

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بالكايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : Télécommunications**

**Spécialité : Système de Télécommunications**

**Par : Metahri Abdellatif**

**Sujet**

**Étude et Conception d'Antennes avec structure EBG pour les applications 5G**

Soutenu publiquement, le 27/ 09 / 2023, devant le jury composé de :

DR. CHIKH BLED HICHAM

Université de Tlemcen

Président

DR. DJELTI HAMIDA

Université de Tlemcen

Examinatrice

DR. BOUSAHLA MILOUD

Université de Tlemcen

Encadreur

**Année universitaire : 2022/2023**

# *Dédicace*

*Il n'y a rien de plus beau à offrir que le fruit d'un travail effectué avec dévouement pour ceux que nous aimons et que nous remercions en exprimant notre gratitude et notre reconnaissance tout au long de notre vie.*

*Ce travail est dédié à : ma mère, qui m'a toujours encouragé avec ses prières à avancer, et à mon père qui m'a comblé de son soutien. Je leur suis infiniment reconnaissant*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers : mes amis de longue date Abd Rahim Moatez et Khaled et Abdenour et Selma et Meriem et Walid toute la promotion de Télécommunication à laquelle j'appartiens, et mes professeurs qui m'ont guidé vers la réussite tout au long de mes études.*

*Metahri abdelatif*

# ***REMERCIEMENTS***

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers Dieu, le tout-puissant, pour avoir instillé en moi la force, le courage et la patience nécessaires pour entreprendre cette tâche modeste.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon superviseur, pour avoir accepté de superviser mon travail, pour sa disponibilité permanente, que ce soit de manière directe ou indirecte, ainsi que pour ses nombreux commentaires et conseils précieux

## **Monsieur BOUSSAHLA MILOUD**

Je tiens à vous remercier chaleureusement pour avoir dirigé mon encadrement avec bienveillance, votre disponibilité constante, vos conseils inestimables ainsi que votre gentillesse, votre compréhension et votre compassion.

## **Monsieur le président de jury CHIKH BLED HICHAM,**

Je tiens à vous remercier vivement d'avoir accepté de présider ce jury.

## **Madame l'examinatrice, DJELTI HAMIDA,**

Je vous exprime ma gratitude pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de mon travail de fin d'étude.

**Grand merci...**

# Résumé

Le but de ce travail est l'étude et la conception d'antennes adaptées aux applications 5G. Dans ce projet, en utilisant le logiciel CST nous avons simulé, étudié et conçu deux antennes. La première antenne fonctionnant aux fréquences 3.6 et 5.8 GHz et la deuxième fonctionnant aux fréquences 2.45 et 5.8 GHz. Pour améliorer les performances de ces antennes conçues nous avons introduit des structures EBG qui permettent de contrôler et de manipuler les propriétés électromagnétiques des antennes. Les résultats obtenus sont très intéressants et montrent l'intérêt et le rôle des structures EBG dans la conception et l'optimisation des antennes. Les améliorations obtenues sont très utiles pour répondre aux exigences croissantes de la 5G.

**Mots clés :** antennes, structure EBG, réseau 5G, conception d'antenne

## **Abstract**

The aim of this work is the study and design of antennas suitable for 5G applications. In this project, using CST software we simulated, studied and designed two antennas. The first antenna operating at frequencies 3.6 and 5.8 GHz and the second operating at frequencies 2.45 and 5.8 GHz. To improve the performance of these designed antennas we introduced EBG structures which allow the electromagnetic properties of the antennas to be controlled and manipulated. The results obtained are very interesting and show the interest and role of EBG structures in the design and optimization of antennas. The improvements obtained are very useful to meet the increasing requirements of 5G.

Keywords : antennas, EBG structure, 5G network, antenna design

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة وتصميم هوائيات مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس 5G. في هذا المشروع، وباستخدام برنامج CST قمنا بمحاكاة ودراسة وتصميم هوائيين. الهوائي الأول يعمل على الترددات 3.6 و 5.8 جيجا هرتز والثاني يعمل على الترددات 2.45 و 5.8 جيجا هرتز. لتحسين أداء هذه الهوائيات المصممة، قدمنا هياكل EBG التي تسمح بالتحكم في الخصائص الكهرومغناطيسية للهوائيات ومعالجتها. النتائج التي تم الحصول عليها مثيرة للاهتمام للغاية وتظهر اهتمام ودور هياكل EBG في تصميم الهوائيات وتحسينها. تعد التحسينات التي تم الحصول عليها مفيدة جدًا لتلبية المتطلبات المتزايدة لـ 5G.

الكلمات المفتاحية : الهوائيات، هيكل EBG، شبكة 5G، تصميم الهوائي

# Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les structure EBG .....	3
I.1 Introduction .....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Les matériaux EBG.....	5
I.3.1 Les matériaux EBG diélectrique .....	7
I.3.1.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D).....	7
I.3.1.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D).....	9
I.3.1.3 Structures périodiques tridimensionnelles (3D).....	10
I.3.2 Les structures EBG métalliques .....	11
I.3.2.1 Structures métalliques à grille.....	12
I.3.2.2 Structures métalliques 1D et 2D .....	13
I.3.2.3 Structures métalliques à base de FSS.....	15
I.3.3 Structures EBG sans défaut.....	16
I.3.4 Structures EBG avec défaut .....	18
I.4 Les applications des structures EBG .....	19
I.4.1 Application des structures EBG dans le domaine des micro-ondes .....	19
I.4.2 Application des structures EBG dans le domaine de l'optique .....	20
I.5 Conclusion .....	21
Chapitre II : Les antennes imprimées pour les applications 5G.....	22
II.1 Introduction.....	23

