



DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Télécommunication

OPTION : système de télécommunication

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

PAR :

DJAIDJA Hasna

BECHELALEG Khouloud

Intitulé :

**Conception et amélioration des caractéristiques d'un
réseau d'antennes microstrips à FSS.**

Evalué le :12/06/2024

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. ZERDOUMI Zahra	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Dr. DJELLID Asma	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Pr. BENMEDDOUR Fadila	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Co- Rapporteur
Mme. CHABANE Rayene	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant, de nous avoir insufflé suffisamment de force, de courage et de patience pour entreprendre ce modeste travail. Ce travail de mémoire intervient à un moment charnière de nos études. Au cours de ces derniers mois, nous avons découvert et exploré des disciplines nouvelles, cette progression et ces découvertes n'auraient pas été possibles sans l'aide des personnes qui nous ont encadrés, conseillés et soutenus au cours des derniers mois.

« Dr. DJELLID Asma et Pr. BENMEDDOUR Fadila »,

Nous vous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance pour avoir dirigé, pour votre grande disponibilité, pour vos précieux conseils et pour votre gentillesse, compréhension et compassion.

Notre respect le plus profond et notre gratitude la plus sincère pour votre aide.

Hasna & Khouloud

DEDICACE

Avec tout mon amour et ma reconnaissance, je dédie ce travail :

À mes chers parents,

Votre amour inconditionnel, votre soutien sans faille et vos sacrifices ont pavé le chemin de mon succès. Ce mémoire est le fruit de votre éducation et de votre dévouement. Je vous dois tout ce que j'ai accompli et espère accomplir.

À mes sœurs et mes frères,

Compagnons de chaque instant, vous avez été mes premiers amis et mes confidents les plus fidèles. Vos encouragements constants et votre présence rassurante ont été mes plus grandes sources de motivation. Ce succès est aussi le vôtre.

Je suis profondément heureuse et fière de faire partie de cette famille merveilleuse.

Ce mémoire est pour vous tous, en signe de mon profond respect et de ma gratitude éternelle.

HASNA

اهداء

{فَرِحِينَ بِمَا آتَاهُمُ اللَّهُ مِنْ فَضْلِهِ}

الحمد لله شكرا وحباً وامتناناً على البدء والختام الذي بفضله ها انا اليوم انظر الى حلم طال
انتظاره وقد أصبح واقعا افتخر به فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا النهايات بفضله وكرمه
بعد مسيرة دراسية دامت سنوات ها انا اليوم أقف على عتبة تخرجي اقطف ثمار جهدي وبكل فخر
اهدي هذا النجاح الى نفسي ثم

الى من الجنة تحت اقدامها من سهلت لي الشدائد بدعائها الى القلب الحنون وسر سعادتي الى
داعمتي الاولى والابدية امي الغالية {حفيظة جعنيط}

الى من لا ينفصل اسمه عن اسمي الى من دعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل يا خير سند لي في
الحياة ابي الغالي {عيسى}

الى عزوتي وسندي الى من قال الله فيهم {سَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ} الى ضلعي الثابت اخواني {اسامة
زكرياء يوسف} الى من ساندوني بكل حب وزرعوا الثقة والاصرار داخلي اخواتي المؤمنات الغاليات
{ مريم وايمان }

الى من تذكرني بقوتي وتقف خلفي كظلي حبيبة قلبي اختي الصغرى {احسان} الى كل عائلتي الكبيرة
{جعنيط وبوشالاق}

الى من رافقتني طوال سنوات الدراسة وكانت نعمة الصديقة والرفيقة {سارة وحسنا} الى استاذتي
الطيبة التي عملت معنا بكل جهد {فضيلة} التي اشرفت على هذه المذكرة

وأحب ان اختتم الاهداء الى صديقات الرحلة والنجاح كل {صديقاتي}

واخيرا من قال انا لها نالها ماكنت لأفعل لولا توفيق الله الحمد لله الذي به خيرا واملا واغرقني سرورا
وفرحا ينسيني مشقتي.

خلود

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
DEDICACE	3
اهداء	4
Liste des Figures	8
Liste des tableaux	10
Liste des abréviations	11
ملخص.....	12
Résumé	12
Abstract	12
Chapitre I	16
Généralité sur les réseaux d’antennes planaires et la 5G	16
I.2. Historique	17
I.3. Définition d’une antenne	17
I.4. Paramètres caractéristiques d’une Antennes	18
I.5. Antenne patch	21
I.6. Réseau d’antennes	21
I.7. Condition sur réseau d’antenne	22
I.8. Types des réseaux d’antennes	22
I.9. Cinquième génération 5G	22
I.9.1. Historique	22
I.9.2. Définition	23
I.9.3. Objectif et Principe	23
I.9.4. Avantages et inconvénients de la 5G	24
I.10. Conclusion	25
Chapitre II	26
Les structures FSS (Surfaces Sélectives en Fréquence) planaires	26
II.1 Introduction	27
II.2. Les surfaces Sélectives en Fréquence (FSS)	27
II.3. Structures des surfaces sélectives en fréquence planaires	27
II.4. Description des surfaces sélectives en fréquence planaires	27
II.5. Classification des FSS en fonction de leurs réponses spectrales	29
II.5.1 FSS coupe-bande : IL apparaît sous la forme de réseau planaire périodique, composée d’anneaux métalliques. Illustrée à la figure (II.3).	29

II.5.2 FSS passe-bande : est une grille métallique, elle est composée d'un arrangement de fentes en anneaux. (Inverse de coupe bande. Illustrée à la figure (II.3)).....	29
II.5.3 FSS passe-haut : Elles offrent le comportement d'une grille métallique, c'est un filtre réfléchissant pour toutes les basses fréquences. Illustrée à la figure (II.3).....	29
II.5.4 FSS passe-bas : est une grille métallique, comme le filtre passe haut mais réfléchissant pour tous les haut fréquences (inverse de passe bas). Illustrée à la figure (II.3).	29
II.6. Différents types de motifs des éléments d'une FSS	30
II.7. Bande passante des structures FSS	31
II.8 Applications des surfaces sélectives en fréquence	31
II.8.1 Réflecteurs d'antenne	32
II.8.2 Porte four micro-ondes	32
II.8.3 Radome	33
II.9. Amélioration des caractéristiques d'une antenne	33
II.10. Conclusion	33
Chapitre III	34
Résultats et Discussions	34
III.1. Introduction	35
III.2. Description du logiciel de simulation CST	35
III.3. Conception et simulation des structures pour la bande des [3.4-3.8] GHz	36
III.3.1. Présentation de la structure à un seul élément	36
III.3.2. Présentation d'un réseau d'antennes à deux éléments (pour une alimentation parallèle)	38
III.3.3. Un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série)	41
III.4. Comparaison entre les résultats des 3 structures	42
III.5. Couche sélective surface en fréquence (FSS)	45
III.5.1. Comment simuler une couche FSS	45
III.6. Etude paramétrique de la couche FSS	47
III.6.1. Effet du rayon $R1$ du motif	47
III.6.2. Effet du rayon $R2$ du motifs	50
III.6.3. Influence de la distance k entre l'antenne et le réflecteur FSS	52
III.7. : Comparaison des caractéristiques d'un réseau d'antenne (alimentation parallèle) avec et sans le réflecteur FSS	54
III.8. Influence des défauts du réflecteur FSS	54
III.8.1. Le défaut du Gap (changer la distance entre motifs en largeur et en longueur)	54
III.8.2. Le deuxième défaut : supprimer deux motifs	57
III.9. Conclusion	58

Conclusion Générale	60
<i>Références</i>	63

Liste des Figures

Figure I.1: la Directivité d'antenne	19
Figure I.2: Fréquence de résonance et bande passante d'antenne	21
Figure I.3: Exemples d'utilisation des antennes patch	22
Figure I.4: Types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnel	23
Figure I.5: les générations mobiles	25
Figure I.6: les applications 5G	26
Figure II.1: Réseau FSS bidimensionnel de type patch	29
Figure II.2: Incidence d'une onde plane sur un réseau FSS bidimensionnel de type patch	30
Figure II.3: Différents types de réponses fréquentielles d'une FSS.	31
Figure II.4: Les quatre différents groupes des éléments constituant une FSS d'après Munk.	32
Figure II.5: Application du FSS dans les sous-amplificateurs pour les communications par satellite	33
Figure II.6: Application des FSSs comme un écran sur la porte du four micro-ondes	33
Figure II.7: Application des FSSs au radôme	34
Figure III.1: Dimensions de l'antenne patch	38
Figure III.2: Coefficient de réflexion S11 pour une antenne rectangulaire	38
Figure III.3: Choix de la fréquence de résonance	39
Figure III.4: Directivité en 3D d'une antenne rectangulaire	39
Figure III.5: Créer un « port »	40
Figure III.6: Un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation parallèle)	41
Figure III.7: Coefficient de réflexion S11 pour un réseau d'antenne à deux éléments alimentés en parallèle	41
Figure III.8: Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patchs à 2 éléments rectangulaires alimentés en parallèle	41
Figure III.9: Créer un réseau d'antennes patchs à 2 éléments rectangulaires alimentés en série	42
Figure III.10: Le réseau d'antennes à deux éléments série	42
Figure III.11: Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau alimenté en série	43
Figure III.12: Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patchs à 2 éléments rectangulaire par une alimentation en série	43
Figure III.13: Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne	45
Figure III.14: Directivité en 3D pour une antenne (a) à un élément, un réseau d'antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation (b) en série (c) parallèle	45
Figure III.15: La couche FSS	44
Figure III.16: Cylinder1 du motif	45
Figure III.17: Cylinder2 du motif	46
Figure III.18: Les motifs de la couche FSS	48
Figure III.19: Les dimensions du motif FSS ($R_1=4.5\text{mm}$ et un $\text{Gap}= 1.4\text{mm}$)	48
Figure III.20: Coefficient de réflexion S11 pour $R_1=4.5\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le $\text{Gap}= 1.4\text{mm}$	48
Figure III.21: Directivité et gain pour $R_1=4.5\text{mm}$, $R_2=2\text{mm}$ et le $\text{Gap}=1.4\text{mm}$	49
Figure III.22: Rayon du cylindre R_2 du motif	49
Figure III.23 : Dimensions de motif FS ($R_1=4\text{mm}$ et le $\text{Gap}=2\text{mm}$)	50
Figure III.24: Coefficient de réflexion S11 pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le $\text{Gap}= 2\text{mm}$	50

Figure III.25: Directivité et gain pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 2mm	50
Figure III.26: Coefficient de réflexion S11 pour $R_2=0.5\text{mm}$, 1 mm et 2 mm	51
Figure III.27: Directivité et gain pour(a) $R_2=0.5\text{mm}$ (b) $R_2=1\text{mm}$ et (c) $R_2=2\text{mm}$	52
Figure III.28 : (a) Coefficient de réflexion et (b) la Directivité et le gain pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=1\text{mm}$ et $k=1$ mm le Gap= 2mm	52
Figure III.29: (a) Coefficient de réflexion pour $k=1\text{mm}, 2\text{mm}, 3\text{mm}$ et 5mm et directivité et gain pour. (b) $k=1\text{mm}$, (c) $k=2$, (d) $k=3\text{mm}$, (e) $k=5\text{mm}$	53
Figure III.30: Coefficient de réflexion, la directivité et le gain pour $R_1= 4\text{mm}$ $R_2=1\text{mm}$ et $k=5\text{mm}$	54
Figure III.31: : (a) Le coefficient de réflexion et directivité et gain pour les deux valeurs du gap à la longueur (b) 1.8mm et (c) 2.4mm	56
Figure III.32: (a) Le coefficient de réflexion et directivité et gain pour les deux valeur (b)1.8mm et (c)2.4mm à largueur	57
Figure III.33: Réflecteur FSS à défauts (sans deux motifs)	58
Figure III.34 : (a) Le coefficient de réflexion (b) Directivité et le Gain de réflecteur FSS sans deux motifs	59

Liste des tableaux

Tableau I.1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles	23
Tableau III.1: Dimensions de l'antenne micro ruban rectangulaire	36
Tableau III.2: Dimensions d'un réseau d'antenne pour une alimentation parallèle	39
Tableau III.3: Dimensions d'un réseau d'antenne pour une alimentation en série	41
Tableau III.4: Les résultats pour une antenne à un seul éléments et le réseau antennes à deux patchs alimentés parallèle et une série	44
Tableau III.5: les résultats pour différentes valeurs de k	53
Tableau III.6: Les résultats pour les antennes réseaux à alimentation parallèle avec et sans le réflecteur FSS	54
Tableau III.7: Les résultats pour les deux valeurs 2.4mm et 1.8mm du Gap en longueur et 2mm pour le gap en largeur	55
Tableau III.8: Les résultats pour les deux valeurs 2.4mm et 1.8mm du Gap en largeur et 2mm pour le gap en longueur	56
Tableau III.9: Les résultats de la comparaisant de caractéristique de la structure réflecteur FSS entre les 2 défauts différents	58

Liste des abréviations

BIE : Bande Interdite Électromagnétique.

FSS : Frequency Sélective Surface.

SSF : Surfaces Sélectives en Fréquence.

3GPP : 3rd Group Partnership Project.

LTE : Long Term Evolution.

ROS : Rapport d'onde stationnaire .

CST : Computer Science Technology.

HFSS : High-Frequency Structure Simulator.

PEC : Perfect Electric Conductor (conducteur électrique parfait).

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

5G : Cinquième Génération.

ملخص

يركز هذا البحث على تصميم وتحسين ووصف نظام هوائيات مكون من عنصرين مستطيلا الشكل. يستخدم النظام تغذية متسلسلة ومتوازية وتدمج مادة السطح الانتقائي الترددي (FSS) كطبقة علوية. يعمل الهوائي ضمن نطاق تردد الجيل الخامس (5 G) بين [3.4 جيجا هرتز و3.8 جيجا هرتز].

الأهداف الرئيسية للدراسة هي التحقيق في كيفية تأثير مختلف المتغيرات الهندسية والفيزيائية للهوائي على أدائه. تشمل مقاييس الأداء الرئيسية تردد الرنين، عرض النطاق الترددي، الكسب، والاتجاهية كما تبحث الدراسة في تأثير عيوب في طبقة FSS على هذه المعايير. الهدف هو تحسين خصائص الهوائي وذلك باستخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية CST MICROWAVE STUDIO في نطاق التردد (5G).

الكلمات الرئيسية: مجموعة هوائي مدقق، الأسطح الانتقائية لتردد FSS، 5G، عيب FSS

Résumé

Ce mémoire se concentre sur la conception, l'optimisation et la caractérisation d'un réseau d'antennes microstrips à deux éléments de forme rectangulaire. Le réseau utilise des configurations d'alimentation en série et en parallèle et intègre un matériau FSS (Frequency Selective Surface) comme superstrat. L'antenne fonctionne dans la bande de fréquences 5G, plus précisément entre 3,4 GHz et 3,8 GHz.

Les principaux objectifs de l'étude sont d'étudier comment divers paramètres géométriques et physiques de l'antenne affectent ses performances. Les mesures de performance clés incluent la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité. La recherche examine également l'impact des défauts de la couche FSS sur ces paramètres. L'objectif est d'améliorer les caractéristiques de l'antenne grâce à l'outil de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO dans le domaine fréquentiel (5G).

Mots clés : Réseau d'antennes microstripe, Surfaces Sélectives en Fréquences FSS, 5G, défaut de FSS

Abstract

This work focuses on the design, optimization, and characterization of a two-element microstrip antenna array with rectangular shapes. The array uses both series and parallel feed configurations and incorporates a Frequency Selective Surface (FSS) material as a superstrate. The antenna operates within the 5G frequency band, specifically between 3.4 GHz and 3.8 GHz.

The primary objectives of the study are to investigate how various geometric and physical parameters of the antenna affect its performance. Key performance metrics include resonance frequency, bandwidth, gain, and directivity. The research also examines the impact of defects in the FSS layer on these parameters. The goal is to enhance the antenna's characteristics using the CST MICROWAVE STUDIO electromagnetic simulation tool in the frequency domain.

Keywords: Microstripe antenna array, FSS Frequency Selective Surfaces, 5G, FSS defect.

