

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

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



Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : MANSOUR MOHAMMED EL AMINE

SAYAD OUSSAMA

Intitulé :

**Conception d'un réseau d'antennes microrubans à Surfaces Sélectives en
Fréquences (FSS)**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. DJELLID Asma	MCB Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR FADILA	MCA Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Dr. ZERDOUMI Zahra	MCB Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا

عَلَّمْتَنَا ۗ إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ "

(صدق الله العظيم)

الآية 32 من سورة البقرة

Remerciements

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

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

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

Grand Merci



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

*À ceux qui sont les plus chères au monde, nos
parents, à qui nous n'arriverons jamais à exprimer
notre gratitude et notre reconnaissance. Pour leur
amour et leur soutien tout au long de nos études.*

À nos frères et sœurs

À nos Familles

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

À Tous nos proches, nos amis et nos collègues.

Nous dédions ce travail

AMINE ET OUSSAMA

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Listes des figures :	vi
Liste des Tableaux	x
Liste des Abréviations	xii
Résumé	xiv
Abstract	xiv
ملخص	xv
Introduction générale	2
CHAPITRE I Les matériaux à bande interdite électromagnétiques (BIE) et leurs applications dans hyperfréquence	4
I.1 Introduction	5
I.2 Présentation des structures a bandes interdites électromagnétiques	6
I.3 Les matériaux BIE	6
I.3.1 Bref historique	6
I.3.2 Définitions et propriétés	7
I.3.3 Réseaux unidimensionnels	9
I.4 Description des structures BIE métalliques	12
I.5 Comportements électromagnétiques	13
I.5.1 Structures diélectriques :	14
I.6 Les Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS)	15
I.7 Structure et caractéristiques principales de la FSS	16
I.8 Les structures métalliques à base de FSS	17
Definition d'antenne BIE	18
I.10 Conclusion	18
Bibliographie	19
CHAPITRE II <i>les réseaux d'antennes microruban et la 5 génération des standards</i>	21
II.1 Introduction	21

II.2 Définition de réseau d'antenne	21
II .3 Réseau d'antennes imprimées	22
II .4 Types de réseaux d'antennes	23
II .5 Définition d'une antenne patch	23
II .6 Caractéristique de base d'une antenne micro ruban à FSS	24
II .7 Les caractéristiques des antennes	25
II .7.1 Le coefficient de réflexion S11	25
II .7.2 La bande passante	25
II .7.3 Le facteur de qualité	26
II .8 Caractéristique de rayonnement des antennes	26
II .8.1 Diagramme de rayonnement	27
II .8.2 Ouverture de l'antenne	27
II .8.3 Polarisation	27
II .8.4 Gain	28
II .8.5 Rendement de l'antenne	29
II .8.6 Impédance d'entrée de l'antenne	29
II .8.7 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)	29
II .9 Techniques d'alimentation	30
II .9.1 Alimentation par ligne micro ruban	30
II .9.2 Alimentation par sonde coaxiale	30
II .9.3 Alimentation par couplage par fente	31
II.10 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch	32
II .10.1 Alimentation parallèle	33
II .10.2 Alimentation série	33
II .10.2.1 Réseaux bidimensionnels	36
II .11 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	36
II .12 Applications des antennes imprimées	36
II.13 La 5eme Génération	37
II .14 Les avantages de la 5G	37
II .15 L'application des réseaux d'antenne dans la 5 G	38
II .15.1 Les antennes massives MIMO	38

II .15.2 Multiplexage NOMA.....	39
II .16 Conclusion	39
Bibliographie.....	42
Chapitre III simulation et résultat.....	43
III.1 Introduction	42
III.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO.....	42
III.3 Présentation de la structure d'un seul élément.....	43
III.4 Structure d'antenne réseau à deux patches circulaire	45
III.5 Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments en parallèle avec un seul élément.....	46
III.6 Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle.....	48
III.7 Effet de la variation le rayon du patch	53
III.8 Comment Simuler Une Couche FSS.....	55
III.9 Effet de la variation dans la distance F	57
III.10 Effet de la variation de l'épaisseur du superstrat	59
III.11 Effet de la variation des permittivités du superstrat.....	60
III.12 Etude la structure avec un défaut	62
III-13 Conclusion	72
Bibliographie.....	75
Conclusion générale	

Listes des figures :

CHAPITRE I

FIGURE I -1 PRINCIPE DU MIROIR DE BRAGG [1]	8
FIGURE I-2 -1 DIMENSION	9
FIGURE I-3 - 2 DIMENSION	9
FIGURE I-4 - 3 DIMENSION	9
FIGURE I -5 - STRUCTURE 1D ET SON DIAGRAMME DE DISPERSION.....	10
FIGURE I -6 EXEMPLES DE DIFFERENTS RESEAUX 2D. [2]	11
FIGURE I-7 BANDES INTERDITES EN FONCTION DU RESEAU ET DU TYPE DE POLARISATION	11
FIGURE I-8 DIFFERENTES STRUCTURES 3D COMME LA STRUCTURE CUBIQUE (1), LE TAS DE BOIS[2].....	12
FIGURE I- 9 EXEMPLES DE SURFACES SELECTIVES EN FREQUENCE (SSF). [2]...	14
FIGURE I- 10 COEFFICIENT DE TRANSMISSION ET DE REFLEXION D'UNE STRUCTURE 1D. [3].....	15
FIGURE I- 11 PROPAGATION A TRAVERS UNE STRUCTURE BIE 1D DANS LA BANDE INTERDITE [3].....	15
FIGURE I-12 PROPAGATION A TRAVERS UNE STRUCTURE BIE 1D HORS BANDE INTERDITE [3]	16
FIGURE I -13 STRUCTURE PLANE PERIODIQUE BIDIMENSIONNELLE.....	17
FIGURE I -14 MOTIFS ELEMENTAIRES POUVANT CONSTITUER UNE FSS. [4]	18
FIGURE I -15 ANTENNE BIE.	19

CHAPITRE II

FIGURE II.1 DIFFERENTS TYPES DE RESEAUX : (A) LINEAIRE (B) BIDIMENSIONNELS	22
FIGURE II-2 STRUCTURE D'UNE ANTENNE IMPRIMEE.....	24
FIGURE II-3 LES DIFFERENTES FORMES DU PATCH [16]	25

FIGURE II-4 COEFFICIENT DE REFLEXION D'UNE ANTENNE ET SA BANDE DE FONCTIONNEMENT	26
FIGURE II-5 REPRESENTATION DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT D'UNE ANTENNE	27
FIGURE II-6 TYPES DE POLARISATION.	28
FIGURE II-7 IMPEDANCE D'ENTREE DE L'ANTENNE	29
FIGURE II(1)	31
FIGURE II(2)	31
FIGURE II(3)	32
FIGURE II-8 ALIMENTATION PARALLELE D'UN RESEAU LINEAIRE	33
FIGURE II-9 ALIMENTATION SERIE D'UN RESEAU LINEAIRE.....	34
FIGURE II-10 ALIMENTATION PARALLELE D'UN RESEAU PLAN.....	35
FIGURE II -11 ALIMENTATION SERIE D'UN RESEAU PLAN	35
FIGURE II-12 ILLUSTRATIONS A GAUCHE D'UNE ANTENNE 64T64R CONSTITUEE DE 192 ELEMENTS RAYONNANTS REGROUPES PAR 4 GROUPS	38

CHAPITRE III

FIGURE III-1 INTERFACE GRAPHIQUE DE CST MICROWAVE STUDIO.	42
FIGURE III-2 LA STRUCTURE D'ANTENNE 1 PATCH.....	44
FIGURE III.3 DIMENSIONS DE L'ANTENNE PATCH CIRCULAIRE	44
FIGURE III.4- LA STRUCTURE D'ANTENNE RESEAU A DEUX PATCHES CIRCULAIRE EN PARALLELE	46
FIGURE III-5 COEFFICIENT DE REFLEXION S_{11} POUR : UN RESEAU CIRCULAIRE EN PARALLELE (2ELEMENTS), UNE ANTENNE CIRCULAIRE (UN SEUL ELEMENT) ..	46
FIGURE III -6 DIRECTIVITE EN 3D D'UNE ANTENNE 1 PATCH CIRCULAIRE	47
FIGURE III-7 DIRECTIVITE EN 3D POUR UN RESEAU D'ANTENNE PATCH 2 ELEMENTS EN PARALLELE CIRCULAIRE	47
FIGURE III-8 LE GAIN EN 3D D'UNE ANTENNE 1 PATCH CIRCULAIRE	47
FIGURE III-9 LE GAIN EN 3D POUR UN RESEAU D'ANTENNE PATCH 2 ELEMENTS CIRCULAIRE	48

FIGURE III.10 ANTENNE RESEAU DE 2 PATCHES CIRCULAIRE ALIMENTES : A) EN SERIE ET B) EN PARALLELE	49
FIGURE III-10 DIRECTIVITE EN 3D POUR UN RESEAU D'ANTENNE PATCH 2 ELEMENTS CIRCULAIRE PAR UNE ALIMENTATION EN SERIE	50
FIGURE III-11 LE GAIN EN 3D POUR UN RESEAU D'ANTENNE PATCH 2 ELEMENTS CIRCULAIRE PAR UNE ALIMENTATION EN SERIE.....	50
FIGURE III-12 COEFFICIENT DE REFLEXION S11 POUR : UN RESEAU ALIMENTE EN SERIE, UN RESEAU ALIMENTE EN PARALLELE	50
FIGURE III-13 COEFFICIENT DE REFLEXION S11 POUR : UN RESEAU ALIMENTE EN SERIE, UN RESEAU ALIMENTE EN PARALLELE ET UNE ANTENNE D'UN SEUL ELEMENT.	51
FIGURE III-14 LES DIFFERENTES STRUCTURE POUR LA DIRECTIVITE EN 3D UN SEUL ELEMENT 2 ELEMENT EN SERIE 2 ELEMENT EN PARALLELE.....	51
FIGURE III-15 LES DIFFERENTES STRUCTURE EN 3D, POUR LE GAIN	52
FIGURE III-16 COEFFICIENTS DE REFLEXION(S1.1) POUR DIFFERENTES R DU PATCH.....	54
FIGURE III-17 DIRECTIVITE, GAIN POUR R=2.5 MM	54
FIGURE III-18 DIRECTIVITE ET GAIN POUR R=3MM	54
FIGURE III-19 ANTENNE PATCH A FSS.....	56
FIGURE III-20 LES MOTIFS DE LA COUCHE FSS.....	56
FIGURE III-21 COEFFICIENTS DE REFLEXION(S11) POUR DIFFERENTS VALEURS DE LA DISTANCE F	57
FIGURE III-22 DIRECTIVITE ET GAIN POUR F=10 MM.....	58
FIGURE III-23 DIRECTIVITE ET GAIN POUR F=20 MM.....	58
FIGURE III-24 DIRECTIVITE ET GAIN POUR F =30 MM	58
FIGURE III-25 COEFFICIENTS DE REFLEXION S11 POUR DIFFERENTES L'EPAISSEUR DU SUPERSTRAT H.....	59
FIGURE III-26 DIRECTIVITE ET LE GAIN EN 3D POUR H1	60
FIGURE III-27 DIRECTIVITE ET LE GAIN EN 3D POUR H2	60

FIGURE III-28 COEFFICIENTS DE REFLEXION (S11) POUR LA PERMITTIVITE DU SUPERSTRAT	61
FIGURE III-29 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR QUARTZ (FUSED)(LOSSY) ER=3.75	61
FIGURE III-30 DIRECTIVITE, GAIN EN 3D POUR ARLON AD 4305(LOSSY)ER =4.3.	61
FIGURE III-31 DEFAULT N:1	62
FIGURE III-32 COEFFICIENT DE REFLEXION AVEC UN DEFAULT ET SANS DEFAULT.	63
FIGURE III-33 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR UN DEFAULT	63
FIGURE III-34 DEFAULT N:2	64
FIGURE III-35 COEFFICIENT DE REFLEXION AVEC UN DEFAULT ET SANS DEFAULT.	65
FIGURE III-36 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR UN DEFAULT	65
FIGURE III-37 DEFAULT N:3.....	66
FIGURE III-38 COEFFICIENT DE REFLEXION AVEC UN DEFAULT ET SANS DEFAULT.	67
FIGURE III-39 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR UN DEFAULT	67
FIGURE III-40 DEFAULT N:4.....	68
FIGURE III-41 COEFFICIENT DE REFLEXION AVEC UN DEFAULT ET SANS DEFAULT	68
FIGURE III-42 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR UN DEFAULT.....	69
FIGURE III-43 DEFAULT N:5	70
FIGURE III-44 COEFFICIENT DE REFLEXION AVEC UN DEFAULT ET SANS DEFAULT.	71
FIGURE III-45 LE GAIN ET LA DIRECTIVITE EN 3D POUR UN DEFAULT.....	71

Liste des Tableaux

TABLEAU III.1	DIMENSIONS DE L'ANTENNE PATCH CIRCULAIRE.....	45
TABLEAU III.2	DIMENSIONS DE DEUX PATCHES CIRCULAIRES EN PARALLELE.....	45
TABLEAU III-3	LES RESULTATS POUR LES DIFFERENTES STRUCTURES D'ANTENNES	48
TABLEAU III.4	LES PARAMETRE DE RESEAX EN SERE DEUX ELEMENT SONT CITEE AU-DESSOUS DANS UN TABLEAU	49
TABLEAU III-5	LES RESULTATS POUR LES DIFFERENTES STRUCTURES D'ANTENNES	53
TABLEAU III-6	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH EN FONCTION DE RAYON DU SUBSTRAT.....	55
TABLEAU III-7-	CARACTERISTIQUES ET DIMENSIONS DU MOTIF	57
TABLEAU III-8	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION DE LA VARIATION DU F	59
TABLEAU III-9	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DU SUPERSTRAT.	60
TABLEAU III-10	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION DE LA PERMITTIVITE DU SUPERSTRAT	61
TABLEAU III-11	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION D'UN DEFAUT	64
TABLEAU III-12	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION D'UN DEFAUT	66
TABLEAU III-13	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION D'UN DEFAUT	68
TABLEAU III-14	CARACTERISTIQUES DE RESEAX PATCH A FSS EN FONCTION D'UN DEFAUT	70

TABLEAU III-15 CARACTERISTIQUES DE RESEAUX PATCH A FSS EN FONCTION D'UN DEFAUT	72
---	----

Liste des Abréviations

CHAPITRE I

- **BIE** : Bande Interdite Électromagnétique.
- **BIP** : Bande Interdite Photonique.
- **GSM**: Global System For Mobile Communication.
- **WALAN**: Wide area Local network.
- **PBG**: Photonique Band Gap.
- **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

- **VSWR** : Voltage Standing Wave Ratio (Rapport d'onde stationnaire de tension).

-**LTE**: Long Term Evolution

-**3GPP**: Projet De Hanche Pour Les Partenaires De Troisième Génération .

-**IUT**: International Telecommunication Union.

MIMO: Multi Input Multi Output

- **IMT** : Télécommunication Mobile International.

-**NOMA** : No Orthogonal Multiplexing Acces

- **5G** : Cinquième Génération.

- **IMT** : Télécommunication Mobile International.

- **SSF** : Surfaces Sélectives en Fréquence

- **RF** : radiofréquence

CHABITRE III

- **CST** : Computer Science Technology.

- **MWV** : MICROWAVE STUDIO.

- **FIT** : Technique Intégration Finis.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier un réseau d'antennes microruban de forme circulaire à BIE 2D exactement le superstrat est à base de FSS (Frequency Surface Sélectifs).

Nous étudions l'influence des paramètres géométriques de réseaux sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés : les permittivités du superstrat, le rayon du patch, la hauteur de superstrat, la distance de la couche FSS.

Enfin nous avons créé un défaut dans la couche FSS et on a étudié son effet sur les caractéristiques du réseaux d'antenne microruban : l'adaptation de réseaux (S11), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité. En utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

mots clés: un réseau d'antennes, BIE 2D, superstrat, la directivité, la couche FSS, la bande 5G

Abstract

The main objective of this work is to study an array of circular microstrip antennas at BIE 2D exactly the superstrate is based on FSS (Frequency Surface Selectives).

We study the influence of the geometric parameters of gratings on the resonance frequency and the bandwidth and on the directivity.

The parameters that we studied: the permittivity of the superstrate, the radius of the patch, the height of the superstrate, the distance from the FSS layer.

Finally we have created a defect in the FSS layer and we have study the influence on the characteristics of microstrip antenna arrays: the array adaptation (S11), the resonant frequency, the bandwidth, the gain and directivity. By using the electromagnetic simulation tool in the frequency domain CST which is based on the finite integration method.

Keywords: circular microstrip antennas, BIE 2D, the FSS layer, the frequency domain CST

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة مجموعة هوائيات **microstrip** دائرية الشكل في **BIE** **2D** ، حيث تعتمد الركيزة تمامًا على **FSS** (انتقائية سطح التردد).

ندرس تأثير المعلمات الهندسية للشبكات على تردد الرنين وعرض النطاق وعلى الاتجاهية. المعلمات التي درسناها: سماح الركيزة ، نصف قطر الرقعة ، ارتفاع الطبقة الفوقية للرقعة ، المسافة من طبقة **FSS**.

أخيرًا ، أنشأنا عيبًا في طبقة **FSS** وحددنا بوضوح ما يفعله الخلل في خصائص صفائف هوائي **microstrip**: تكييف المصفوفة (s_{11}) ، وتردد الطنين ، وعرض النطاق الترددي ، والكسب والاتجاهية.

باستخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية في مجال التردد **CST** والتي تعتمد على طريقة التكامل المحدود.

الكلمات المفتاحية مجموعة هوائيات، (انتقائية سطح التردد **2D**) ، أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement des nouveaux systèmes de Télécommunications sans fil nécessite la conception d'antennes de plus en plus difficiles à élaborer.

Dans le cas des communications entre mobiles, la diversité des systèmes et standards (GSM, DCS, UMTS, WLAN...) amène les ingénieurs à concevoir des antennes satisfaisant de nombreuses contraintes telles que : compacité, faible coût de fabrication, large bande passante et fonctionnement multifréquence.

De ce fait, les études se sont orientées vers une miniaturisation importante, vers l'utilisation de nouveaux matériaux diélectriques et vers le développement de capacités multifonctionnelles.... Afin de répondre à ces besoins, des méthodologies de conception innovatrices d'antenne sont nécessaires.

Les nouvelles technologies pour les systèmes de télécommunication devront démontrer des potentialités très attractives en matière minimisée, des pertes de réglage et de reconfiguration des circuits, et aussi la fiabilité, faire diminuer coûts de fabrication.

Dans lesquels les caractéristiques pourront évoluer par une commande électronique. Deux atouts majeurs ont entraîné un développement très important de ce type :

Leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration.

Aujourd'hui ils sont implantés dans des nombreux dispositifs électroniques et constituent le type privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes.

Par ailleurs ce type présente des limites, notamment la bande passante étroite. Afin de compenser cette limitation et améliorer les performances des antennes micro rubans, alors, nous proposons l'utilisation d'une structure circulaire.

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 antennes BIE directives.

Dans Le deuxième chapitre nous avons présenté le réseau patch (micro ruban) à FSS, qui est constitué des antennes patch au-dessous d'un superstrat qui contient la couche FSS, cette dernière est constituée d'un ensemble de motifs.

Apparus 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. Ainsi que les différentes méthodes d'alimentation rencontrées dans la littérature, aussi leurs avantages et inconvénients, leurs caractéristiques.

Enfin nous présentons leur applications.

Dans le troisième chapitre nous montrons comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO, et nous exposons les résultats numériques obtenus, concernant l'influence des paramètres de la structure au réseau d'antennes patches de forme circulaire opérant dans la bande X [20 GHz-35 GHz], sur la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

On présente l'effet de la création d'un défaut au sein de la couche FSS et nous terminons par une conclusion générale.



CHAPITRE I

*Les matériaux BIE et leurs applications dans
les hyperfréquences*

1.1 Introduction

Les matériaux à bandes interdites électromagnétique (BIE) ont suscité un vif intérêt depuis leur invention par le Professeur Eli Yablonovitch à la fin des années quatre-vingts.

Il a démontré théoriquement et expérimentalement que ces matériaux périodiques possédaient de fréquences pour lesquelles aucun mode de propagation n'existait.

Il a d'ailleurs donné son nom à la plus célèbre des structures BIE 3D : la Yablonovite. Ce matériau possède la plus large des bandes interdites quel que soit l'angle de l'onde électromagnétique et ils se rapprochent de la structure parfaite appelée diamant.

Par analogie avec la bande d'énergie interdite caractérisant les réseaux cristallins atomiques, les structures BIE possèdent une bande de fréquence interdite où aucune onde électromagnétique ne peut se propager à travers le matériau.

Ce type de structure dont le rapport d'indice occupe une place importante est l'extension à plusieurs dimensions de structures périodiques bien connues comme les miroirs de Bragg, les diélectriques artificiels, les grilles métalliques ou encore les surfaces sélectives en fréquences.

Ces matériaux présentent pour des ondes électromagnétiques des propriétés physiques intéressantes en terme de propagation à la fois dans le domaine de l'optique mais aussi dans le domaine des micro-ondes et plus particulièrement dans celui des antennes.

Quelques structures présentent dans certaines conditions des propriétés physiques innovantes comme une permittivité ou encore une perméabilité négative qui provoque l'engouement pour ces nouveaux matériaux et relancent ainsi l'intérêt des physiciens pour l'électromagnétisme.

Nous parlons désormais de bandes interdites électromagnétiques (BIE) pour des structures dans le domaine des hautes fréquences.

L'introduction d'un défaut au sein de ces structures périodiques permet de générer un pic de transmission à l'intérieur de la bande interdite photonique.

A cette fréquence, les ondes électromagnétiques peuvent se propager à l'intérieur de structures BIE mais uniquement dans certaines directions.

Cette propriété a permis Cette propriété a permis d'aboutir à la création d'une antenne directive à faibles lobes secondaires : l'antenne BIE résonant à défauts.

1.2 Présentation des structures à bandes interdites électromagnétiques

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter dans un contexte général le domaine de mes travaux de recherche sur les matériaux à bandes interdites électromagnétique (BIE) où Photonique Band Gap (PBG) dans le but de développer des structures périodiques comprenant Plusieurs dimensions. Dans un premier temps, nous rappellerons les propriétés générales des matériaux BIP Par un bref historique et quelques définitions.

Nous aborderons ces matériaux qu'ils soient diélectriques ou métalliques dans des configurations diverses : sans défaut ou avec défauts [2].

1.3 Les matériaux BIE

1.3.1 Bref historique

Ce nouveau type de structure a été développé par E. Yablonovitch 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 Laurence Bragg en 1915. Ce dernier a Réussi par l'empilement périodique de couches transparentes à indices de réfraction différents à réfléchir 99,5% de l'énergie incidente, ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce Phénomène s'explique par de multiples réflexions à l'intérieur même de chaque interface.

Elles sont constructives pour une épaisseur particulière des différentes couches. Ces matériaux dont la constante diélectrique est structurée de manière périodique possèdent des fréquences pour lesquelles il n'existe aucun mode de propagation possible à l'intérieur du matériau, autrement appelé bande de fréquence interdite.

Ces structures Périodiques à une dimension sont déjà connues sous le nom de miroirs de Bragg.

Depuis, E.Yablonovitch a eu l'idée d'étendre leur fonctionnement à plusieurs dimensions. Pour Simplifier les réalisations, un prototype a été défini avec des bandes interdites mesurables en Micro-ondes.

Depuis cette innovation, les études qui ont pour objet ces matériaux se sont Considérablement accrues. Les domaines de fréquences où ces matériaux sont étudiés Correspondent aux fréquences électromagnétique (de 1 GHZ jusqu'à 1000GHz) et aux fréquences microondes ou hyperfréquences.

La gamme de fréquences facilite la conception et la réalisation de ces matériaux. L'analogie entre l'équation de schrödinger et l'équation de propagation issue des Équations de Maxwell dans les milieux diélectriques permet de rapprocher les propriétés des Cristaux

solides de celles des cristaux photoniques. À l'image des semi-conducteurs, dont la régularité du paysage atomique entraîne l'existence d'une bande d'énergie interdite, nous pouvons donc obtenir des bandes de fréquences interdites pour des matériaux diélectriques périodiques.

Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré selon la structure étudiée. Ces plages de fréquences ont pris le nom générique de bande interdite électromagnétique.

Le principe du miroir de Bragg est présenté sur la Figure I-1.

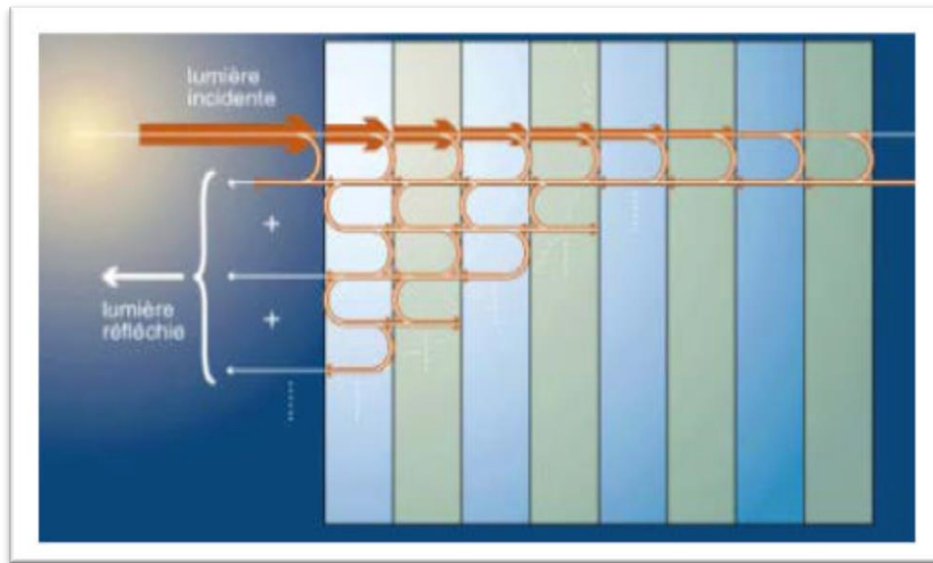


Figure I -1 Principe du miroir de Bragg [2]

Pour le domaine des hautes fréquences (HF) ou micro-ondes, nous utiliserons plutôt le terme de matériaux à bande interdite électromagnétique ou BIE qui correspond aux bandes de fréquences étudiées.

En effet, leurs propriétés fréquentielles sont transposables pour d'autres longueurs d'ondes car elles sont surtout induites par la ou les périodicités du Matériau.

1.3.2 Définitions et propriétés

À présent, intéressons-nous brièvement aux propriétés générales pour les trois grandes catégories de matériaux BIE diélectriques caractérisées par leur nombre de périodicités. Nous terminerons par une courte présentation des structures périodiques en métal.

Description des matériaux BIE diélectriques : Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés Électriques des matériaux.

Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de Leurs propriétés électromagnétiques.

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques (*Figure I-2*) Ils ont la Propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques.