II.2 Antenne imprimée .....	23
II.3 Alimentation des antennes imprimées.....	24
II.3.1 Alimentation avec contact.....	24
II.3.1.1 Alimentation par ligne microruban.....	24
II.3.1.2 Alimentation par sonde coaxiale .....	25
II.3.2 Alimentation sans contact.....	25
II.3.2.1 Alimentation couplée par fente.....	25
II.3.2.2 Alimentation couplée par proximité.....	26
II.3.2.3 Alimentation par couplage par guide d’ondes coplanaires.....	27
II.4 Caractéristiques des antennes imprimées .....	28
II.4.1 Impédance d’entrée.....	28
II.4.2 Bande passante.....	28
II.4.3 Directivité .....	29
II.4.4 Gain.....	29
II.4.5 Rendement .....	30
II.4.6 Diagramme de rayonnement.....	30
II.4.7 Coefficient de réflexion $s_{11}$ .....	31
II.5 Réseau d’antennes imprimées .....	31
II.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	32
II.6.1 Avantages des antennes imprimées.....	32
II.6.2 Inconvénients des antennes imprimées.....	32
II.7 Applications des antennes imprimées dans la 5G .....	32
II.8 Cinquième génération 5G .....	33
II.8.1 Historique.....	33
II.8.2 Définition de la 5G.....	34
II.8.3 Objectif et Principe .....	34
II.9 La Bande 5G .....	35

II.10 Conclusion .....	36
Chapitre III : Simulations & résultats .....	37
III.1 Introduction : .....	38
III.2 Choix de l’outil de simulation.....	38
III.3 Les Structures proposées .....	39
III.3.1 Antenne proposéé (1).....	39
III.3.2 Antenne proposée (2).....	44
III.3.3 Antenne proposée et réalisée .....	52
III.4 Antenne avec EBG .....	55
III.5 Conclusion.....	58
Conclusion générale .....	60
Bibliographie .....	62

## *Liste des figures*

<b>Figure I-1</b> : Principe du miroir de Bragg [1].....	4
<b>Figure I-2</b> : Structures périodiques 1D, 2D et 3D [2] .....	6
<b>Figure I-3</b> : Structure périodique unidimensionnelle [4] .....	8
<b>Figure I-4</b> : Structures périodiques bidimensionnelles [5].....	9
<b>Figure I-5</b> : Structures périodiques tridimensionnelles [7] .....	10
<b>Figure I-6</b> : Coefficient De Transmission D'une Structure BIEM [11].....	12
<b>Figure I-7</b> : Grilles métalliques 2D [13] .....	14
<b>Figure I-8</b> : Motifs de base pour une FSS [16] .....	16
<b>Figure I-9</b> : Structure EBG sans Défaut [18] .....	17
<b>Figure I-10</b> : Structures BIE avec défaut [20].....	18
<b>Figure I-11</b> : Structures EBG avec défaut [20] .....	19
<b>Figure II-1</b> : Structure d'une antenne imprimée [2] .....	23
<b>Figure II-2</b> : Formes des éléments rayonnants [3] .....	24
<b>Figure II-3</b> : Alimentation par ligne Micro ruban [12] .....	24
<b>Figure II-4</b> : Alimentation par sonde coaxiale [15] [17].....	25
<b>Figure II-5</b> : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse [13] [14].....	26
<b>Figure II-6</b> : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande [13]	27
<b>Figure II-7</b> : Alimentation par guide d'ondes coplanaire [29] .....	27
<b>Figure II-8</b> : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [29] .....	29
<b>Figure II-9</b> : Diagramme en coordonnées polaires [11].....	30
<b>Figure II-10</b> : Diagramme en coordonnées cartésiennes [11].....	31
<b>Figure II-11</b> : Différents types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnels [17] .....	32

<b>Figure II-12</b> : Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétrique [20] .....	35
<b>Figure III-1</b> : Outil de simulation CST Studio Suite 2019. ....	39
<b>Figure III-2</b> : Géométrie de l'antenne proposée (1).....	39
<b>Figure III-3</b> : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne proposée (1) .....	41
<b>Figure III-4</b> : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée (1) à 3.6 GHz.....	42
<b>Figure III-5</b> : Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (1) à 3.6 GHz .....	42
<b>Figure III-6</b> : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée (1) à 5.8Ghz.....	43
<b>Figure III-7</b> : Diagramme de rayonnement en coordonnées polaire de l'antenne proposée (1) à 5.8Ghz .....	43
<b>Figure III-8</b> : le gain de l'antenne proposée (1) .....	44
<b>Figure III-9</b> : VSWR de l'antenne proposée (1).....	44
<b>Figure III-10</b> : Structure initiale de l'antenne.....	45
<b>Figure III-11</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne initiale .....	45
<b>Figure III-12</b> : Antenne avec un fente .....	46
<b>Figure III-13</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne avec un fente .....	46
<b>Figure III-14</b> : Antenne avec fente et troncature .....	47
<b>Figure III-15</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et troncature .....	47
<b>Figure III-16</b> : Antenne avec fente et deux troncatures .....	47
<b>Figure III-17</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et deux troncatures.....	48
<b>Figure III-18</b> : Géométrie de l'antenne proposéé (2).....	48
<b>Figure III-19</b> : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne proposée (2).....	49
<b>Figure III-20</b> : VSWR de l'antenne proposée (2) .....	49
<b>Figure III-21</b> : Diagramme de rayonnement 3D a 2.45Ghz .....	50
<b>Figure III-22</b> : Diagramme de rayonnement polaire à 2.45 GHz .....	50