Introduction Générale

Introduction générale

La technologie microbande, en particulier les antennes microbandes (microstrip, imprimé, microbande, patch, microrubane) est en plein développement auprès des industriels et des professionnels des télécommunications. Les antennes microstrip sont essentielles dans la transmission et la réception de signaux radiofréquences, et sont de plus en plus utilisées dans divers domaines tels que l'aéronautique, l'aérospatial et militaire. Elles offrent des avantages tels qu'un profil plat, un faible poids, un volume réduit et la possibilité d'intégrer des circuits micro-ondes. Cependant, elles présentent des inconvénients tels qu'une bande passante étroite, une faible puissance et un faible gain. Les chercheurs se sont penchés sur l'amélioration de ces antennes en développant des antennes à surfaces sélectives en fréquence (FSS). Ces structures périodiques sont généralement formées de grilles métalliques ou de motifs métalliques imprimés, elles sont constituées d'éléments métalliques ou diélectriques disposés de manière périodique sur un superstrat, ces couches FSS contrôlent les ondes électromagnétiques frappant leur surface et agissent comme des filtres en fonction de leur conception et permettent de réfléchir certaines fréquences et de transmettre d'autres. Elles ont été découvertes en 1783 et sont largement utilisées aujourd'hui dans divers domaines des systèmes de télécommunication : tels que la défense militaire, les radars et les communications modernes.[34]

L'objectif de ce travail est de concevoir un réseau d'antenne microruban à deux éléments rectangulaires avec un superstrat en matériau FSS, et d'optimiser ses performances en étudiant l'effet des différents paramètres de la structure y compris des défauts introduits dans la couche FSS et cela dans le domaine des fréquences 5G.

La 5G offre des avantages tels que des connexions plus rapides, une latence réduite et la possibilité de connecter facilement les objets du quotidien au réseau. Les antennes jouent également un rôle crucial dans les communications sans fil, et surtout ses caractéristiques tels que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, et La fréquence de résonance qui réagit le mieux aux signaux électromagnétiques, en émettant ou recevant des signaux avec une efficacité maximale. La bande passante est la plage de fréquences sur laquelle elle fonctionne efficacement, déterminée par sa conception, ses dimensions et les matériaux utilisés. La conception et l'optimisation d'une antenne pour une bande passante spécifique et une fréquence de résonance sont essentielles pour assurer son efficacité dans les systèmes de communication sans fil [5] et Le gain qui mesure la capacité d'une antenne à concentrer l'énergie dans une direction spécifique par rapport à une antenne de référence, en tenant compte des pertes et de l'efficacité. Il est exprimé en décibels par rapport à une antenne isotrope (dBi) et La directivité

considérée comme essentielle dans les systèmes de communication sans fil car elle permet de concentrer la puissance du signal dans la direction souhaitée, améliorant ainsi la portée et la qualité de la communication [5]. Cependant, une augmentation de la directivité rend l'antenne plus sensible à l'orientation et au positionnement précis. L'ajout de structures FSS peut améliorer les caractéristiques de la structure : réseau d'antennes microstrips, en augmentant la bande passante, le gain et la directivité. Cette étude ouvre la voie à des améliorations technologiques dans les systèmes de communication modernes. Le document est scindé en trois chapitres après une introduction généralités sur les réseaux d'antennes générale :

Le premier chapitre qui concerne les planaires et la 5G, dans **le deuxième chapitre** nous avons présenté les FSS (Surfaces Sélective en Fréquence) planaires et **le dernier chapitre** de notre mémoire est consacré à la présentation des résultats et différentes simulations d'une antenne micro ruban à FSS,

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

Chapitre I

Généralité sur les réseaux d'antennes planaires et la 5G

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 atteindre un réseau d'antenne microstrips à FSS, qui sera notre sujet dans ce chapitre.

I.2. Historique

Le concept d'antenne imprimée fut pour la première fois imaginé en 1953 par Georges Deschamps. Alors que le premier brevet reprenant ce concept fut déposé en 1956 par Henri Gutton et Georges Boissinot [1].

Un peu plus tard dans l'année 1970, Byron a décrit une structure planaire qui se compose d'une plaque conductrice imprimée sur un substrat diélectrique avec $\epsilon_r < 10$ posé sur un plan de masse. Ses premières réalisations étaient essentiellement réservées à des applications militaires. Dans les années 1990, Howel et Munson ont réalisé un véritable passage dans le domaine industriel [2].

La majorité des travaux vise à améliorer certains sous-systèmes de cette nouvelle technique. A cette époque, on lui donne plusieurs noms : technologie « sans porteuse », ou en « bande de base » ou encore « technologie impulsionnelle » [3].

I.3. Définition d'une antenne

L'antenne est un dispositif capable d'émettre et de recevoir des ondes électromagnétiques véhiculant des informations. Le système antennaire 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 classer les antennes tels que la directivité et le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, ... 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 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 équirépartie dans l'espace [4].

I.4. Paramètres caractéristiques d'une Antennes

- Impédance d'entrée.
- Coefficient de réflexion.
- Rapport d'onde stationnaire (ROS).
- Diagramme de rayonnement.
- **Directivité :**

La directivité d'une antenne est une mesure de sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction spécifique. En d'autres termes, c'est la capacité de l'antenne à émettre ou à recevoir des signaux plus efficacement dans certaines directions par rapport à d'autres. Cette propriété est souvent exprimée en termes de diagramme de rayonnement, qui montre comment l'énergie est répartie dans l'espace autour de l'antenne. Une antenne très directive aura un diagramme de rayonnement étroit, ce qui signifie qu'elle émet ou reçoit des signaux de manière très sélective dans une direction donnée. La directivité est un aspect important dans la conception des systèmes de communication sans fil, car elle peut être utilisée pour concentrer la puissance du signal dans la direction souhaitée, ce qui améliore la portée et la qualité de la communication. Cependant, il est important de noter que l'augmentation de la directivité peut également rendre l'antenne plus sensible à l'orientation et au positionnement précis [5].

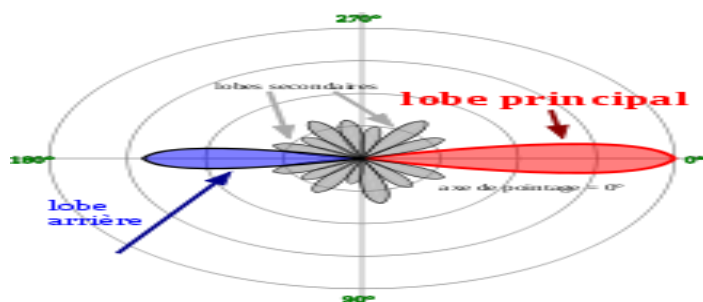


Figure I.1: la Directivité d'antenne

La directivité caractérise la façon dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions dans l'espace. La directivité d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport

de la puissance $P(\theta, \varphi)$ à la puissance rayonnée par la source isotrope par unité d'angle solide.

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (1.1)$$

$$P_R = \iint_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1.2)$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1.3)$$

Dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) la directivité est exprimée :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_r} \quad (1.5)$$

➤ **Gain :**

Le gain d'une antenne est une mesure de sa capacité à concentrer l'énergie dans une direction particulière par rapport à une antenne de référence. Contrairement à la directivité, qui mesure seulement la concentration de l'énergie, le gain prend également en compte les pertes et l'efficacité de l'antenne. Le gain d'une antenne est généralement exprimé en décibels (dB) par rapport à une antenne de référence isotrope, appelée dBi (isotrope), ou par rapport à une antenne de référence dipôle, appelée dBd (dipôle). Une antenne ayant un gain de 0 dBi ou 0 dBd émet ou reçoit l'énergie de manière égale dans toutes les directions, ce qui est typique d'une antenne isotrope ou dipôle idéale.

Un gain positif indique que l'antenne est plus efficace que la référence dans une direction donnée, tandis qu'un gain négatif signifie qu'elle est moins efficace. Par exemple, une antenne avec un gain de 3 dBi concentre l'énergie dans la direction spécifiée trois fois plus que l'antenne de référence isotrope. Le gain d'antenne est un aspect crucial dans la conception des systèmes de communication sans fil, car il contribue à améliorer la portée et la qualité des communications en concentrant l'énergie dans la direction souhaitée. Cependant, il est important de noter que l'augmentation du gain peut également rendre l'antenne plus directive et plus sensible à l'orientation et au positionnement précis [5].

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que la source isotrope émettrait par unité d'angle solide.

En général, le gain G correspond au gain dans la direction du rayonnement maximal (θ_0, φ_0)

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (1.6)$$

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)_0}{P_A} \quad (1.7)$$

$$G(\text{db}) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (1.8)$$

➤ **Fréquence de résonance et bande passante :**

La fréquence de résonance d'une antenne est la fréquence à laquelle elle réagit le plus efficacement aux signaux électromagnétiques. Cela se produit lorsque la longueur de l'antenne correspond à une fraction entière de la longueur d'onde du signal électromagnétique. À la fréquence de résonance, l'antenne émet ou reçoit des signaux avec une efficacité maximale.

La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences sur laquelle elle fonctionne efficacement. Elle est déterminée par plusieurs facteurs, dont la conception de l'antenne, ses dimensions, et les matériaux utilisés. Une antenne peut être conçue pour fonctionner sur une seule fréquence (antenne mono fréquence) ou sur une plage de fréquences plus large (antenne large bande). Pour une antenne donnée, la bande passante peut être définie de différentes manières. Par exemple, elle peut être mesurée comme la plage de fréquences sur laquelle le gain de l'antenne reste dans une certaine marge par rapport à son gain maximal, ou comme la plage de fréquences sur laquelle l'impédance de l'antenne reste dans une certaine plage acceptable. La conception et l'optimisation d'une antenne pour une certaine bande passante et une fréquence de résonance spécifique sont des considérations importantes dans de nombreux systèmes de communication sans fil, car elles déterminent la capacité de l'antenne à fonctionner efficacement dans les conditions requises [5].

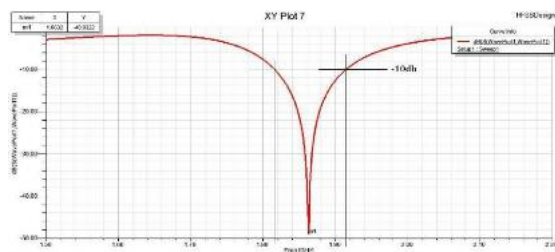


Figure I.2: Fréquence de résonance et bande passante d'antenne

I.5. Antenne patch

L'antenne patch (aussi appelé antenne imprimée) est composée d'un élément métallique (patch) imprimé sur un substrat placé au-dessus d'un plan de masse. Cette antenne est très employée dans l'industrie en raison de ses dimensions réduites, de son coût et poids faibles. Elle peut être utilisée soit comme élément rayonnant principal (Figure I.3.a), soit comme source élémentaire d'un réseau (Figure I.3.b) ou bien encore comme sonde d'excitation (Figure I.3.c) d'une antenne à résonateur comme l'antenne BIE. A noter que dans le cas du réseau de patch, l'alimentation est réalisée par un circuit de distribution (1 voie vers 16 dans l'exemple Figure I.3.b) qui répartit la puissance en amplitude et en phase sur les différents éléments.[5]

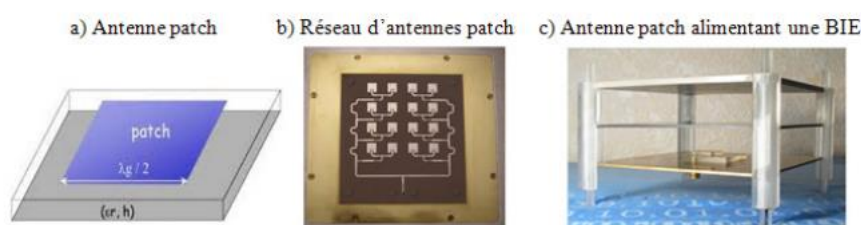


Figure I.3: Exemples d'utilisation des antennes patch

I.6. Réseau d'antennes

L'utilisation d'une antenne imprimée à patch unique s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Des caractéristiques spécifiques comme un gain élevé ou un lobe principal conformé ne peuvent généralement être obtenus que par le regroupement de plusieurs sources rayonnantes pour former un système appelé réseau d'antennes. L'avantage de l'assemblage de plusieurs antennes primaires permet donc d'obtenir des rayonnements hautement dirigés, En fonction du nombre et de la nature des éléments, de la forme de leur alimentation électrique ainsi que de leur disposition technique dans le réseau.

L'utilisation d'une antenne imprimée unitaire est insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposé, pour améliorer les performances de ces antennes, on associe plusieurs éléments rayonnants pour former un système appelé réseau, permettant de compenser les limitations des caractéristiques d'une antenne seule et jouer sur de nombreux facteurs tels que l'espacement et la phase des patches et la taille du plan de masse, pour avoir un gain plus élevé et un lobe principal conforme.[4].

I.7. Condition sur réseau d'antenne

Le réseau d'antenne contient plusieurs conditions pour avoir de meilleures performances comme [6] :

- ✓ Nombre d'éléments rayonnants nécessaires.
- ✓ L'espacement entre les éléments du réseau est assez petit qu'il n'y a aucune variation d'amplitude entre les signaux reçus aux différents éléments.
- ✓ Il n'y a aucun couplage manuel entre les éléments.
- ✓ Tous les champs d'incidence peuvent être décomposés en nombre discret d'ondes planes. C'est-à-dire, il y a un nombre fini de signaux.
- ✓ La largeur de bande du signal incident sur le réseau est petite comparée à la fréquence porteuse.

I.8. Types des réseaux d'antennes

Le groupement en réseau le plus simple est obtenu avec des sources identiques qui se déduisent les unes des autres par translation pour former des réseaux linéaires ou plans.

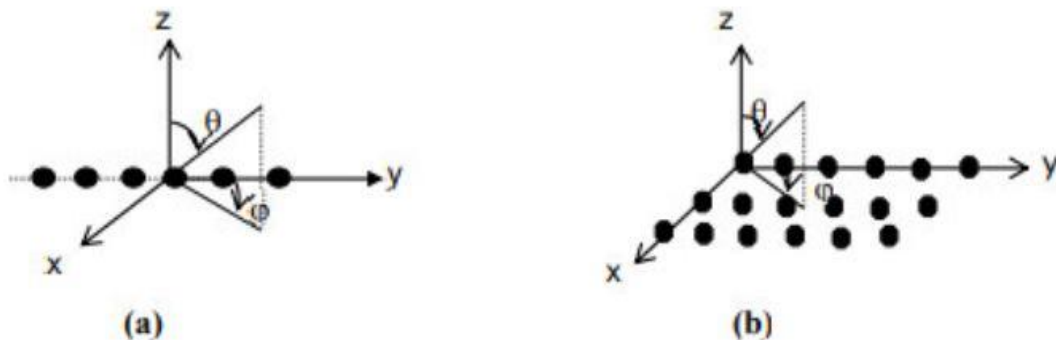


Figure I.4: Types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnel.

I.9. Cinquième génération 5G

La 5G souhaite se présenter comme la génération de rupture, la génération qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie [7].

I.9.1. Historique

Les technologies de communication mobile sont prises en charge par des organisations de développement des standards à l'échelle globale comme le 3GPP (3rd Group Partnership Project), ils sont souvent divisés en générations. Ainsi, la (1G) est le système mobile analogique des années 1980s du siècle dernier. La (2G) est le premier système mobile numérique et la 3G le premier des systèmes pouvant supporter des données à haut débit (Broadband data). L'évolution à long terme ou la LTE (Long Term Evolution) souvent appelée "4G", est la « LTE Advanced » est l'étape de l'évolution réelle vers la 4^{ème} génération, avec la première version de la LTE : version (release) 8 comme étant la "3.9G".

D'après le tableau II.1.1, nous voyons un écart de 10 ans entre les principales générations des technologies de communication sans fil. Le tableau I.3 décrit aussi les caractéristiques spécifiques des cinq générations [8].

	1G	2G	3G	4G	5G
Date approximation de déploiement	Années 1980	Années 1990	Années 2000	Années 2010	Années 2020
Vitesse téléchargement théorique	2 kbit/s	384 kbit/s	56Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
Temps de latence	Sans objet	629 ms	212 ms	60-98 ms	<1ms

Tableau I.1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles

I.9.2. Définition

La 5G est une nouvelle génération de technologie de télécommunications sans fil, qui fait suite aux précédentes générations de la téléphonie mobile. Elle promet de révolutionner la façon de communiquer dans le monde entier. Cette cinquième génération (5G) vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Avec la 5G, la transmission des données sur connexions haut débit sans fil pourrait atteindre, selon certaines estimations, une vitesse de 20Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires, et une latence égale ou inférieure à 1ms pour les usages à boucle de retour en temps réel. La 5G, avec l'avantage de bande passante et sa technologie d'antenne avancée, ouvre aussi la voie à la croissance exponentielle des données transmises sur les systèmes sans fil [9].

I.9.3. Objectif et Principe

La 5G permet des connexions et des téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, on se concentrait sur l'internet des objets. La 5G vise donc à :

- Assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette.
- Atteindre les meilleurs débits (1 Gb par seconde). Avoir de plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Avoir un temps de « latence » plus court qui donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Avoir Moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.

Comme principe, la 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz, mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G [10].