Ces structures peuvent Jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial. [2]

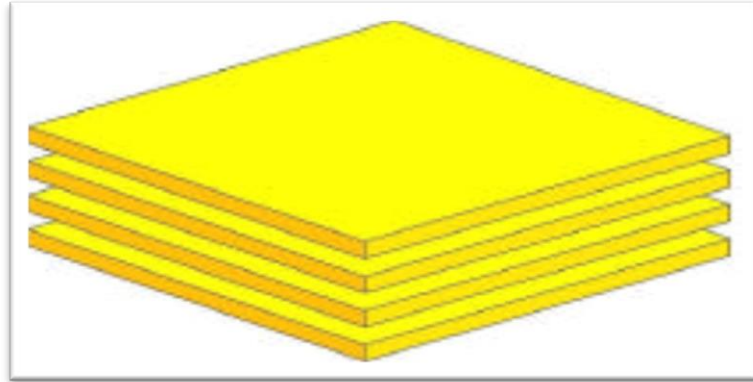


Figure I-2 -1 DIMENSION

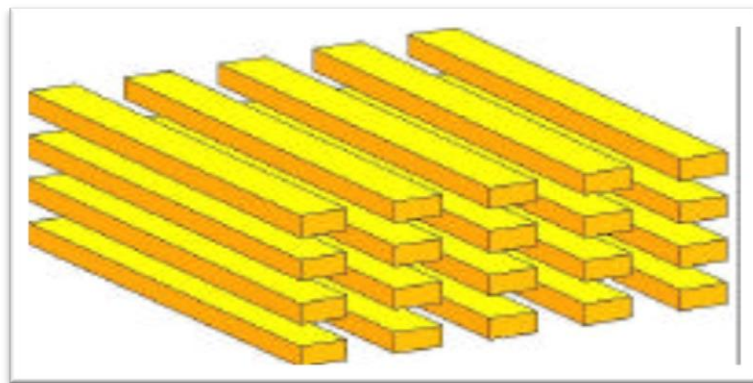


Figure I-3- 2 DIMENSION

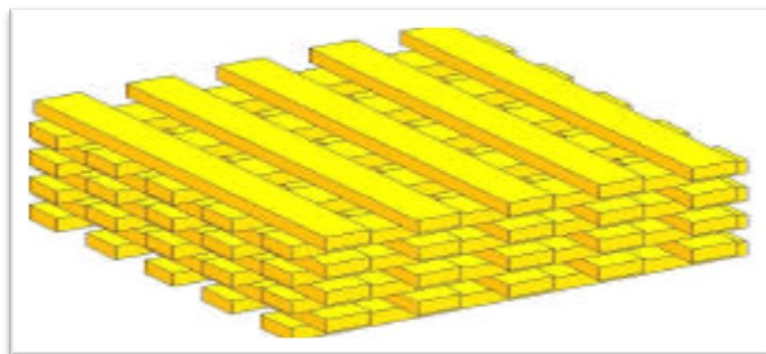


Figure I-4- 3 DIMENSION

Figure I-2-3-4 : Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D.

1.3.3 Réseaux unidimensionnels

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

Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg).

Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée (**Figure I-5**).

[2]

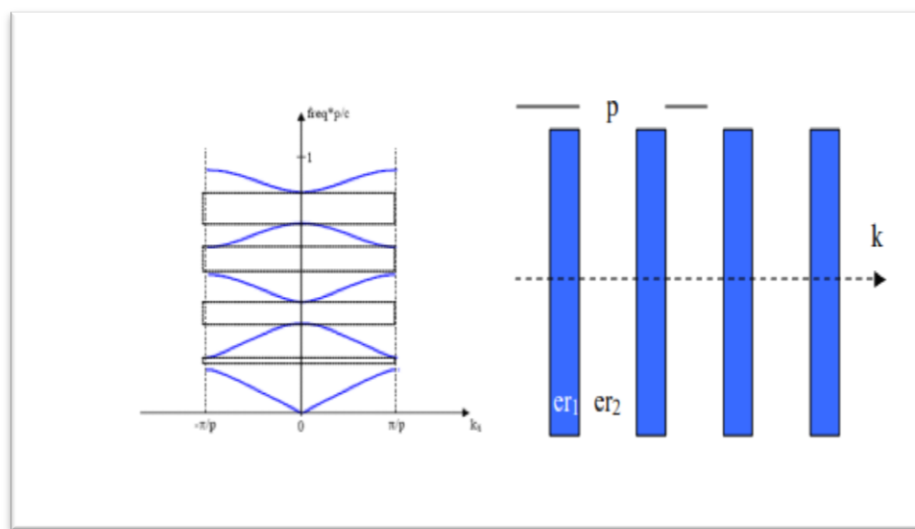


Figure I -5- Structure 1D et son diagramme de dispersion

Lors des réalisations, la conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les Bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions.

Réseaux bidimensionnels : les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième.

Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques 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-6**, plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, Le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal. [2]

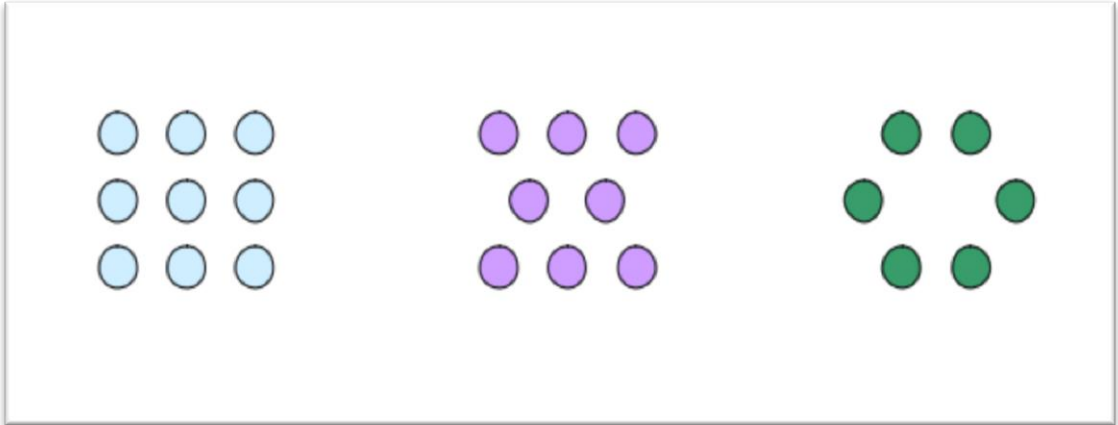


Figure I -6 Exemples de différents réseaux 2D. [2]

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

Les diagrammes de la **Figure I-7** représentent :

- En abscisse, le parcours Γ par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ , X , M de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, la fréquence des modes calculés. [2]

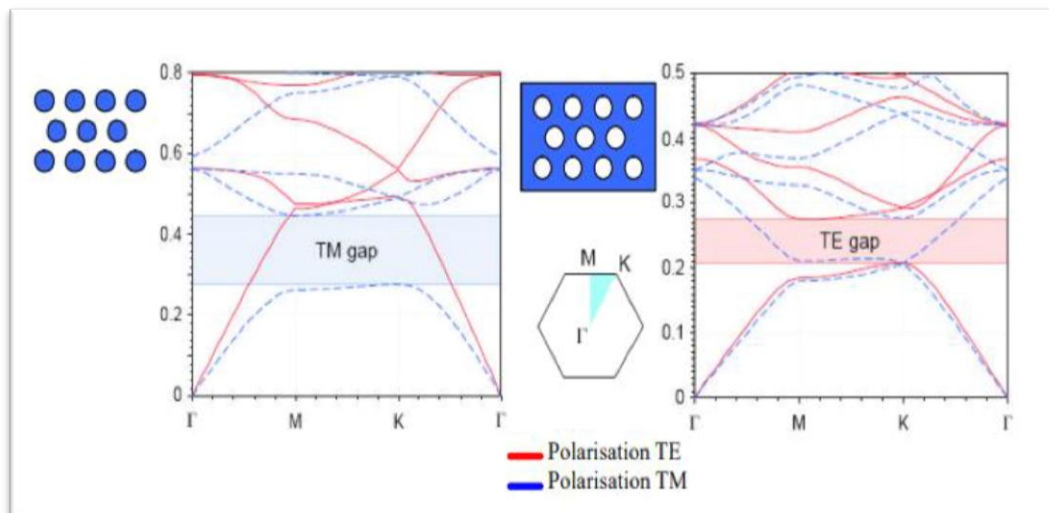


Figure I-7 Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation

Dans les deux cas nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites dans les deux polarisations (en étudiant ici les diagrammes de bande d'une structure 2D en polarisation TE et TM).

Mais, lorsque les bandes interdites correspondant à chacune des polarisations se recouvrent même de façon partielle, nous parlons alors de bandes Interdites complètes.

En réalité, il n'y a que dans le cas des structures en trois dimensions que nous pouvons Obtenir théoriquement une vraie bande interdite complète, c'est-à-dire dans le cas où il n'y a Aucune propagation possible quelles que soient la polarisation et la direction de l'onde incidente.

Réseaux tridimensionnels : Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D où 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-8*).

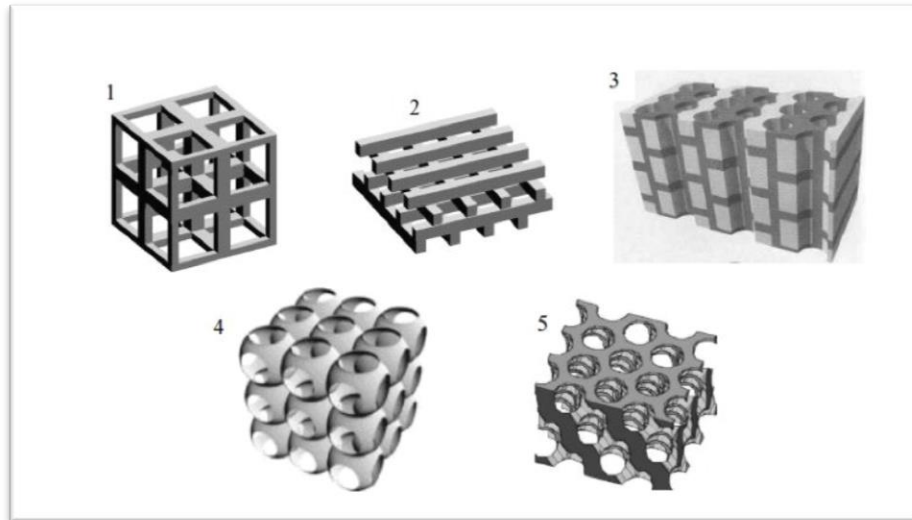


Figure I-8 Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois[2]

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 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.

Ceux-ci sont à la base des structures périodiques tridimensionnelles. [2]

1.4 Description des structures BIE métalliques

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux Purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique.

En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes Pertes des métaux à ces fréquences.

Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas.

Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions.

Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau d est très faible devant la longueur d'onde λ ? Qui est bien en dessous des fréquences optiques.

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs.

Elles ont aussi permis de concevoir des surfaces sélectives en fréquence où SSF (**Figure I-9**) mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les structures BIE métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une Extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions [1] [3]

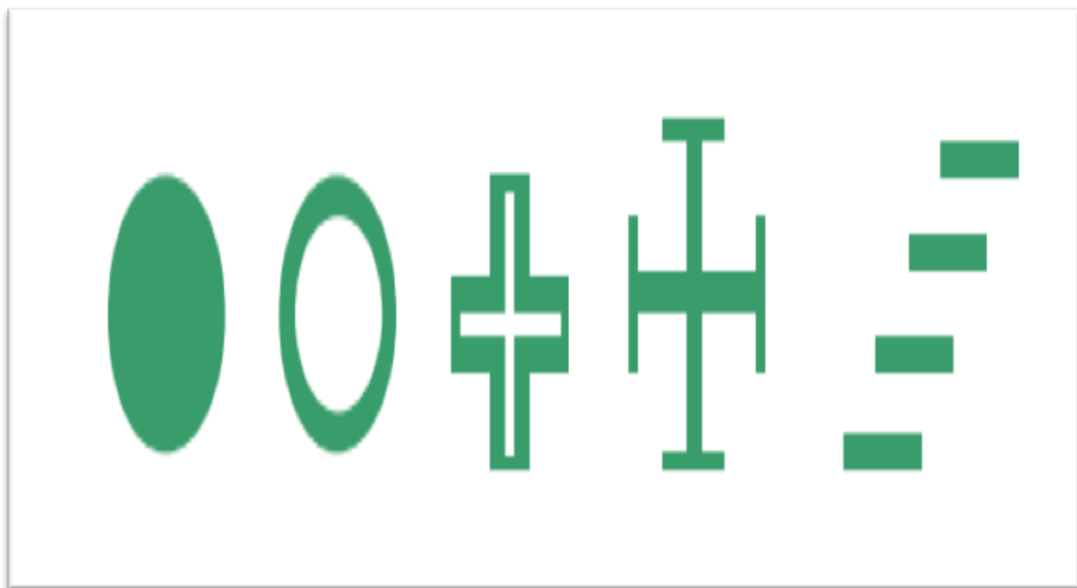


Figure I- 9 Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF). [2]

1.5 Comportements électromagnétiques

Nous allons étudier les propriétés électromagnétiques des structures périodiques et leurs comportements fréquentiels.

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.

1.5.1 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.

La **Figure I-10** montre le module du coefficient de transmission $|S_{11}|$ et le module du coefficient de réflexion $|S_{21}|$ d'une structure 1D sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.

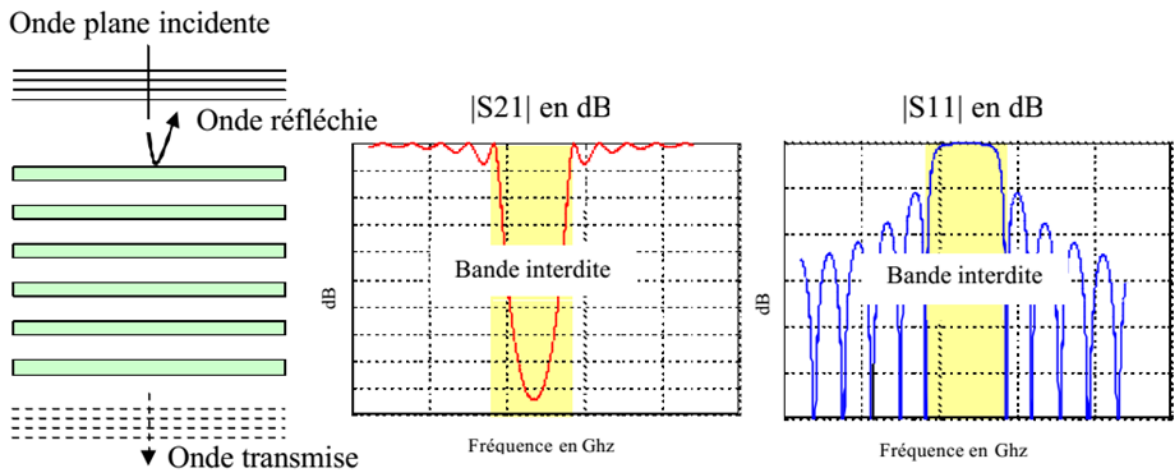


Figure I- 10 Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D. [3]

Ces structures réfléchissent les ondes grâce à un phénomène d'interférence constructive entre les différentes couches composant le matériau.

L'onde incidente est partiellement réfléchie à chaque interface entre deux couches. Du fait de la stratification périodique, les ondes ainsi réfléchies présentent un déphasage bien défini les uns par rapport aux autres.

Elles interfèrent donc de manière constructive ou destructive selon la valeur du déphasage qui dépend entre autre de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence (**Figure I-11**).

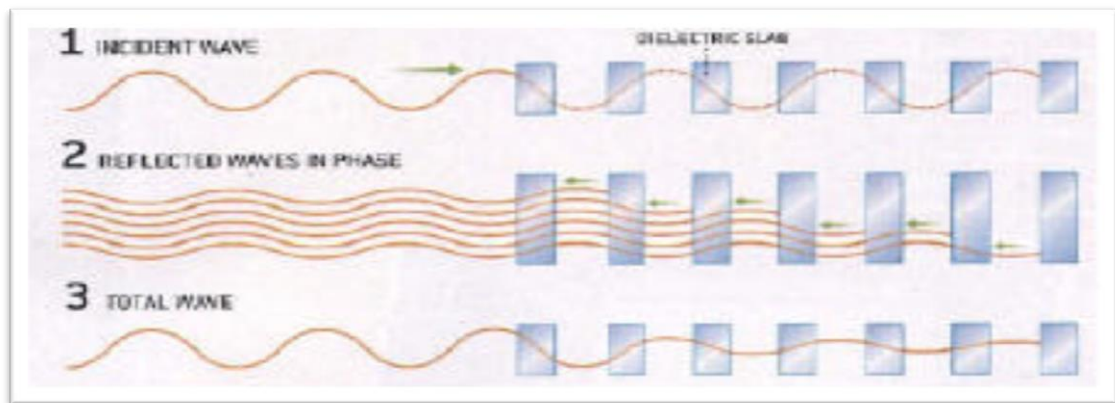


Figure I- 11 Propagation à travers une structure BIE 1D dans la bande interdite

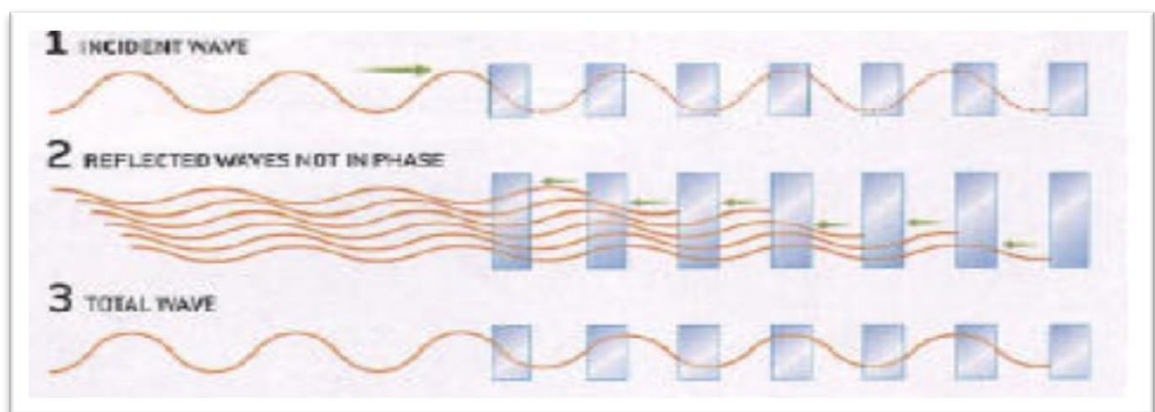


Figure I-12 Propagation à travers une structure BIE 1D hors la bande interdite

1.6 Les Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS)

La performance de la FSS a été étudiée par de nombreux auteurs au cours des dernières décennies.

La plupart des études sur les FSS concernent des techniques et des structures analytiques fournissant de multiples bandes de fréquences, une largeur de bande étendue, des structures réduites pour les applications hyperfréquences et optiques dans les zones commerciales et militaires récemment, plusieurs géométries ont été analysées en fonction des exigences applicatives de la FSS.

Différents matériaux de substrat ont fait l'objet d'études approfondies, comme c'est le cas des diélectriques isotropes, des diélectriques anisotropes et des méta-matériaux.

Les surfaces sélectives en fréquence (FSS) sont référées à un réseau infini bidimensionnel de pièces métalliques ou à un réseau d'ouvertures dans une feuille de métal.

Le premier prototype de FSS a été signalé en 1919 par Marconi et Franklin.

Cependant, en raison de l'intérêt fortement demandé pour les militaires, d'intenses recherches théoriques et expérimentales ont été lancées sur ce sujet au milieu des années 1960.

A l'origine, la technologie des FSS faisait partie du domaine militaire. Aujourd'hui, les FSS ont trouvé de nombreuses applications en micro-ondes, antennes, radar, et communications par satellite. [4]

Parmi ces applications diverses, on peut citer : radôme, réflecteurs, filtres, absorbants

I.7 Structure et caractéristiques principales de la FSS

Les FSS sont généralement des structures périodiques à deux dimensions qui fonctionnent comme des filtres spatiaux.

La figure I.5 montre un exemple de structure plane périodique à deux dimensions où P_x et P_y sont les périodicités respectives des axes x et y et h est l'épaisseur du substrat

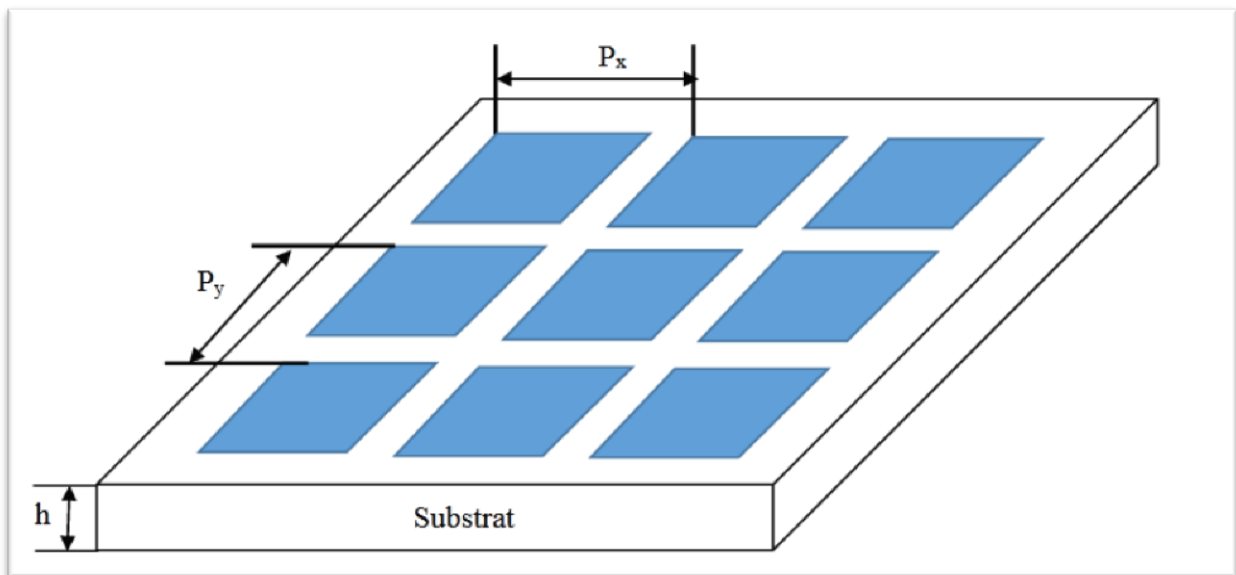


Figure I -13 Structure plane périodique bidimensionnelle

Une surface sélective en fréquence (FSS) est généralement formée soit d'un plan métallique perforé périodiquement avec des ouvertures (grille métallique), soit d'un réseau périodique de motifs métalliques imprimés sur un substrat.

Pour chaque type de FSS, les ondes électromagnétiques structure en deux polarisations distinctes, TE (transverses électriques) et TM (transverses magnétiques), peuvent être étudiées.

I.8 Les structures métalliques à base de FSS

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. [4]

Ces différentes structures sont présentées dans la (**figure I-13**).

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 :

$$\phi_P + \phi_A \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \times 2h = 2k\pi, k = 0 \pm 1 \pm 2$$

ϕ_P et $\phi_A = 180$ Sont le coefficient de réflexion de la PRS et du plan de masse respectivement. [4]

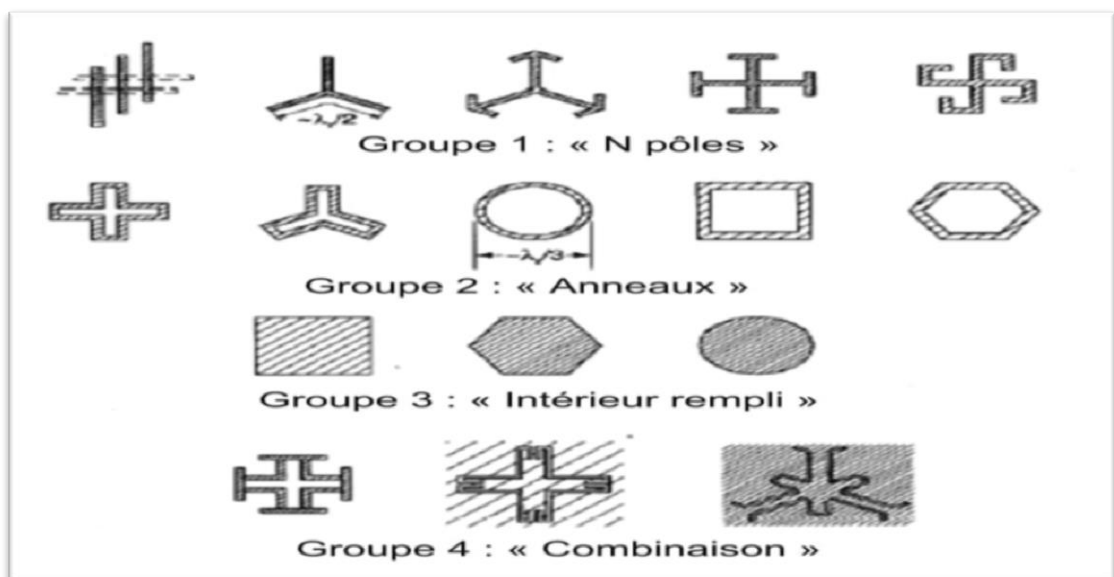


Figure I -14 Motifs élémentaires pouvant constituer une FSS. [4]

1.9 Définition d'une 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.

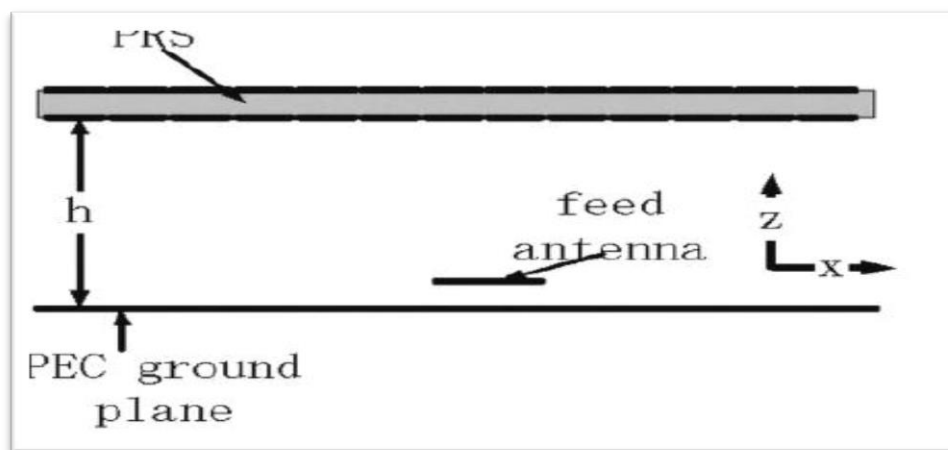


Figure I -15 Antenne BIE.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents concepts qui nous seront utilisés pour la suite de notre étude, nous avons vu que les matériaux BIE restent un sujet très riche, tout comme le choix de leurs applications.

Pour comprendre leur fonctionnement, elles requièrent de nombreuses notions.

Les matériaux BIE diélectriques et métalliques ont ensuite été décrits dans la deuxième partie.

L'étude de leurs caractéristiques a permis de comprendre comment agir sur les performances des antennes.

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

Bibliographie

- [1] T. M. H. Eddine, mémoire «Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire,»
05 Juin 2014.

L'université

- [2] T.JAFFRE, 02 février 2005. [En ligne].

Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiwkejH5dL2AhWH8LsIHYCgAiQQFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Ffaurore.unilim.fr%2Ftheses%2Fnxfile%2Fdefault%2F342540ff-1e0d-4bdb-8afb-23771b268d27%2Fblobholder%3A0%2F2005LIMO0004.pdf&usg=AOv>

[Accès le 19 march 2022].

- [3] KUMAR, Girish et RAY, Kamala Prasan. *Broadband microstrip antennas*. Artech house, 2003.

- [4] H. Radhia, mémoire «Etude d'une antenne micro ruban BIE-FSS,» Radhia, HERIZI, msila, 2021.

- [5] V. I. .: p. g. d. l. 5G, «Evaluation de l'exposition du,» Juillet 2019.

Le titre n'est pas complet !!

- [6] BELKHIR Hossam Eddine SEGHIRI Oussama, «Conception et simulation d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments,», mémoire de master, université m'sila, 2019 /2020.

- [7] M. S. Y. W. M. K. B. Bochra, «Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C,» 2020/2021.

- [8] B. a. S. asma mémoire, «Etude D'un Réseau D'antenne Patch Rectangulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La Bande X,» 2018/2019.



CHAPITRE II

**Les réseaux d'antennes microrubans et la 5
génération des standards**

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 microstrip 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. [1]

II.2 Définition de réseau d'antennes

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone.

C'est-à-dire que le déphasage du courant entre deux paires d'antennes est fixe, un réseau peut comporter des éléments non alimentés directement par une source (éléments parasites) mais qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments (c'est le cas des antennes Yagi-Uda).