<b>Figure III-23</b> : Diagramme de rayonnement 3D à 3.6 GHz.....	51
<b>Figure III-24</b> : Diagramme de rayonnement polaire à 3.6 GHz .....	51
<b>Figure III-25</b> : Gain de l'antenne proposéé (2).....	52
<b>Figure III-26</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne proposée et réalisée .....	52
<b>Figure III-27</b> : Diagramme de rayonnement 3D à la fréquence 2.45 GHz.....	53
<b>Figure III-28</b> : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz de l'antenne proposée et réalisée .....	53
<b>Figure III-29</b> : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée et réalisée à 3.6 GHz .....	54
<b>Figure III-30</b> : Diagramme de rayonnement à 3.6 GHz de l'antenne proposée et réalisée	54
<b>Figure III-31</b> : VSWR de l'antenne proposée et réalisée .....	55
<b>Figure III-32</b> : Gain de l'antenne proposée et réalisée .....	55
<b>Figure III-33</b> : Antenne avec EBG.....	56
<b>Figure III-34</b> : Géométrie de la structure EBG .....	56
<b>Figure III-35</b> : Coefficient de réflexion de l'antenne avec EBG .....	56
<b>Figure III-36</b> : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec EBG à 2.45GHz .....	57
<b>Figure III-37</b> : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec EBG à 3.6 GHz .....	57
<b>Figure III-38</b> : Gain de l'antenne avec EBG.....	58

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau II-1</b> : Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles.....	34
<b>Tableau III-1</b> : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire. ....	40
<b>Tableau III-2</b> : Les paramètres géométriques calculés.....	41
<b>Tableau III-3</b> : Les paramètres géométriques calculés.....	45

## *Glossaire des termes techniques*

**EBG** : Electromagnétique Band Gap

**PRS** : Plan de Référence de Surface

**BIE** : Bandes Interdites en Electromagnétisme

**TM** : champ E parallèle aux barreaux

**TE** : champ E perpendiculaire aux barreaux

**SSF** : surfaces sélectives en fréquence

**FSS** : Frequency Selective Surfaces

**PMC** : conducteur magnétique parfait

**3GPP** : le 3rd Group Partnership Project

**5G** : cinquième génération

**LAN** : communication des réseaux locaux

**WAN** : réseaux étendus

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Avec l'avènement de la technologie 5G, les communications sans fil sont sur le point de connaître une transformation majeure. La 5G promet des vitesses de transmission de données ultra-rapides, une faible latence et une connectivité massive, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications. Pour soutenir ces performances élevées, l'étude et la conception d'antennes adaptées aux applications 5G sont essentielles.

Le but de ce projet est l'étude et la conception d'antennes adaptées aux applications 5G.

Le premier chapitre de ce mémoire abordera les structures EBG (Electromagnetic Band Gap), qui sont devenues une solution prometteuse pour l'étude et la conception d'antennes adaptées aux applications 5G. Dans ce chapitre nous présentons la structure EBG en commençant par un historique ensuite nous présentons les matériaux EBG, la définition et ses conceptions, les méthodes d'analyse des réseaux EBG et les méthodes d'identification des propriétés EBG, enfin nous donnons ses applications dans les domaines concerné [1].

Le deuxième chapitre de ce mémoire se concentre sur les antennes imprimées pour les applications 5G. Ce chapitre donne des généralités sur les antennes imprimées en commençant par la définition d'une antenne imprimée ensuite les différentes techniques d'alimentation de ces antennes, leurs caractéristiques ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre de ce mémoire se concentrera sur la simulation et les résultats obtenus dans le cadre de l'étude et de la conception d'antennes avec structure EBG pour les applications 5G. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation des antennes conçues. Nous examinons aussi les avantages des structures EBG qu'elles offrent en termes d'amélioration du gain et d'optimisation des performances des antennes pour garantir des performances optimales des systèmes de communication.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

## **Chapitre I : Les structure EBG**

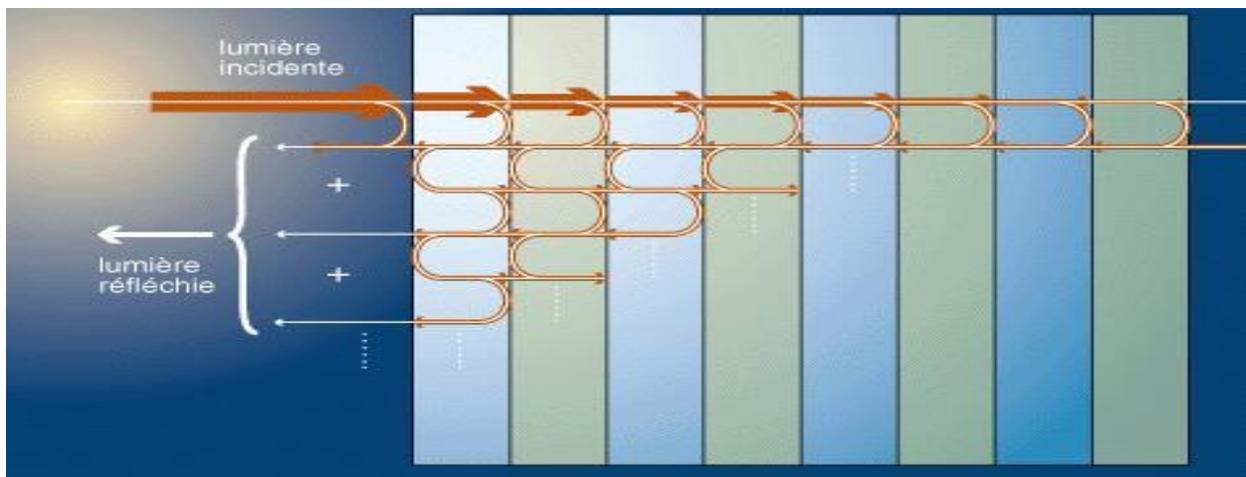
## I.1 Introduction

La technologie EBG (Electromagnetic Band Gap) est en constante évolution et continue d'être étudiée pour améliorer les performances des antennes et des systèmes de transmission. Elle est utilisée dans diverses applications de communication sans fil [1].