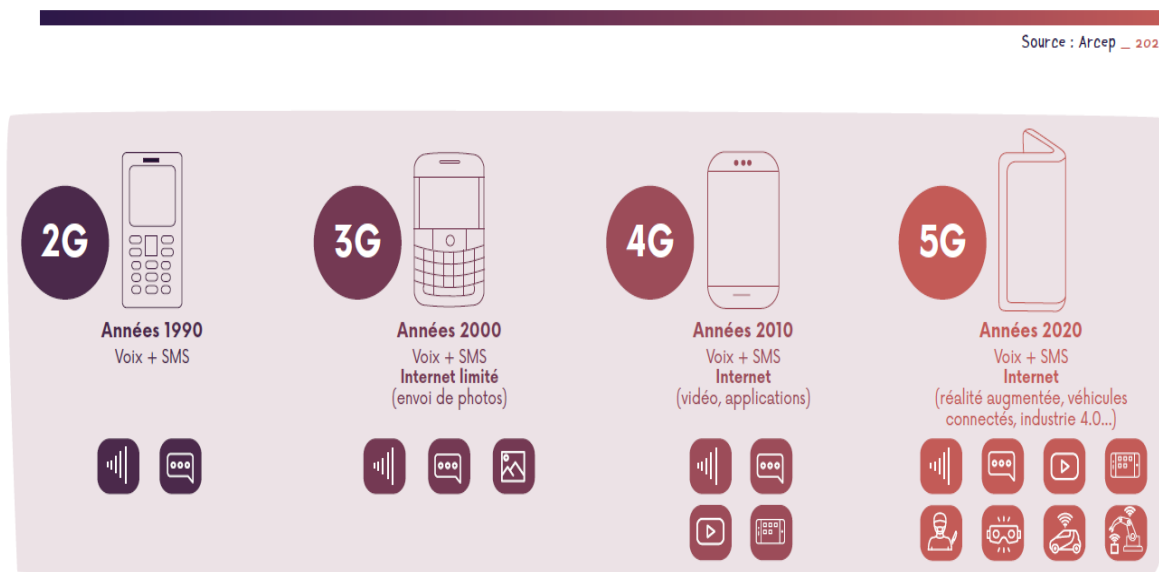


Figure I.5: les générations mobiles

I.9.4. Avantages et inconvénients de la 5G

I.9.4.1. Avantages

- Débit : La 5G va permettre d'aller vite, beaucoup plus vite : des débits de 10

Gbit/s contre 100 Mb/s aujourd'hui. Ce débit peut se comparer avec le réseau de fibres standard disponible chez vous actuellement.

- Latence réduite : désigne le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction.
- Objets connectés : Tous vos objets du quotidien vont pouvoir être connectés simplement et à moindre coût au réseau. C'est l'explosion des volumes de données transmises. [12]



Figure I.6: les applications 5G

I.9.4.2. Inconvénients

Le futur réseau 5G suscite néanmoins quelques inquiétudes notamment en matière d'exposition aux ondes. En effet, l'impact des radiofréquences sur notre santé et sur l'environnement fait débat, l'arrivée de la 5G, tout comme la 4G, augmentera obligatoirement l'exposition aux ondes avec l'installation de nouvelles antennes pour assurer une bonne couverture 5G du territoire. Pour évaluer si la 5G présente un danger pour notre santé, les expérimentations pilotes actuellement menées en France vont permettre de mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. [13]

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, d'une manière générale, les caractéristiques principales des antennes, les réseaux d'antennes et ces types, la deuxième partie du chapitre a été consacrée à 5ème génération et son objectif. Et nous avons terminé par avantages et inconvénients des 5G

Chapitre II

Les structures FSS (Surfaces

Sélectives en Fréquence)

planaires

II.1 Introduction

Les surfaces sélectives en fréquence (en Anglais : Frequency Sélective Surface FSS) sont une idée ancienne découverte par deux scientifiques ce sont David Rittenhouse et Francis Hopkinson, en 1783 [14]. Les physiciens ont d'abord ciblé les propriétés de ces structures dans le domaine de l'optique, puis sont passés au domaine des micro-ondes.

Les FSS ont été utilisées pour des applications militaires à partir des années 1960 afin de rendre les objets non détectables par les radars comme les avions furtifs [15].

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord les structure FSS planaires et leurs classifications, puis nous présenterons les différents motifs utilisés dans la constitution des FSS. Par la suite, nous présenterons les différents types des FSS et leurs diverses applications.

II.2. Les surfaces Sélectives en Fréquence (FSS)

Les FSS sont des structures périodiques comportant des motive métalliques ou diélectriques, ces structures sont un élément clé dans la conception des systèmes à fréquences de résonance multiples. Elles sont généralement formées soit d'un plan métallique perforé périodiquement avec des ouvertures (grille métallique), soit d'un réseau périodique de motifs métalliques imprimés sur du substrat. [14]

II.3. Structures des surfaces sélectives en fréquence planaires

De nos jours, les structures périodiques FSS ont attiré beaucoup d'attention et ont été appliquées à une variété d'applications nécessitant des performances très élevées. En effet, elles ont été utilisées dans les domaines militaires, les applications Radar et les systèmes de communications modernes [16-17]. La description et le principe de propagation de ces structures ainsi que leurs types seront présentés dans les sections suivantes.

II.4. Description des surfaces sélectives en fréquence planaires

Les surfaces sélectives en fréquence planaires sont des structures périodiques constituées d'un arrangement d'éléments de types conducteurs implantés sur un substrat diélectrique ou de types ouvertures perforées sur un plan conducteur. Chaque élément est appelé cellule unitaire et se répète selon un, deux ou trois vecteurs de translation. L'espace entre les cellules, appelé « gap », est généralement inférieur à la longueur d'onde (figure II.1). Les paramètres clés qui influencent sur la réponse fréquentielle des surfaces sélectives en fréquence sont : la nature de la géométrie de l'élément (imprimés ou ouvertures), le gap et la périodicité selon les axes x et y [17].

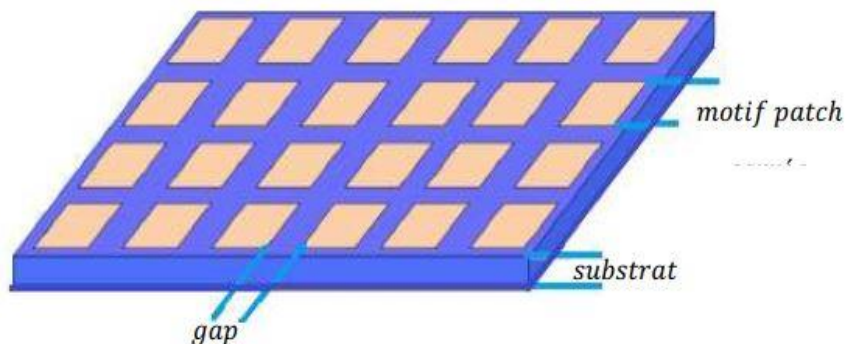


Figure II.1: Réseau FSS bidimensionnel de type patch.

À cause de la similarité et de la répétition des cellules unitaires, l'amplitude du champ électromagnétique à chaque cellule est la même [18]. En contrepartie, du fait de la régularité des différents décalages des cellules, la phase entre celles-ci varie de manière régulière. Cette propriété permet de limiter l'analyse du groupe de cellules en l'analyse d'une seule cellule unitaire grâce au théorème de « Floquet ». Ce théorème est basé sur la décomposition en série de Fourier appliquée aux fonctions périodiques. En effet, ce dernier permet de donner une représentation modale d'un champ qui se répète de manière périodique [14]. Plusieurs simulateurs tels que l'HFSS et le CST utilisent le théorème « Floquet » pour analyser ce type de structures.

La structure FSS est une structure semi réfléchissante c'est-à-dire elle se caractérise, lors de l'incidence d'une onde électromagnétique plane, par la réflexion de certaines fréquences et la transmission d'autres [19]. La figure II.2 présente un réseau FSS bidimensionnel avec les vecteurs de périodicité \vec{D}_u et \vec{D}_v qui sont donnés comme suit [20] :

$$\vec{D}_u = Du(\cos \alpha 1\hat{x} + \sin \alpha 1\hat{y}) \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{D}_v = Du(\cos \alpha 2\hat{x} + \sin \alpha 2\hat{y}) \quad (\text{II.2})$$

Où :

α est l'angle entre \vec{D}_u et \vec{D}_v , $\alpha 1$ l'angle d'incidence entre \vec{D}_u et l'axe x , et $\alpha 2$ l'angle entre \vec{D}_v et l'axe x .

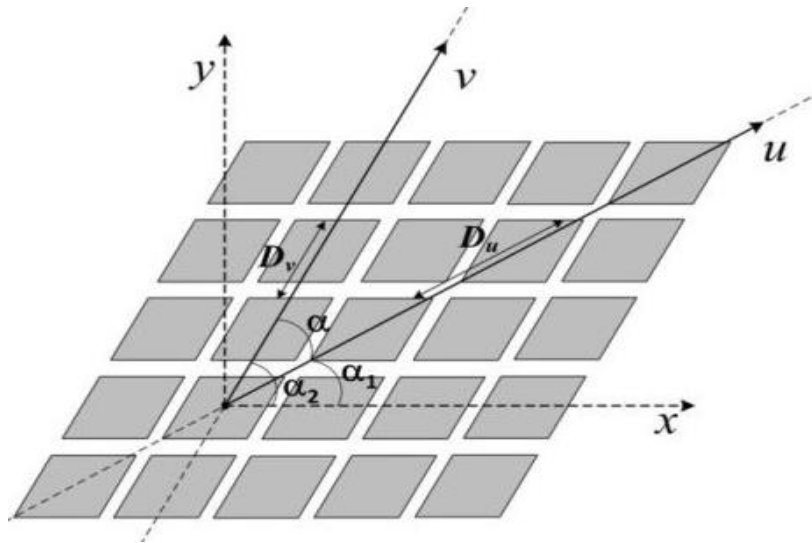


Figure II.2: Incidence d'une onde plane sur un réseau FSS bidimensionnel de type patch [20]

II.5. Classification des FSS en fonction de leurs réponses spectrales

Les FSS sont des structures périodiques gravées dans une surface diélectrique ou un groupe de structures métalliques dans le vide. [21]. FSS contrôle les ondes électromagnétiques frappant sa surface et agit comme un filtre en fonction de la conception de la structure. [22].

Grâce à la possibilité de sélection précise de la forme et de la taille du motif FSS, ce dernier est conçu pour fournir les quatre réponses spectrales qui sont : coupe bande, passe bande, passe bas et passe haut, selon les critères de conception suivants : le niveau d'atténuation, la fréquence de coupure, la bande passante et l'angle d'incidence de l'onde influent [14] [23].

Les FSS sont classées en fonction de leurs réponses spectrales comme suit :

II.5.1 FSS coupe-bande : IL apparaît sous la forme de réseau planaire périodique, composée d'anneaux métalliques. Illustrée à la figure (II.3).

II.5.2 FSS passe-bande : est une grille métallique, elle est composée d'un arrangement de fentes en anneaux. (Inverse de coupe bande. Illustrée à la figure (II.3).

II.5.3 FSS passe-haut : Elles offrent le comportement d'une grille métallique, c'est un filtre réfléchissant pour toutes les basses fréquences. Illustrée à la figure (II.3).

II.5.4 FSS passe-bas : est une grille métallique, comme le filtre passe haut mais réfléchissant pour tous les haut fréquences (inverse de passe bas). Illustrée à la figure (II.3).

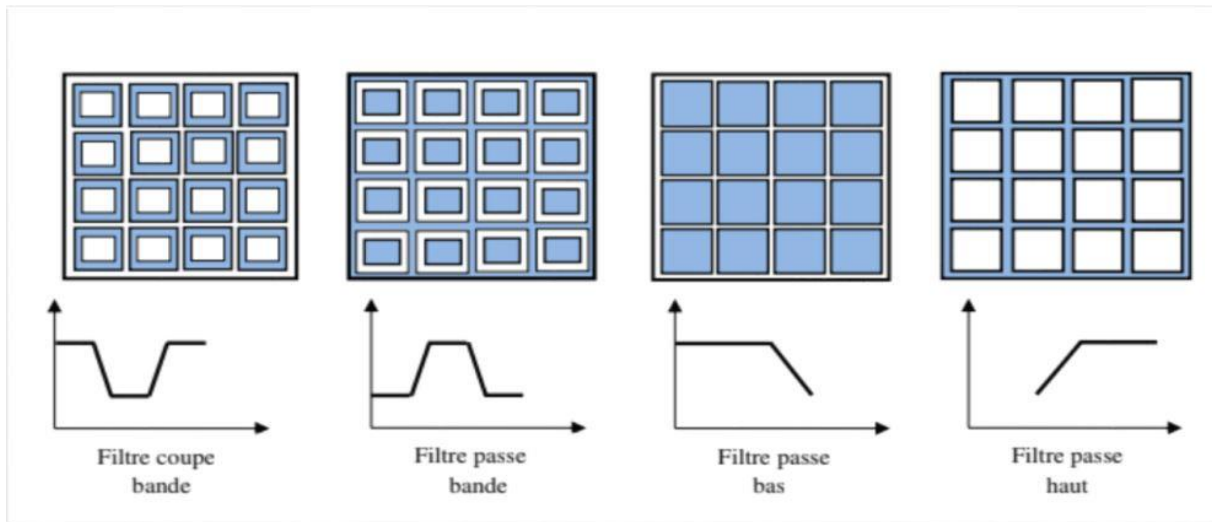


Figure II.3: Différents types de réponses fréquentielles d'une FSS

II.6. Différents types de motifs des éléments d'une FSS

Les motifs utilisés dans les FSS sont classés en quatre groupes de base [19,14,24] dont des exemples sont montrés dans la figure II.4 :

- Réseau formé par des éléments connectés au centre comme les dipôles, tripodes, les croix de Jérusalem ;
- Réseau formé par des éléments en anneau comme les anneaux circulaires, carrés, hexagonaux ;
- Réseau formé par des ouvertures de forme quelconques dans un plan conducteur ou des patches de formes diverses imprimées sur un substrat ;
- Réseau formé d'une combinaison des éléments cités ci-dessus. Ces combinaisons ont été employées afin d'atténuer certains des problèmes liés à des FSS constituées par un seul type d'éléments [19].

Ces quatre modèles de base peuvent être combinés pour générer, de nombreuses nouvelles FSS dont les caractéristiques sont uniques, tout dépend des performances désirées. La taille des éléments et la façon dont ils sont disposés dans le réseau jouent un rôle important pour la stabilité du FSS avec l'angle d'incidence. En effet, pour améliorer la stabilité de la FSS, il faut que la taille de la cellule soit inférieure à la moitié de la longueur d'onde à la fréquence de fonctionnement [25]. Par exemple les FSS avec des éléments du deuxième groupe ont été proposées dans la littérature dans le but était d'avoir des structures multi-bandes avec une réduction de la taille (miniaturisation) et une stabilité des propriétés de résonance par rapport à l'onde d'incidente [26,27].

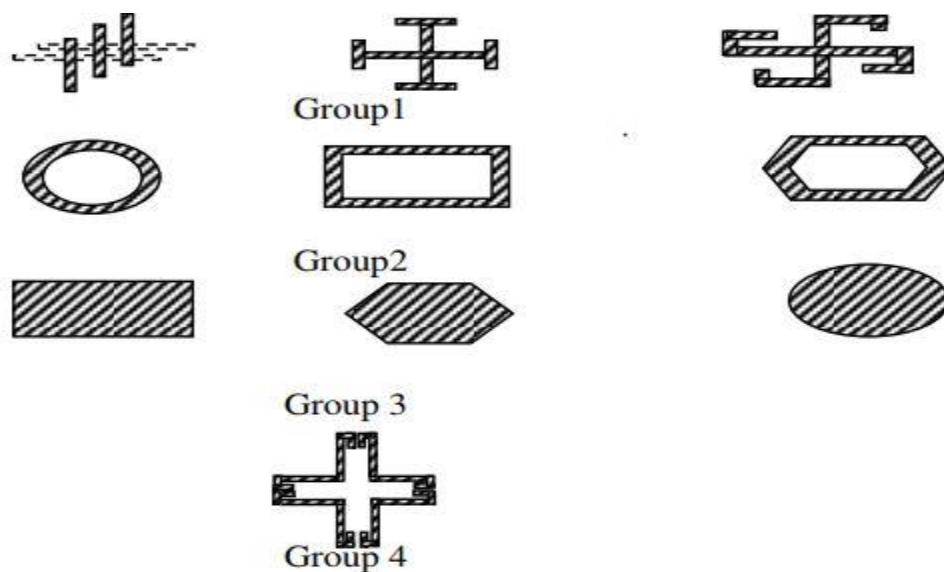


Figure II.4: Les quatre différents groupes des éléments constituant une FSS d'après Munk [19].

II.7. Bande passante des structures FSS

La bande passante des composants est un bon point de départ lors de la conception d'une large bande pour le FSS. Il est important de planifier les éléments plus étroitement ensemble pour augmenter la bande passante du FSS. Cet objectif peut également être atteint en définissant les éléments pour réduire la taille de cellule.