Le champ électromagnétique produit par un réseau d'antennes est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments.

En choisissant convenablement l'espacement entre les éléments et la phase du courant qui circule dans chacun, on peut modifier la directivité du réseau grâce à l'interférence constructive dans certaines directions et à l'interférence.

II.3 Réseau d'antennes imprimées

L'utilisation d'une antenne plaque unitaire s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées.

Le réseau d'antennes imprimées est constitué par des éléments rayonnants reliés en chaîne les uns aux autres par des tronçons de ligne microbandes.

Les antennes élémentaires fonctionnent à la même fréquence et sont disposées périodiquement selon une ou plusieurs directions.

Les réseaux d'antennes sont actuellement utilisés dans de nombreuses applications radars, radio mobile ou spatial. Les antennes réseaux peuvent avoir différentes géométries : réseaux linéaires et réseaux planaires (bidimensionnels).

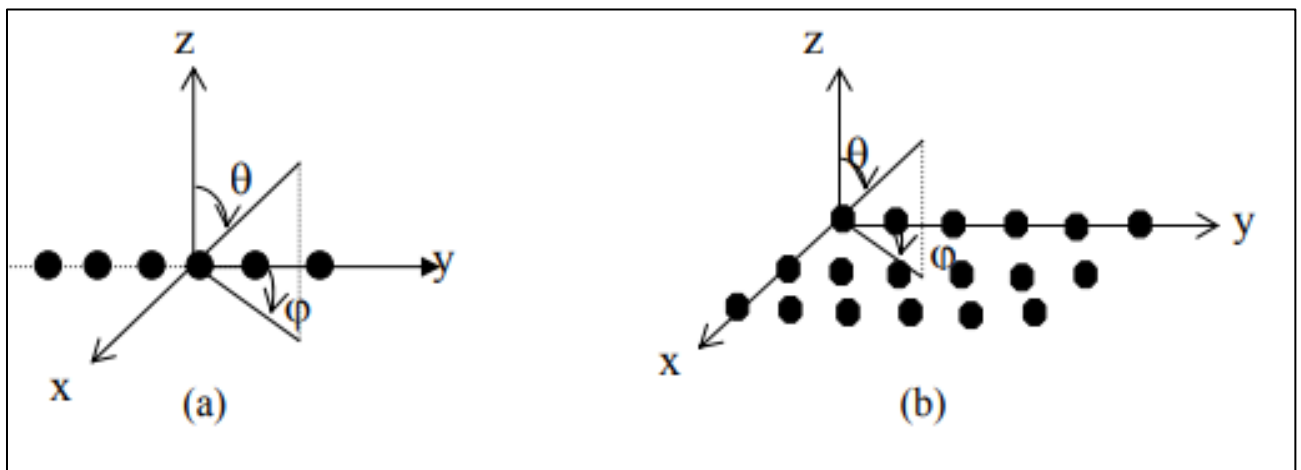


Figure II.1 : Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments. La forme du rayonnement global doit prendre en considération les paramètres suivants :

- *La géométrie du réseau : linéaire, plan... ;
- *L'espacement relatif entre chaque élément ;
- * L'amplitude de l'excitation de chaque élément ;
- *La phase appliquée à chaque excitation ;
- *Le diagramme de rayonnement propre à chaque élément.

II.4 Types de réseaux d'antennes

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau linéaire, réseau circulaire, réseau planaire (forme rectangulaire ou circulaire) et réseau volumique

II.5. Définition d'une antenne patch

Depuis les années 1990, les antennes micro-ruban (microstrip) ont connu des innovations et une évolution exemplaire en matière d'antenne. Avant cette période, la technologie micro-ruban était réservée à des applications militaires.

Mais depuis quelques temps, il y a de plus en plus des applications vouées au commerce, et de nombreux produits issus de la technologie sans fil ont surgit sur le marché [3].

Il y a des spécificités propres aux antennes micro-rubans qui font qu'elles soient parfaites pour des multiples applications commerciales.

D'abord, elles peuvent être produites à moindre coût, car elles reposent sur la technologie des circuits imprimés [2].

En effet, puisqu'elles ont une forme plate, elles peuvent être installées dans le même boîtier que le produit qu'elles alimentent. On peut également les insérer sur la plaque portant le circuit radiofréquence ou micro-onde [2]. [7]

L'antenne à éléments rayonnant au départ contient un fin conducteur métallique (environ 17,5 à 35 μm d'épaisseur) de forme aléatoire (l'élément rayonnant), que l'on pose sur un substrat diélectrique dont la face inférieure contient un plan de masse tout métallisé [4,5]. Dans le domaine des micro-ondes et des ondes millimétriques, les antennes imprimées emploient habituellement une seule couche de substrat et sont très populaires.

Dans une forme géométrique quelconque (Figure II.2 :), elles sont installées sur un substrat diélectrique et un plan de masse. On a plusieurs formes de ces éléments rayonnants : carrée, rectangulaire, circulaire, elliptique ou plus complexe.

Nous notons que leur dimension est de l'ordre de $\lambda/2$ à λ [3]. [8]

Afin de satisfaire les exigences particulières des antennes, on peut construire des formes plus pointues.

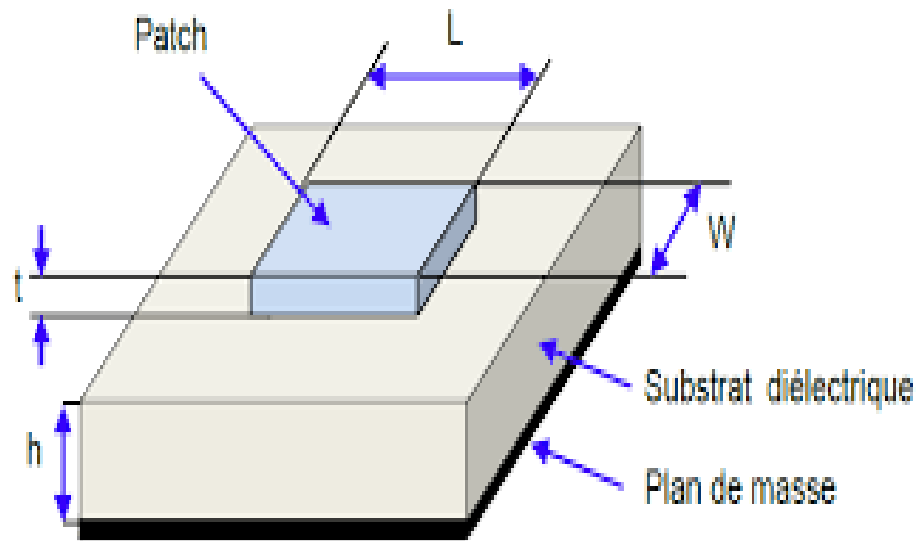


Figure II-2 Structure d'une antenne imprimée

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.

II.6 Caractéristique de base d'une antenne micro ruban à FSS

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 ...

Si on les compare aux antennes microondes l'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme la montre sur la Figure II.3 [7].

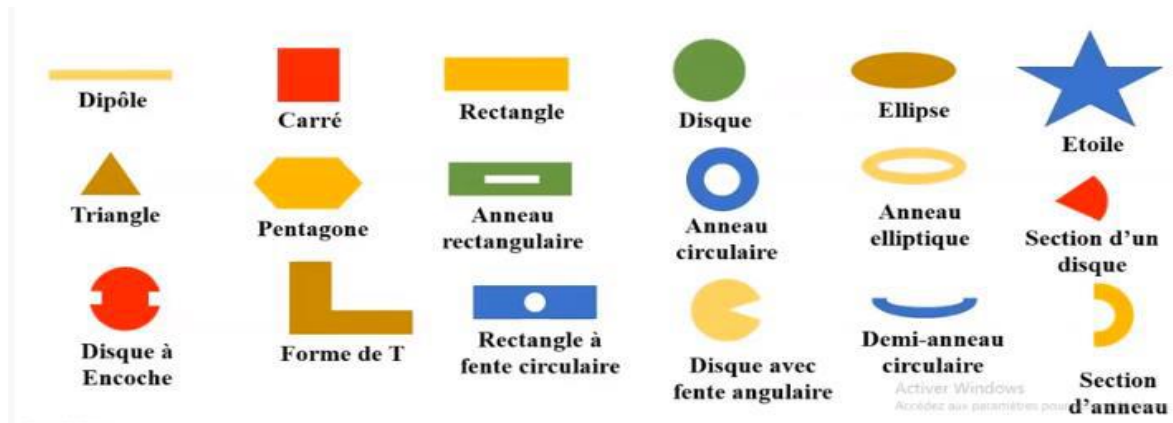


Figure II-3 Les différentes formes du patch [16]

II.7. Les caractéristiques des antennes

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. D'une manière générale, une antenne utilisée dans un type d'application ne peut pas l'être dans d'autres.

Une antenne peut être caractérisée par :

II.7.1 Le coefficient de réflexion S_{11}

On définit la qualité d'adaptation d'une antenne soit en donnant son impédance caractéristique (I.1) (souvent 50 ohms), soit en donnant son coefficient de réflexion S_{11} (I.2).

$$Z_e = R + jX \quad \text{I.1}$$

$$|S_{11}|^2 = P_r/P_t \quad \text{I.2}$$

$|S_{11}|$ est le coefficient de réflexion en tension, donné par la formule et exprimée en Décibels.

C'est le rapport entre la tension réfléchie et la tension transmise.

Le paramètre S_{11} qui est le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne exprime le transfert d'énergie par cette antenne.

La valeur de ce paramètre varie en fonction de la fréquence.

Afin d'assurer une bonne adaptation dans la bande de fréquence désirée, nous imposons le critère suivant $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$ [9] [7].

II.7.2 La bande passante

La bande passante est une bande où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale.

Dans la plupart des cas, la bande passante est définie en fonction du coefficient de réflexion.

Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion.

Cependant, un critère typique est d'avoir un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur toute la bande passante.

Certaines antennes sont très sélectives (bandes passantes très étroites), d'autres peuvent être utilisées sur une très large bande de fréquence.[4]

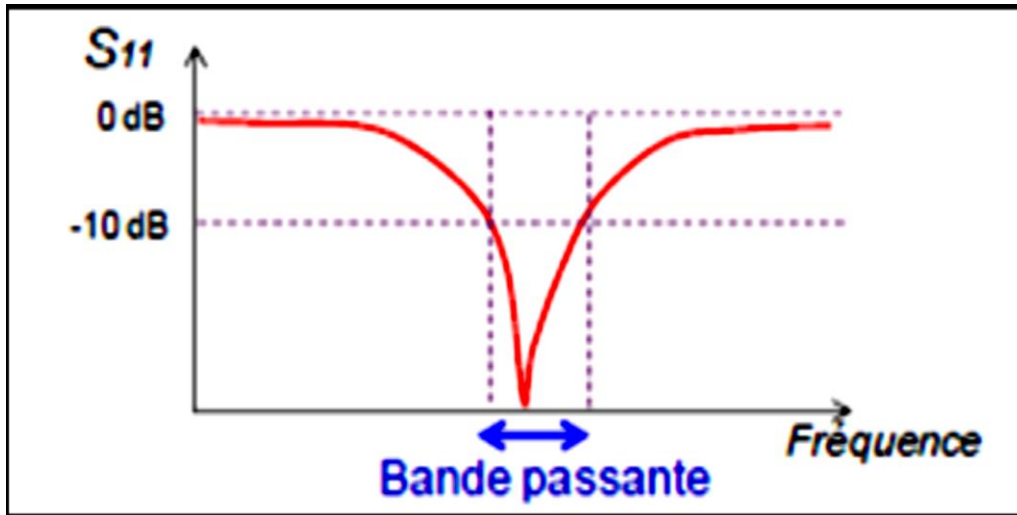


Figure II-4 Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement

II.7.3 Le facteur de qualité

Pour obtenir l'expression du facteur de qualité Q d'une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire, il suffit de calculer l'énergie totale W stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée P_{rad}

Une bonne estimation du facteur de qualité est donnée par le rapport entre la fréquence de résonance f_r de l'antenne et sa bande passante Δf [4].

$$Q = f_r / \Delta f \dots\dots\dots I.3$$

II.8. Caractéristique de rayonnement des antennes

Les caractéristiques de rayonnement visées sont utiles pour le dimensionnement des systèmes antennaires.

Le rôle d'une antenne dans un système de communication sans fils est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance. Plusieurs caractéristiques permettent de grouper les antennes tels que le gain, le diagramme de rayonnement, la largeur de fonctionnement, la polarisation, etc. [7] .

II .8.1 Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées.

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace.

Il indique les directions de l'espace $(\theta_0, 0)$ dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction.

Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure I.5). En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H $(\theta, \varphi) = (\theta, \varphi) / PO(\theta, \varphi)$ [8].

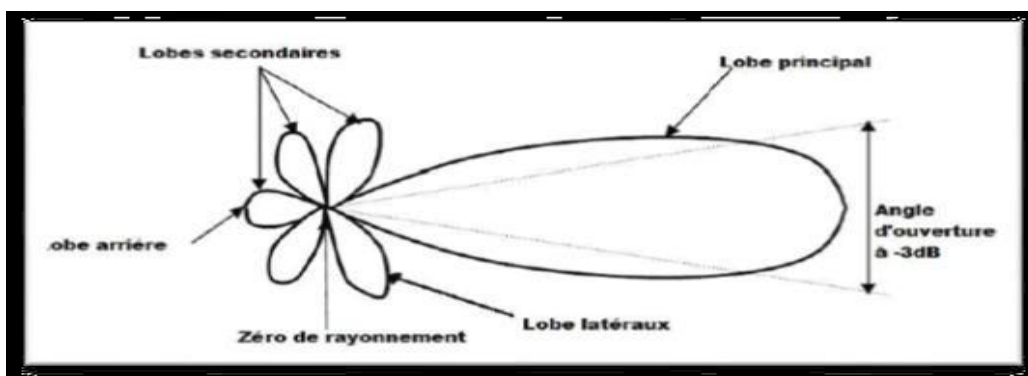


Figure II-5 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne

II .8.2 Ouverture de l'antenne

L'ouverture angulaire à mi-hauteur ou ouverture à 3dB est définie par l'écart angulaire existant entre les deux directions situées de chaque côté de l'axe, pour lesquelles la puissance est divisée par deux.

II .8.3 Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée [5].

Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique [8].

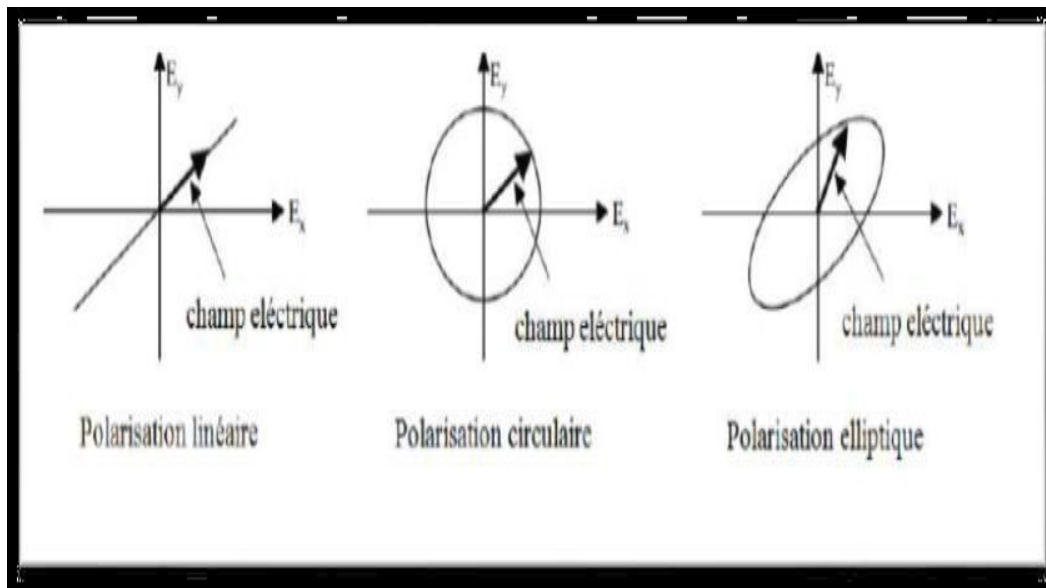


Figure -II-6 Types de polarisation.

II .8.4 Gain

Le gain est considéré comme un des principaux paramètres des antennes directives. Pour ces derniers, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres.

Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre la puissance émise dans la direction du lobe principal et la puissance qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, les deux antennes étant alimenté [15-17].

$$G(\theta, \varphi) = p(\theta, \varphi)P_0 = P(\theta, \varphi)/P_t 4\pi R^2 = 4\pi R^2/P(\theta, \varphi) \iint P(\theta, \varphi)$$

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m^2).

P_0 : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m^2).

P_t : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

La directivité 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 d'une antenne isotrope [18].

$$D(\theta, \varphi) = P(\theta, \varphi)/P_r 4\pi = 4\pi P(\theta, \varphi)P_r [8].$$

II .8.5 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = P_r / P_f \dots\dots\dots (I.4)$$

Ce rapport caractérise les pertes à l'intérieur de l'antenne.

II .8.6 Impédance d'entrée de l'antenne

Une antenne alimentée par une ligne de transmission d'impédance caractéristique, l'impédance d'antenne peut être considérée comme une impédance complexe :

$$Z_a = R_a + jX_a \dots\dots\dots I.5$$

L'impédance d'entrée de l'antenne dépend bien évidemment de la géométrie de l'antenne mais aussi du couplage entre la ligne et l'antenne.

L'impédance d'entrée de l'antenne doit être la plus proche possible de 50Ω dans sa partie réelle, et nulle dans sa partie imaginaire.

Elle dépend du type d'alimentation. [5]

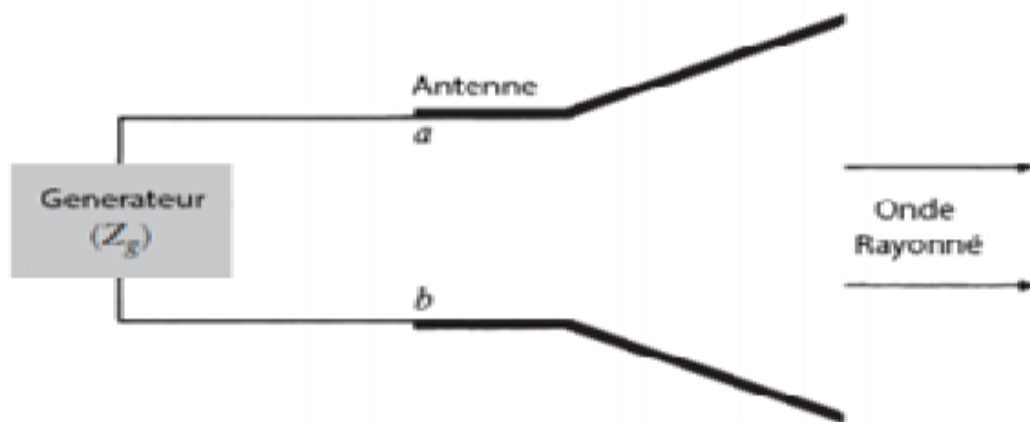


Figure II-7 Impédance d'entrée de l'antenne

II .8.7 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Dans les notes d'application d'antennes, l'adaptation de l'antenne est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR). [5]

Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur). [8]

Le VSWR est donné par : $(1+|S_{11}|)/(1-|S_{11}|)$

Avec : V_r

$V_i = (Z_{an} - Z_c)/(Z_{an} + Z_c)$ I.6

V_r : Amplitude de l'onde réfléchie.

V_i : Amplitude de l'onde incidente.

Le VSWR minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de 50 Ω à 75 Ω . [8]

II.9 Techniques d'alimentation

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne micro ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.[6]

II.9.1 Alimentation par ligne micro ruban

Dans le premier cas, une ligne micro ruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la figure (I-7-a), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5% [10].

II.9.2 Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse Figure (I-7-b). [6]

L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [10].

II.9.3 Alimentation par couplage par fente

L'alimentation par ligne micro ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite.

Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban comme le montre la figure (I-7-c).

Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré.

Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passant étroite [10].

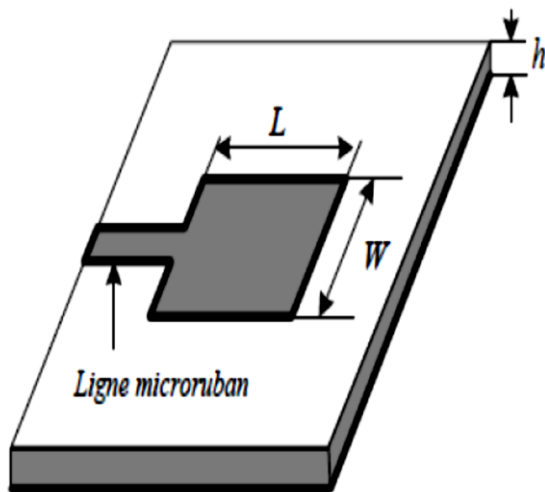


Figure 7-II(1)

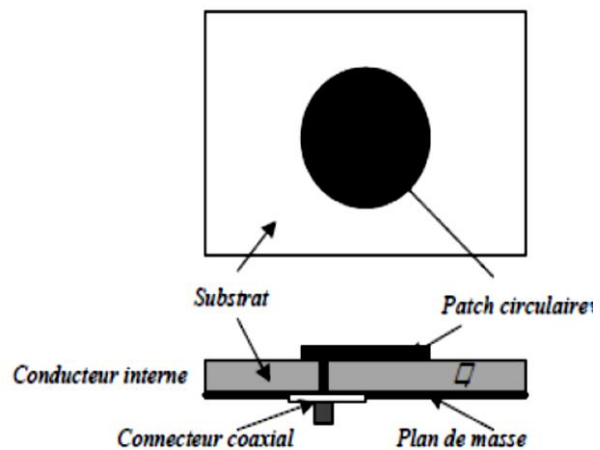


Figure 8-II(2)

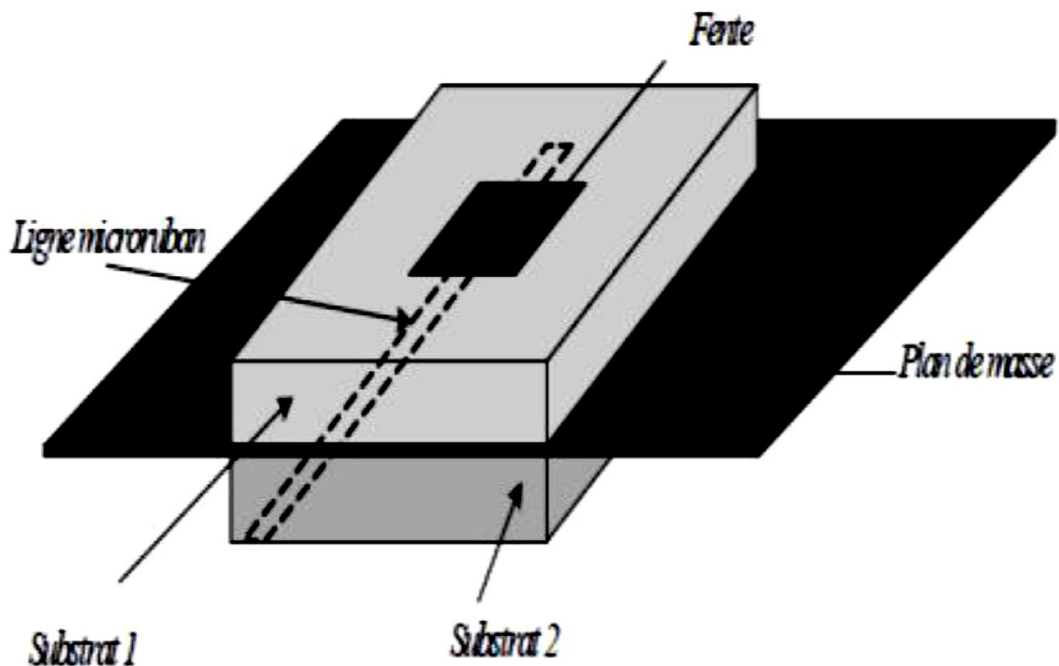


Figure 9-II (3)

II.10 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération.

La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes microbandes.

Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par utilisation des lignes microbandes et des transformateurs d'impédances quart-d'ondes.

Les déphaseurs dans le circuit d'alimentation peuvent être formés d'éléments supraconducteurs.

Toutes les structures d'alimentations sont supposées uniformes de point de vue distribution de puissance (les patchs doivent être alimentés avec la même puissance).

Il faut mettre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps.

Le circuit d'excitation peut prendre plusieurs architectures ; on distingue deux types :

- Alimentation en série ;

- Alimentation en parallèle ;

Le choix du type d'alimentation se fait en fonction de différents paramètres qui sont :

- La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase ;
- La bande passante souhaitée ;
- Un réseau série aura une bande passante plus faible dans la mesure où la loi de pondération sera plus sensible à la fréquence que dans le cas d'une alimentation parallèle [8] [10].

II.10.1 Alimentation parallèle

Un réseau parallèle (Figure II. 10), sera plus encombrant qu'un réseau série (Figure II.11).

De plus, il est à noter qu'un réseau parallèle présente des longueurs de lignes supérieures et un plus grand nombre de coudes ce qui engendre davantage de pertes, En particulier dans le domaine millimétrique un autre choix important dans la conception d'une antenne imprimée est celui du substrat diélectrique.

Si la structure du réseau à $2n$ éléments rayonnants qui peuvent être alimentés en parallèle par n étages de $(2m-1)$ diviseurs de puissance à chaque étage m .

Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson [10].

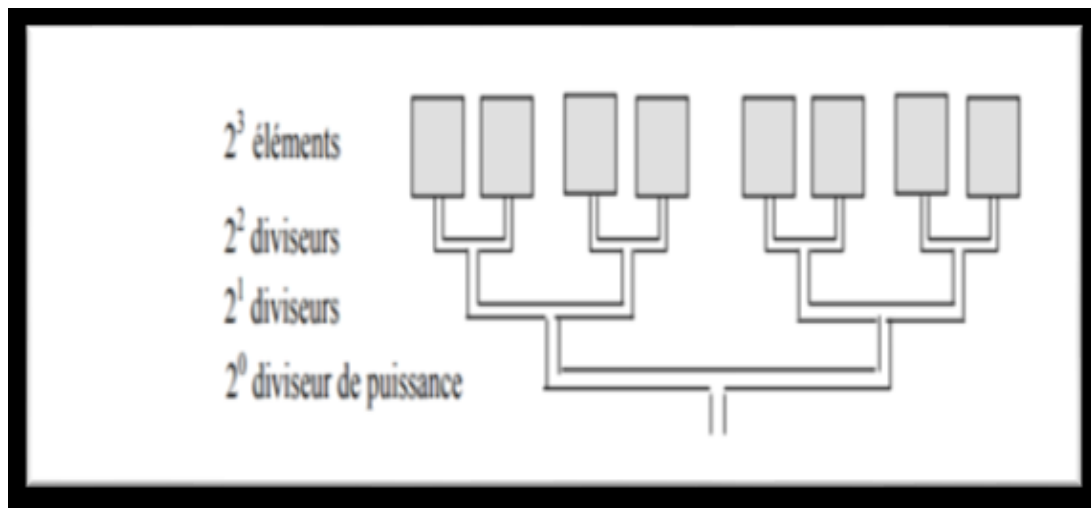


Figure II-8 Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

II.10.2 Alimentation série

Dans la figure II.11 nous avons une ligne de transmission excitée en série les éléments Rayonnants.

Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur, qui lui-même est lié de façon orthogonale à un guide commun d'alimentation.