Dans ce chapitre nous présentons la structure EBG (Electromagnetic Band Gap), en commençant par sa définition, ensuite un historique et par la suite nous présentons les matériaux EBG, et ses applications.

## I.2 Historique

Lord Rayleigh a été le premier à démontrer la possibilité de produire des bandes interdites (lacunes) en 1887, et il a également mentionné la possibilité de créer des structures avec de telles bandes interdites en deux ou trois dimensions [1]. En 1915, le célèbre physicien britannique William Laurence Bragg a inventé le premier matériau à bande interdite photonique basé sur la réflexion des ondes électromagnétiques. Il a successivement empilé des couches de matériaux transparents avec différents indices de réfraction pour créer un miroir presque parfait qui restitue 99,5 % de l'énergie incidente (Figure I.1). Cette efficacité est obtenue lorsque la longueur d'onde et l'angle d'incidence du rayonnement sont adaptés à l'épaisseur des couches constituant le matériau à bande interdite. La réflexion est meilleure lorsque la distance entre les couches est de  $\lambda/4$ .



**Figure I-1** : Principe du miroir de Bragg [1]

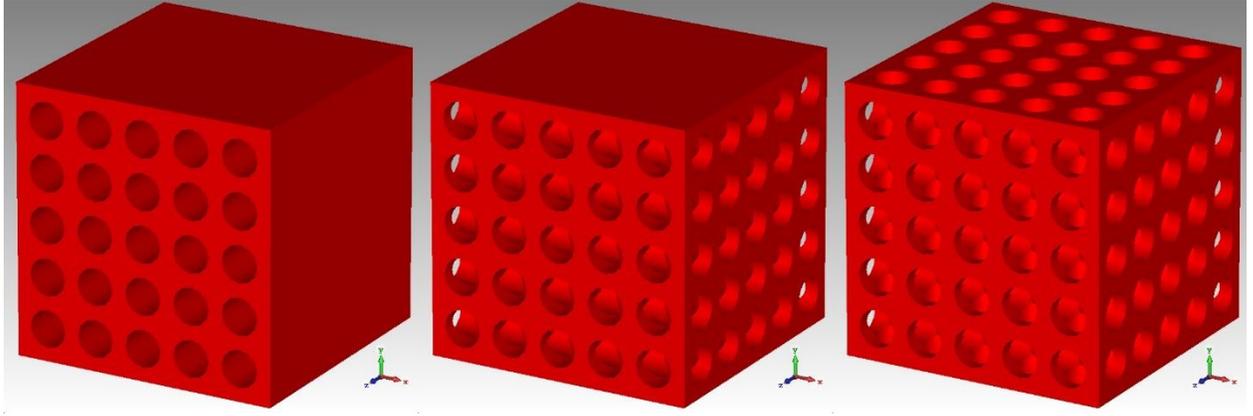
En 1987, Eli Yablonovitch a étendu l'application de l'assemblage périodique unidimensionnel à des structures à deux ou trois dimensions, et a établi une relation entre les propriétés des cristaux solides et des cristaux photoniques, qui proviennent respectivement de l'équation de Schrödinger et des équations de Maxwell. Ces structures possédaient une bande interdite unidimensionnelle et une forte réflectivité. Aujourd'hui, ces structures sont utilisées dans de nombreux domaines tels que la fabrication de surfaces réfléchissantes, l'amélioration de l'efficacité des LEDs, ou encore dans les cavités optiques de certains lasers pour leur grande réflectivité (par exemple, VCSEL). En 1972, V.P. Bykov a réalisé une étude théorique détaillée des structures optiques unidimensionnelles, qui a été la première à examiner l'effet des bandes interdites sur l'émission spontanée provenant d'atomes et de molécules intégrées à la structure [30]. Cette étude a ouvert la voie à la fabrication de cristaux photoniques en utilisant des méthodes similaires à celles utilisées dans le domaine des semi-conducteurs [1].

Aujourd'hui, il est possible d'utiliser des plaques de cristaux photoniques (photonic Crystal slabs) qui sont constituées de cristaux photoniques bidimensionnels gravés dans des plaques de semi-conducteurs. La lumière est enfermée dans la plaque grâce à la réflexion totale interne, ce qui permet de tirer parti des propriétés du cristal. Les chercheurs effectuent actuellement de nombreuses recherches sur ces plaques de cristaux photoniques afin de les intégrer dans des circuits intégrés, améliorant ainsi le traitement du signal optique à l'intérieur et entre les puces. Bien que les techniques antérieures nécessitent encore des développements pour avoir des applications commerciales, les cristaux photoniques bidimensionnels sont déjà utilisés sous forme de fibres optiques à cristaux photoniques. Ces fibres ont été créées par Philip Russel en 1998 et ont été conçues pour améliorer les performances des fibres optiques ordinaires [1].

### **I.3 Les matériaux EBG**

Les matériaux EBG (Electromagnétique Band Gap) sont des matériaux artificiels conçus pour présenter des bandes interdites (gaps) dans leur spectre de réponse électromagnétique, ces bandes interdites sont des gammes de fréquences pour lesquelles les ondes électromagnétiques ne peuvent pas se propager à travers le matériau. Les matériaux EBG peuvent être utilisés dans des applications telles que les antennes, les filtres et les guides d'ondes pour améliorer les performances et réduire les interférences.

Les matériaux EBG sont fabriqués à partir de structures périodiques en une, deux ou bien en trois dimensions, qui sont conçues pour perturber la propagation des ondes électromagnétiques.