La bande passante coupe-bande ou passe-bande du FSS peut également être obtenue en combinant les deux FSS en cascade ; En choisissant avec soin la distance entre les deux surfaces, cette technique est appelée technique Aplatir et élargir de la courbe de réflexion (ou de transmission) dans la bande de fréquence, la fréquence de travail. Aussi, dans ce cas, le coefficient de réflexion (ou de transmission) chute fortement en bordure de bande [28].

II.8 Applications des surfaces sélectives en fréquence

Actuellement, plusieurs applications impliquent les FSS, telles que les antennes, la sécurité dans les réseaux sans fil, les radômes, les missiles, les boucliers électromagnétiques...etc

II.8.1 Réflecteurs d'antenne

L'utilisation du FSS dans les sous-réflecteurs pour les communications par satellite est illustrée à la Figure II.5, dans laquelle un seul sous-réflecteur principal peut séparer différentes bandes de fréquences. Pour améliorer les capacités du réflecteur auxiliaire, des FSS fonctionnant à plusieurs fréquences sont utilisées. Dans de tels systèmes, la structure FSS présente de bonnes caractéristiques de réflexion des fréquences spécifiques [29].

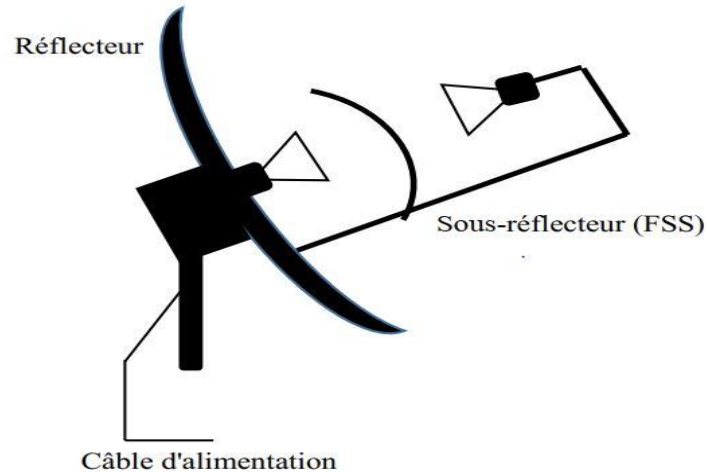


Figure II.5: Application du FSS dans les sous-amplificateurs pour les communications par satellite

II.8.2 Porte four micro-ondes

Le panneau avant du four à micro-ondes domestique, figure II.6, est une application bien connue des FSS. Dans cette application, la FSS présente la caractéristique d'un filtre passe-bande, permettant de laisser passer la fréquence de la lumière visible et de rejeter la plage des hyperfréquences (environ 2,45 GHz). Ces caractéristiques ont conduit à l'utilisation du FSS dans les radômes pour réduire le rayonnement transversal des antennes en dehors de leur bande de fonctionnement [29].



Figure II.6: Application des FSSs comme un écran sur la porte du four micro-ondes

II.8.3 Radome

Les FSS sont également largement utilisées dans les radômes, fournissant un filtre passe-bande. [30], [31]. Un exemple de FSS utilisé comme radôme est illustré à la figure II.7.



Figure II.7: Application des FSSs au radôme [30]

II.9. Amélioration des caractéristiques d'une antenne

L'ajout des structures FSS peut modifier les performances de l'antenne telles que la sélectivité de la bande passante de l'antenne, l'ajustement léger de la fréquence de résonance, ou la modification du diagramme de rayonnement et l'amélioration au niveau du gain de l'antenne, en fonction de la structure et de la méthode d'intégration utilisées [22].

II.10. Conclusion

Le chapitre 2 présente les structures des surface sélectives en fréquence planaire et sa classification, description, et leur caractéristiques principales et ses applications dans différents domaines.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des différentes simulations et résultats que nous avons obtenus, qui sont concentré sur le but d'améliorer les performances de notre réseau d'antennes microstrips. Nous allons donner une courte description du programme **CST MWS** que nous avons utilisé, en choisissant la gamme de fréquences [**3.4 GHz - 3.8 GHz**] appartenant domaine de la **5G**. Nous allons comparer une antenne patch à un seul élément avec un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle). Comme nous avons inséré une couche **FSS** et nous avons fait une étude paramétrique de cette dernière dans le but d'améliorer les caractéristiques de l'antenne : le coefficient de réflexion, la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

III.2. Description du logiciel de simulation CST

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies (Finité Intégration Technique) cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle [1].

Le simulateur **CST Microwave Studio** est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique des composantes hautes fréquences à interface simple. Ce simulateur utilise un maillage parallélépipédique où l'espace est divisé en cellules élémentaires de forme cubique et la discrétisation générée est donc volumique. Un processus de maillage peut être appliqué avant que la simulation de la structure ne soit lancée. Ceci permet directement une description en 3-D de tous les éléments de la structure ce qui le rend applicable à de nombreux problèmes électromagnétiques hyperfréquences dans les domaines temporel et fréquentiel. L'avantage de cet outil est sa potentialité de simuler toutes sortes de structures, quelle que soit la technologie utilisée avec un moindre temps de calcul par rapport au logiciel **HFSS** [2].

HFSS ou "High-Frequency Structure Simulator", est un logiciel de simulation électromagnétique largement utilisé dans l'industrie pour la conception et l'analyse de circuits

haute fréquence, d'antennes et de dispositifs micro-ondes. Il est développé par ANSYS (anciennement Ansoft), une société spécialisée dans les logiciels de simulation et d'ingénierie [3].

III.3. Conception et simulation des structures pour la bande des [3.4-3.8] GHz

En premier nous allons comparer les antennes microstrips : à un seul élément, réseau à deux éléments alimentés en série et parallèle.

III.3.1. Présentation de la structure à un seul élément

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat d'une permittivité de $\epsilon_r = 4$ (Epoxy resin), d'un patch de forme rectangulaire.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (mm)</i>
w_s : longueur du substrat	36
l_s : largeur du substrat	29.5
y : épaisseur du substrat	1.6
l_p : largeur de patch	19.5
w_p : longueur de patch	26
h_p : épaisseur du patch	0.035
h_m : épaisseur du plan de masse	0.035
l_f : Longueur ligne alimentation	11.46
w_f : Largeur ligne alimentation	3
S_g : largeur de l'encoche	1.78
Y_o : longueur de l'encoche	6.25

Tableau III.1: Dimensions de l'antenne micro ruban rectangulaire

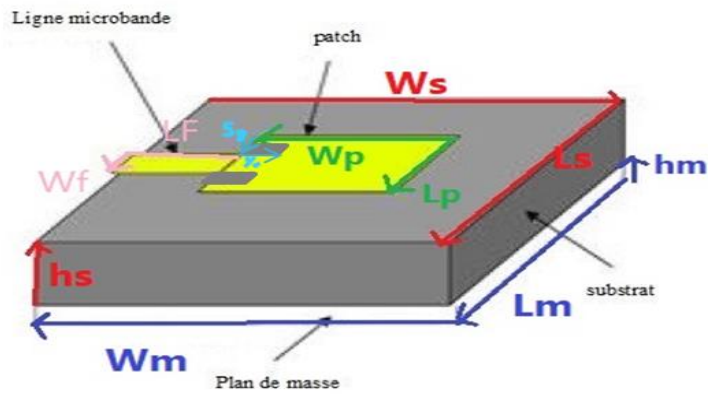


Figure III.2: Dimensions de l'antenne patch

Après avoir effectué plusieurs simulations et en changeant plusieurs fois les paramètres de la structure, nous avons atteint des résultats acceptables fixant les valeurs des paramètres, à savoir la longueur de l'antenne $w = 26 \text{ mm}$, largeur $L = 19.5 \text{ mm}$, et cela pour avoir une fréquence dans la bande $[3.4\text{GHz} - 3.8\text{GHz}]$ et avec une très bonne adaptation de l'antenne.

Le type du diélectrique qui forme le substrat $\epsilon_r = 4$ « Epoxy resin ». Cela nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour nos structures choisis en fixant les dimensions mentionnées ci-dessus (Tableau III.1).

III.3.1.1. Résultats pour une antenne microstrip

A) Fréquence de résonance :

Les résultats sont obtenus en cliquant sur l'icône dans l'arbre navigation.

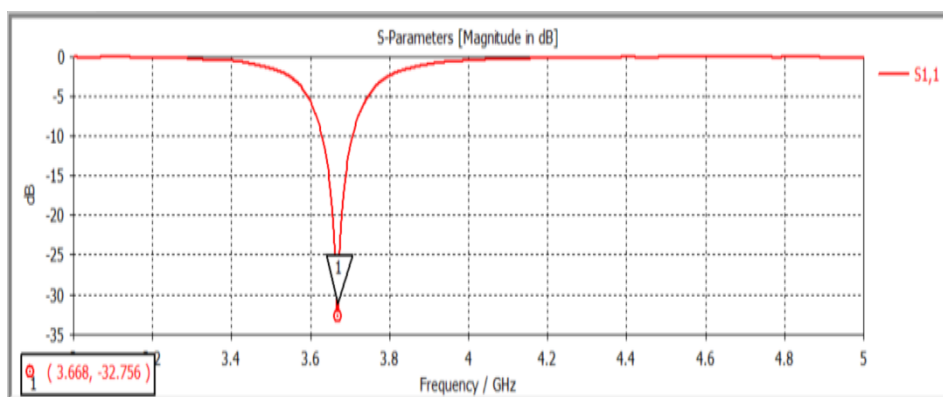



Figure III.2: Coefficient de réflexion S11 pour : une antenne rectangulaire.

B) Directivité et Gain :

Pour afficher la directivité et le gain il faut :

1. Activez l'outil de simulation en cliquant sur l'icône correspondante  dans la barre d'outils de l'objet.
2. Après avoir choisi la fréquence de résonance en utilisant la boîte de dialogue, et on peut choisir la précision et relancer la simulation.

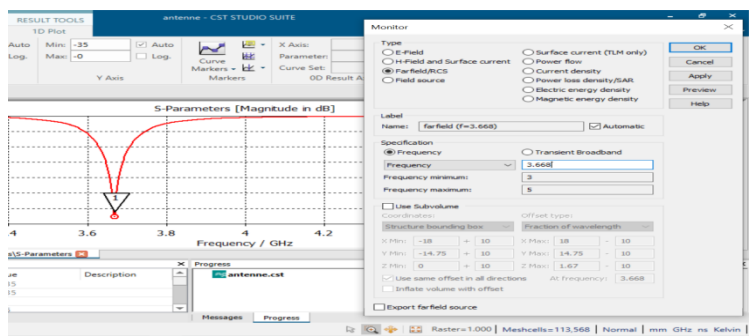



Figure III.3: Choix de la Fréquence de résonance.

3. Les résultats de la directivité sont obtenus en cliquant sur l'icône  dans l'arbre navigation.

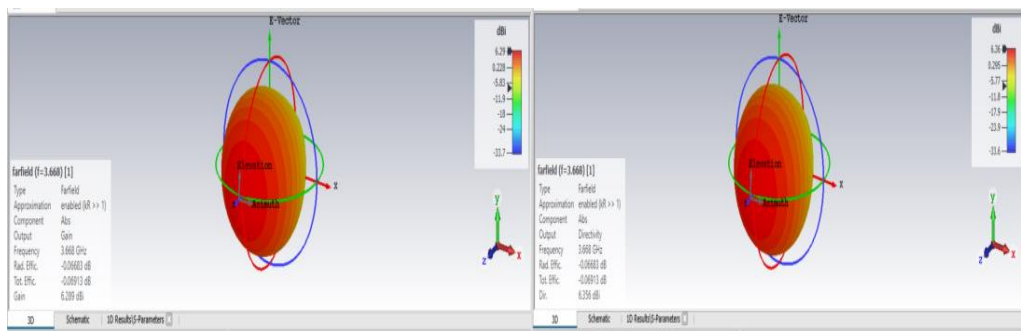


Figure III.4 : Directivité en 3D d'une antenne rectangulaire.

III.3.2. Présentation d'un réseau d'antennes à deux éléments (pour une alimentation parallèle)

Les dimensions des éléments rayonnants de la structure de base que nous avons adoptée pour un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation parallèle), sont les mêmes que pour d'un seul élément (Tableau III-1) avec des changements dans dimension du plan de masse,

et du substrat. Nous avons également utilisé deux lignes d'alimentation. Cette structure est alimentée par le biais sous forme d'une jonction T (diviseur de puissance) voir la figure.III.6.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
w_{s2} : Longueur du substrat	84.92
l_{s2} : Largeur du substrat	38.96
l_{f2} : Longueur ligne alimentation2	51.92
w_{f2} : Largeur ligne alimentation2	3.4
l_{f3} : Longueur ligne alimentation3	9.46
w_{f3} : Largeur ligne alimentation3	3

Tableau III.2: Dimensions d'un réseau d'antennes pour une alimentation parallèle

Nous modifions l'emplacement du « port »:

$$X1 = -\frac{wf}{2} + \frac{(2*11.46 + wp)}{2} - \frac{wf}{2} \tag{III.1}$$

$$X2 = -\frac{wf}{2} + \frac{(2*11.46 + wp)}{2} + \frac{wf}{2} \tag{III.2}$$

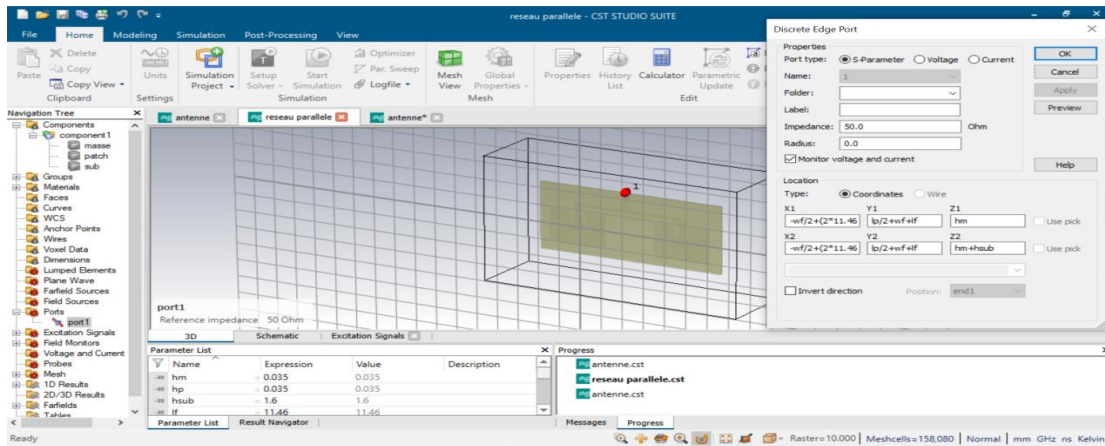


Figure III.5: Créer un « port »

On obtient un réseau d'antennes à deux éléments alimentés en parallèle.