La distance des branchements des lignes sur la ligne principale doit être uniforme, et les signaux doivent arriver en phase jusqu'aux déphaseurs pour ne pas s'induire dans des erreurs de phase [8]

Figure II-9-Alimentation série d'un réseau linéaire

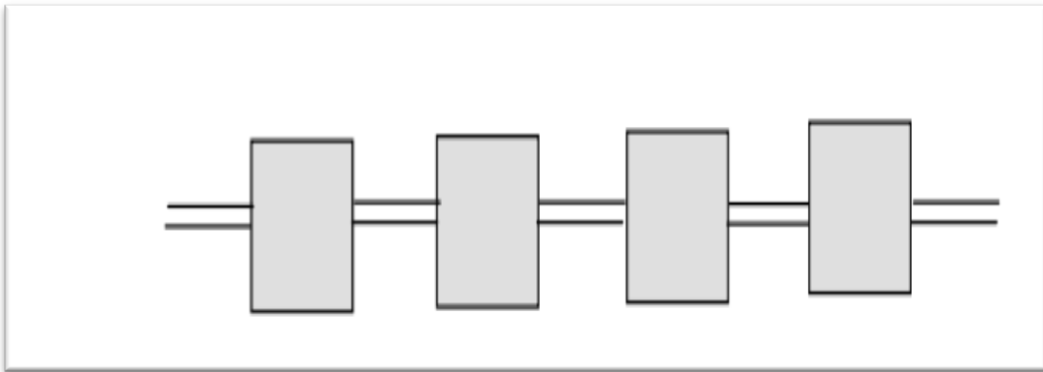


Figure II-9 Alimentation série d'un réseau linéaire.

II.10.2.1 Réseaux bidimensionnels

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan passant par les sources du réseau.

Afin d'obtenir un effet de réseau dans tout l'espace et, en particulier dans les plan E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels

Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [10].

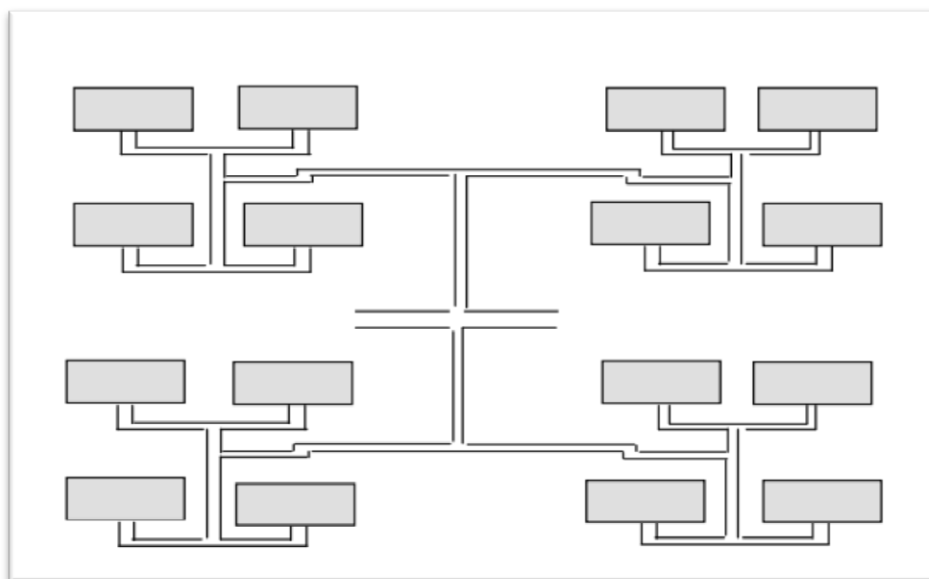


Figure II-10 Alimentation parallèle d'un réseau plan

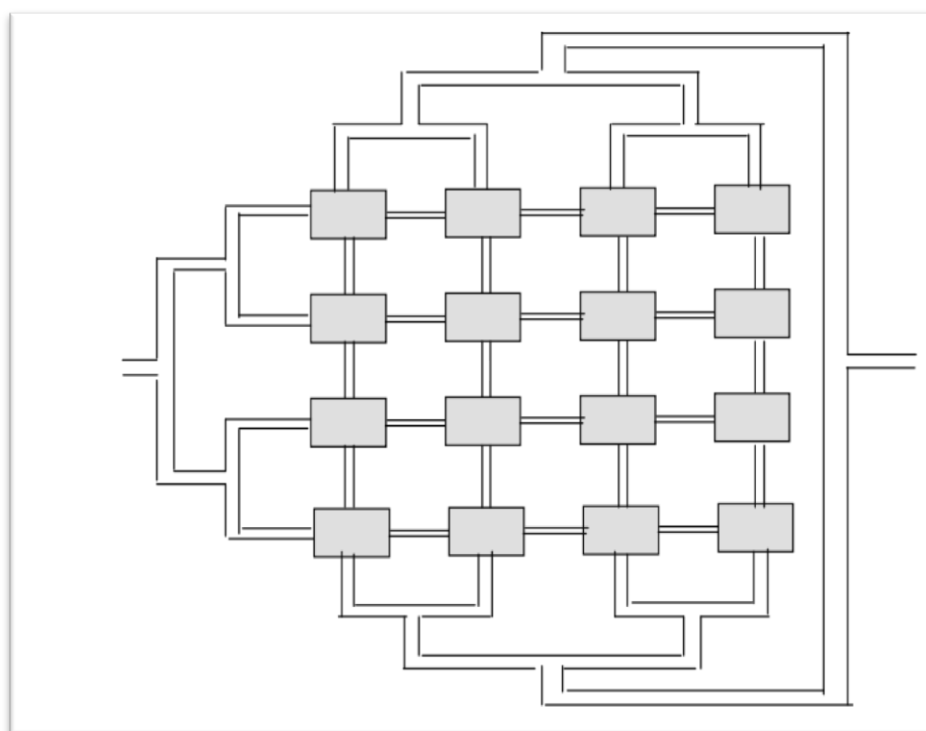


Figure II -11 Alimentation série d'un réseau plan

II.11. Avantages et inconvénients des antennes imprimées

La technologie des antennes imprimées est issue de celle des circuits imprimés ce qui leur confère certains avantages par rapport aux antennes classiques (cornet, dipôle filaire,) dont :

- * Un poids léger et un volume petit,
- * Possibilité d'intégration des éléments actifs, directement sur le même substrat (oscillateurs, amplificateurs, modulateurs,),
- * Simples, robustes et non encombrantes,
- * La faculté de se conformer à des surfaces courbes (ailes d'avions, missiles,),
- * Faible coût de fabrication, par conséquent peut être fabriqué en grande quantité.
- * Une épaisseur et un encombrement minimes, [3]
- * Elles peuvent être polarisées linéairement ou circulairement par simple changement de la position d' alimentation.

Elles présentent cependant quelques inconvénients tels que :

- * Faible rendement,
- * Faible puissance d'émission,
- * Pureté de polarisation difficile à obtenir,
- * Faible bande passante (1 à 5 %). [3]

II.12 Applications des antennes imprimées

Remplacer les antennes classiques par des antennes patches avec des performances équivalentes est le souci principal des concepteurs des systèmes de télécommunication, vu le besoin et les exigences du marché industriel.

Il existe différentes applications réussies démontrant la possibilité de cette transition :

- Télécommunication satellitaires.
- Commande et contrôle.
- Télémétrie (télémesure) par missile.
- Équipements portatifs.
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Antenne d'émission utilisée en médecine.
- Récepteur satellite de navigation [3]

II.13 La 5^{ème} Génération

La 5G (réseaux mobiles ou systèmes sans fil de 5^eme génération) englobe un ensemble de technologies qui constituent la prochaine grande phase des normes de télécommunications mobiles à partir de l'évolution des normes actuelles 4G LTE (évolution à long terme).

Le réseau 5G est validé par l'ITU (International Télécommunication Union) et le consortium 3GPP (3rd) Génération Partnership Project).

Il n'y a pas de définition unique de 5G. Cependant, dans la définition la plus simple possible, 5G est la cinquième génération de réseaux cellulaires.

C'est la prochaine étape dans la technologie mobile, ce que les téléphones et les tablettes du futur seront utilisés pour les données.

Chaque génération de réseau a une durée de vie d'environ 20 ans. Les travaux sur la 4G ont débuté en 2003 pour un lancement en 2010 et jusqu'en 2030. De son côté, la 5G est en réflexion depuis 2012, pour un lancement commercial en 2020.

Une nouvelle génération de téléphonie mobile est spécifiée principalement par deux acteurs : l'un concerne les exigences de performance technique IMT-2020 de l'UIT-R (Union internationale des télécommunications) qui s'achève en février 2017, l'autre est le rapport technique sur les scénarios et les exigences 3GPP (Projet de hanche pour les partenaires de troisième génération) qui est achevé en mars 2017.

5G vise à fournir un débit de données très élevé pour un grand nombre d'utilisateurs et à prendre en charge plusieurs communications simultanément pour déployer un grand nombre de capteurs, et également améliorer l'efficacité spectrale du réseau [13].

II.14 Les avantages de la 5G

Le débit : dix fois plus rapide : des débits de 10 Gbit/s contre 100 Mb/s aujourd'hui.

La latence réduite : dix fois moins de latence (délai entre une action et le déclenchement d'une réaction).

La connectivité massive : Permet de doper la densité de connexions par antenne laquelle pourra atteindre un million d'équipements connectés par km².

Les objets connectés : « L'ultra connectivité » sera ainsi possible, c'est-à-dire beaucoup plus de monde et d'objets connectés en même temps.

Concrètement, c'est entre autres, votre voiture, l'éclairage public, les transports en commun, les dispositifs médicaux, les systèmes de sécurité qui vont être connectés au réseau et partager des informations [14].

II.15 L'application des réseaux d'antenne dans la 5G

Les antennes 5G pour les bandes de fréquences déjà attribuées à la téléphonie mobile seront généralement semblables aux antennes existantes.

En revanche, l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes permet de construire des dipôles élémentaires de plus petites tailles, de l'ordre de 5 cm dans la bande 3400 – 3800 MHz (longueur d'onde médiane d'environ 9 cm) et de l'ordre de 0,5 cm dans la bande 26 GHz (longueur d'onde médiane d'environ 1,2 cm). Les antennes 5G dans ces bandes de fréquences seront des réseaux deux dimensions comportant un grand nombre de dipôles élémentaires permettant de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs.

Un émetteur/récepteur peut être soit une antenne élémentaire (également appelé élément rayonnant) soit un regroupement d'antennes élémentaires.

Par exemple, une antenne 5G peut être constituée de 192 éléments rayonnants organisés sur 8 colonnes, 12 lignes et 2 polarisations croisées pour former 64 émetteurs/récepteurs (64T64R) en regroupant verticalement par trois les éléments rayonnants. [11].

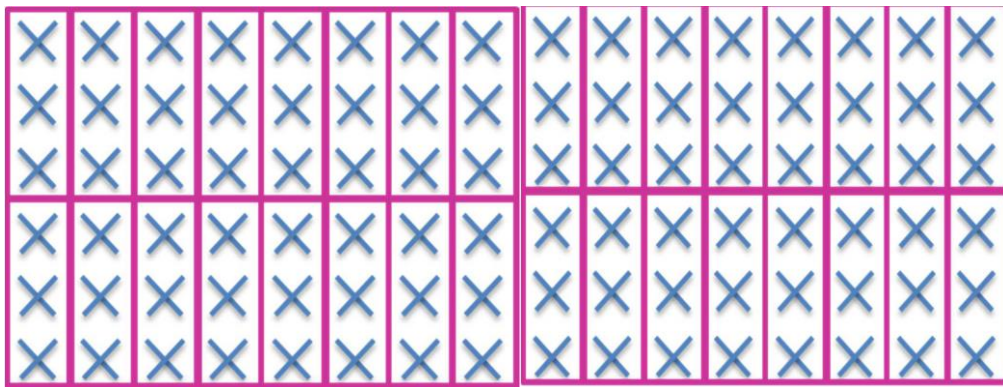


Figure II-12 Illustrations d'une antenne 64T64R constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par 4 groups

II.15.1 Les antennes massives MIMO

Les antennes *massives MIMO* permettent également de focaliser le rayonnement de façon beaucoup plus efficace dans une direction donnée. Le gain des antennes 5G dans la bande 3400 MHz 3800 MHz est de l'ordre de 24 dBi, c'est-à-dire environ 5 fois plus que pour une antenne 2G-3G-4G classique.

Le rayonnement est concentré dans un faisceau beaucoup plus fin qu'actuellement, c'est ce que l'on appelle le *beamforming* ou antenne à formation de faisceaux [14].

L'antenne pourra gérer indépendamment plusieurs faisceaux et les orienter dans la direction des utilisateurs

Deux techniques de *beamforming* existent : le GoB (« *Grid of Beams* ») pour lequel l'ensemble des faisceaux possibles est pré-codé dans un « *codebook* » et l'EBB (« *eigenvalue based beamforming* ») pour lequel les faisceaux se définissent dynamiquement dans le temps. [11] [5]

II.15.2 Multiplexage NOMA

Plusieurs utilisateurs sont couplés et partagent les mêmes ressources radio, que ce soit en temps, en fréquence ou en code.

Chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G. [5] [11].

II.16 Conclusion

On a essayé à travers ce chapitre de présenter de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes imprimées dont aurait besoin tout ingénieur ou chercheur s'intéressant à ce type d'antenne.

On a présenté brièvement le réseau d'antenne imprimé, ou on a cité quelques applications de ce type d'antennes, ainsi leur caractéristiques, le choix des paramètres et substrats, les avantages, les inconvénients et leurs applications on s'est intéressé par la suite aux plus importantes techniques utilisées pour son alimentation.

Nous décrivons les antennes patch à FSS et incluons ses caractéristiques ainsi que nous essayons de collecter les informations les plus importantes sur les 5 générations. [14]

Bibliographie

[1] mémoire Yamina Tighilt, «Identification des antennes micro rubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones », thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de,» Sétif. Juin 2011. [L'université ?](#)

[2] p. g. d. l. livre 5G, Evaluation de l'exposition du, Juillet 2019.

[3] V. 1. :. p. g. d. l.livre 5G, «Evaluation de l'exposition du,» Juillet 2019.

[2] [3] C'est les mêmes

[4] g. image. [En ligne]. Available:

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FCoefficient-de-reflexion-du-reseau-dantennes-de-reference_fig2_278777489&psig=AOvVaw1UV69wF0OPqhS18A2DHi0G&ust=1647811906489000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCMjZkKf. [Accès le 19 march 2022].

Cette adresse mène à une image !!

[5] B. A. T.livre Louiza, «Simulation d'un réseau d'antennes,» Le : 25/06/2018.

Préciser cette réf !!

[6] wékipedia. [En ligne]. Available: <https://theconversation.com/quelles-seront-les-applications-concretes-de-la-5g-170843>. [Accès le 29 03 2022].

[7] wékipedia. [En ligne]. Available: <https://theconversation.com/quelles-seront-les-applications-concretes-de-la-5g-170843>. [Accès le 29 03 2022].

[6] [7] c'est les mêmes !

[8] b. s. D. A. ALQUDAMi, «Etude des techniques de modulation pour les réseaux,» 2019-2020. [En ligne]. Available: <http://dSPACE.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5713/M-ELE.SY.TE-2020-02.pdf?sequence=1>. [Accès le 30 03 2022].

[9] cirem, livre «La 5G "cinquième génération de réseau mobile",»

[10] google, «cellelur network,» [En ligne]. Available: https://www.google.com/search?q=l%27architecture+de+la+5g&tbm=isch&ved=2ahUKEwifivbRqO72AhUYBWMBHUZVABEQ2-cCegQIABAA&oq=L%27architecture+de+la+5G&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIABAYOgcIIxDvAxAnOgoIIxDvAxDqAhAnUJ8IWPIoYNgyaAFwAHgEgAHKBIgBkxWSAQczL TUuMS4xmAEAoAEBq. [Accès le 30 03 2022].

[11] Tocitethisversion:, «Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables,» HAL Id:tel-02492090, [En ligne]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02492090>.

[12] «site wibe,» [En ligne]. Available: <https://reseaux.orange.fr/actualites/5g-antennes-mimo>.

[13] «petite cellule,» [En ligne]. Available: <https://hellofuture.orange.com/fr/les-small-cells/>.

[14] «hal these,» [En ligne]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02873784>.



CHAPITRE III

Simulation & Résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, en premier, nous avons conçu une antenne patch rectangulaire à substrat alimentée par une ligne micro ruban avec encoches que nous l'avons utilisée pour les réseaux d'antennes à deux patches alimentées en série, et pour le réseau à deux patches mais alimentées en parallèle.

Nous avons comparé les différentes structures dans le but d'avoir les meilleures caractéristiques de ces antennes, après nous avons étudié l'influence des paramètres d'un réseau d'antennes patches à 2 éléments de forme circulaire à substrats à 2D sur la fréquence de résonance, la bande passante ainsi que la directivité de cette antenne, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST MICROWAVE STUDIO.

III.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique à trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences.

Il simplifie le processus de saisie de la structure et la définition des équipements en fournissant une interface graphique de modélisation puissante et solide **Figure III-1**.

Après la modélisation du composant, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant que la procédure de simulation ne soit lancée.

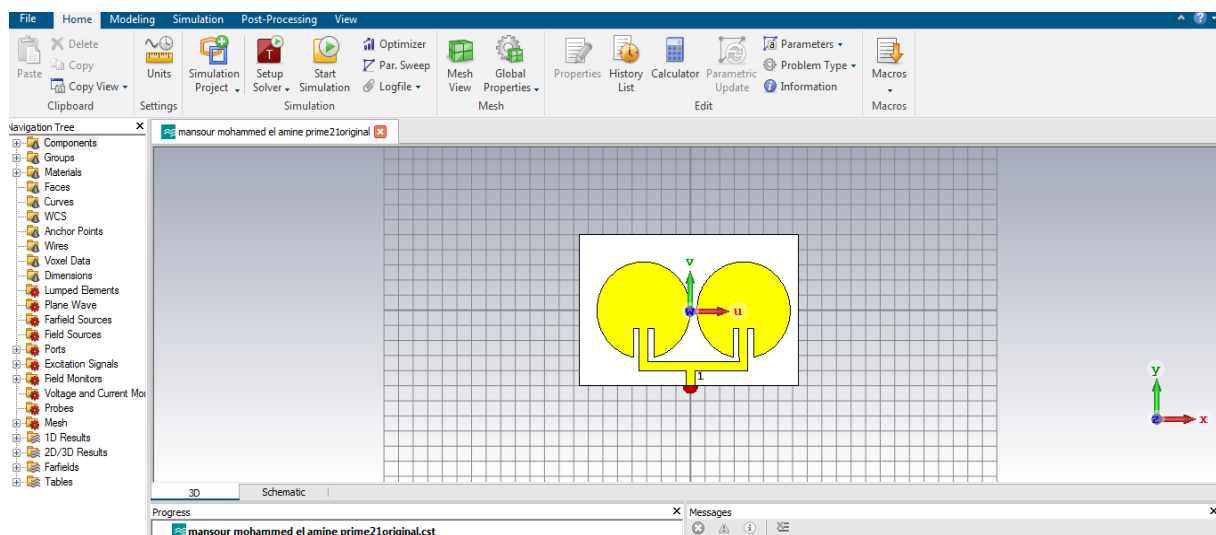


Figure III-1 Interface graphique de CST MICROWAVE STUDIO.

Solveur d'équation intégrale, et solveur de mode propre), pour mieux répondre aux applications particulières.

L'outil le plus flexible est le solveur transitoire, qui peut obtenir le comportement fréquentiel pour une large bande de fréquence par une seule et unique simulation (contrairement à l'approche fréquentielle de nombreux autres simulateurs).

Il est basé sur la technique **FIT** (en anglais : Finité Intégration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant.

Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes etc... .

La méthode d'intégration finie

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

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

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

Par ailleurs, la méthode d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numérique, telles que la méthode des éléments finis

III.3 Présentation de la structure d'un seul élément

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composé d'un plan de masse, d'un substrat de type Rogers RT 5880 LOSSY qui est constitué $\epsilon_{r1}=2.2$ d'épaisseur $h_1=0.797\text{mm}$.

La longueur et la largeur d'élément rayonnant sont **$RP=3.2\text{mm}$** et les dimensions du substrat $L_s=10\text{mm}$, $W_s=10\text{mm}$. Cette antenne est alimentée par une ligne microbande.

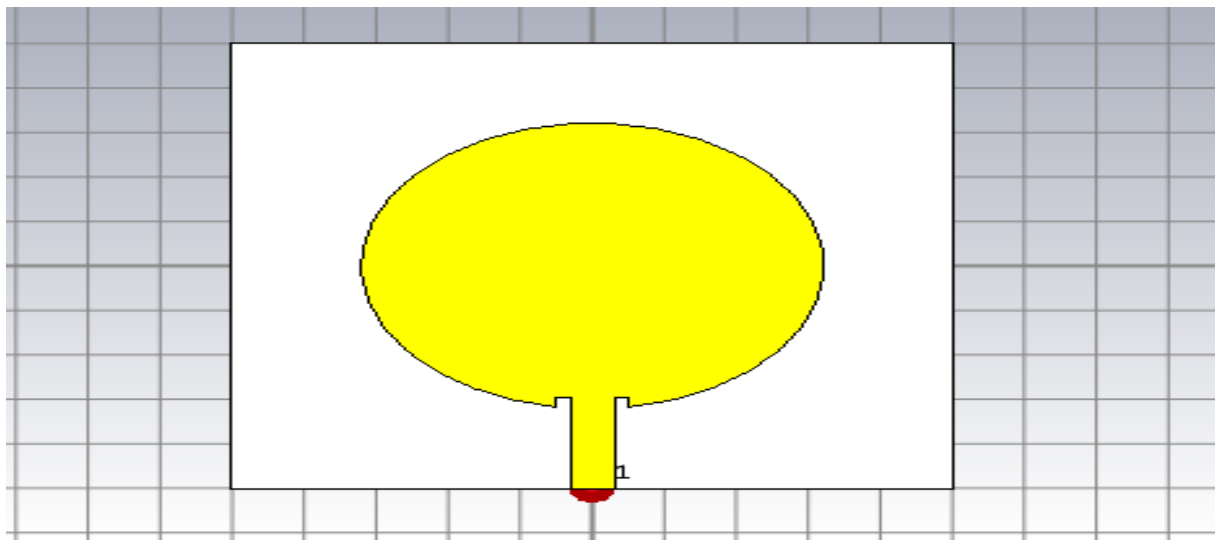


Figure III-2 La structure d'antenne 1 patch.

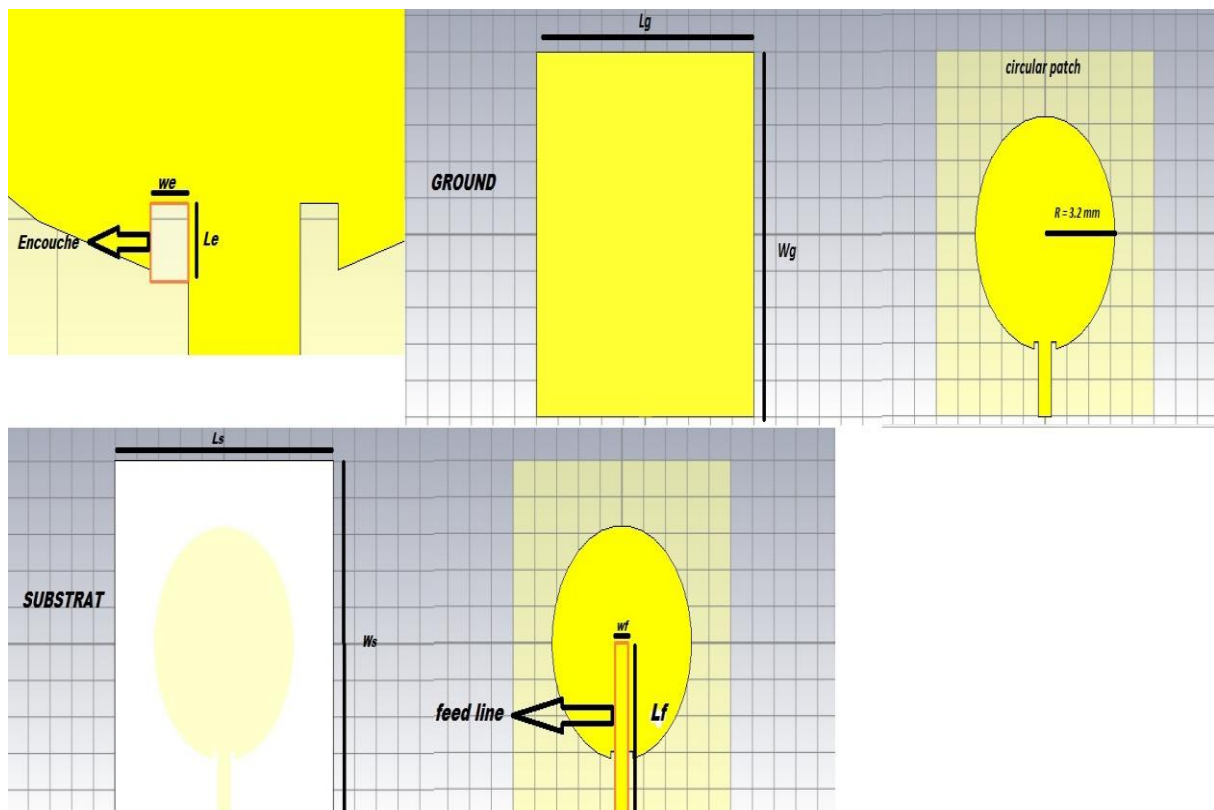


Figure III.3 Dimensions de l'antenne patch circulaire

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
Rayon de patch R	3.2
Longueur ligne alimentation, L_f	5
Largueur ligne alimentation, W_f	0.6
Position d'alimentation Y_0	-5
Longueur de l'encoche, l_e	$R-0.291$
Largueur de l'encoche, w_e	0.2
Largueur substrat, W_s	10
Longueur substrat, L_s	10
Permittivité de substrat	$\epsilon_{r1}=2.2$

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch circulaire

III.4 Structure d'antenne réseau à deux patches circulaires

On garde le même patch circulaire avec des changements cités au-dessous dans un tableau avec un un espacement de $\lambda/2=0.57\text{mm}$ entre les deux patches circulaires.