**Figure I-2 :** Structures périodiques 1D, 2D et 3D [2]

Les motifs périodiques peuvent être créés en utilisant une variété de techniques, y compris l'impression 3D, la lithographie, la gravure, le dépôt de couches minces et l'assemblage de nanostructures.

Les propriétés des matériaux EBG dépendent de leur géométrie, de leur périodicité et de leur composition.

En général, les matériaux EBG présentent des propriétés diélectriques et magnétiques anisotropes, ce qui signifie que leurs propriétés électromagnétiques dépendent de la direction de la propagation des ondes.

Les matériaux EBG présentent plusieurs avantages par rapport aux matériaux traditionnels utilisés dans les applications électromagnétiques. Ils peuvent être conçus pour présenter des bandes interdites étroites et sélectives, ce qui permet de réaliser des filtres de meilleure qualité. Ils peuvent également être utilisés pour supprimer les ondes stationnaires et les réflexions indésirables, ce qui améliore l'efficacité des antennes et des guides d'ondes. En outre, les matériaux EBG peuvent être fabriqués à l'échelle nanométrique, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications dans les domaines de la photonique, de l'électronique et des télécommunications [2].

### **I.3.1 Les matériaux EBG diélectrique**

Les matériaux EBG diélectriques sont une classe de matériaux artificiels qui présentent une bande interdite pour les ondes électromagnétiques, basée sur leur structure périodique diélectrique. Les matériaux EBG diélectriques sont souvent utilisés dans les domaines des télécommunications, de l'électronique et de la défense [3].

L'objectif concernant les matériaux semi-conducteurs était de réguler leurs propriétés électriques, pour les matériaux EBG, l'objectif est de parvenir à maîtriser leurs propriétés électromagnétiques.

Les matériaux EBG diélectriques sont composés d'un empilement périodique de couches de matériaux diélectriques à haute permittivité et faible perte. La structure périodique de ces matériaux génère une bande interdite pour les ondes électromagnétiques dans une certaine plage de fréquences, cette bande interdite peut être modifiée en fonction des propriétés diélectriques des matériaux et de leur structure périodique.

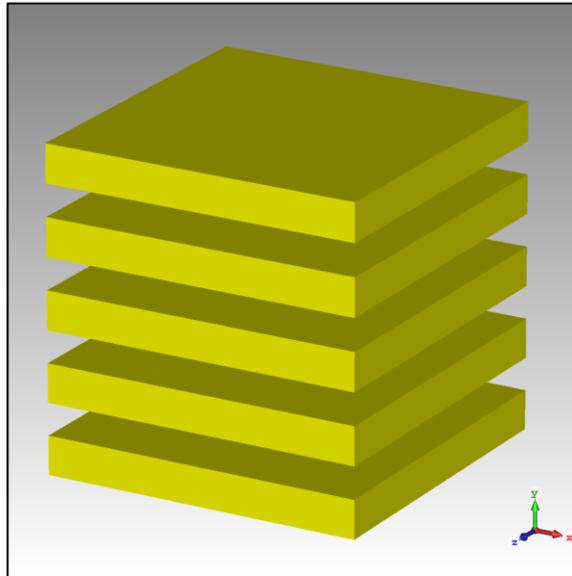
Les matériaux EBG diélectriques peuvent être utilisés pour améliorer les performances des antennes, des filtres, des guides d'ondes et des cavités résonantes. Ils peuvent également être utilisés pour améliorer l'isolation entre les éléments d'une antenne, en réduisant les couplages entre eux. Les matériaux EBG diélectriques sont souvent utilisés dans les antennes à large bande pour réduire les pertes et les réflexions dans le système [3].

Les matériaux EBG diélectriques sont également utilisés dans les dispositifs d'absorption électromagnétique. Ces dispositifs sont utilisés pour absorber les ondes électromagnétiques dans une plage de fréquences spécifique. Les matériaux EBG diélectriques peuvent être utilisés pour concevoir des dispositifs d'absorption qui présentent une bande de fréquence étroite ou large [3].

#### **I.3.1.1 Structures périodiques unidimensionnelles (1D)**

Les structures périodiques unidimensionnelles (1D) sont des arrangements de matériaux qui présentent une périodicité dans une seule direction spatiale, elles peuvent être trouvées dans la nature, comme dans les cristaux unidimensionnels, mais elles peuvent également être conçues artificiellement pour leurs propriétés électromagnétiques ou optiques [4].

Les structures périodiques 1D peuvent être réalisées en alternant deux matériaux différents selon un motif périodique, les propriétés optiques ou électromagnétiques de ces structures dépendent de la périodicité du motif et des propriétés des deux matériaux utilisés.



**Figure I-3 :** Structure périodique unidimensionnelle [4]

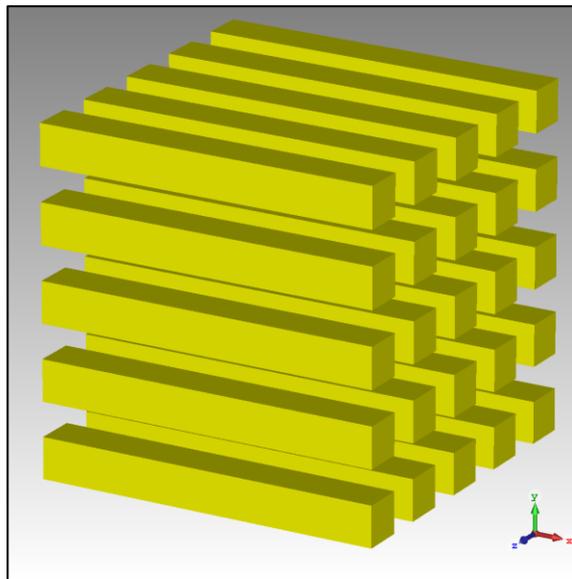
Les structures périodiques 1D peuvent être utilisées dans de nombreuses applications optiques et électromagnétiques. Elles sont souvent utilisées pour contrôler la propagation de la lumière ou des ondes électromagnétiques, en modifiant les propriétés de réfraction, de diffraction et de réflexion, elles sont souvent utilisées dans la conception de filtres optiques, qui sont utilisés pour isoler des bandes de fréquences spécifiques et peuvent également être utilisées pour concevoir des miroirs diélectriques (principe du miroir de Bragg), qui sont utilisés pour réfléchir la lumière ou les ondes électromagnétiques dans une certaine gamme de fréquences.