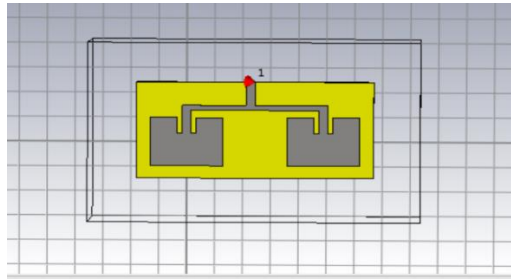


Figure III.6: Un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation parallèle)

III.3.2.1. Résultats d'un réseau d'antenne à deux éléments parallèles

A) Fréquence de résonance :

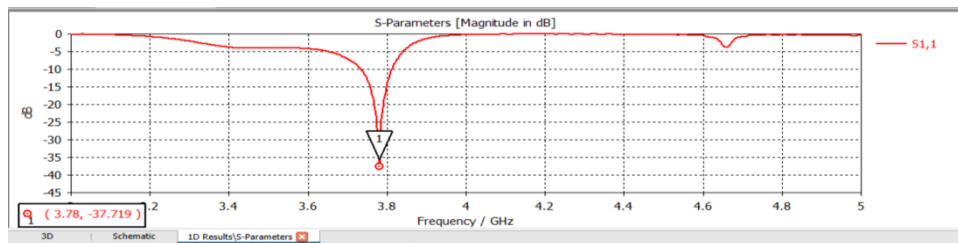


Figure III.7 : Coefficient de réflexion S11 pour un réseau d'antennes à deux éléments alimentés en parallèle

B) Directivité et Gain

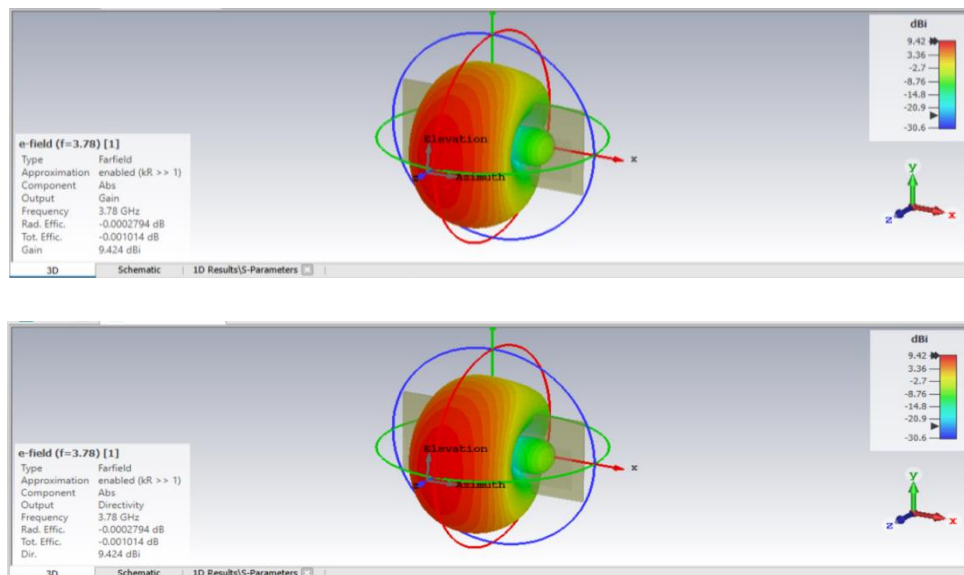


Figure III.8: (a) Gain (b) Directivité en 3D

pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments rectangulaires alimentés en parallèle

III.3.3. Un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série)

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment (Tableau III.1), sauf les dimensions du plan de masse et du substrat modifié comme suit :

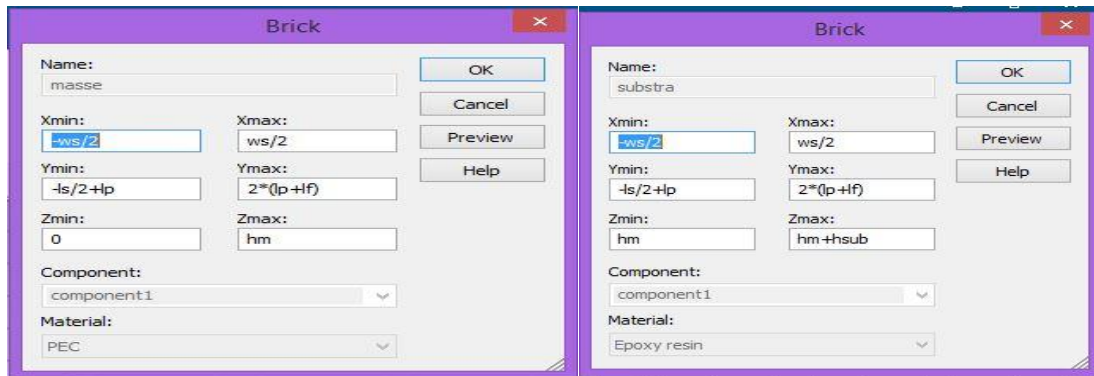


Figure III.9: Créer un réseau d'antennes patches à 2 éléments rectangulaires alimentés en série.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
w_{s2} : longueur du substrat	57.17
l_{s2} : largeur du substrat	36
l_{f2} : Longueur ligne alimentation2	11.25
w_{f2} : Largeur ligne alimentation2	1.78

Tableau III.3 : Dimensions d'un réseau d'antennes pour une alimentation en série.

On obtient un réseau d'antennes à alimentations série :

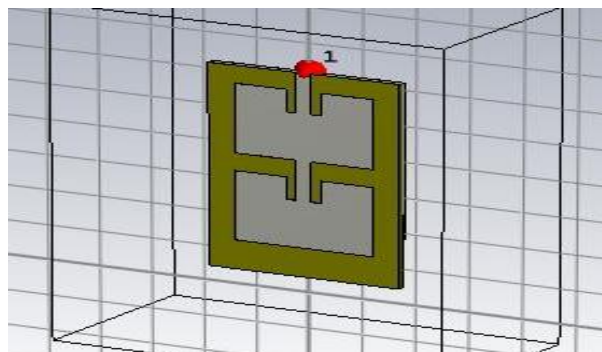


Figure III.10: Le réseau d'antennes à deux éléments alimentés en série.

III.3.3.1. Résultats d'un réseau d'antennes à deux éléments alimentés en série

A. Fréquence de résonance :

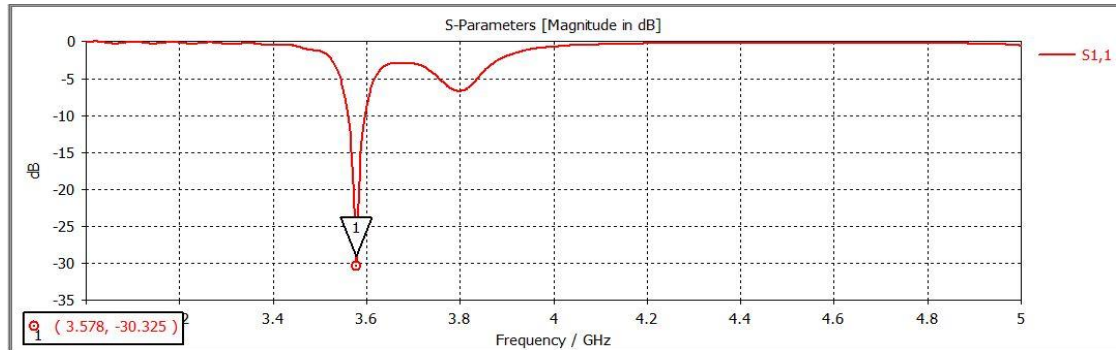


Figure III.11: Coefficient de réflexion S_{11} pour : un réseau alimenté en série.

B. Le Gain et la directivité

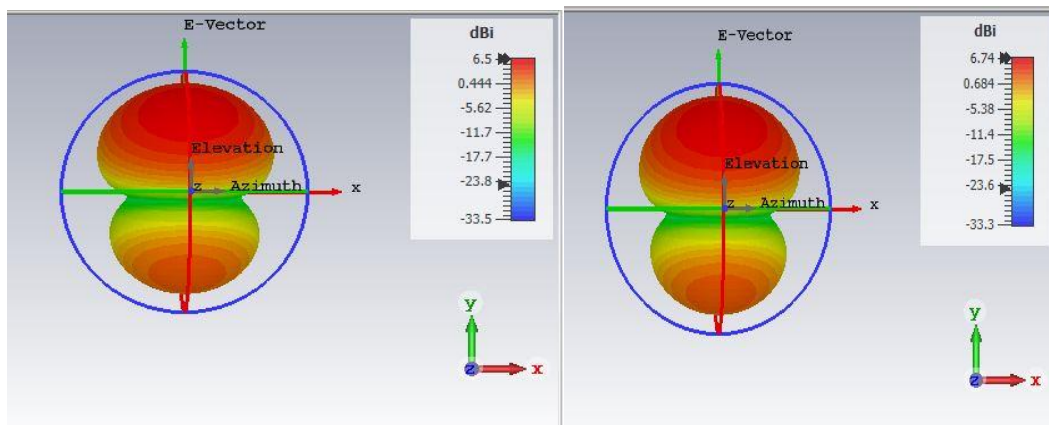


Figure III.12 : Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments rectangulaire par une alimentation en série.

III.4. Comparaison entre les résultats des 3 structures

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment d'un réseau d'antennes à deux patches rectangulaires (figure.III.6 et figure.III.10).

A) Fréquence de résonance

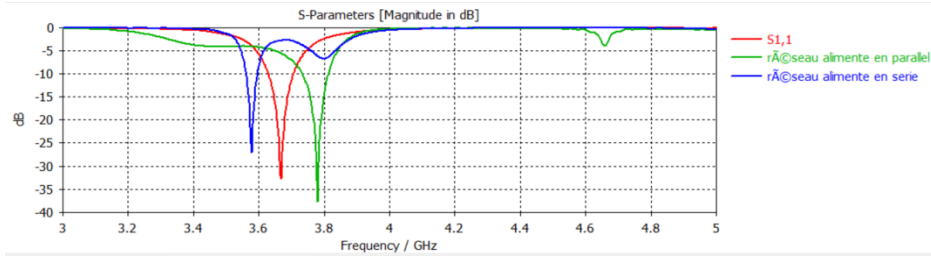
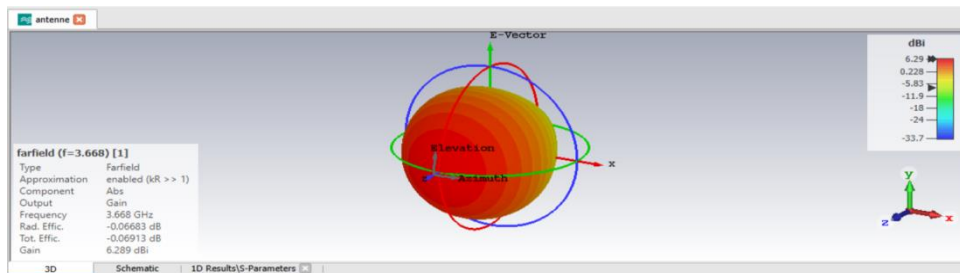


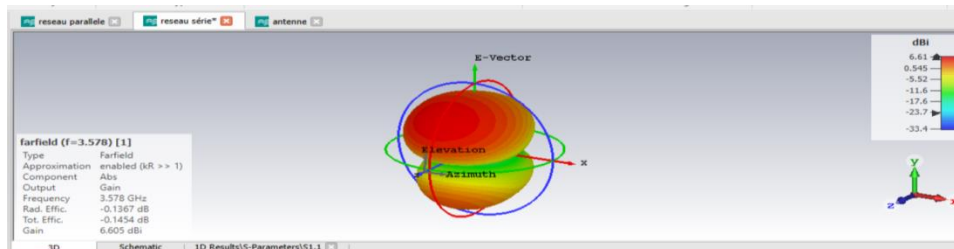
Figure III.13: Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne.

Après plusieurs tentatives, nous avons obtenu les résultats rassemblés au tableau III.4 ; Tout d’abord, nous avons modifié la longueur du patch jusqu’à obtenir la fréquence de résonance et la bande passante requises, qui se situe dans le domaine de la 5G. Deuxièmement, afin d’obtenir une bonne adaptation, nous avons modifié la longueur de l’encoche.

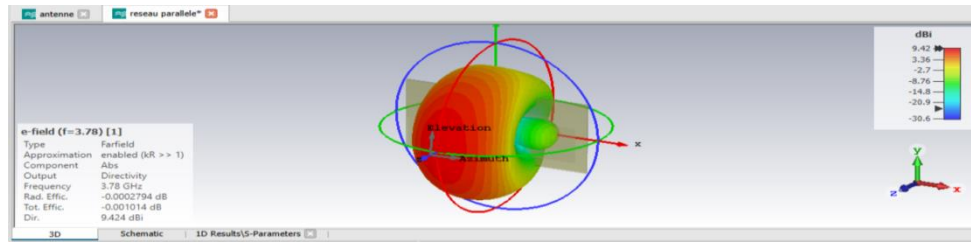
B) Directivité et Gain



(a)



(b)



(c)

Figure III.14: Directivité en 3D pour une antenne (a) à un élément, un réseau d’antenne patch 2 éléments rectangulaire par une alimentation (b) en série (c) parallèle

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11(dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain(dBi)
Antenne patch	6.36	-32.775	3.668	0.0773	6.29
Réseau à 02 patchs en série	6.74	-30.325	3.578	0.034	6.61
Réseau à 02 patchs parallèles	9.24	-37.719	3.78	0.0797	9.42

Tableau III.4: Les résultats pour une antenne à un seul éléments et les réseaux d’antennes à deux patchs alimentés parallèle et série.

A partir des résultats du coefficient de réflexion S_{11} d’une antenne d’un seul patch et des réseaux à 2 éléments avec 2 types d’alimentations (série et parallèle) et les résultats indiqués dans le tableau III-4 des caractéristiques : la fréquence de résonance, la bande passante, la directivité et le gain, on remarque que :

- La fréquence de résonance pour un réseau à alimentation parallèle a augmenté par rapport à un seul élément.
- La bande passante pour un réseau (série et parallèle) est plus large par rapport à un seul élément et particulièrement pour un réseau en parallèle.
- La directivité pour un réseau à alimentation parallèle est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément.

- Le gain pour un réseau à alimentation parallèle est mieux des autres structures.

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

La couche FSS est une couche ou une structure périodique placée sur une surface qui permet de contrôler la transmission ou la réflexion des ondes électromagnétiques à différentes fréquences, elle est placée au-dessus du réseau d'antennes avec une distance k au-dessus des patches, constituée d'un groupe de motifs que nous présenterons ultérieurement. Au-dessus d'eux vient une couche appelée superstrat qui a les mêmes dimensions du substrat.

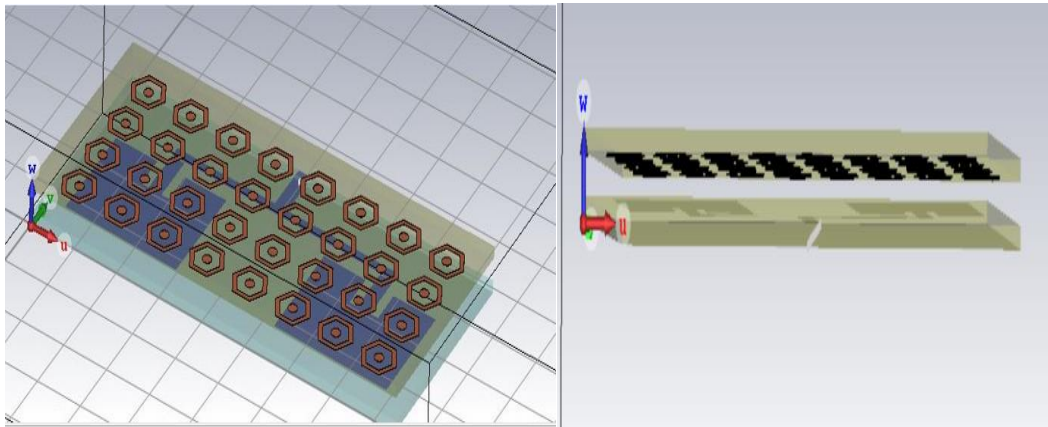


Figure III.15: La couche FSS

III.5.1. Comment simuler une couche FSS

Nous avons commencé par la première étape qui consiste à créer un motif avec ses dimensions exactes et des formes superposées au-dessus du réseau d'antennes qui a été créé à une distance de $k = 1mm$, en suivant les étapes ci-dessous :

- Nous avons changé les repères (de $X Y Z$ à $U V W$) et créé la première forme, qui est cylindre avec un diamètre de $R_1 = 4.5mm$ de matériau PEC.

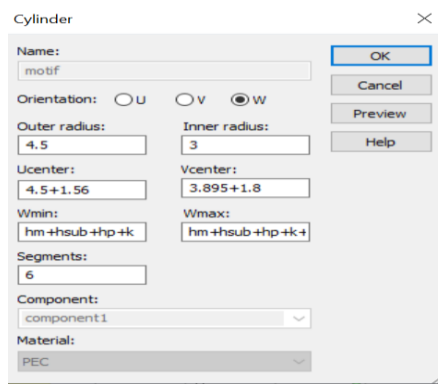


Figure III.16. Cylindre 1 du motif.

- b) Nous avons ajouté un autre cylindre, plus petit que le premier, avec un diamètre de $R_2 = 2mm$ et en matériau PEC.

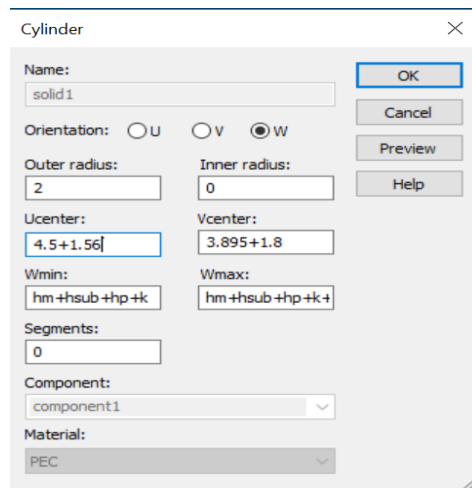


Figure III.17. Cylinder 2 du motif.

- c) Et puis nous avons rassemblé ces formes qui représentent le motif et nous l'avons répété plusieurs fois en utilisant l'instruction **TRANSFER** : 3 fois sur l'axe V et 7 fois sur l'axe U, après nous avons ajouté la dernière couche : superstrat, en tenant compte du choix du Gap (distance entre deux motifs) pour compléter notre structure à FSS.