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
Rayon de deux patches, R	3.2
Longueur ligne alimentation, L_f	5
Largueur ligne alimentation, W_f	0.6
Position d'alimentation Y_0	-5
Longueur de l'encoche, l_e	$-R+2=1.2$
Largueur de l'encoche, w_e	0.4
Largueur substrat, W_s	10
Longueur substrat, L_s	15
Permittivité de substrat	$\epsilon_{r1}=2.2$
Espacement entre les Deux patches circulaires	$\lambda/2=0.57$

Tableau III.2 : Dimensions de deux patches circulaires en parallèle

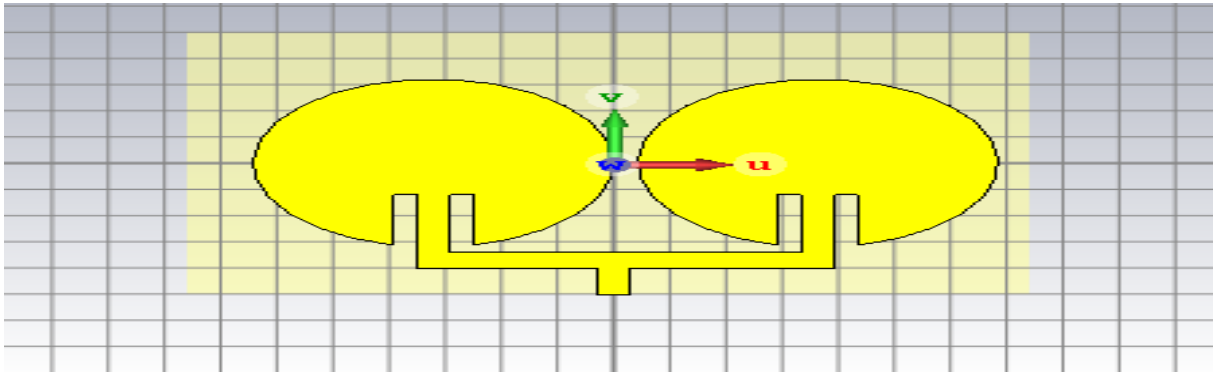


Figure III.4 la Structure d'antenne réseau à deux patches circulaires en parallèle

III.5. Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments en parallèle avec un seul élément

A) Coefficient de réflexion S11

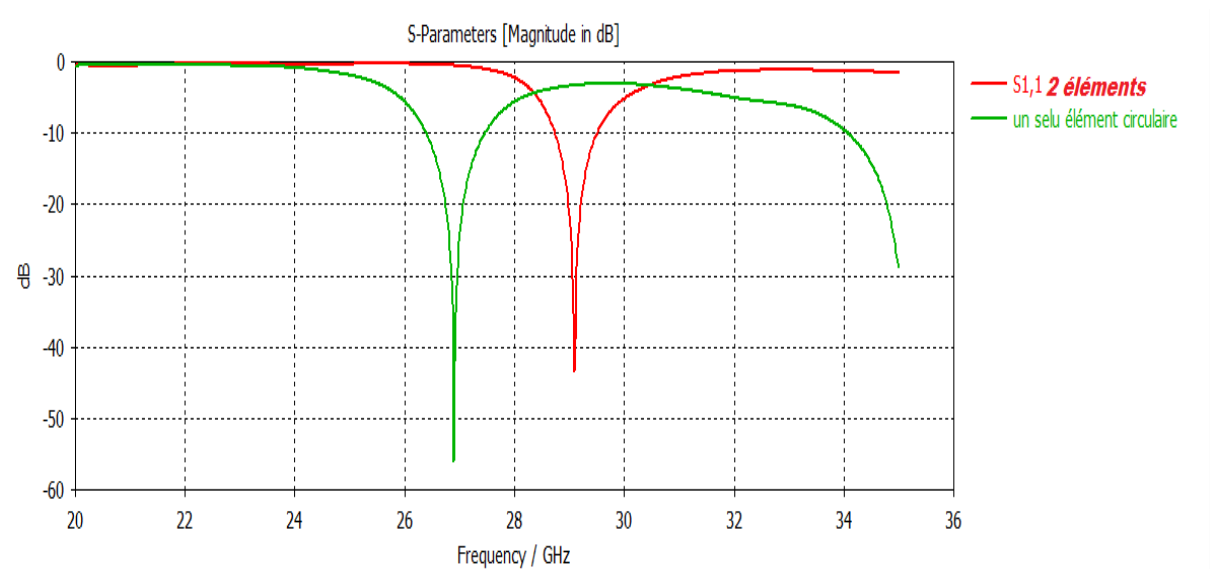


Figure III-5 Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau circulaire en parallèle (2 éléments), une antenne circulaire (un seul élément)

B) La directivité

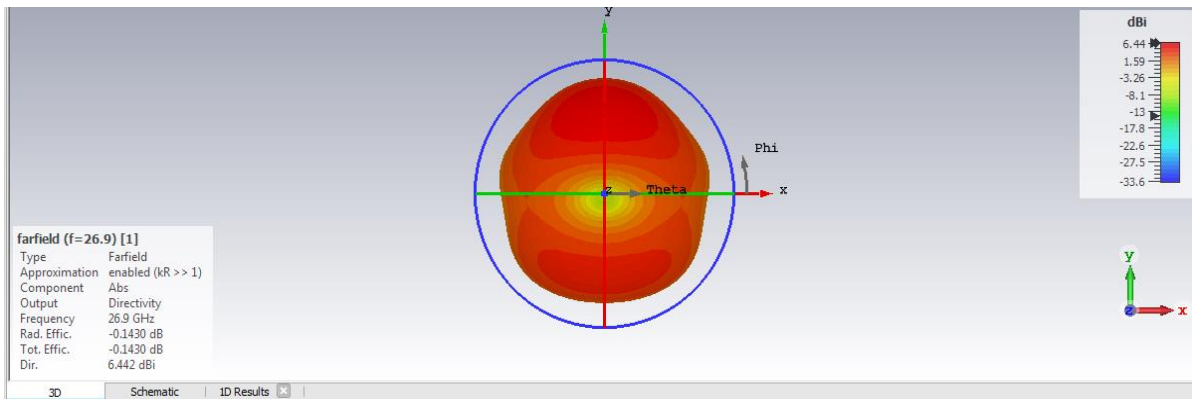


Figure III-6 Directivité en 3D d'une antenne 1 patch circulaire

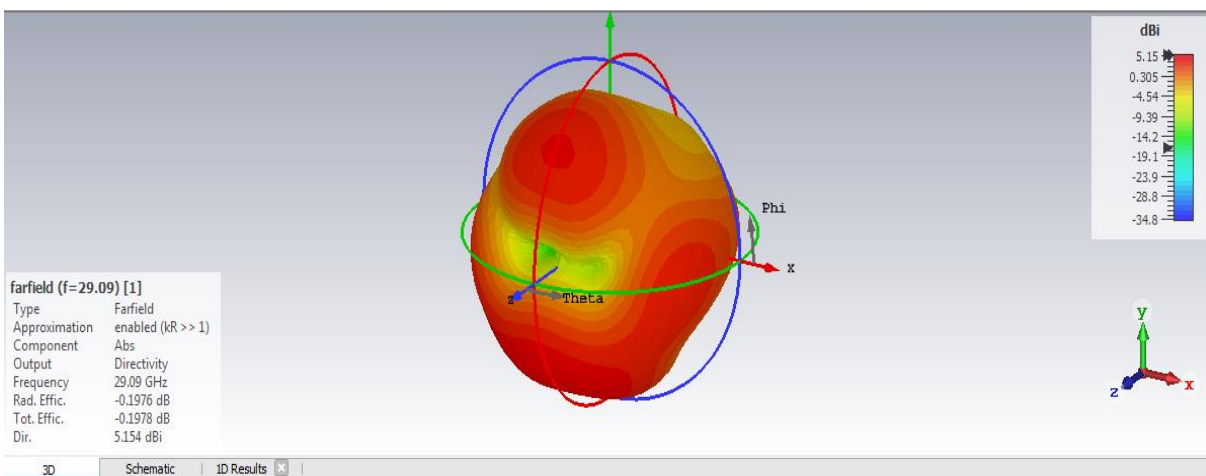


Figure III-7 Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments circulaires en parallèle

c) Le gain

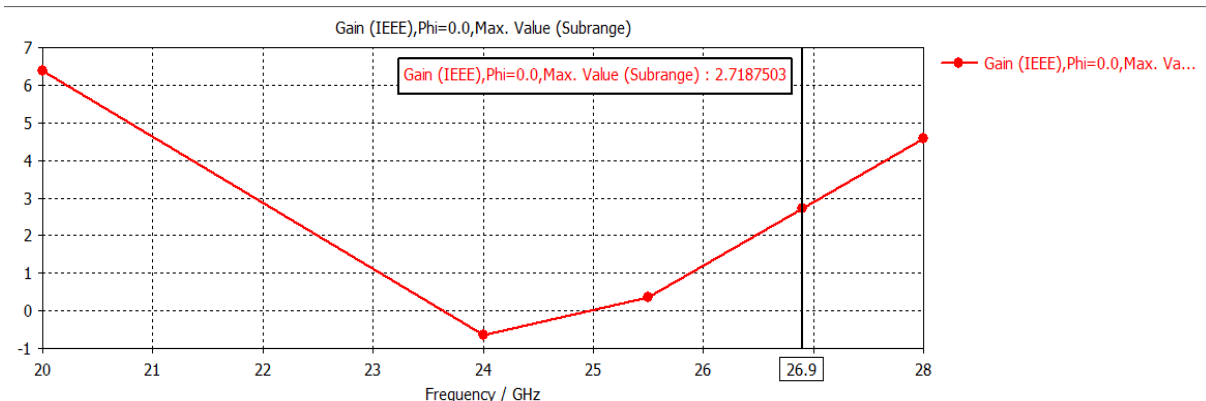


Figure III-8 Le gain en 3D d'une antenne 1 patch circulaire

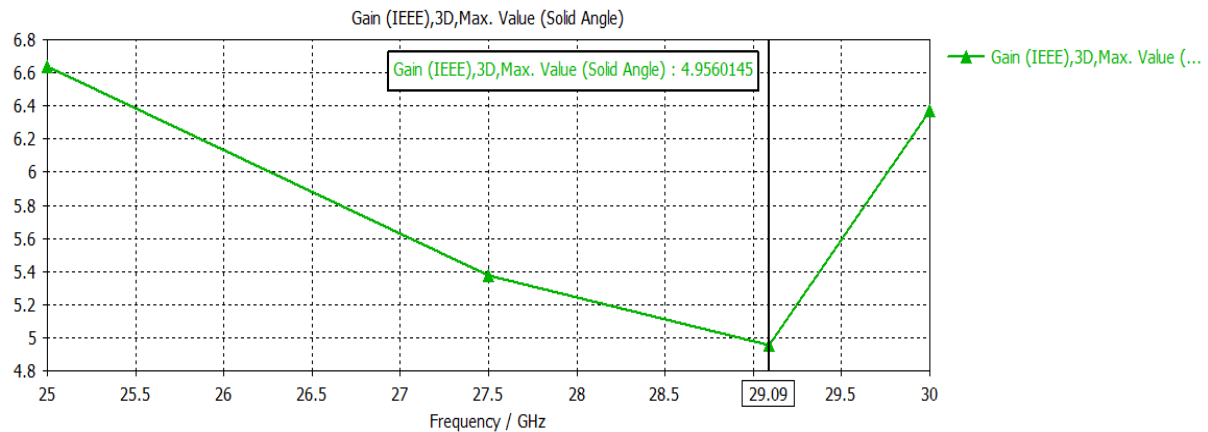


Figure III-9 le gain en 3D pour un réseau d'antenne patch 2 éléments circulaires

	Le gain (dBi)	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S_{11} (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)
Antenne1 patch	2.71	6.442	-56.027	26.9	1.067
Réseau 02patch parallèle	4.95	5.154	-43.38	29.09	0.762

Tableau III-3 Les résultats pour les différentes structures d'antennes

A partir de les figure III-5 III-6 III-7 III-8 III-9 et le tableau III-3 des coefficients de réflexion S_{11} et de la directivité d'une antenne d'un seul élément patch et d'un réseau à 2 éléments rayonnants avec l'alimentation parallèle

*La fréquence de résonance pour un réseau a augmenté par rapport à un seul élément ;

* La bande passante pour un réseau est un peu large par rapport à un seul élément ;

* La directivité pour une une antenne à un seul élément est améliorée par rapport à un réseau à alimentation parallèle ;

*Le gain pour un réseau à alimentation parallèle est amélioré par rapport à une antenne à un seul élément ;

*l'antenne à un seul élément est plus adaptée qu'un réseau à deux éléments parallèles.

III.6 Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle)

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et un espacement de $\lambda/2$ entre les deux patches alimentés en parallèle, un réseau d'antenne à deux patches circulaires est conçu.

Nous optant pour deux méthodes d'alimentation, la première est une alimentation série utilisant un transformateur quart d'onde et la deuxième est une alimentation parallèle par le biais d'un réseau d'alimentation sous forme d'une **jonction T** (diviseur de puissance) excité par une source 50Ω . **Figure.III.10** montre la géométrie des antennes proposées.

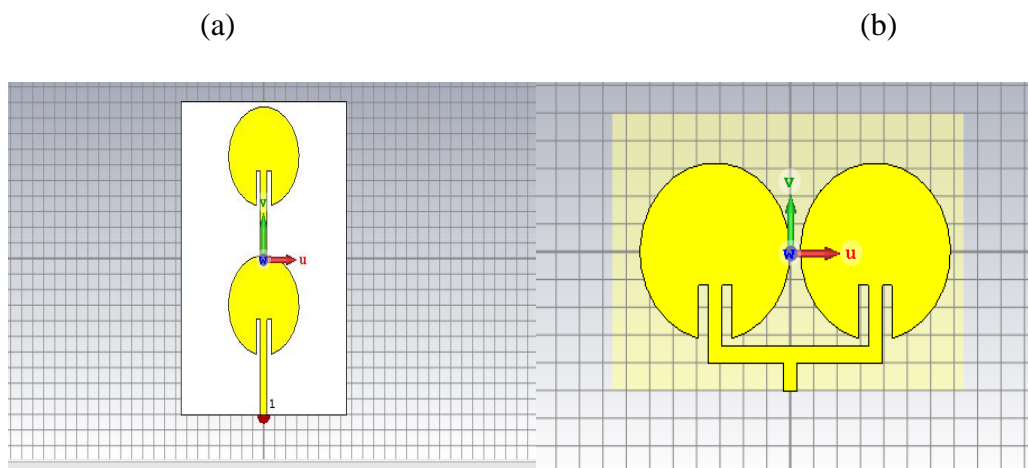


Figure III.10 Antenne réseau de 2 patches circulaires alimentées : a) en série et b) en parallèle

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
Rayon de deux patches, R	3.2
Longueur ligne alimentation, L_f	10
Largueur ligne alimentation, W_f	0.6
Largueur de l'encoche, w_e	0.4
Longueur de l'encoche	2.2
Largueur substrat, W_s	15
Longueur substrat, L_s	20
Permittivité de substrat ϵ_{r1}	2.2
Position d'alimentation Y_0	-10

Tableau III.4 Les paramètres de réseau en série deux éléments

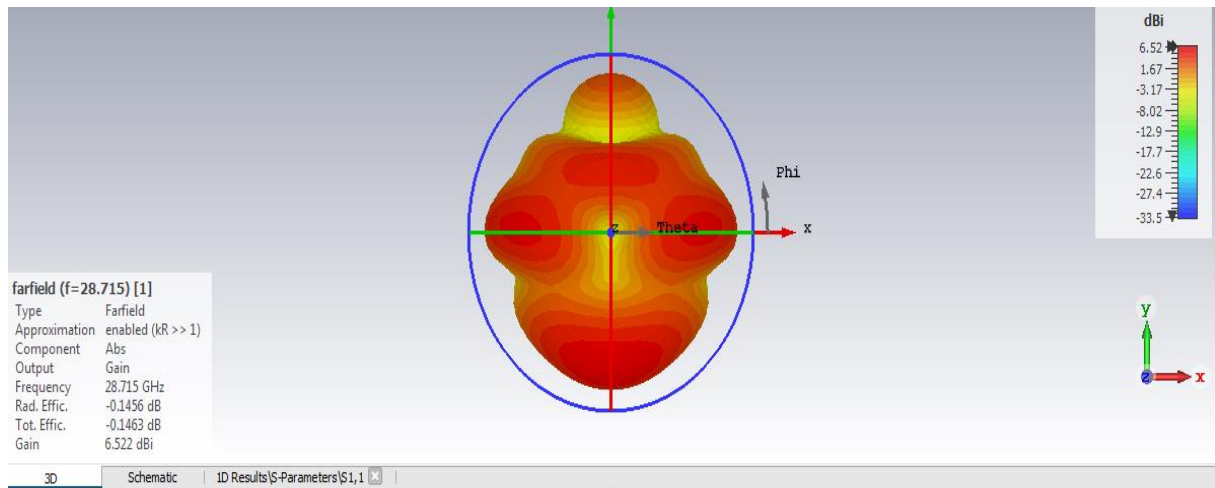


Figure III-10 Directivité en 3D pour un réseau d'antenne patch à 2 éléments circulaires avec une alimentation série

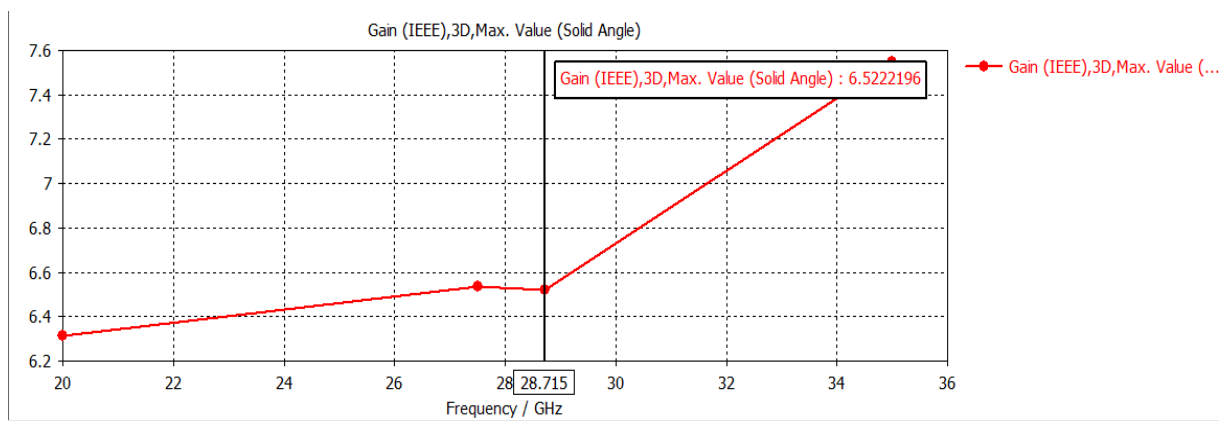


Figure III-11 le gain en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments circulaires par une alimentation en série.

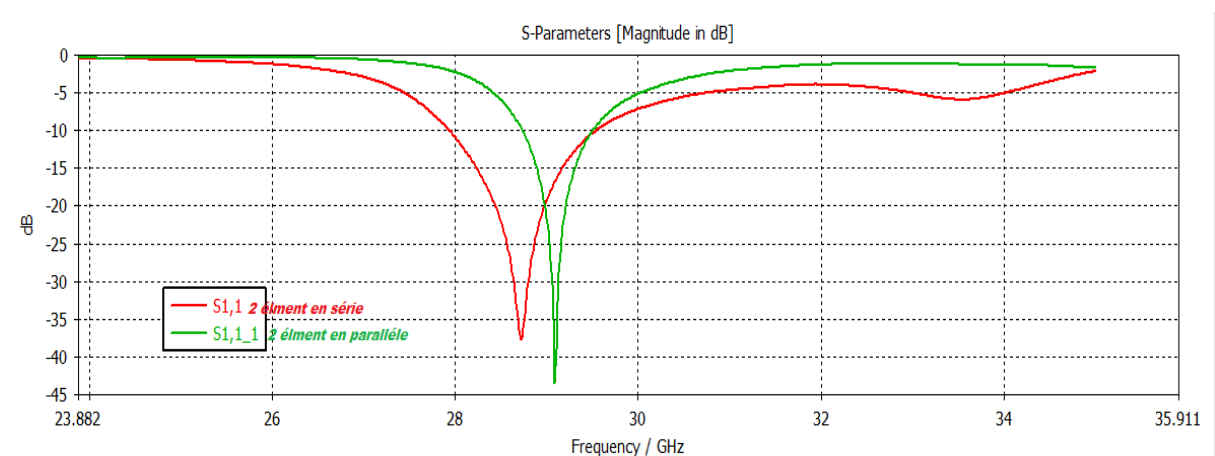


Figure III-12 Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle

A) Coefficient de reflexion

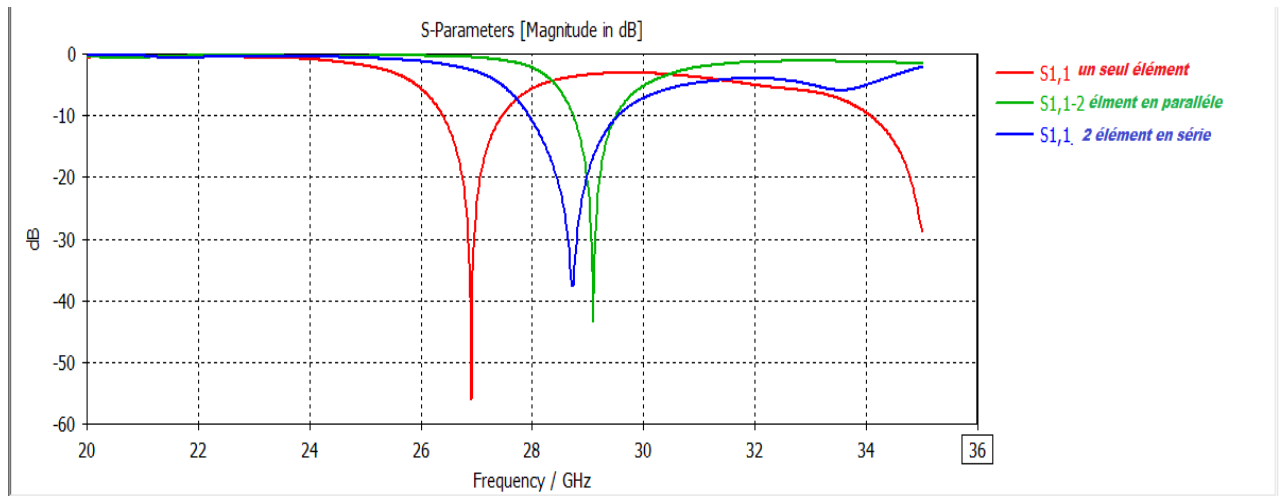


Figure III-13 Coefficient de réflexion S11 pour un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne à un seul élément.

B) La directivité

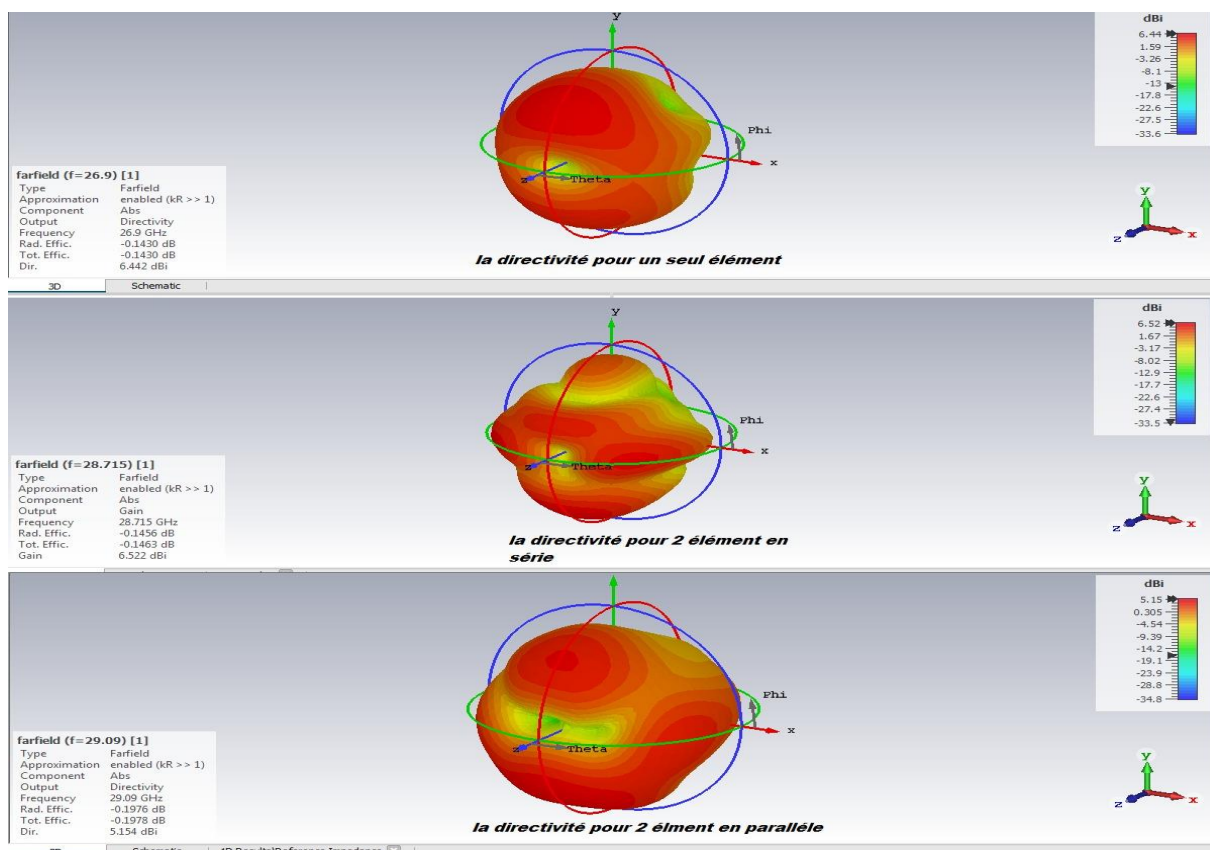


Figure III-14 La directivité en 3D pour les différentes structures : un seul élément 2 éléments en série 2 éléments en parallèle

C) Le gain

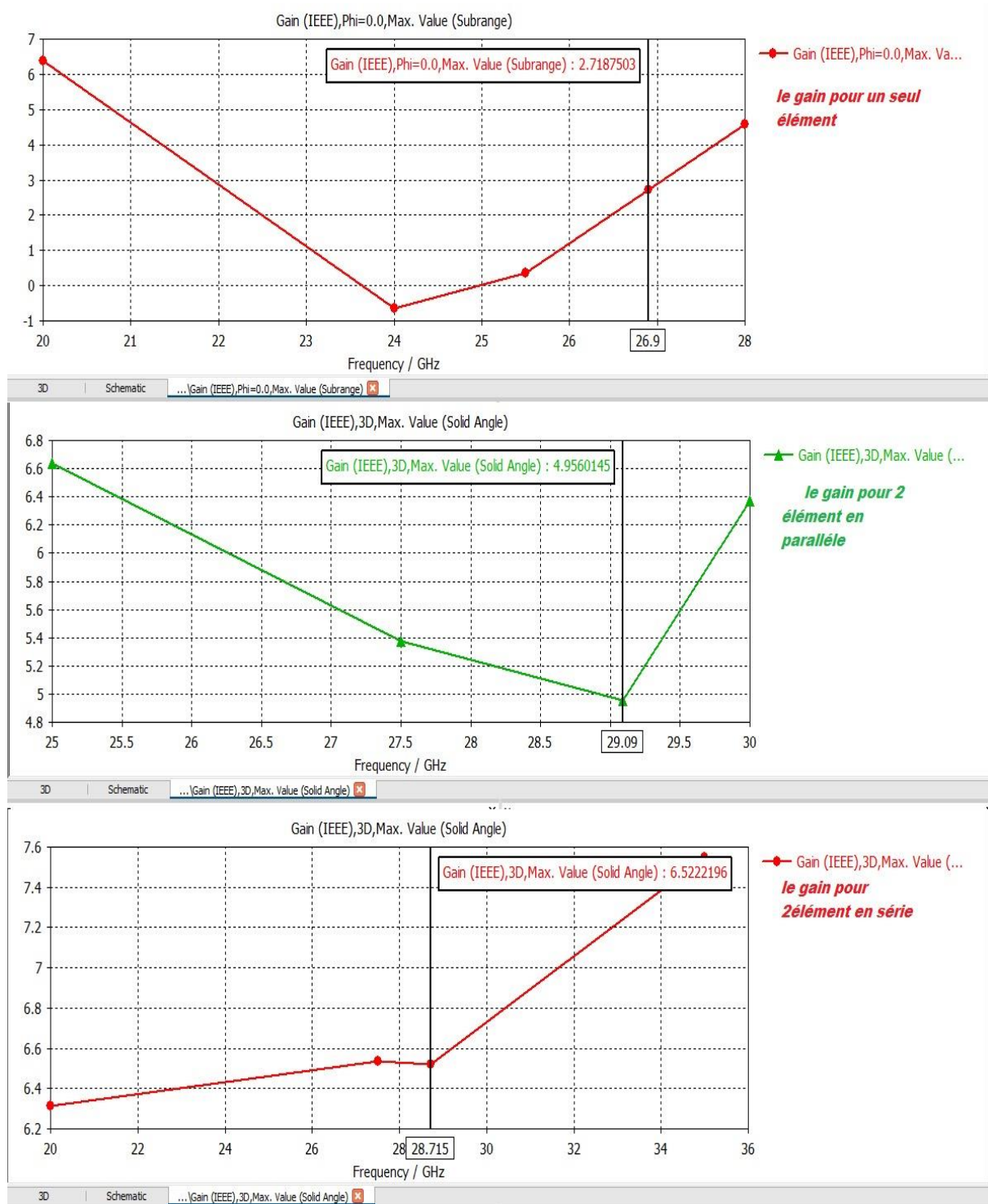


Figure III-15 Le gain pour les différentes structures

	Directivité (dBi)	Le coefficient de réflexion S_{11} (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHz)	Le gain (dBi)
Antenne 1 patch	6.442	-56.027	26.9	1.027	2.71
Réseau 02 patches en parallèle	5.154	-43.38	29.09	0.762	4.95
Réseau 02 patches en série	6.668	-37.62	28.715	1.598	6.52

Tableau III-5 Les résultats pour les différentes structures d'antennes

D'après l'image III-13, III-14, III-15 du coefficient de réflexion S_{11} et de la directivité d'une antenne constituée d'un seul élément patch et d'un réseau à 2 éléments rayonnants avec les 02 types d'alimentation : série et parallèle, et les résultats indiqués dans le tableau III-5 des fréquences de résonances, les bandes passantes et la directivité des 03 structures, et on remarque que :

- La directivité pour un réseau à alimentation série est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément et à un réseau en parallèle ;
- Le gain pour un réseau à alimentation série est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément et à un réseau en parallèle ;
- L'antenne est plus adaptée qu'un réseau ;
- La fréquence de résonance de deux alimentations est presque la même ;
- Dans la gamme millimétrique les réseaux série est mieux que les réseaux parallèle.