Ces structures sont également utilisées pour concevoir des résonateurs optiques et électromagnétiques, ces résonateurs sont utilisés pour stocker et amplifier des signaux optiques ou électromagnétiques dans une plage de fréquences spécifique [4].

### I.3.1.2 Structures périodiques bidimensionnelles (2D)

Les structures périodiques bidimensionnelles (2D) sont des arrangements de matériaux qui présentent une périodicité dans deux directions spatiales perpendiculaires. Ces structures sont souvent utilisées pour leurs propriétés optiques, électromagnétiques et acoustiques uniques.

Les structures périodiques 2D peuvent être réalisées en alternant deux matériaux différents selon un motif périodique dans deux directions spatiales. Les propriétés optiques ou électromagnétiques de ces structures dépendent de la périodicité du motif et des propriétés des deux matériaux utilisés.



**Figure I-4 :** Structures périodiques bidimensionnelles [5]

Les structures périodiques 2D sont souvent utilisées pour contrôler la propagation de la lumière ou des ondes électromagnétiques dans deux dimensions, en modifiant les propriétés de réfraction, de diffraction et de réflexion. Elles peuvent également être utilisées pour diriger la propagation des ondes acoustiques [5][6].

Les structures périodiques 2D sont souvent utilisées dans la conception de guides d'ondes, qui sont utilisés pour acheminer la lumière ou les ondes électromagnétiques dans des directions spécifiques. Elles peuvent également être utilisées pour concevoir des filtres optiques

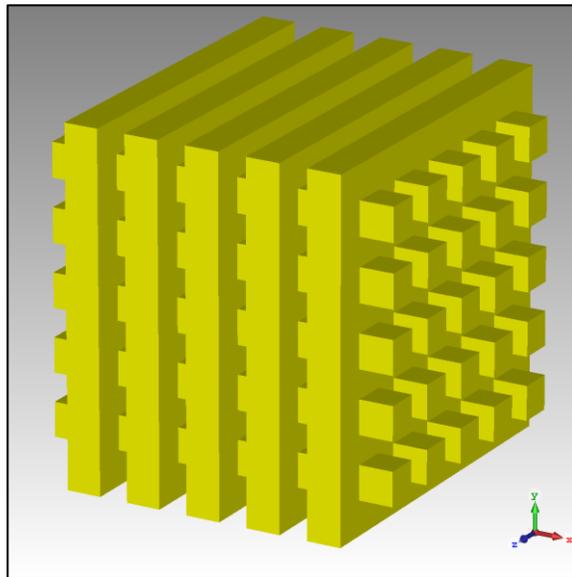
bidimensionnels, qui sont utilisés pour isoler des bandes de fréquences spécifiques dans deux dimensions.

Les structures périodiques 2D peuvent également être utilisées pour concevoir des matériaux photoniques, qui sont des matériaux artificiels conçus pour manipuler la propagation de la lumière. Les matériaux photoniques peuvent être utilisés pour concevoir des lentilles optiques bidimensionnelles, des miroirs photoniques bidimensionnels et des structures de polarisation bidimensionnelles [5][6].

### I.3.1.3 Structures périodiques tridimensionnelles (3D)

Les structures périodiques 3D peuvent être réalisées en alternant plusieurs matériaux différents selon un motif périodique dans trois directions spatiales. Les propriétés optiques ou électromagnétiques de ces structures dépendent de la périodicité du motif et des propriétés des matériaux utilisés [7].

Les structures périodiques 3D sont souvent utilisées pour contrôler la propagation de la lumière



**Figure I-5** : Structures périodiques tridimensionnelles [7]

Les structures périodiques 3D peuvent également être utilisées pour concevoir des métamatériaux, qui sont des matériaux artificiels conçus pour présenter des propriétés

électromagnétiques inhabituelles. Les métamatériaux peuvent être utilisés pour concevoir des dispositifs tels que des cloaks d'invisibilité, des superlentilles et des antennes à haute efficacité [7][8].

### **I.3.2 Les structures EBG métalliques**

Des matériaux avec une bande interdite ont été créés initialement en utilisant des matériaux diélectriques purs pour répondre aux besoins en optique. En effet, dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile en raison des pertes élevées associées aux métaux à ces fréquences. Cependant, pour les fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas, ce qui permet aux métaux de devenir de quasi-parfaits réflecteurs avec une absorption faible. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau ( $d$ ) est très faible par rapport à la longueur d'onde ( $\lambda$ ), qui est beaucoup plus basse que les fréquences optiques.

Les premières recherches se concentraient sur l'utilisation d'éléments métalliques ayant des périodicités différentes pour créer des polariseurs et des réflecteurs. Ces études ont également permis la conception de ou SSF, mais la plupart de ces recherches se concentraient sur des structures monocouches avec des motifs 2D [9][10].