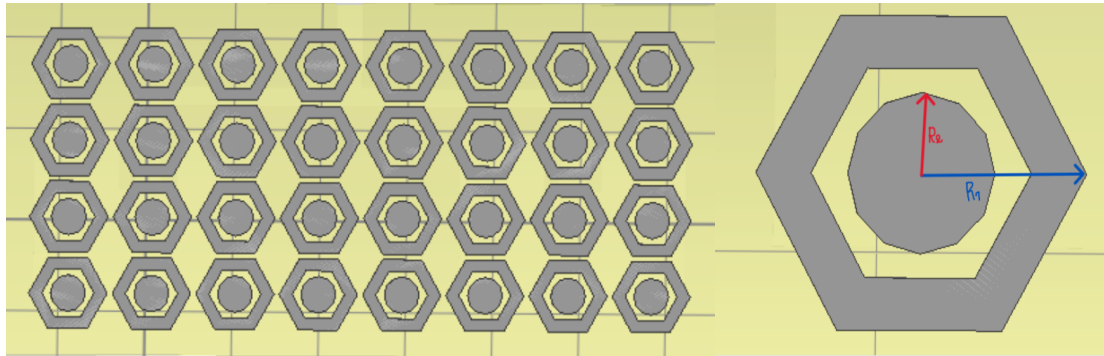


Figure III.18: Les motifs de la couche FSS

III.6. Etude paramétrique de la couche FSS

Après avoir calculé et apporté un certain nombre de modifications sur le motif et exactement le Gap, nous avons fait une étude paramétrique.

III.6.1. Effet du rayon R_1 du motif

La valeur de R_2 est fixer à 2mm et et $k = 1mm$, alors qu'on a pris deux valeurs de rayons : $R_1=4.5mm$ et 4 mm.

➤ Pour $R_1=4.5mm$ et un Gap= 1.4mm

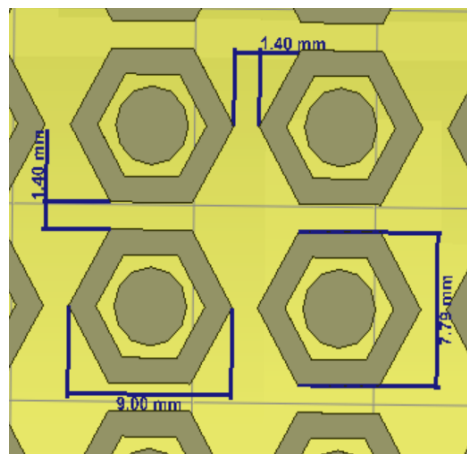


Figure III.19: Les dimensions du motif FSS ($R_1=4.5mm$ et un Gap= 1.4mm)

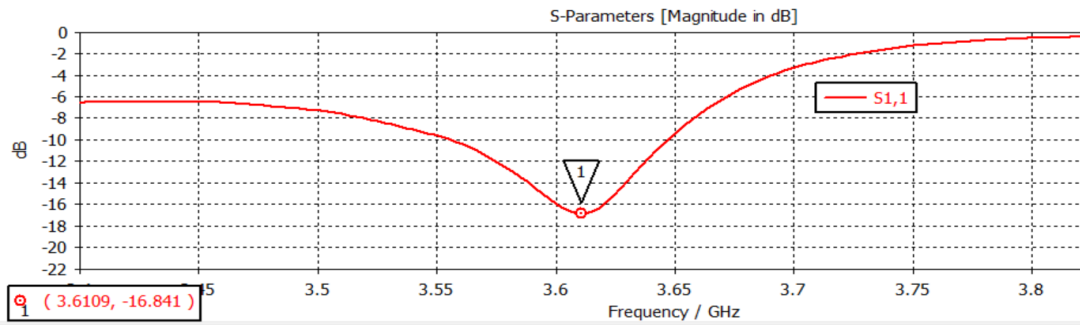


Figure III.20: Coefficient de réflexion S11 pour $R_1=4.5\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 1.4mm

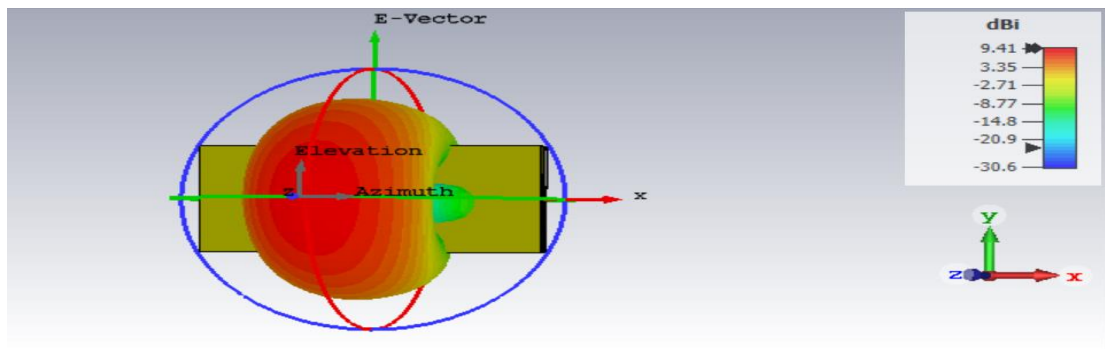


Figure III.21: Directivité et gain pour $R_1=4.5\text{mm}$, $R_2=2\text{mm}$ et le Gap=1.4mm

➤ Pour $R_1=4\text{mm}$ et le Gap=2mm

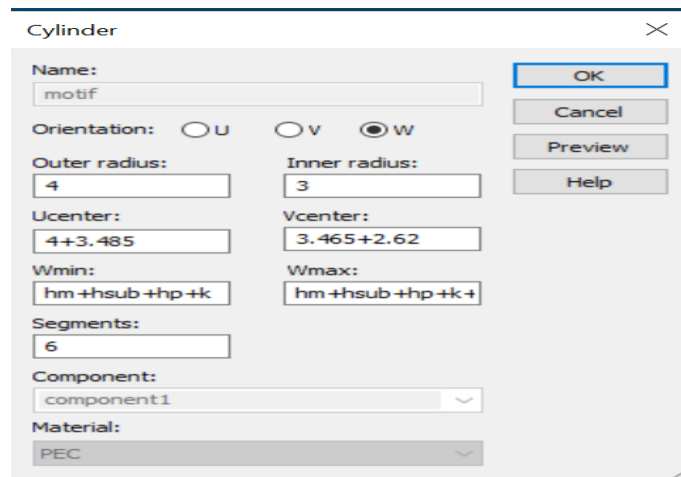


Figure III.22: Rayon du cylindre R_2 du motif

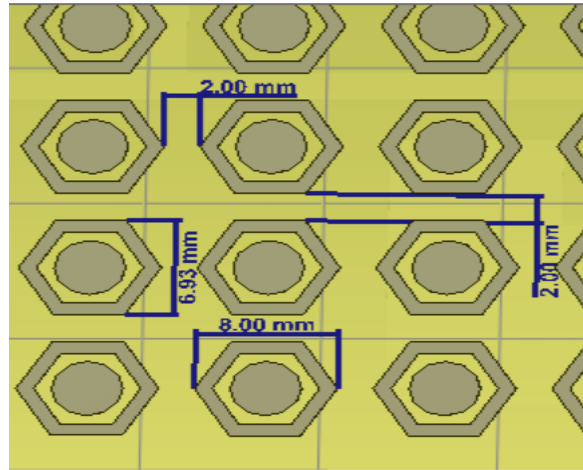


Figure III.23 : Dimensions de motif FSS ($R_1=4\text{mm}$ et le Gap= 2mm)

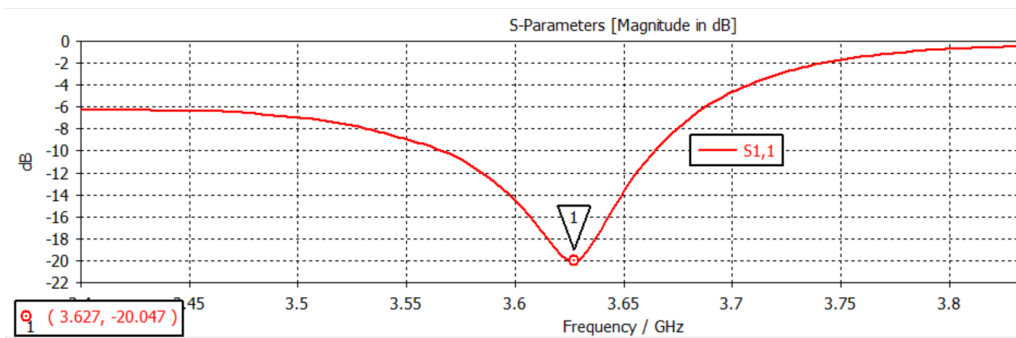


Figure III.24: Coefficient de réflexion S_{11} pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 2mm

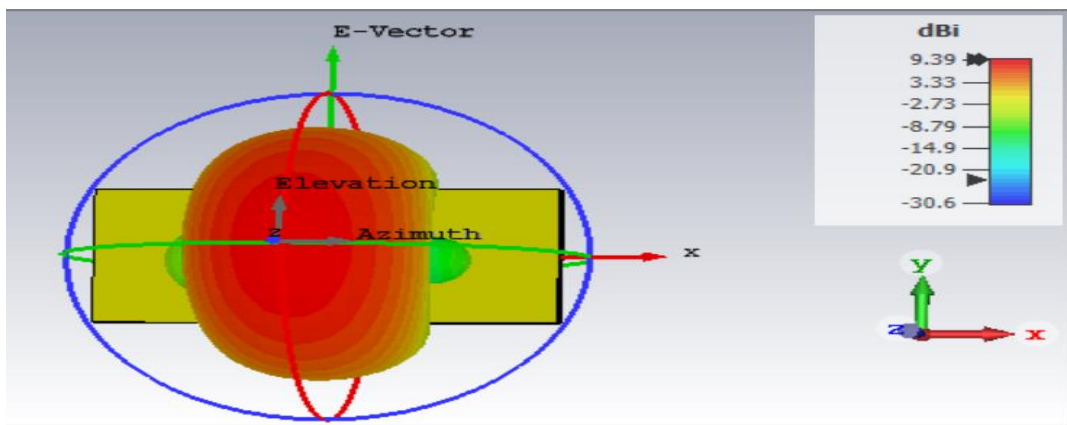


Figure III.25: Directivité et gain pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 2mm

On remarque que la meilleure directivité et gain pour $R_1=4.5\text{mm}$, $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 1.4mm mais le meilleure Coefficient de réflexion S_{11} , la bande passante et bonne adaptation pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=2\text{mm}$ et le Gap= 2mm (les figure 20, 21, 24, et 25).

III.6.2. Effet du rayon R_2 du motifs

On a fixé $R_1 = 4mm$ et $k=1mm$ qui a donné de bons résultats, et on a changé le rayon du petit cylindre pour les valeurs $R_2=0.5mm$, $1mm$, et $2mm$.

➤ Pour $R_2=0.5mm$, $1mm$ et $2mm$

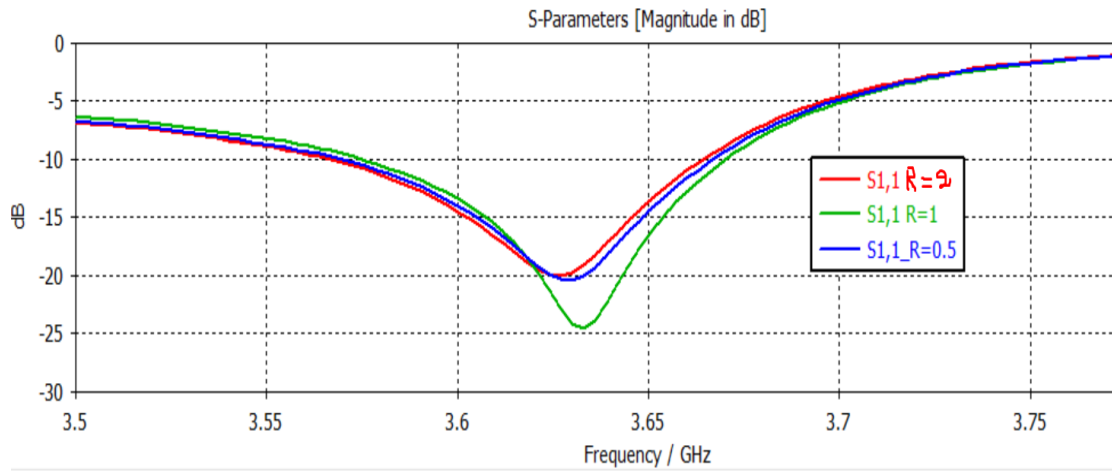
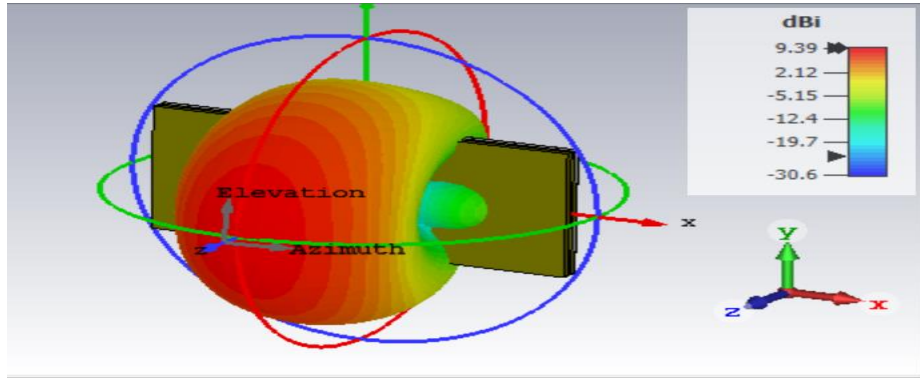


Figure III.26: Coefficient de réflexion S_{11} pour $R_2=0.5mm$, $1 mm$ et $2mm$



(a)

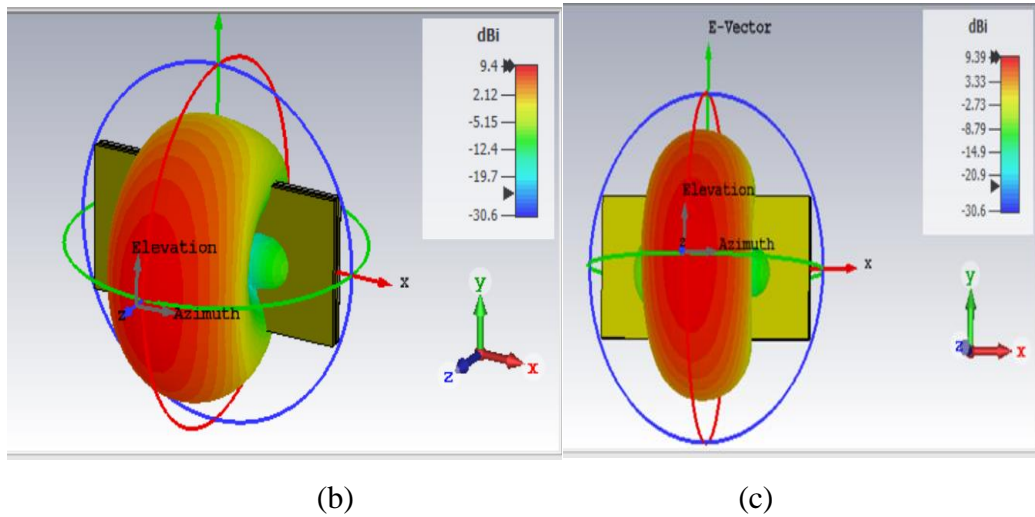
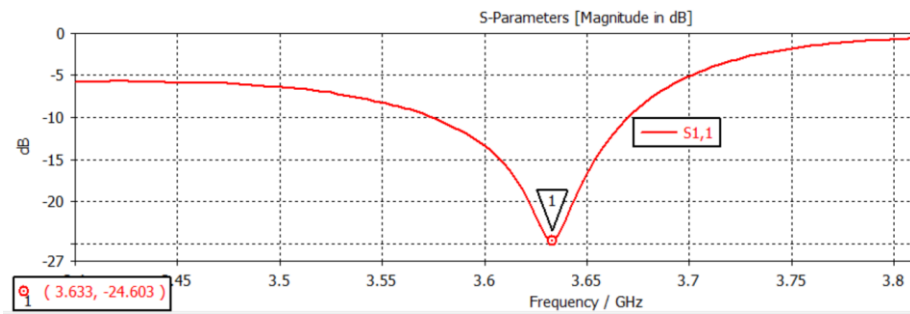
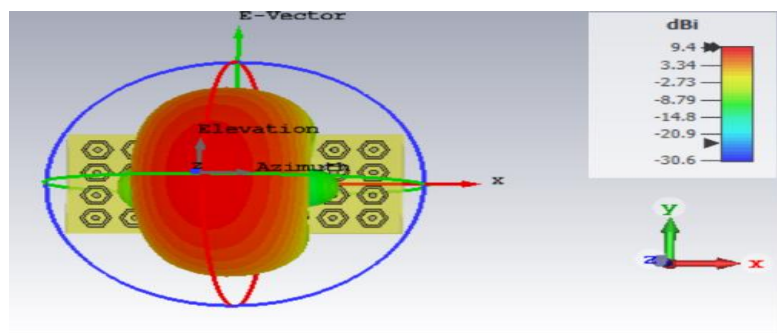