III.7 Effet de la variation du rayon du patch

A) Coefficients de réflexion S_{11}

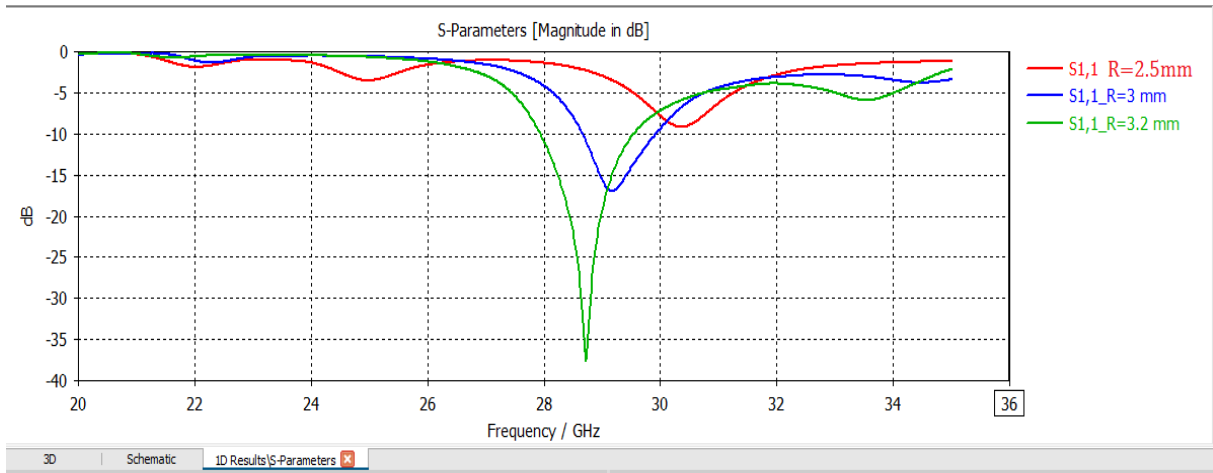


Figure III-16 Coefficients de réflexion (S11) pour différents R du patch

b) Directivité et gain

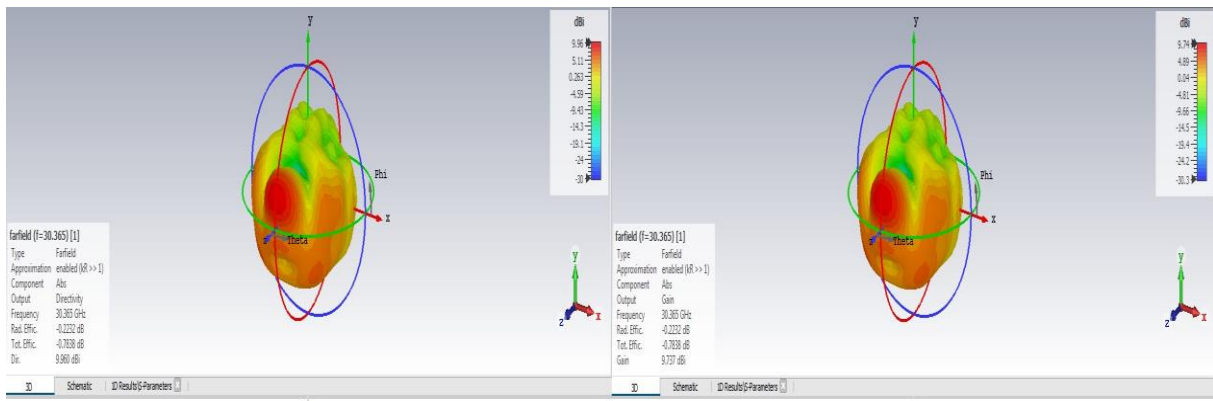


Figure III-17 Directivité, gain pour R=2.5 mm

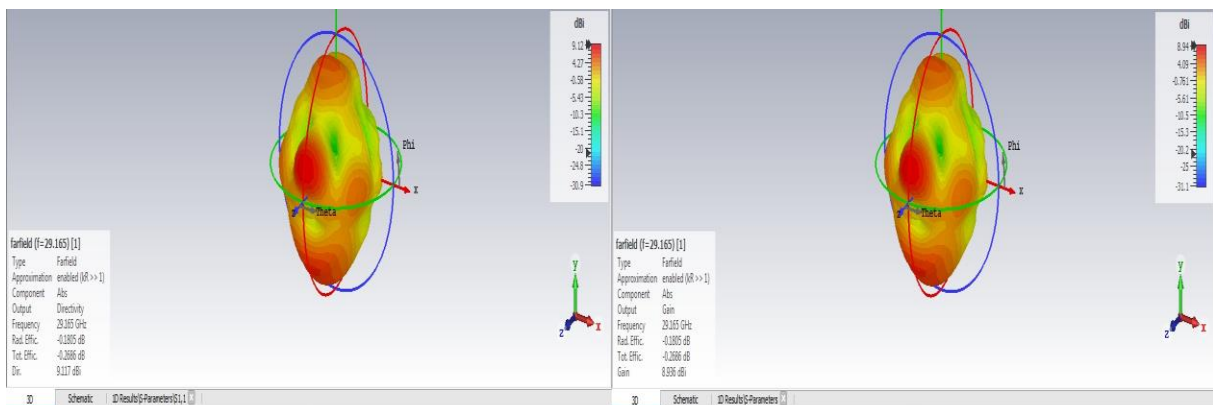


Figure III-18 Directivité et gain pour R=3mm

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S1, 1(dB)	D (dBi)	G (dBi)
R=2.5	30.365	/	-9.11	9.960	9.737
R=3	29.165	1.255	-16.97	9.117	8.936
R=3.2	28.715	1.598	-37.62	6.668	6.552

Tableau III-6 Caractéristiques de réseau patches en fonction du rayon

Après avoir changé le rayon du patch on note :

- Lorsque nous augmentons le rayon, nous obtenons une amélioration de la bande passante et d'adaptation.
- Tandis que nous obtenons une diminution de directivité et du gain avec changement significatif de la fréquence de résonance
- Quand R=2.5 le réseau n'est plus adapté.

III.8 Comment Simuler une Couche FSS

Au-dessus du patch d'antenne qui a été créé et à une distance de $F=30\text{mm}$, 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 $L=1.5\text{mm}$ de matériau PEC;

Deuxièmement, nous avons ajouté un autre carré, plus petit que le premier, avec une longueur de $A1=1.2\text{mm}$ du matériau vacuum ;

Troisièmement, nous avons créé un cercle avec un diamètre de $R1=0.5\text{mm}$ et en matériau PEC ;

Quatrièmement, nous avons ajouté un dernier carré d'une longueur de $A2=0.6\text{mm}$ du matériau vacuum ;

Enfin, nous avons créé un cercle avec $R2=0.25\text{mm}$ de diamètre de matériau de PEC.

Ensuite, nous avons collecté ces formes puis avons commencé à répéter ce motif *5 fois suivant Y et 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.

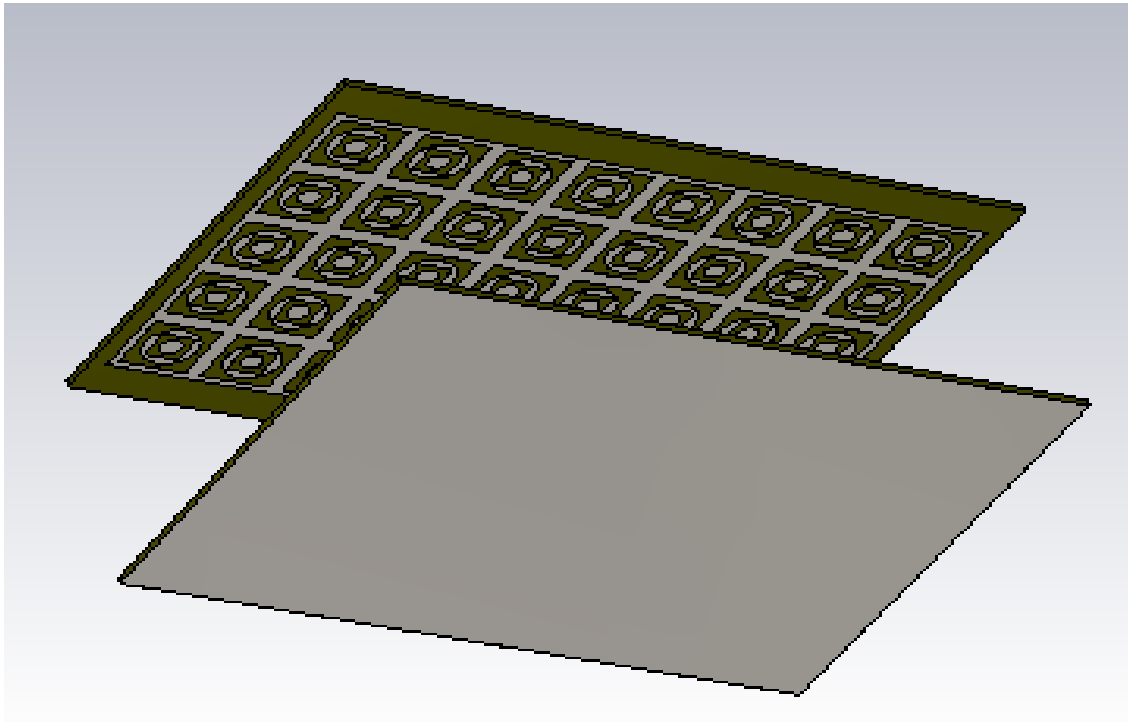


Figure III-19 Antenne patch à FSS.

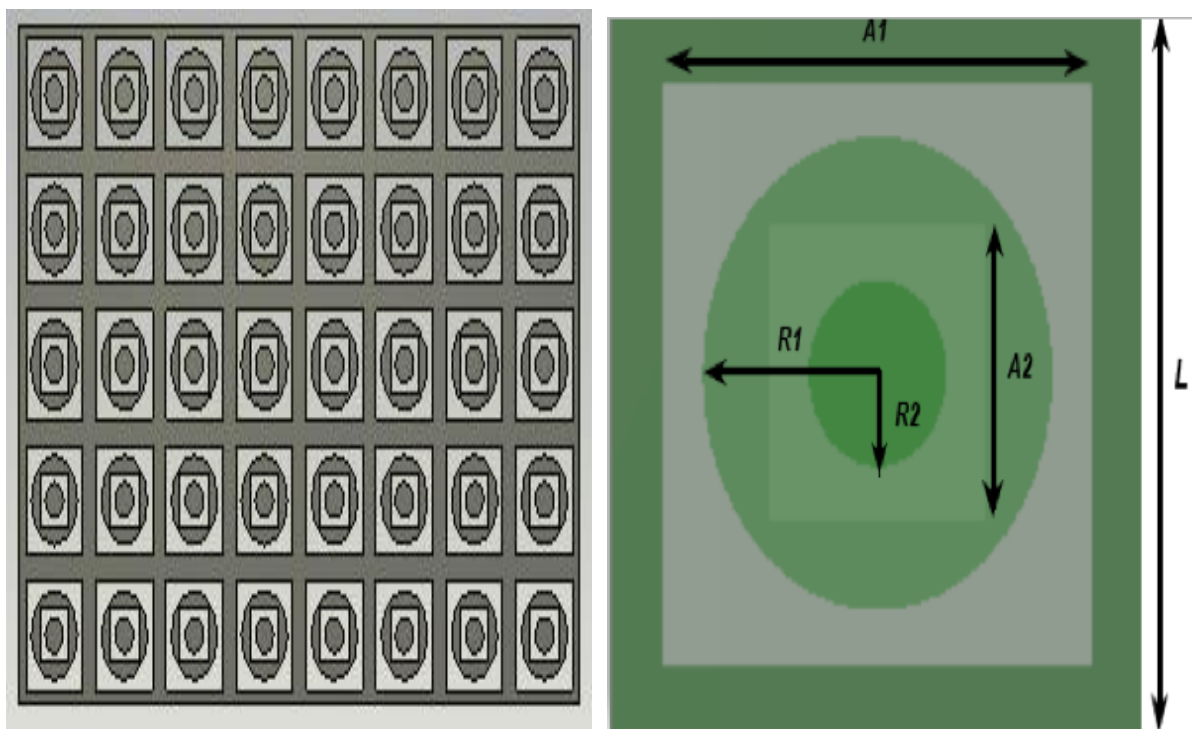


Figure III-20 Les motifs de la couche FSS.

Nous listerons les dimensions dans le tableau suivant :

<i>Paramètres</i>	Dimension (mm)
Longueur de côté	L=1.5
Longueur de la boucle carrée extérieure	A1=1.2
Rayon de la bague extérieure	R1=0.5
Longueur de la boucle intérieure	A2=0.6
Rayon de l'anneau intérieur	R2=0.25
Distance entre antenne patch et FSS	30mm

Tableau III-7- Caractéristiques et dimensions du motif

III.8 Effet de la variation dans la distance F

A) Coefficient de réflexion S_{11}

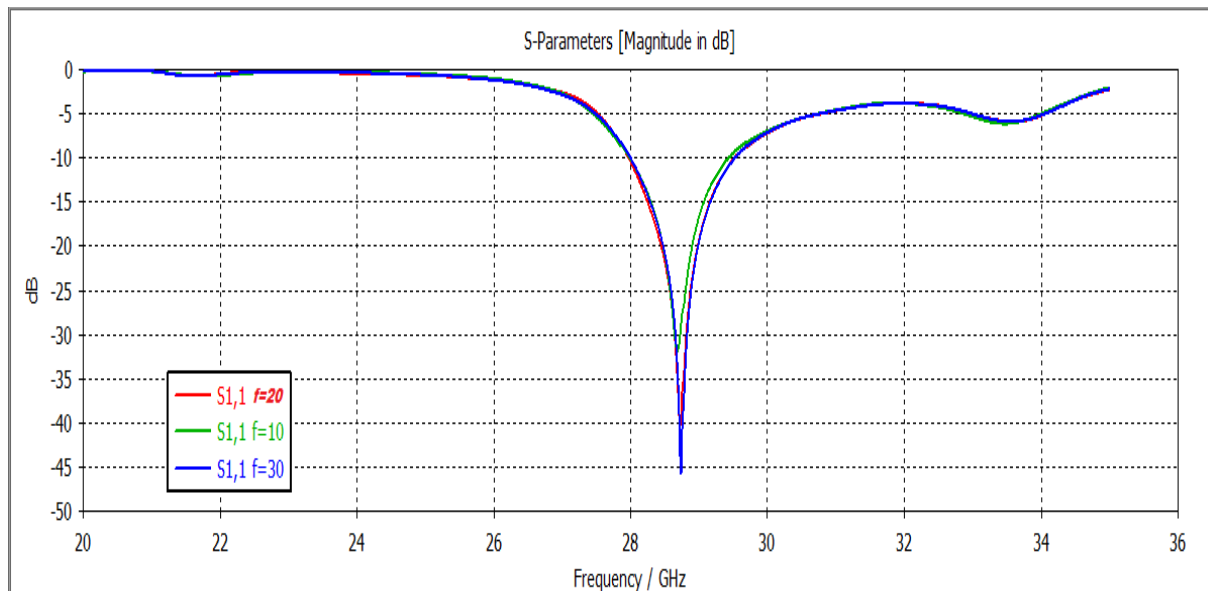


Figure III-21 Coefficients de réflexion(S_{11}) pour différents valeurs de la distance F .

B) Directivité et gain

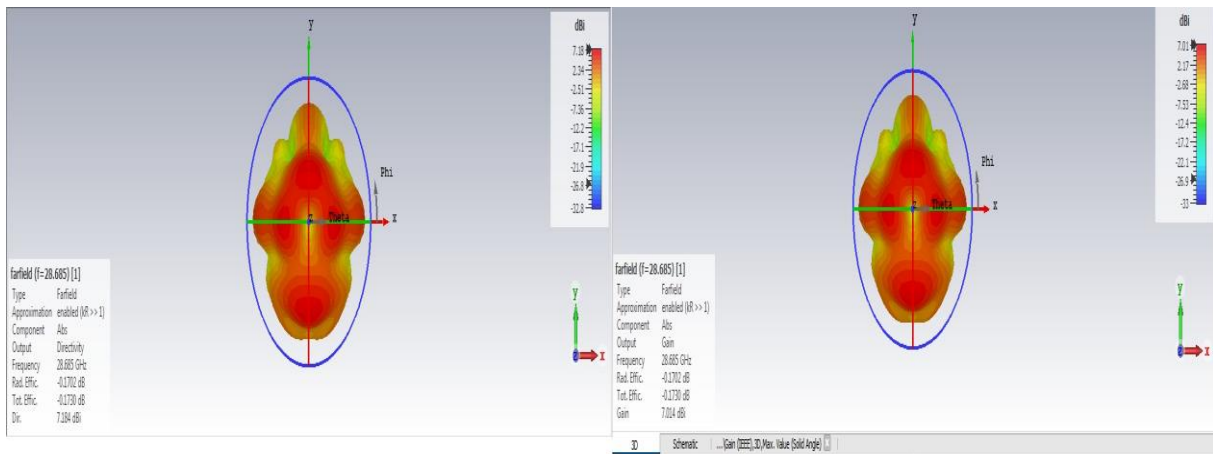


Figure III-22 directivité et gain pour F=10mm

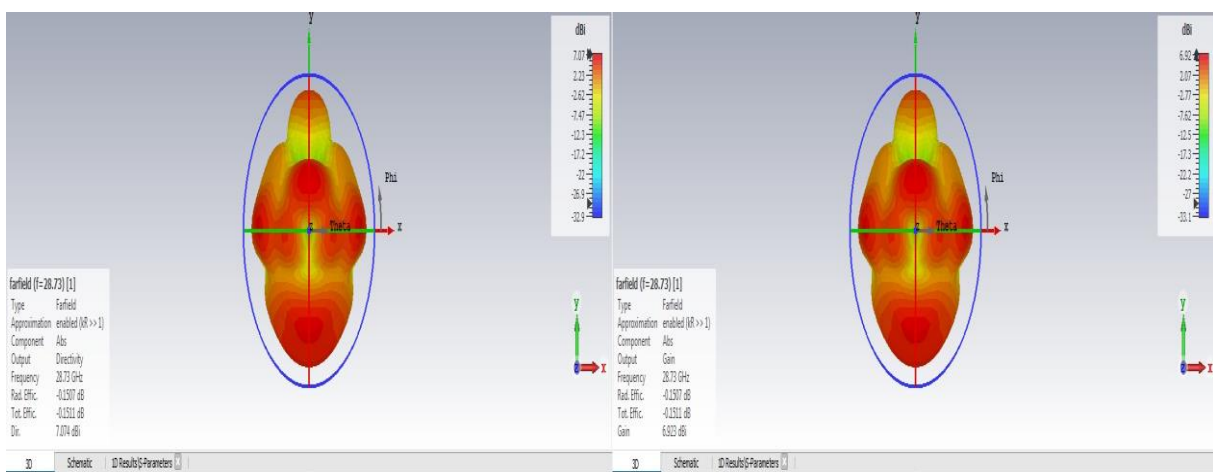


Figure III-23 directivité et gain pour F=20mm

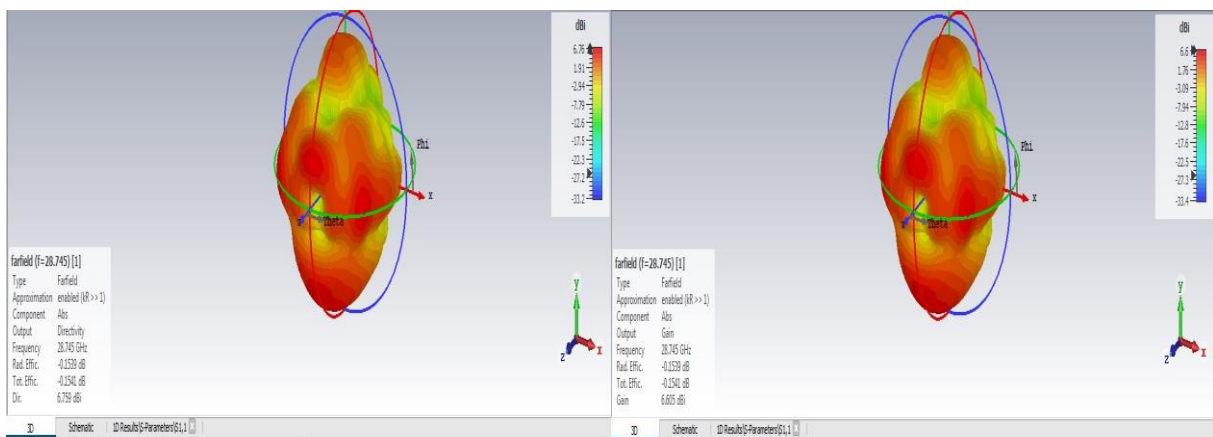


Figure III-24 directivité et gain pour F =30mm

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G (dBi)
F=10mm	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014
F=20mm	28.73	1.558	-40.58	7.074	6.923
F=30mm	28.745	1.535	-45.76	6.759	6.605

Tableau III-8 Caractéristiques de réseaux patch à FSS en fonction de la variation du F

Après le changement de la distance F on remarque :

- Qu'en augmentant la distance F on obtient une augmentation de la bande passante et amélioration de l'adaptation (S11), peu de diminution du gain et de la directivité
- Une augmentation légère en fréquence de résonance.

III.10 Effet de la variation de l'épaisseur du superstrat

A) Coefficient de réflexion

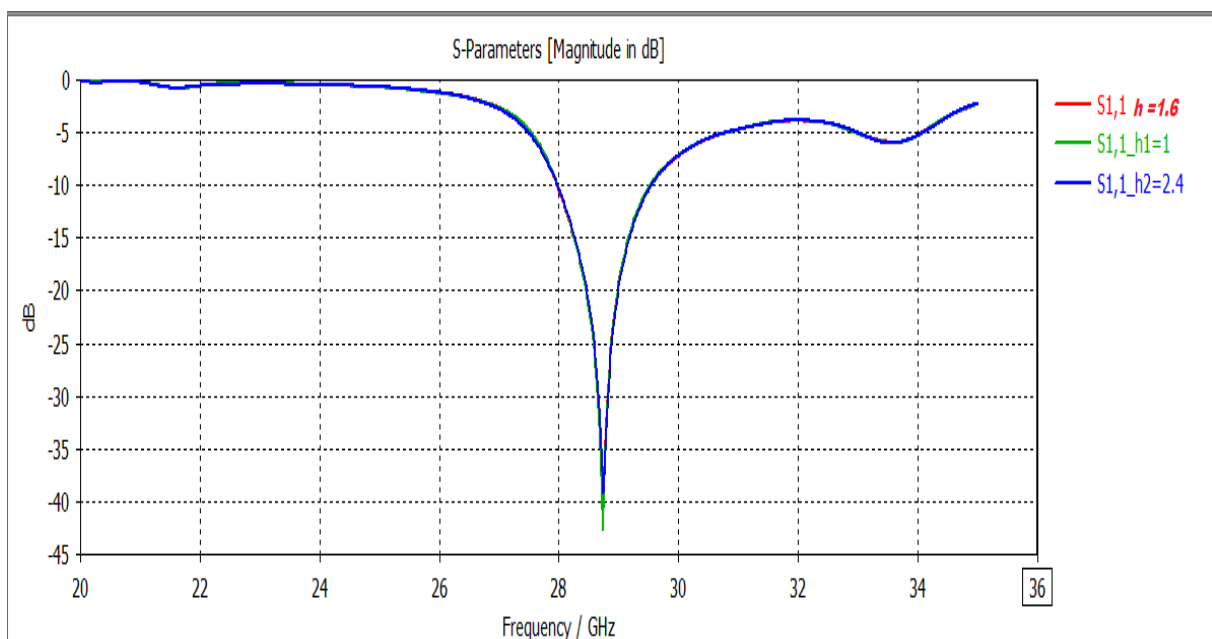


Figure III-25 Coefficients de réflexion S11 pour différentes épaisseurs du superstrat h

B) Directivité et gain

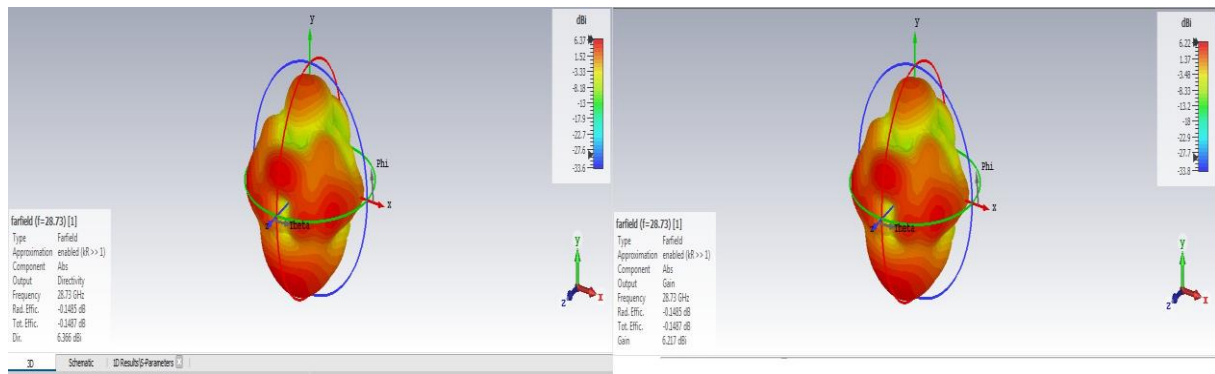


Figure III-26 Directivité et le gain en 3D pour h_1

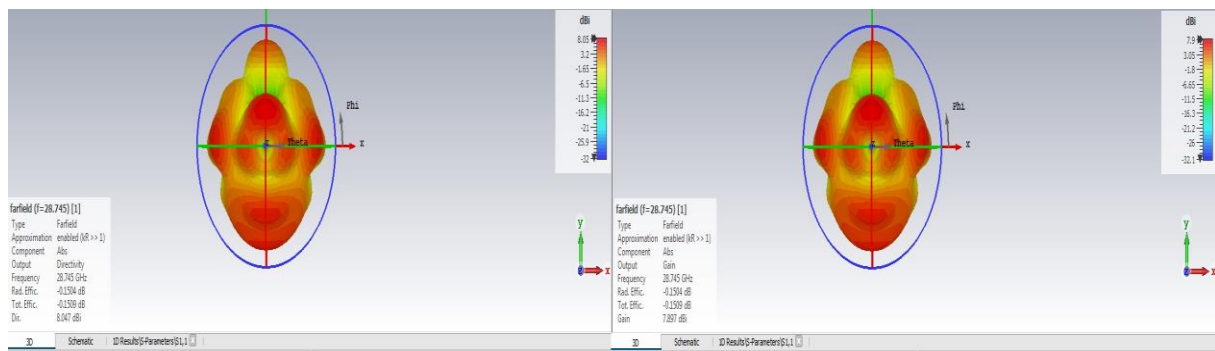


Figure III-27 Directivité et le gain en 3D pour h_2

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G(dBi)
H1=1mm	28.73	1.531	-42.52	6.356	6.217
H =1.6mm	28.73	1.555	-40.58	7.074	6.923
H 2=2.4mm	28.745	1.558	-39.11	8.047	7.807

Tableau III-9Caractéristiques de réseau patches à FSS en fonction de l'épaisseur du superstrat.