La conception des matériaux métalliques est similaire à celle des diélectriques, mais leur arrangement de cellules élémentaires est différent, les matériaux BIE métalliques ne peuvent pas avoir une dimension 1D car cela entraînerait un coefficient de réflexion égal à 1 avec une phase de  $180^\circ$ , seules les structures 2D et 3D, respectivement des réseaux de lames et des grilles, peuvent exister [9].

Les structures 2D ont des arrangements différents en fonction de leur polarisation, car ce matériau est anisotrope. La polarisation TM (champ E parallèle aux barreaux) est le dual de la polarisation TE (champ E perpendiculaire aux barreaux).

Les structures EBG métalliques sont des structures à bande interdite photomagnétique qui sont fabriquées à partir de métal, ces structures sont également connues sous le nom de cristaux photoniques métalliques. Les EBG (Electromagnetic Band Gap) sont des matériaux qui ont une

bande interdite photomagnétique qui empêche la propagation de la lumière dans une certaine gamme de longueurs d'onde [9][10].

### I.3.2.1 Structures métalliques à grille

Les matériaux métalliques périodiques ont une structure cristalline qui leur confère des propriétés uniques. Ils peuvent prendre la forme de tiges ou de grilles, qui présentent un ou plusieurs axes de périodicité. Les grilles ont la particularité de posséder une bande interdite basse fréquence, où elles agissent comme des miroirs parfaits. À ces fréquences, l'impédance dérivée de la grille métallique est plus élevée que l'impédance caractéristique de la ligne de transmission représentant le vide. Cette propriété est différente des réseaux périodiques diélectriques BIE, qui possèdent une bande permise basse fréquence jusqu'à leur première bande interdite, déterminée par leur périodicité et leur permittivité. Les matériaux métalliques périodiques sont largement utilisés dans la conception d'antennes, de filtres, de résonateurs et d'autres dispositifs pour les communications sans fil et les micro-ondes en raison de leur capacité à contrôler la propagation des ondes électromagnétiques [11][12].

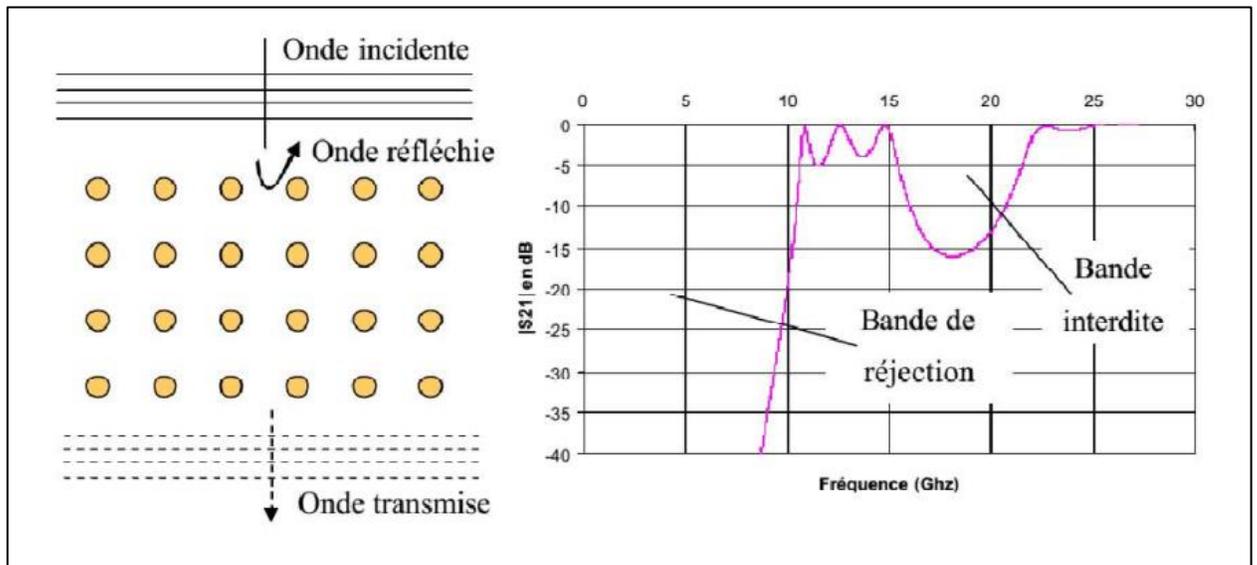


Figure I-6 : Coefficient De Transmission D'une Structure BIEM [11]

Lorsque la distance entre les tiges métalliques est réduite, la réflexion basse fréquence devient plus prononcée. Si les tiges sont très espacées, le réseau de grilles ne fonctionne comme une surface métallique que pour les très grandes longueurs d'onde. La bande de réjection dépend de la périodicité des éléments métalliques. En modifiant le diamètre ou la section des tiges, la réjection à basse fréquence peut être améliorée. Cela revient à diminuer la distance entre les tiges et donc le pas du réseau. Les grilles métalliques sont donc un bon moyen de réaliser des filtres passe-bas en exploitant cet effet à basse fréquence. Ces propriétés des matériaux métalliques périodiques sont très importantes dans la conception de dispositifs électroniques, en particulier dans les domaines des télécommunications et des micro-ondes [11][12].

