caractéristiques. Nous avons donné un aperçu historique des matériaux BIE et une brève description de ceux-ci. Nous avons également mentionné leurs caractéristiques, et mis en évidence leurs comportements et leurs structures, ainsi que leurs domaines d'applications.

Quant au deuxième chapitre, nous avons présenté les antennes patch à FSS, par une description, évoqué leurs caractéristiques et leurs différentes techniques d'alimentation. Nous avons également parlé des mécanismes de rayonnement de l'antenne patch. Nous avons listé ses différents avantages et inconvénients et quelques applications de cette antenne. Ensuite, nous avons présenté un bref historique du FSS et présenté une définition des surfaces en fréquence (FSS) avec ses différents types et applications FSS.

Le troisième chapitre est l'essentiel de notre travail que nous avons fait. Nous avons présenté un bref aperçu du programme CST MICROWAVE STUDIO, qui est le programme de conception basé sur notre projet afin de créer une antenne patch. Passant à la plus importante partie, qui est la création et la simulation.

Nous avons procédé à plusieurs simulations à l'aide du programme CST pour obtenir une conception d'antenne rectangulaire à substrat normal qui fonctionne à une fréquence dans l'intervalle de fréquence requis (5G) et cela après de nombreux changements du point d'alimentation et des paramètres de la structure.

Ensuite, nous sommes passées à l'antenne patch rectangulaire à substrat normal avec slot fonctionnant sur deux bandes de fréquences afin d'effectuer le processus bi-bande où nous avons créé le slot en forme de « \sqsubset » sur le plan du patch et avec une adaptation parfaite.

Après avoir conçu une antenne mono bande et bi bande, nous avons conçu une antenne bi bande avec substrat BIE (1D) et l'avons comparée à l'antenne à substrat normale. Nous avons examiné certains effets sur cette antenne tels que la différence de matériau, l'épaisseur de substrat, les changements de dimensions des patches, l'emplacement et surface du slot. Ensuite, nous avons créé une couche FSS, qui se compose de 5×8 motifs, placée au-dessus du patch avec slot à une distance de $F = 50 \text{ mm}$, imprimée sur une couche superstrat, donc nous obtenons l'antenne patch bibandes avec slot à FSS. Nous avons étudié quelques effets, notamment la distance, la permittivité et l'épaisseur du superstrat. Et ici nous mentionnons tous les résultats que nous avons obtenus :

- ✓ Le point d'alimentation que nous avons choisi est l'alimentation par sonde coaxiale qui influe directement sur l'adaptation, tandis que les dimensions du patch contrôlent la gamme de fréquence que nous recherchons [2.1 à 3.8 GHz] ;
- ✓ Le slot est un générateur de la deuxième fréquence (bi- bande) ;
- ✓ Nous concluons que les caractéristiques (bande passante, gain et directivité) de l'antenne à substrat à BIE-1D sont meilleurs que l'antenne à substrat normal ;
- ✓ Le changement des dimensions du patch affecte la bande passante. Nous avons constaté que la largeur affecte la première fréquence f_{r1} et la longueur affecte la deuxième fréquence f_{r2} ;
- ✓ L'épaisseur du substrat a un effet sur les caractéristiques de l'antenne, plus la valeur h est élevée les performances sont meilleures ;
- ✓ Diminution de la directivité et du gain avec l'augmentation de la permittivité ϵ_r du substrat ;
- ✓ La position du slot affecte toutes les caractéristiques de l'antenne, en particulier l'adaptation ;
- ✓ La surface du slot a un effet clair sur la bande passante ;
- ✓ Nous avons constaté que les caractéristiques de l'antenne patch à FSS sont meilleures que celles de l'antenne patch sans FSS ;
- ✓ La distance F a une grande influence sur l'adaptation ;
- ✓ La permittivité ϵ_r du superstrat n'a aucun effet sur les caractéristiques de l'antenne ;
- ✓ L'épaisseur du superstrat a un effet sur la bande passante, la directivité et le gain.