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

*Qu'en augmentant l'épaisseur h on obtient une augmentation de la bande passante et amélioration de la directivité et aussi du gain), une petite diminution de l'adaptation.

* léger Changement en fréquence de résonance pour h_2

III.11 Effet de la variation de la permittivité du superstrat

A) Coefficient de réflexion S_{11}

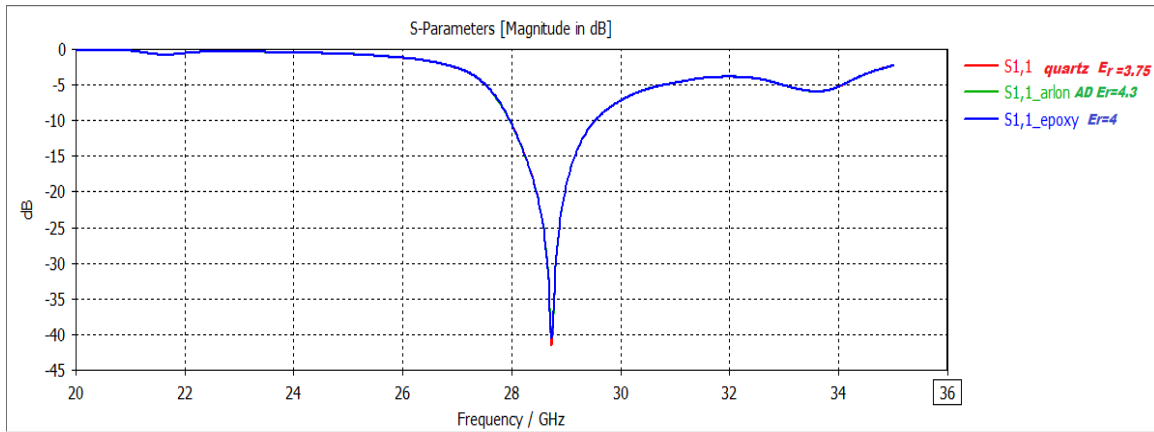


Figure III-28 Coefficients de réflexion (S11) pour la permittivité du superstrat

A) Directivité et gain

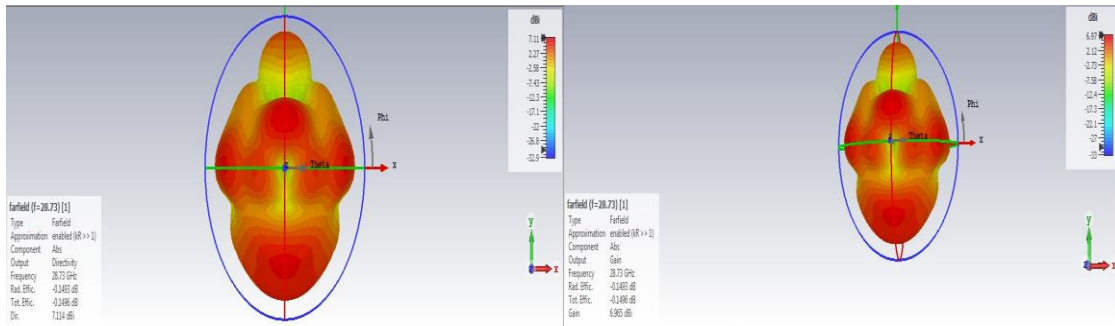


Figure III-29 Le gain et directivité en 3D pour Quartz (Fused)(lossy) $\epsilon_r=3.75$

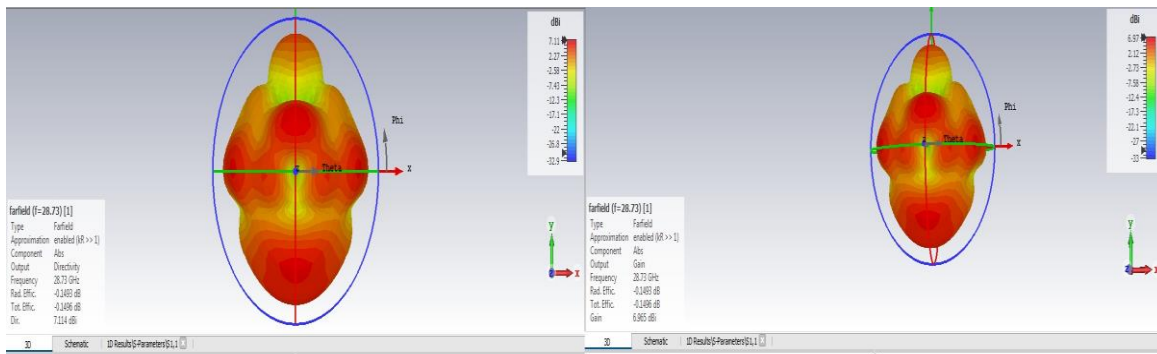


Figure III-30 Directivité, gain en 3D pour Arlon AD 4305(lossy) $\epsilon_r = 4.3$.

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G (dBi)
$\epsilon_r=3.75$	28.73	1.555	-41.68	7.114	6.965
$\epsilon_r=4$	28.73	1.555	-40.58	7.074	6.923
$\epsilon_r=4.3$	28.73	1.556	-40.52	7.150	6.997

Tableau III-10 Caractéristiques de réseaux patches 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.

III.12 Etude de la structure avec un défaut

Défaut N : 1

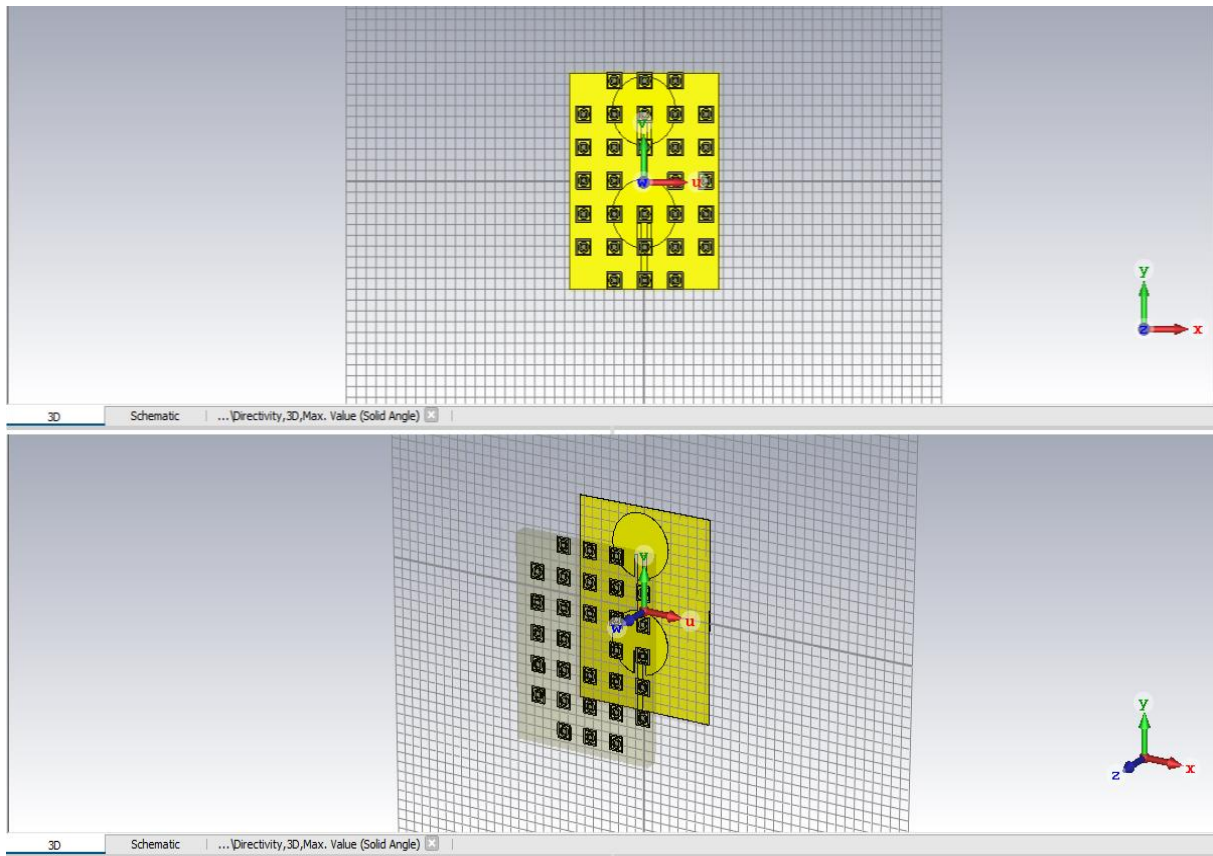


Figure III-31 Défaut N:1

A) Coefficient de réflexion

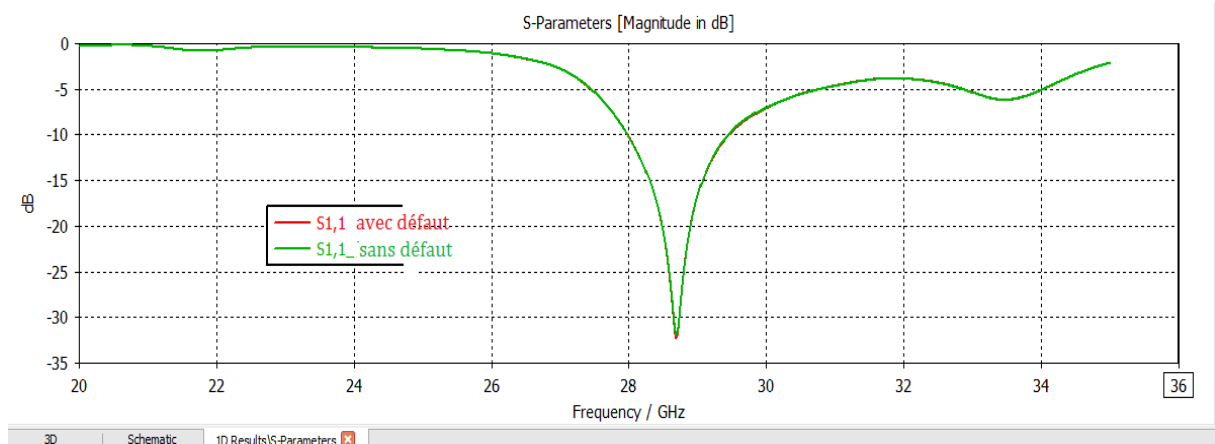


Figure III-32 Coefficient de réflexion avec et sans défaut

B) Directivité et gain

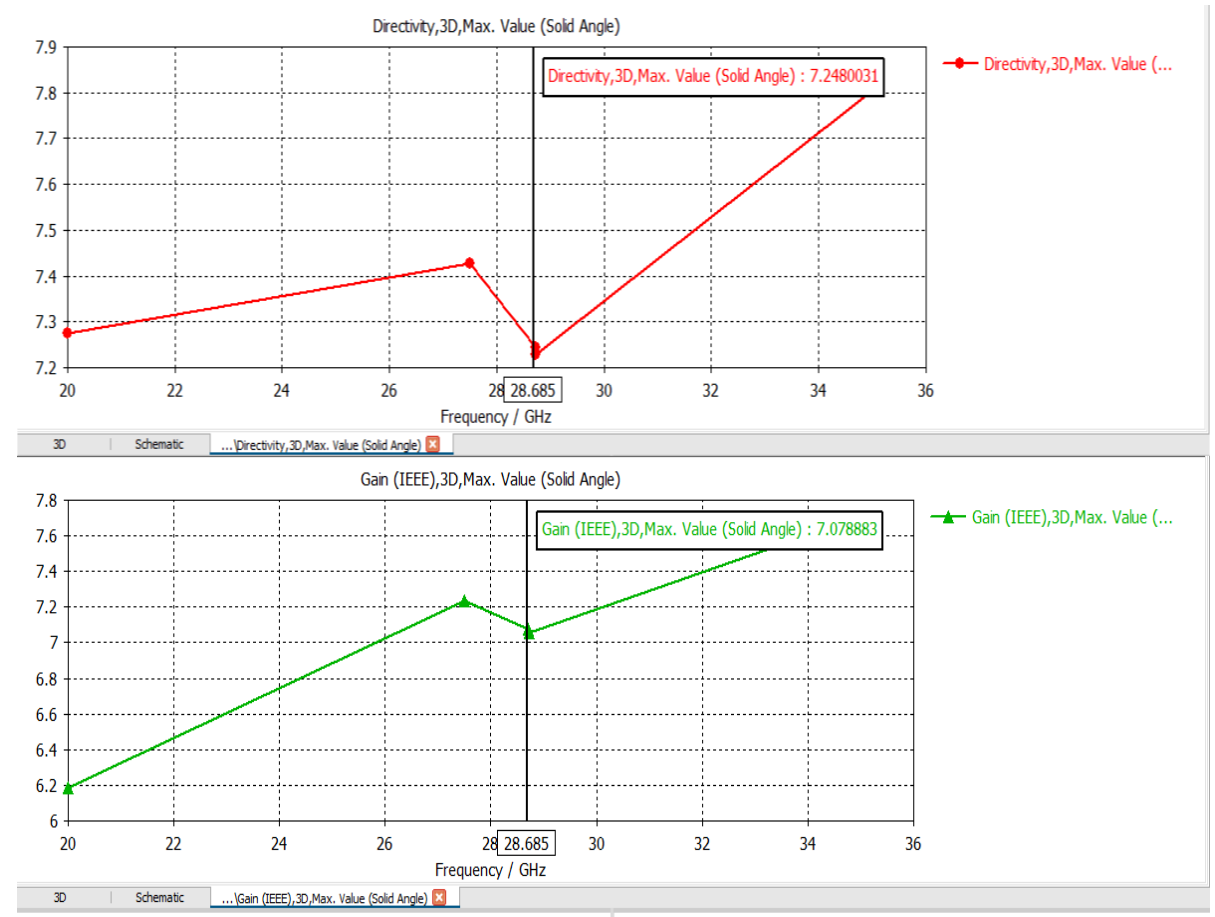


Figure III-33 le gain et la directivité pour le défaut N°1

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G(dBi)
Avec un défaut	28.685	1.463	-32.23	7.248	7.078
Sans défaut	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014

Tableau III-11 Caractéristiques de réseaux patch à FSS avec et sans défaut

Après avoir changé la forme de la couche FSS, nous avons constaté :

- Une augmentation de la bande passante et amélioration du gain et de directivité ;
- La fréquence de résonance et l'adaptation S11 sont constants.

Défaut N : 2

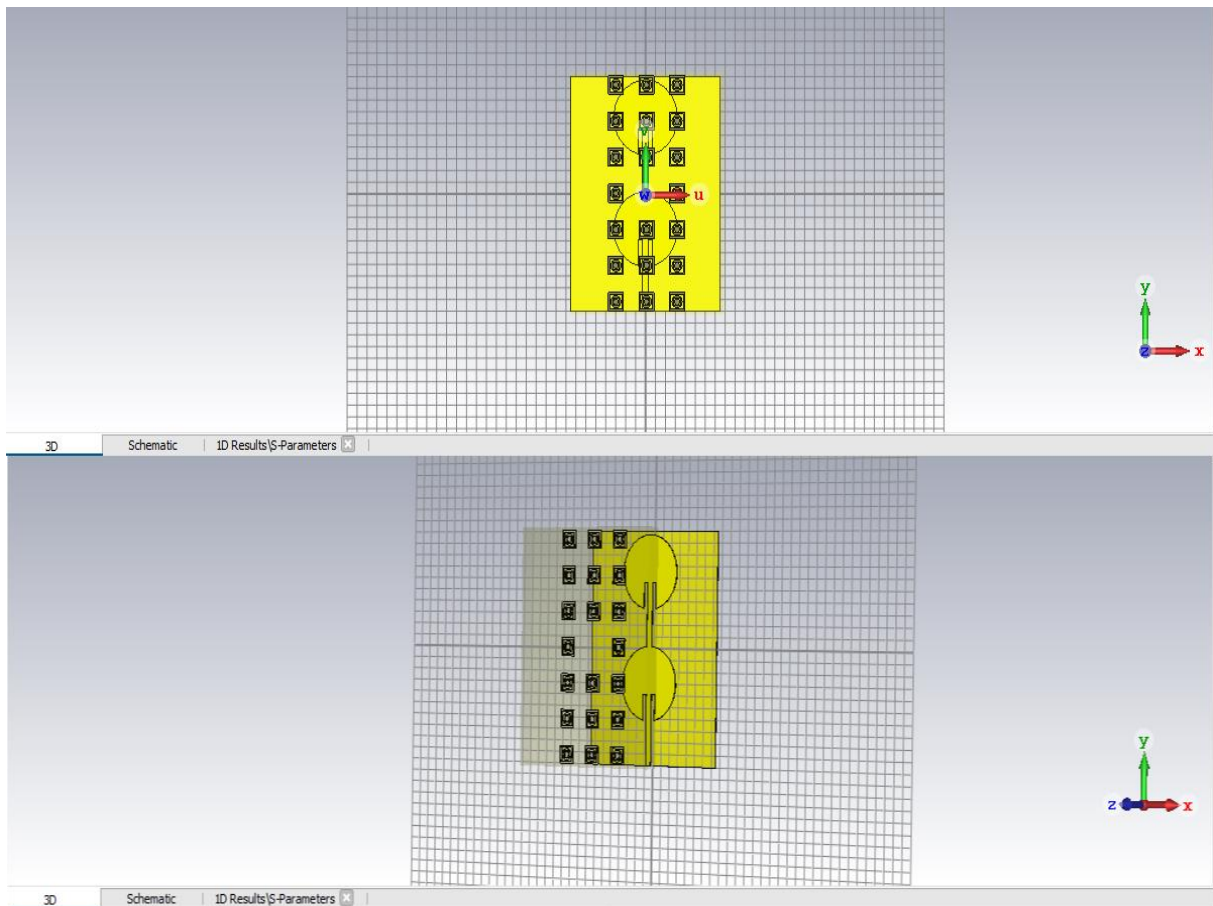


Figure -III-34 Défaut N°2

A) Coefficient de réflexion

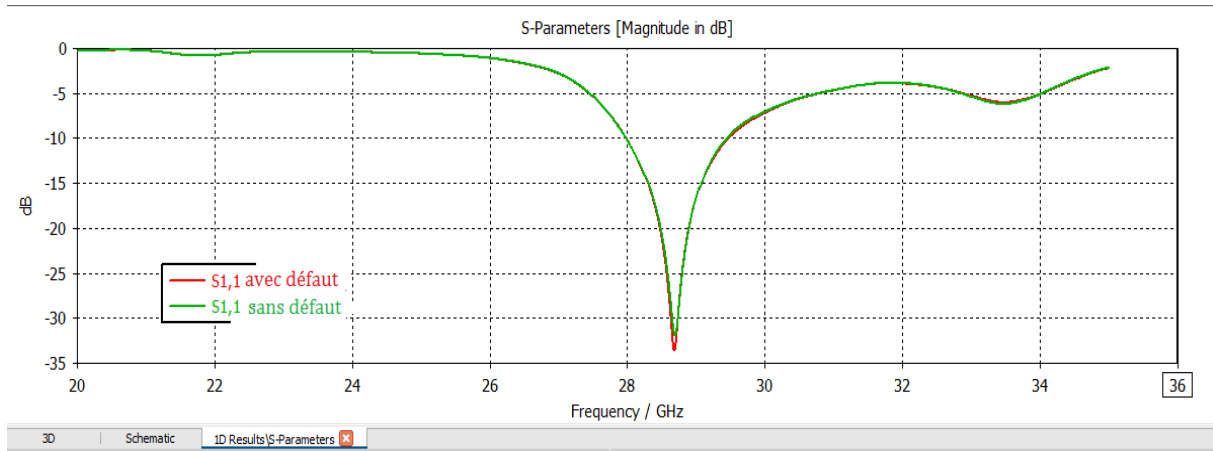


Figure III-35 coefficient de réflexion avec un défaut et sans défaut

B) Directivité et gain

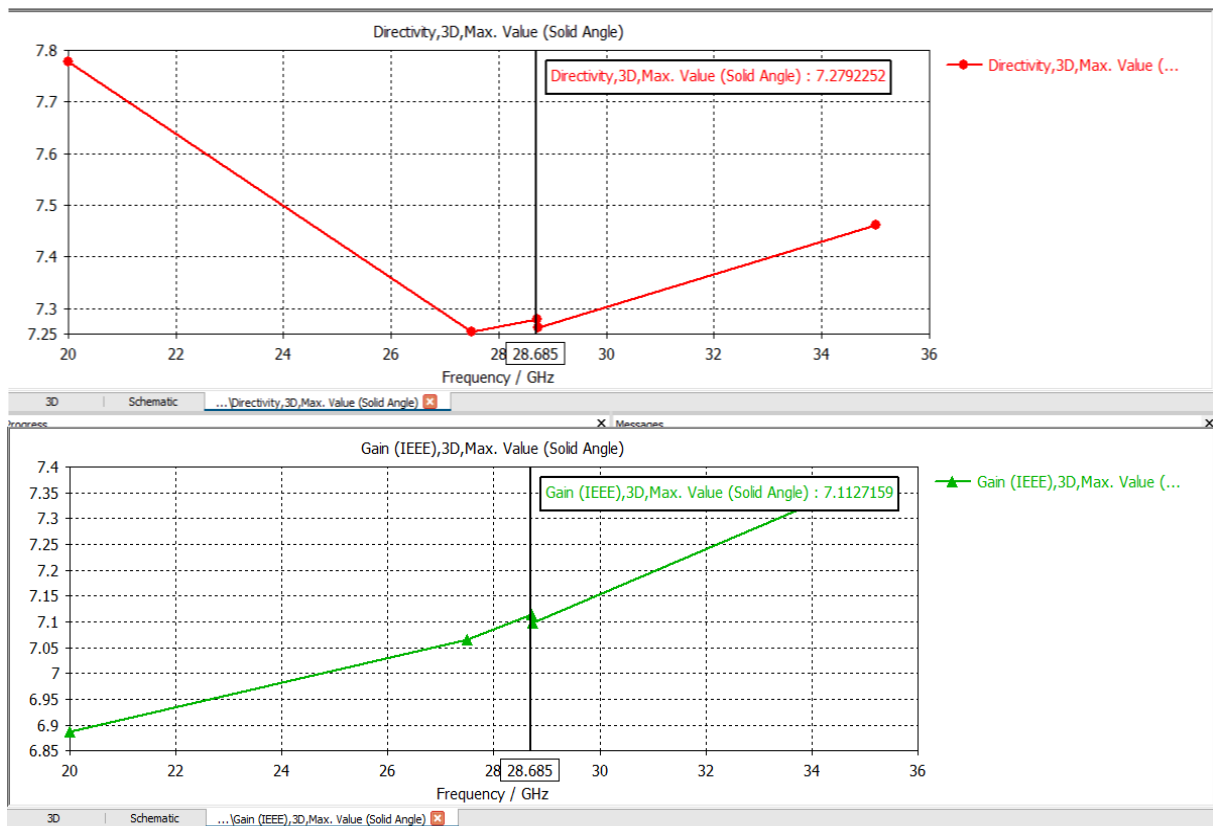


Figure III-36 Le gain et la directivité pour le défaut N°2

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G (dBi)
Avec défaut	28.685	1.477	-33.58	7.279	7.112
Sans défaut	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014

Tableau III-12 Caractéristiques de réseaux patch à FSS avec et sans défaut

Après avoir changé la forme de la couche FSS, nous avons constaté :

- Une augmentation de la bande passante et amélioration du gain et de directivité ;
- La fréquence de résonance est constante avec un changement léger en adaptation S11.