Figure III.27: Directivité et gain pour (a) $R_2=0.5\text{mm}$ (b) $R_2=1\text{mm}$ et (c) $R_2=2\text{mm}$

On remarque que les meilleurs résultats sont pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=1\text{mm}$ et $k=1\text{ mm}$ le Gap= 2mm, on a obtenu les caractéristiques suivantes : Coefficient de réflexion, S11 la directivité et gain et la bande passante (Figure III.28)



(a)



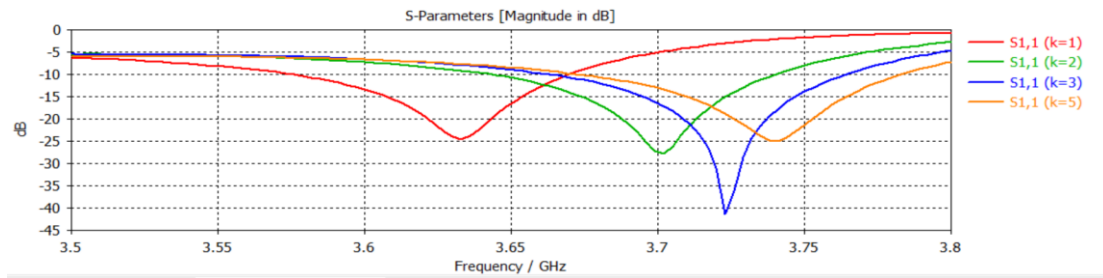
(b)

Figure III.28: (a) Coefficient de réflexion et (b) la Directivité et le gain pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=1\text{mm}$ et $k=1\text{ mm}$ le Gap= 2mm

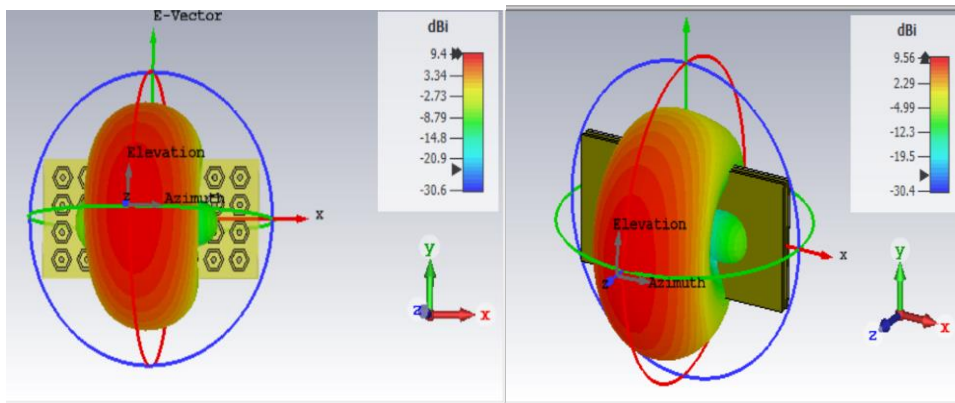
III.6.3. Influence de la distance k entre l'antenne et le réflecteur FSS

On prend les valeurs $R_1=4\text{mm}$, et $R_2=1\text{mm}$ qui on données de bonnes résultats o, maintenant on change la distance k entre le patch et la couche FSS.

➤ Pour $k=1\text{mm}$, 2mm , 3mm et 5mm

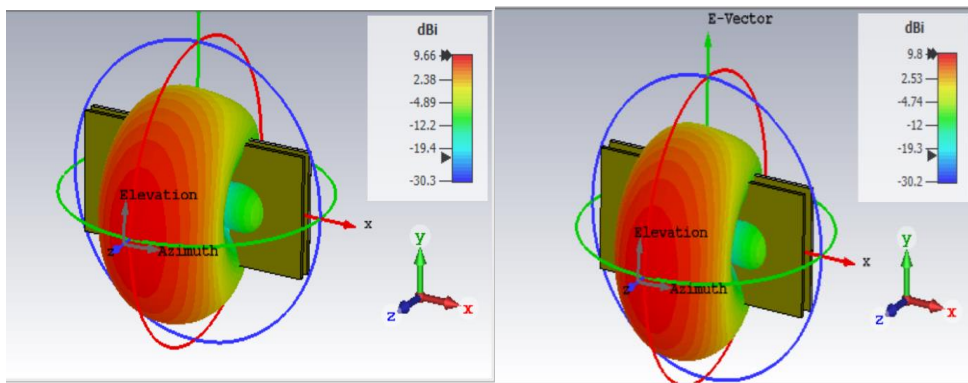


(a)



(b)

(c)



(d)

(e)

Figure III.29: (a) Coefficient de réflexion pour $k=1\text{mm}$, 2mm , 3mm et 5mm et directivité et gain pour (b) $k=1\text{mm}$, (c) $k=2$, (d) $k=3\text{mm}$, (e) $k=5\text{mm}$

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11(dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain (dBi)
K=1	9.4	-24.603	3.633	0.0954	9.4
K=2	9.56	-27.88	3.702	0.0980	9.56
K=3	9.66	-41.369	3.723	0.1026	9.66
K=5	9.8	-24.985	3.741	0.1123	9.8

Tableau III.5 : Les résultats pour différentes valeurs de **k**

A partir des résultats indiqués dans le tableau III.5 des caractéristiques du réseau : la fréquence de résonance, la bande passante, la directivité et le gain, on remarque que :

- Toutes les caractéristiques augmentent en fonction de l'accroissement de la distance **k** ;
- La plus grande valeur de la bande passante est pour les deux valeurs : $k=5$ et $k=3$;
- Meilleure directivité et gain pour la distance $k=5$;
- Meilleure coefficient de réflexion S11 pour la distance $k=3$.

Donc on prend $k=5$ qui donne de meilleurs résultats : bande passante, directivité et le gain (figure III. 30).

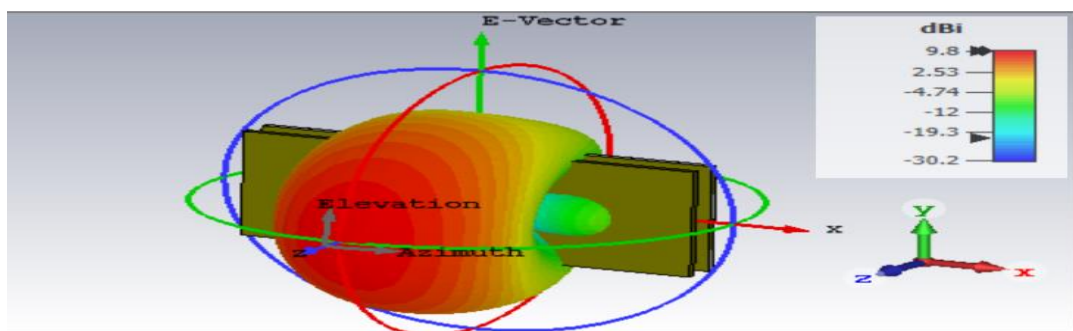
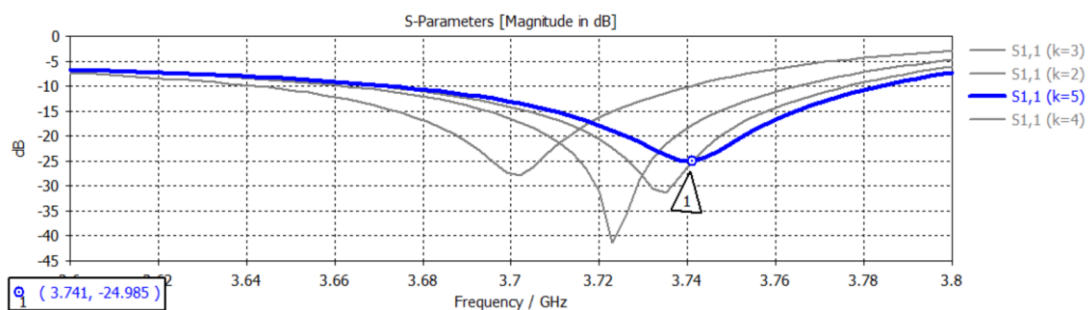


Figure III.30: Coefficient de réflexion, la directivité et le gain pour $R_1 = 4\text{mm}$ $R_2 = 1\text{mm}$ et $k=5\text{mm}$

III.7. : Comparaison des caractéristiques d'un réseau d'antenne (alimentation parallèle) avec et sans le réflecteur FSS

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain (dBi)
Sans FSS	9.24	-37.719	3.78	0.0797	9.42
Avec FSS	9.8	-24.985	3.741	0.1123	9.8

Tableau III.6: Les résultats pour les antennes réseaux à alimentation parallèle avec et sans le réflecteur FSS

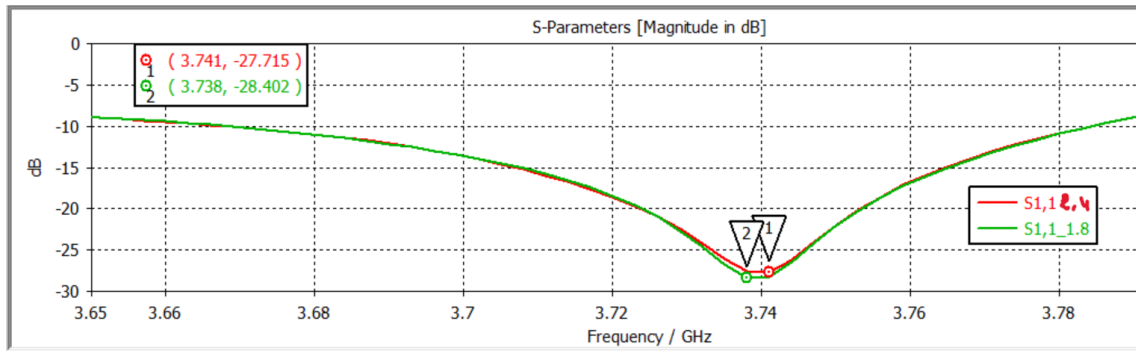
D'après les résultats du tableau III 6, et le tableau 4 dans le cas du réseau à FSS à alimentation parallèle on remarque : Une augmentation de la directivité, le gain, et un élargissement de la bande passante pour le réseau d'antennes alimenté en parallèle avec FSS comparé à celui sans réflecteur FSS.

III.8. Influence des défauts du réflecteur FSS

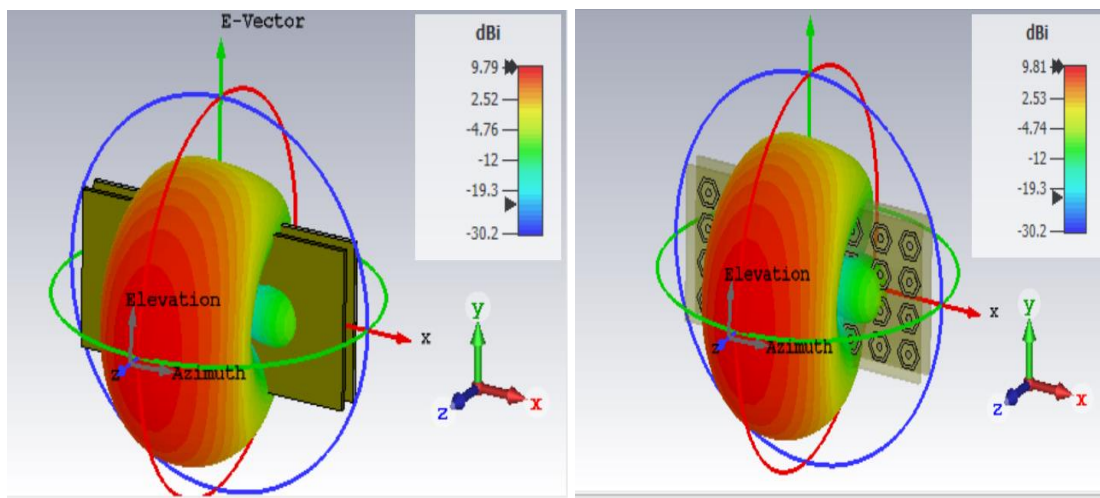
Il existe plusieurs défauts, donc on a choisi deux. Le premier défaut est de modifier le Gap, c'est-à-dire le gap en largeur est différent de celui de la longueur. Le deuxième défaut est de supprimer deux motifs à des emplacement différents.

III.8.1. Le défaut du Gap (changer la distance entre motifs en largeur et en longueur)

- ❖ Nous avons donc choisi deux valeurs : 2.4mm et 1.8mm pour la distance entre motifs en longueur du réflecteur FSS, tandis que la distance entre motifs en largeur du FSS garde la valeur 2mm et pour $R_1=4\text{mm}$ $R_2=1\text{mm}$ et $k=5\text{mm}$



(a)



(b) 1.8 gap à la longueur

(c) 2.4 gap à la longueur

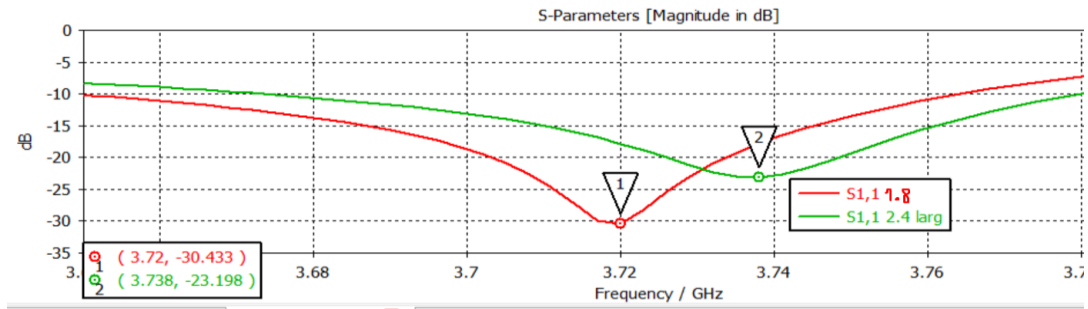
Figure III. 31 : (a) Le coefficient de réflexion et directivité et gain pour les deux valeurs du gap à la longueur (b) 1.8mm et (c) 2.4mm

La distance (gap) entre motifs en longueur (mm)	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain (dBi)
1.8	9.8	-28.402	3.738	0.1155	9.8
2.4	9.81	-27.715	3.741	0.116	9.81

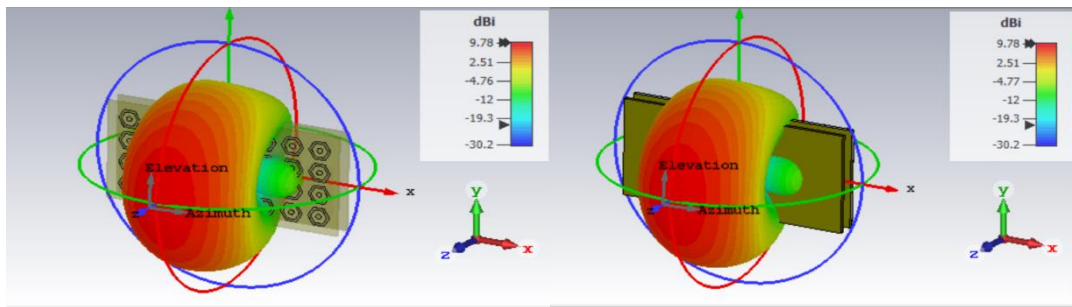
Tableau III.7: Les résultats pour les deux valeurs 2.4mm et 1.8mm du Gap en longueur et 2mm pour le gap en largeur

Le meilleur résultat du coefficient de réflexion S11 à $R_1=4\text{mm}$, $R_2=1\text{mm}$, $k=5\text{mm}$ et la longueur $\text{Gap}=2.4\text{mm}$, le Gap à la largeur est fixé à 2mm . Alors que nous observons une stabilité de bande passante et augmentation du gain et de la directivité. les valeur de l'adaptation sont presque égales (Tableau III.7 et Figure III.31)

❖ Après on va fixer la distance entre motifs en longueur à 2mm et on change la distance entre motifs en largeur qui va prendre deux valeurs : 2.4mm et 1.8mm .