Défaut N 3

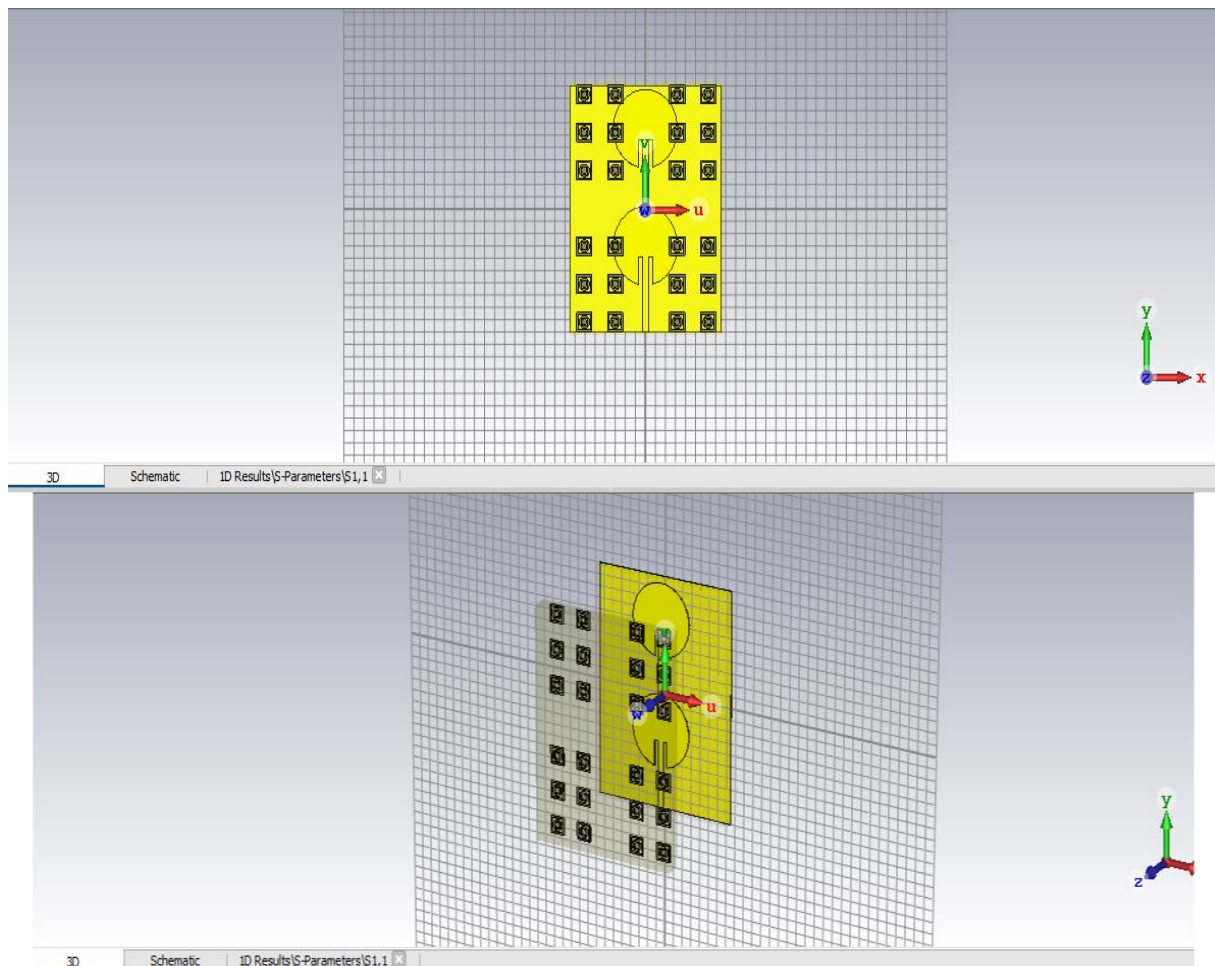


Figure III-37 Défaut N°3

A) Coefficient de réflexion

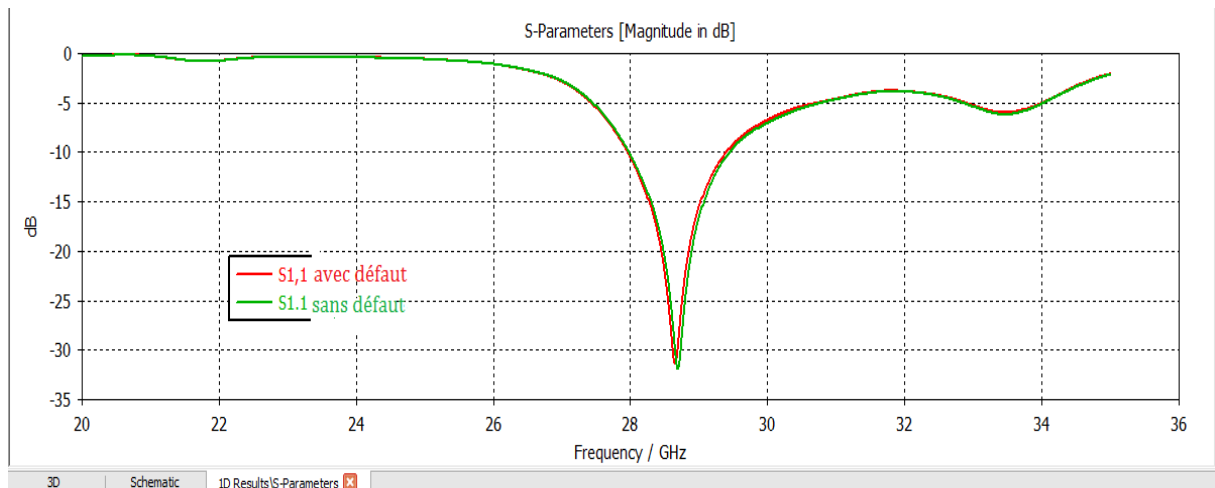


Figure III-38 Coefficient de réflexion avec un défaut et sans défaut

B) Directivité et gain

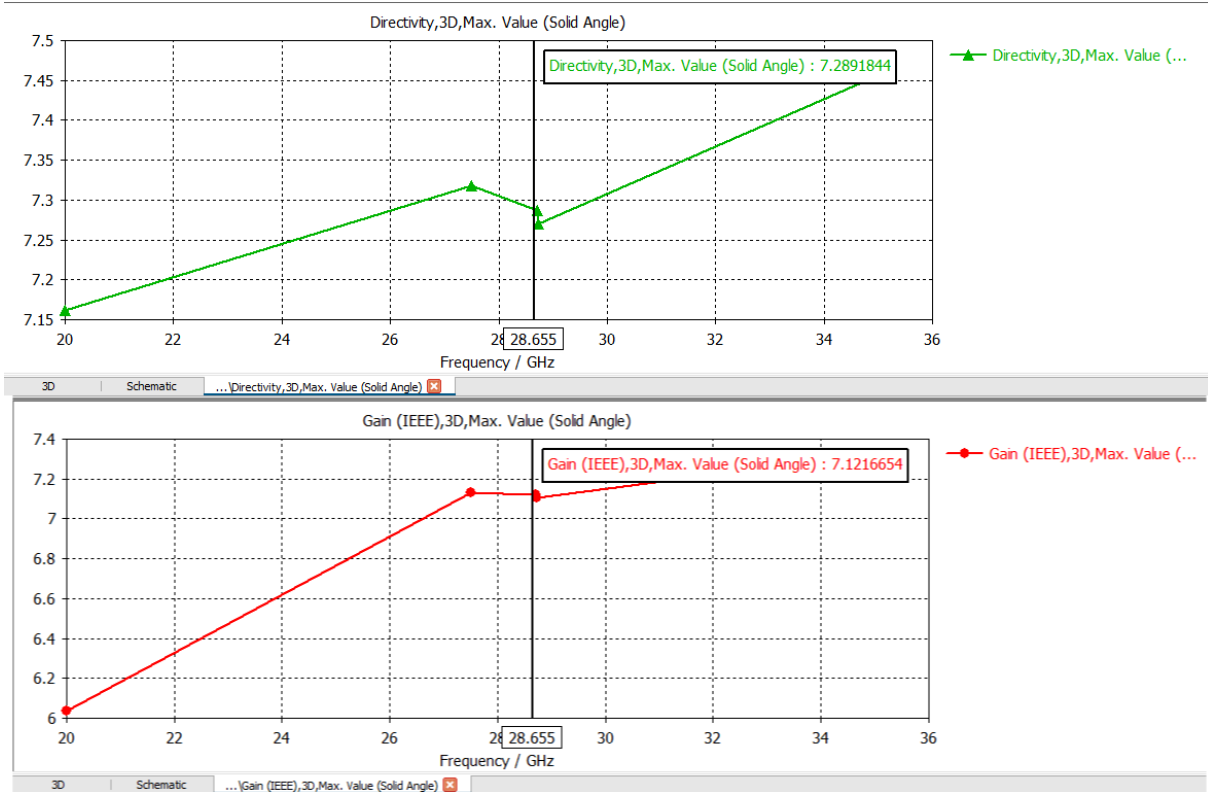


Figure III-39 Le gain et la directivité pour le défaut N°3

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G (dBi)
Avec défaut	28.655	1.423	-31.35	7.289	7.121
Sans défaut	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014

Tableau III-13 Caractéristiques de réseaux patch à FSS avec et sans défaut

Après avoir changé la forme de la couche FSS, nous avons constaté :

- Une diminution de la bande passante et amélioration du gain et de directivité ;
- L'adaptation est presque constante avec un changement léger en fréquence de résonance.

Défaut N°4

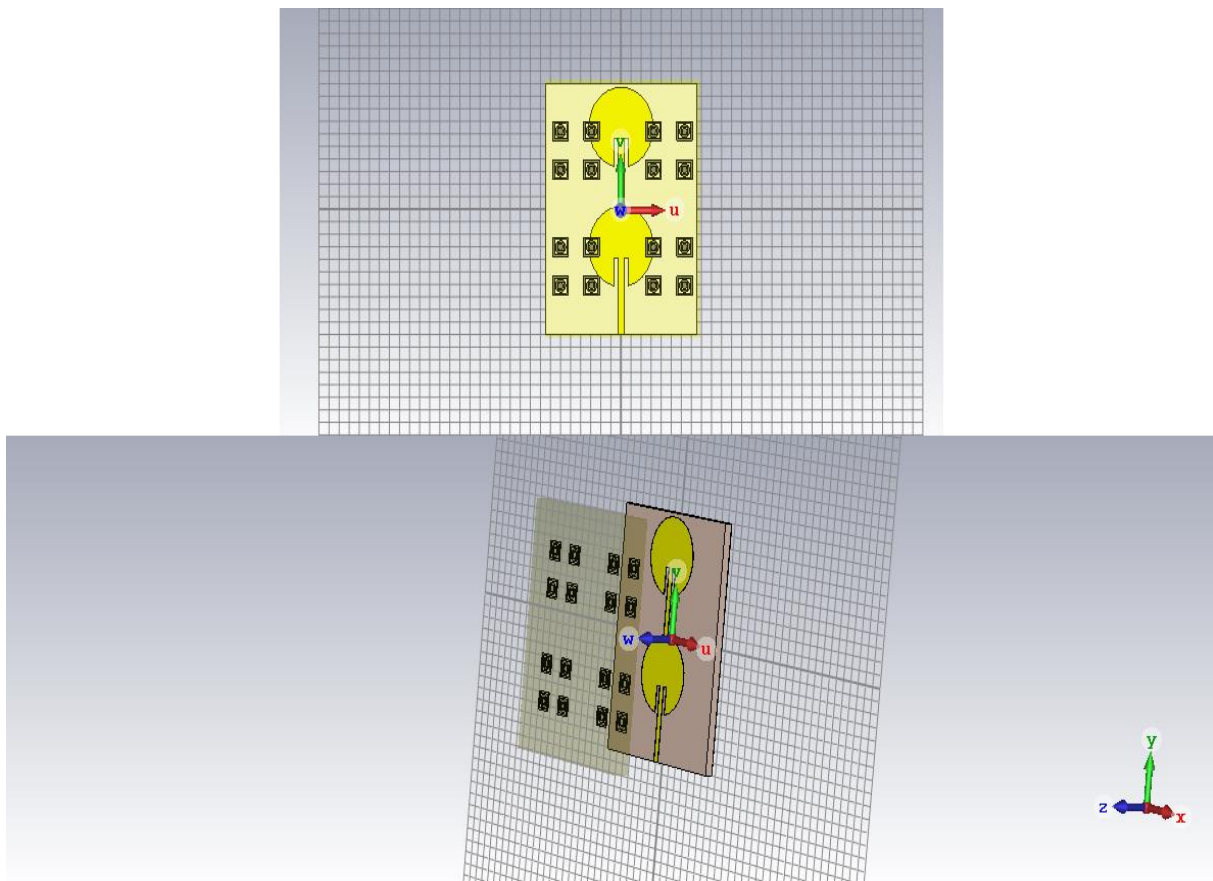


Figure III-40 Défaut N°4

A) Coefficient de réflexion

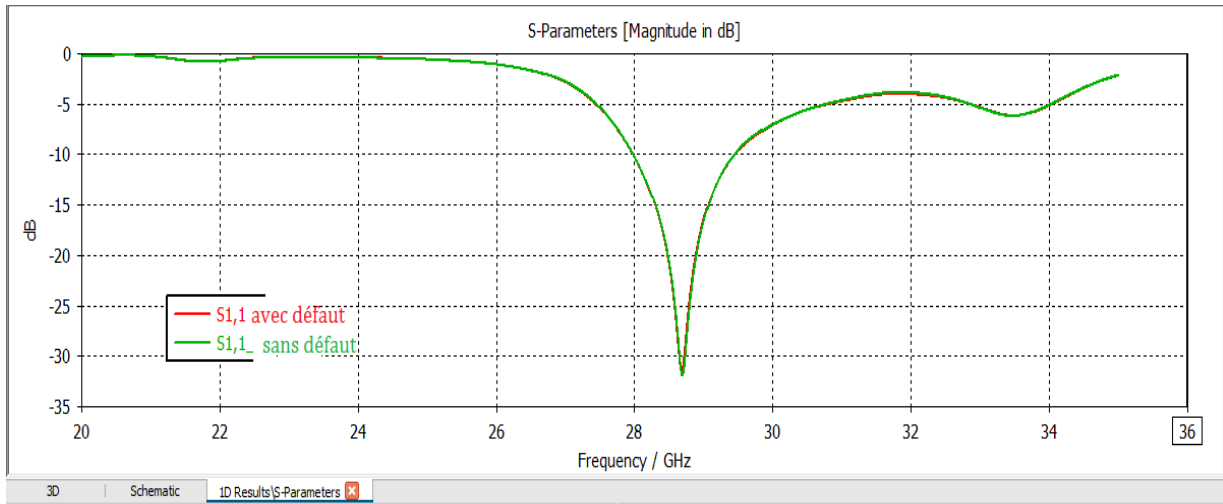


Figure III-41 coefficient de réflexion pour une antenne avec et sans défaut

B) Directivité et gain

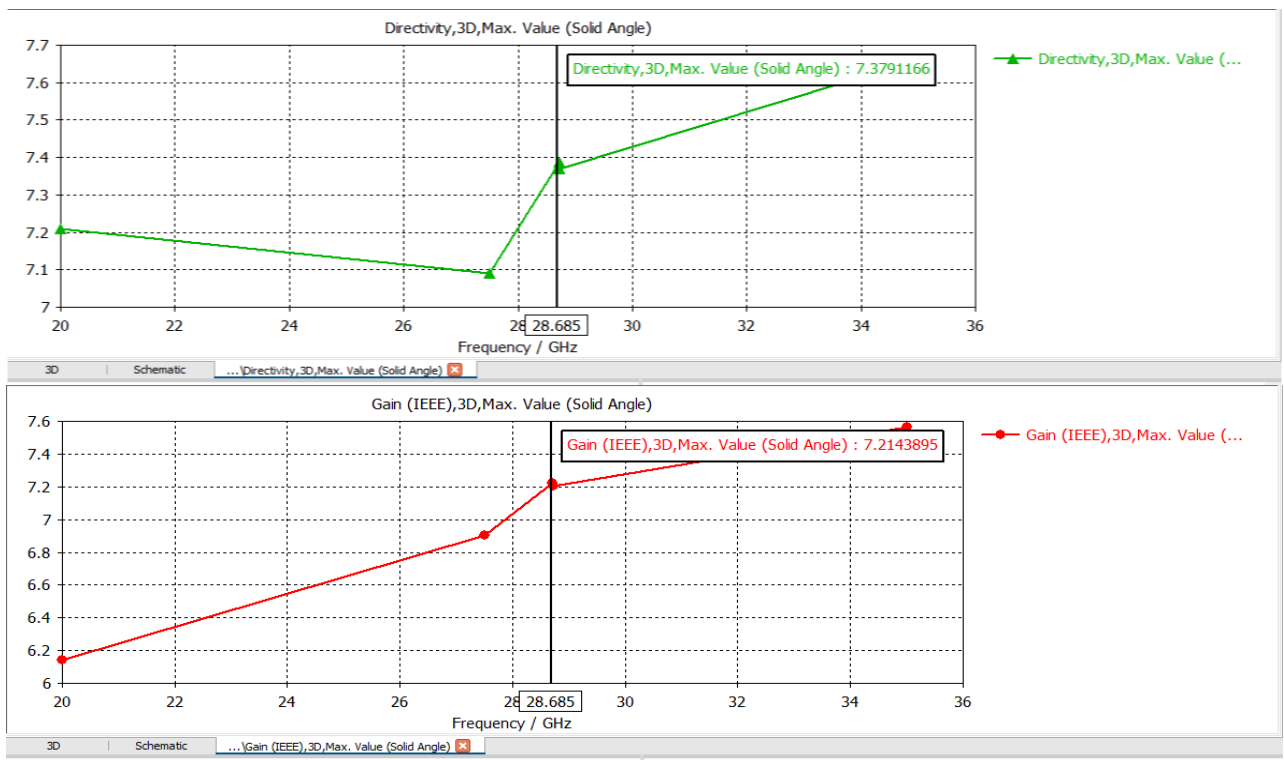


Figure III-42 Le gain et la directivité pour le défaut N°4

	FR(GHZ)	BP(GHZ)	S11 (dB)	D (dBi)	G(dBi)
Avec défaut	28.655	1.463	-31.45	7.379	7.214
Sans défaut	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014

Tableau III-14 Caractéristiques de réseaux patch à FSS avec et sans défaut

Après avoir changé la forme de la couche FSS, nous avons constaté que :

- Une augmentation de la bande passante et une meilleure amélioration du gain et de directivité
- La fréquence de résonance et l'adaptation S11 sont constants

Défaut N°5

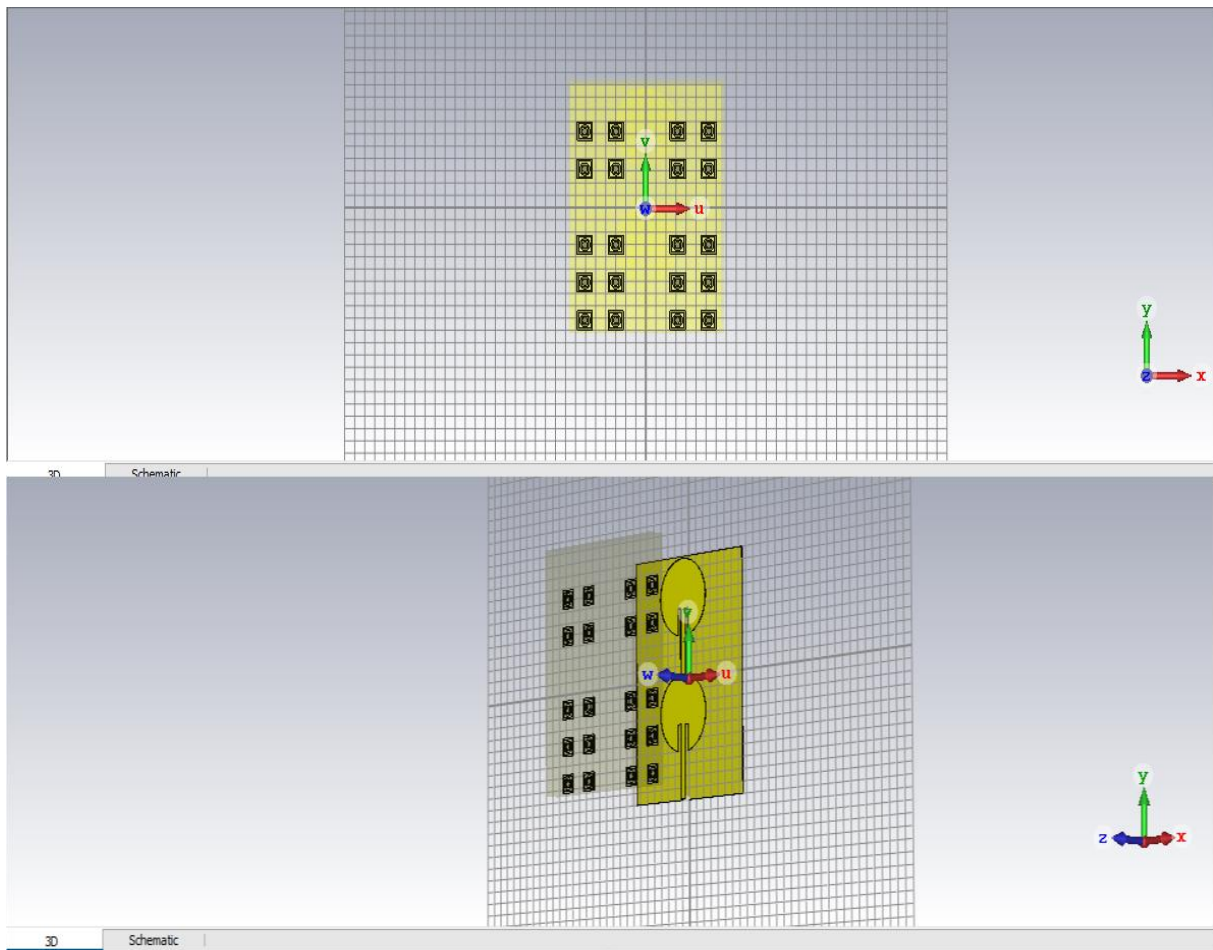


Figure III-43 Défaut N°5

A) Coefficient de réflexion

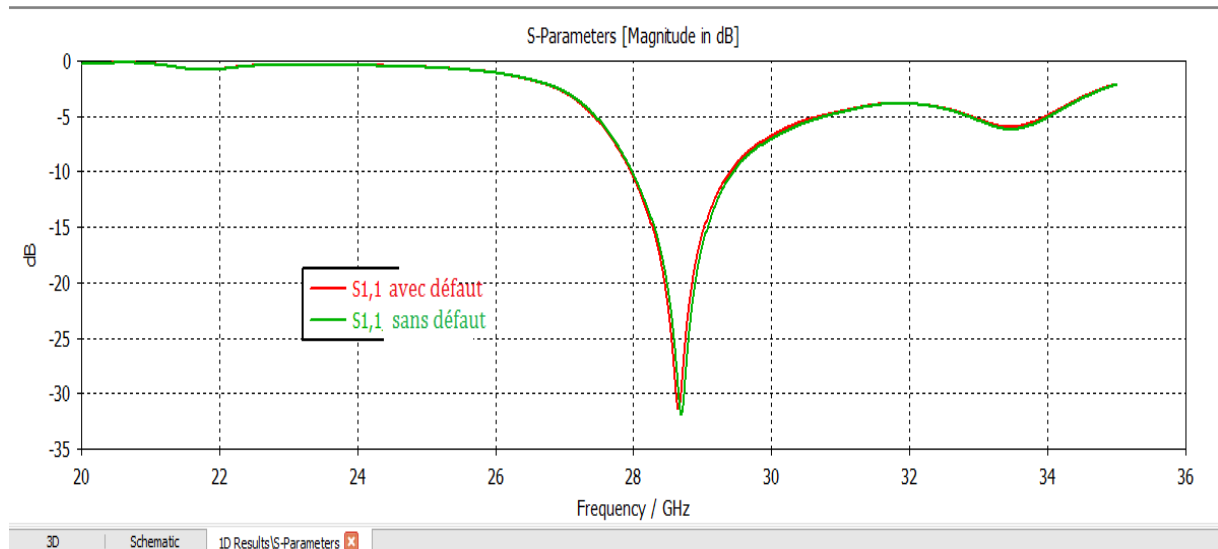


Figure III-44 Coefficient de réflexion avec et sans défaut

B) Directivité et gain

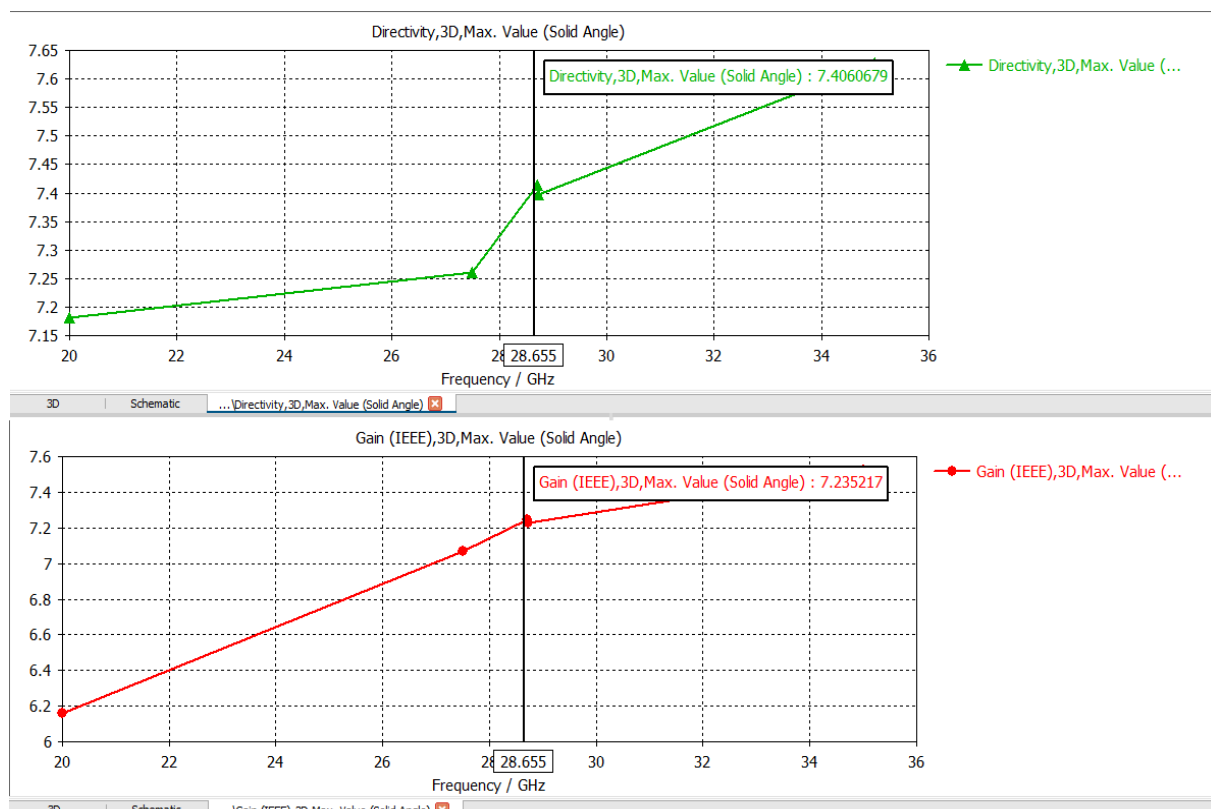


Figure III-45 Le gain et la directivité pour le défaut N°5

	FR(GHz)	BP(GHz)	S11 (dB)	D (dBi)	G (dBi)
Avec défaut	28.655	1.428	-31.40	7.406	7.235
Sans défaut	28.685	1.452	-31.88	7.184	7.014

Tableau III-15 Caractéristiques de réseaux patch à FSS en présence d'un défaut

Après avoir changé la forme de la couche FSS, nous avons constaté:

- Une diminution de la bande passante et une meilleure amélioration du gain et de la directivité ;
- L'adaptation est presque constante avec un changement léger en fréquence de résonance.

III-13 Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons présenté les différentes simulations que nous avons effectuées sur un réseau qui contient deux antennes patches circulaires alimentées en série et parallèle.

Après avoir ajouté la dernière couche FSS :

- Nous avons pu obtenir un gain de 7.807 dB, une directivité amélioré 8.074 dBi aussi une bande passante 1.558 GHz concentrées à la fréquence 28.745Ghz qui appartiennent à la bande 5G.
- La distance entre la couche FSS et le réseau patch contrôle la directivité et le gain Aussi l'épaisseur du superstrat ;
- Après avoir introduit un défaut dans la couche FSS on a pu améliorer la directivité, le gain et l'adaptation

Bibliographie

- [22] Computer Simulation Technologie (CST), Microwave Studio, Version 2019

Conclusion générale

Ce mémoire nous a permis d'étudier un réseau d'antennes microrubans de forme circulaire le superstrat est à base de FSS (Fréquence Surface Sélectifs) à défauts.

Nous avons étudié l'influence des différents paramètres physiques et géométriques de ce réseaux tel que (les dimensions du patch, le rayon du substrat et l'épaisseur du superstrat (FSS), dimensions et emplacement (la distance F) de la couche FSS, la permittivité du superstrat) sur les caractéristiques de réseau d'antennes microrubans l'adaptation de réseau (S_{11}), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

Puis on a ajouté un défaut dans la couche FSS qui nous a donné de meilleure résultats lié concernant les caractéristique de l'antenne tel que l'adaptation de réseau (S_{11}), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité, on a obtenu une directivité 7.406 dBi et un gain 7.235 DB à cause d'un défaut que nous avons ajouté dans la couche FSS.

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 cité ses différents avantages et inconvénients et quelques applications de réseaux d'antennes.

Ensuite Nous avons cité les une vision de la 5 générations et son avantage.

Le troisième chapitre est l'essentiel de notre travail. Nous avons présenté un bref aperçu du programme CST MICROWAVE STUDIO, qui est le programme de conception basé sur notre projet afin de créer un réseau d'antennes circulaires.

Nous avons commencé par effectuer plusieurs simulations sous CST pour arriver à obtenir une antenne microruban puis un réseau de forme circulaire fonctionnant dans la bande requis (5G) dans la gamme 28 GHz, bien adaptée (on a cherché à obtenir le coefficient de

Conclusion générale

réflexion le plus parfait, nous avons effectué plusieurs variations aux différents paramètres de l'antenne.

Ensuite, nous avons ajouté une couche à FSS à une distance de 30mm composé de (7×5) motifs, imprimées sur une couche superstrat pour améliorer le gain et la directivité passant à notre objectif qui est l'étude de l'effet d'un défaut au sien de la couche FSS, les résultats obtenus sont :

- Les caractéristiques d'un réseau d'antennes patches sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques ;
- La bande passante pour un réseau avec alimentation série est plus large par rapport à un seul élément ;
- La fréquence de résonance pour un réseau a augmenté par rapport à un seul élément

- La directivité pour un réseau à alimentation série est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément et à un réseau en parallèle.
- l'antenne a un seul élément est plus adapté qu'un réseau d'antennes ;
- Lorsque nous augmentons le rayon du patch, nous obtenons une bonne amélioration de la bande passante et l'adaptation
- Le changement des dimensions du patch affecte la bande passante.
- La variation du rayon du patch affecte l'adaptation de réseaux d'antenne

Influence de la couche à FSS

- Nous avons constaté que les caractéristiques de réseaux d'antennes patch à FSS sont meilleures que celles de réseaux d'antennes sans FSS ;
- l'augmentation de l'épaisseur du superstrat augmente la bande passante et améliore la directivité et le gain ;
- La variation de la distance entre le patch et la couche FSS influent sur la bande passante, la directivité, le gain et la fréquence de résonance ;
- La variation de la permittivité de superstrat n'influe pas sur la caractéristique de l'antenne Patch ;
- On a pu améliorer la directivité, le gain et la bande passante par introduction d'un défaut dans la couche FSS ;

- Les résultat d'un défaut dans la couche FSS en terme des caractéristique de l'antenne (directivité, gain bande passante) est mieux que sans défaut.

Conclusion générale

➤ En fin, on peut dire que la présence de la couche du FSS et un défaut dans la couche FSS influent sur toutes les caractéristiques de l'antenne microruban, considérablement sur le coefficient de réflexion S11, directivité, gain, bande passante.

تعم بفضل

الله