(a)



(b)

(c)

Figure III.32: (a) Le coefficient de réflexion et directivité et gain pour les deux valeurs (b) 1.8mm et (c) 2.4mm au largueur

La distance entre motifs en largueur (mm)	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain (dBi)
1.8	9.78	-30.433	3.72	0.1158	9.78
2.4	9.78	-23.198	3.738	0.1058	9.78

Tableau III.8: Les résultats pour les deux valeurs 2.4mm et 1.8mm du Gap en largeur et 2mm pour le gap en longueur

Le meilleur résultat du coefficient de réflexion S11 et la bande passante, pour $R_1=4\text{mm}$, $R_2=1\text{mm}$, $k=5\text{mm}$ est à la distance entre motifs en largeur 1.8mm et la distance entre motifs en largeur à la longueur est fixé à 2mm . Nous observons les même directivités et gains pour les 2 valeur (tableau III.8 et figure III.32).

III.8.2. Le deuxième défaut : supprimer deux motifs

Nous avons gardé les valeurs qui donnent de bons résultats obtenus de $R_1=4\text{mm}$, $R_2=1\text{mm}$, $k=5$ et le Gap= 2mm et mené de nombreuses expériences. Nous avons supprimé deux motifs et (figure III.33) obtenu les résultats suivants :

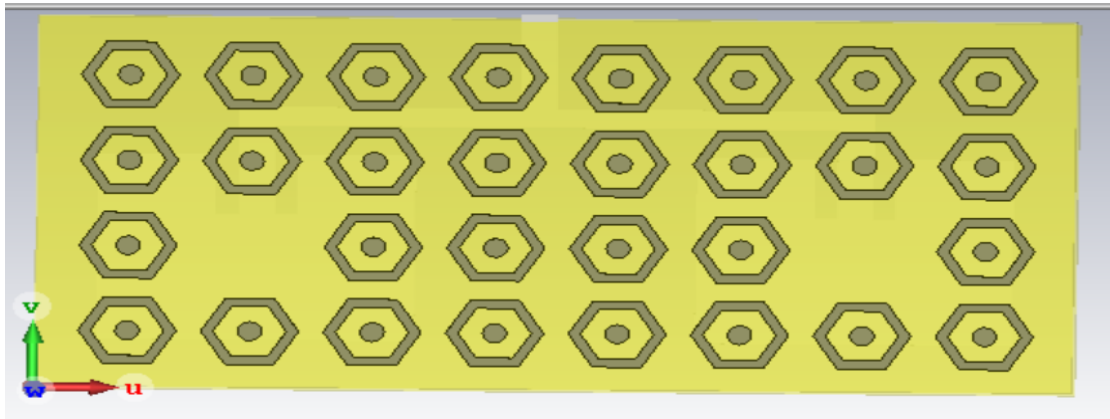
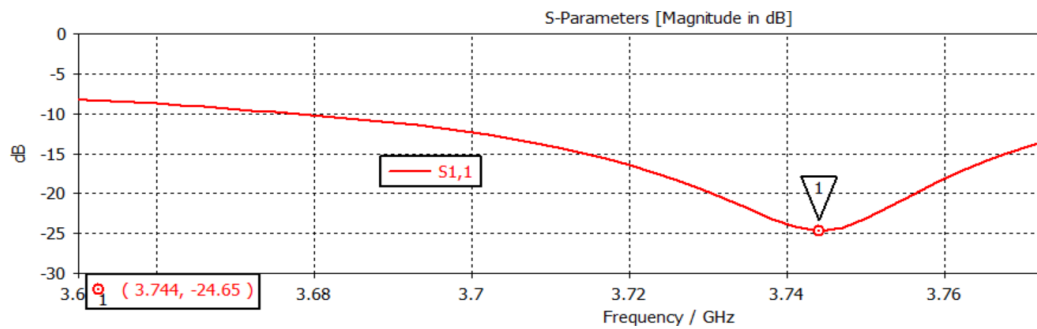
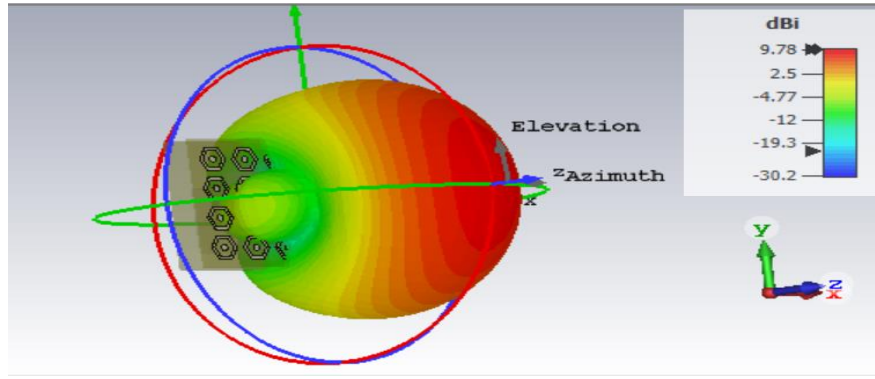


Figure III.33 : Réflecteur FSS à défauts (sans deux motifs)



(a)



(b)

Figure III.34 : (a) Le coefficient de réflexion (b) Directivité et le Gain de réflecteur FSS sans deux motifs

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)	Le Gain (dBi)
FSS avec défaut 1 (2.4 mm à la longueur)	9.81	-27.715	3.741	0.116	9.81
FSS avec défauts 2	9.78	-25.65	3.744	0.110	9.78

Tableau III.9: Les résultats de la comparaisant de caractéristique de la structure réflecteur FSS entre les 2 défauts différents

D'après les résultats de la comparaisant du tableau III.9, nous remarquons le meilleur résultat de directivité et de Gain avec une bande passante élargie et une bonne adaptation pour une couche FSS avec défauts du Gap (2.4mm à la longueur)

III.9. Conclusion

Après avoir mené un ensemble d'expériences et appliqué de nouvelles idées, à la fin de ce travail, on a présenté les différentes simulations de CST que nous avons effectuées sur le réseau l'antennes patches rectangulaires dans la gamme fréquentielle 5G avec et sans la couche

FSS, ainsi que l'ajout de défauts afin d'améliorer les caractéristiques d'un réseau, à partir des résultats nous avons conclu :

- ✓ Afin d'obtenir la fréquence de résonance et la bande passante dans la gamme 5G, nous avons modifié la longueur et la largeur de l'antenne patch.
- ✓ Afin d'avoir une bonne adaptation, nous avons changé la longueur de l'encoche du patch (inversement proportionnelle).
- ✓ La fréquence de résonance pour un réseau de 2 éléments à alimentation parallèle a augmenté par rapport à un seul élément.
- ✓ La bande passante pour un réseau à alimentation parallèle est plus large.
- ✓ Le gain pour un réseau à alimentation parallèle est meilleur par rapport à un seul élément ou un réseau à alimentation série.
- ✓ La présence de la couche FSS améliore le coefficient de réflexion et le gain.
- ✓ Nous avons effectué une série de modifications jusqu'à obtenir les dimensions du motif qui nous ont permis d'obtenir de bons résultats.
- ✓ Les effets de la distance k entre l'antenne et le réflecteur FSS sur les caractéristiques (la fréquence de résonance, élargissement la bande passante, la directivité et le gain ont augmenté). Le meilleur résultat est pour $k=5\text{mm}$.
- ✓ Après avoir créé des défauts dans la couche FSS, il y a un changement de la directivité, du gain, la bande passante pour le meilleur
- ✓ La couche FSS avec défauts nous donne une très bonne directivité et gain.
- ✓ Après avoir comparé les structures à défauts, nous constatons que le défaut de changement de la distance entre motifs en largeur et longueur, nous donne des résultats meilleurs mais lorsque nous supprimons quelques motifs, nous obtenons des résultats acceptables.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude a été dédiée à la conception, l'optimisation et la caractérisation d'un réseau d'antennes microstrip à deux éléments rectangulaires, fonctionnant dans la bande de fréquences 5G, entre 3,4 GHz et 3,8 GHz. En intégrant une surface sélective en fréquence (FSS) comme superstrat, l'étude visait à améliorer les performances des antennes microstrip, en explorant différentes configurations d'alimentation en série et en parallèle.

▪ Conception et Optimisation des Antennes

Les antennes microstrip rectangulaires ont été conçues en tenant compte des spécificités de la bande de fréquences ciblée. La méthodologie de conception a permis de définir les dimensions optimales des patches et de sélectionner les matériaux adéquats pour le substrat.

Deux configurations d'alimentation, en série et en parallèle, ont été explorées. Les avantages et inconvénients de chaque configuration ont été analysés en termes de bande passante, gain et directivité. Les meilleurs résultats ont été obtenus sur l'alimentation parallèle.

▪ Intégration de la couche FSS

L'ajout d'une FSS comme superstrat a permis d'améliorer significativement les caractéristiques de l'antenne. La FSS a été conçue avec une périodicité et des formes d'éléments optimisées pour filtrer et sélectionner les fréquences d'intérêt.

Les simulations ont montré que la FSS améliore la bande passante et le gain de l'antenne, tout en affectant positivement la directivité.

▪ Impact des paramètres géométriques

Divers paramètres géométriques, tels que la longueur et la largeur des patches, ainsi que l'espacement entre les éléments du réseau, ont été optimisés pour obtenir les meilleures performances. Et ici nous mentionnons tous les résultats que nous avons obtenus :

- ❖ Le changement des dimensions du patch affecte la bande passante, et les encoche affecte l'adaptation.
- ❖ Après de nombreuses expériences, nous avons conclu que la meilleure distance entre la couche FSS et le patch est $K=5\text{mm}$.

- ❖ Après le choix du motif 8×3 nous avons vu que la meilleure distance entre les motifs et 2mm selon l'axe (u et v) et les rayons des motifs $R_1 = 4mm$ et $R_2 = 1mm$

- **Étude des Défauts de la FSS**

L'impact des défauts dans la couche FSS a été analysé, montrant que des imperfections peuvent améliorer les performances globales de l'antenne. Cette analyse est cruciale pour la fabrication et l'implémentation pratiques des FSS.

- **Simulation et validation**

L'outil de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO a été utilisé pour modéliser et optimiser les structures d'antennes et de FSS. Les simulations ont permis de prédire avec précision les performances des antennes et d'identifier les configurations optimales.

- **Impact et applications**

Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation d'une FSS comme superstrat pour des antennes microstrip dans la bande 5G peut considérablement améliorer leurs performances, rendant ces antennes très adaptées aux applications de communication sans fil avancées. Les configurations optimisées offrent des solutions prometteuses pour les systèmes de télécommunications, les réseaux de capteurs et les applications IoT (Internet des objets).

En conclusion, ce mémoire a apporté des contributions significatives à la conception, à l'optimisation et à la caractérisation des réseaux d'antennes microstrip à FSS, ouvrant la voie à des améliorations technologiques substantielles et à des performances accrues dans les systèmes de communication modernes.

Références

- [1] **I. J. Bahl, P. E. Bhartia** « Microstrip Antennas » Dedham, MA : Artech House. 1980.
- [2] mémoire Master Recherche Génie Electrique _ Université de Mohamed Khider-Biskra Faculté Technologie " Étude et caractérisation d'antennes imprimée pour les systèmes ULTRA_LARGE_BANDE.
- [3] **H.H.Laribi, N.Kamni**, "Conception d'antennes implantables larges bandes pour les applications médicales", mémoire Master, université de Tlemcen, 2019.
- [4] **HERIZI Radhia HADJ MAKHLOUFI Ilhem**, 'Etude d'une antenne micro ruban BIE-FSS', Mémoire Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2020/2021.
- [5] **Moustapha SALAH TOUBEH**, « Etude d'antennes BIE planaires de hauteur très inférieure à la longueur d'onde dite : The ULP EBG Antennas », DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES, UNIVERSITE DE LIMOGES, 21/12/2011.
- [6] **C. Aissaoui**, Contribution à l'analyse des antennes microbandes avec excitation par la méthode du domaine spectral - Application à un réseau d'antennes microbandes, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2017 .
- [7] Rapport-Enjeux de la 5G « Autorité de régulation des communications électronique et des postes », République Française, Mars 2017.
- [8] **A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei** . «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004.
- [9] **Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. Walker Townes**. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Netcom, 32-1/2 | 2018, 139-162.
- [10] **Olivier Ezratty**. « Opinions Libres » <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018.
- [11] **BELAKHDAR Faiza**. « Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de la téléphonie mobile 5G », mémoire master UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID DE TLEMEN, le 15 Juillet 2021.
- [12] **R. Cetkovic**, « Les avantages de la 5G simplement », Article rédigé dans <https://www.journaldunet.com/ebusiness/telecoms-fai/1420427-les-avantages-de-la-5g-simplement/#>, 20/12/2018
- [13] Réseaux 5G « Les avantages et les inconvénients », Article rédigé dans <https://www.prixtel.com/decouvrir-prixtel/actualite/news/reseau-5g-les-avantages-etlesinconvenients/>, 24 juin 2019.
- [14] **Euloge Budet Tchikaya**, "Modélisation électromagnétique des surfaces sélectives en fréquence finies uniformes et non-uniformes par la technique de changement d'échelle (SCT)", Micro et nanotech-nologies/Microélectronique, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2010. Français.fftel-00546376ff.
- [15] **Ouazib nadia**, "Métamatériaux, applications aux filtres", Mémoire Master Académique, Université Abderrahmane MIRA- Béjaïa, 2012-2013.
- [16] **Wu, T. K.**: "Frequency Selective Surface and Grid Array", John Wiley and Sons, 1995.
- [17] **Singh, D., Kumar, A., Meena, S., Agarwala V.**: "Analysis of frequency selective surfaces for radar absorbing materials", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 38, pp.297-314, 2012.
- [18] **Vardaxoglou, J. C.**: "Frequency-selective surfaces: Analysis and design", Research Studies Press, Ltd., Taunton, UK, 1997.

- [19] **Munk, B. A.**: "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", Wiley Inter science, 2000.
- [20] **Mohamed Lamine, A.** : « Etude et conception d'antennes directives large bande à base de méta-surfaces », Thèse de Doctorat présentée à l'université du Québec, Avril 2017.
- [21] **Arafi Islam**, « Etude et conception d'antenne à fente avec réflecteur FSS pour les bandes GPS », Mémoire de master présentée à Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [22] **Saidi Raouia**, "Contribution à l'étude des filtres planaires microondes à réseaux périodiques et/ou presque périodiques de patches perturbés par la méthode WCIP pour des applications à bandes larges et à double polarisations, " Thèse de Doctorat Univ. Batna 2 Mostefa Ben Boulaïd, 2019.
- [23] **DJOUMAA Awatef**, " Contribution à l'étude des structures planaires à plusieurs niveaux de métallisation et à substrats multicouches homogènes et inhomogènes par une formulation en ondes transverses, " Thèse de Doctorat Univ. Batna 2 Mostefa Ben Boulaïd, 2017.
- [24] **Dana C. Kohlgraf**, *Design and Testing of a Frequency Selective Surface (FSS) Based Wide-Band Multiple Antenna System*, Department of Electrical and Computer Engineering. The Ohio State University 2005.
- [25] **Jay Houston Barton**, B.S.E.E, *Frequency Selective Surfaces for extreme applications*, Thèse de doctorat, Department of Electrical and Computer Engineering, The university of Texas, Mai 2014.
- [26] **Romeu J., Rahmat-Samii Y**, "Dual band FSS with fractal elements", *Electronics Letters*, vol. 35, no. 9, pp. 702-703, April 1999.
- [27] **Taylor, P. S**, "An active annular ring frequency selective surface", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp.3265–3271, Sep. 2011.
- [28] **El Hani. Rachid**. "Contributions Au Contrôle Du Faisceau D'antenne Réflecteur En Utilisant Les Surfaces sélectives En Fréquences Et Les Réseaux Réflecteurs," Thèse De Doctorat, Département De Génie électrique, Université De Montreal, Mars 2014.
- [29] **Alfrêdo Gomes Neto et al**, 'Analysis of Frequency Selective Surface with U-Shaped Geometry', *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 14, SI-1, pp 113-122, July 2015.
- [30] **A. Edalati e T. A. Denidni**, Frequency selective surfaces for beam-switching applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 195–200, Jan. 2013.
- [31] **R. Mittra, C. H. Chan e T. Cwik**, Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces – A Review, *Proceedings of the IEEE*, vol.76, no. 12, pp. 1593–1615, Dec. 1988.
- [32] **BOUAKA Asma**, 'Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio'', Mémoire MASTER Academique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 25/06/2018.
- [33] **BELMESSAOUD Djaouida**, « Etude de nouvelles antennes planaires en tenant compte des surfaces sélectives en fréquence », DOCTORAT EN SCIENCES, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 14/06/2020.
- [34] **Douiou Zoulikha, Roukaila Hadjira** ,''Conception d'une antennes microruban à Surfaces Sélectives en Fréquence FSS'', Mémoire Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2020 /2021