### **I.3.2.2 Structures métalliques 1D et 2D**

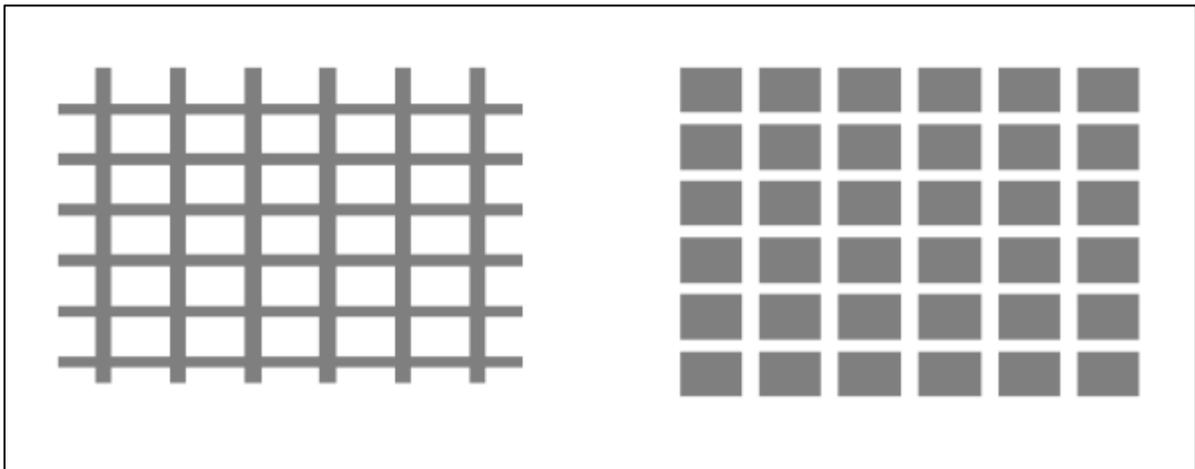
L'étude des grilles métalliques n'est pas récente et a depuis longtemps mis en évidence les propriétés en basses fréquences de ces structures. Les grilles unidimensionnelles sont formées de fils métalliques parallèles ayant une épaisseur ( $h$ ), une largeur ( $a$ ) (ou un diamètre dans le cas de tiges), et un pas de réseau ( $p$ ). Ces structures ont été largement étudiées pour leur utilisation dans la conception de dispositifs électroniques, tels que des antennes, des filtres, des résonateurs, et des guides d'ondes. Les propriétés des grilles métalliques sont déterminées par leur géométrie, leur périodicité, ainsi que les propriétés des matériaux utilisés. Les avancées récentes dans les techniques de fabrication ont permis la réalisation de grilles métalliques avec des pas de réseau de plus en plus petits, ce qui a conduit à de nouvelles applications dans les domaines des télécommunications et de l'électronique. Ainsi, les grilles métalliques restent un domaine de recherche actif et important pour le développement de dispositifs électroniques avancés [13][14][15].

Lorsque le pas du réseau «  $p$  » est inférieur à la longueur d'onde, le comportement des grilles métalliques suit la théorie des lignes, qui consiste à utiliser un schéma électrique équivalent. Pour une grille 1D infinie, le circuit général d'une grille métallique mince est une ligne de transmission représentant le vide, avec en parallèle, dans le plan de référence, une admittance normalisée par rapport à l'admittance caractéristique de la ligne représentant la grille. Si la grille est sans perte, l'admittance est purement une susceptance [13].

Pour réaliser des structures métalliques insensibles à la polarisation de l'onde (polarisation circulaire), il est possible de passer d'une grille unidimensionnelle à une grille bidimensionnelle.

Les grilles bidimensionnelles sont formées de tiges métalliques disposées selon une grille carrée ou hexagonale. Les propriétés de ces grilles dépendent de la forme des tiges, de leur orientation, de leur espacement, et des propriétés des matériaux utilisés. Les grilles bidimensionnelles peuvent être utilisées pour la conception de filtres, de résonateurs, et de guides d'ondes, ainsi que pour la réalisation de structures métalliques à polarisation circulaire pour les applications en radioastronomie, en télédétection, et en communications sans fil [13] 15].

La figure [I.7] présente deux réseaux périodiques bidimensionnels symétriques qui étendent les structures unidimensionnelles précédemment illustrées. Si la structure de droite est constituée d'un réseau de carrés métalliques, on parle de réseau déconnecté. En revanche, si la structure de gauche présente des intersections entre les éléments métalliques, on parle de réseau connecté. La grille bidimensionnelle dans la figure [8] est en fait la superposition de deux grilles unidimensionnelles perpendiculaires. Quelle que soit l'onde incidente parallèle à l'une des deux grilles unidimensionnelles, elle ne réagira qu'avec un seul réseau de grilles. En effet, il y aura une interaction entre les deux grilles 1D si une grille est complémentaire à l'autre, ce qui a une influence négligeable sur le comportement du réseau. Selon sa polarisation, le fonctionnement de la grille bidimensionnelle est identique à celui de la grille unidimensionnelle [13][14][15].



**Figure I-7 :** Grilles métalliques 2D [13]

### **I.3.2.3 Structures métalliques à base de FSS**

Les FSS (Frequency Selective Surfaces), ou surfaces sélectives en fréquence, sont des structures métalliques qui présentent des propriétés de réflexion ou de transmission sélectives pour des ondes électromagnétiques selon leur fréquence. Elles sont largement utilisées dans les domaines des télécommunications, de l'aérospatiale, de la défense et de l'ingénierie des matériaux. Les FSS peuvent être utilisées pour filtrer les signaux, pour les antennes, pour améliorer la performance de blindage électromagnétique et pour d'autres applications dans lesquelles la manipulation de la propagation des ondes est importante [16].

Les FSS peuvent être constituées de grilles bidimensionnelles ou de motifs complexes sur des surfaces métalliques, et leur conception dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique que l'on souhaite manipuler.

Le facteur qui détermine principalement le gain de l'antenne est la taille et la réflexion de la PRS (Plan de Référence de Surface), ainsi que la hauteur de la cavité et le gain de l'antenne d'alimentation. Si la taille des PRS et le gain de l'antenne d'alimentation sont constants, la hauteur de la cavité détermine la fréquence de fonctionnement et le gain de l'antenne à cavité formée par la PRS et le plan de masse [16][17].

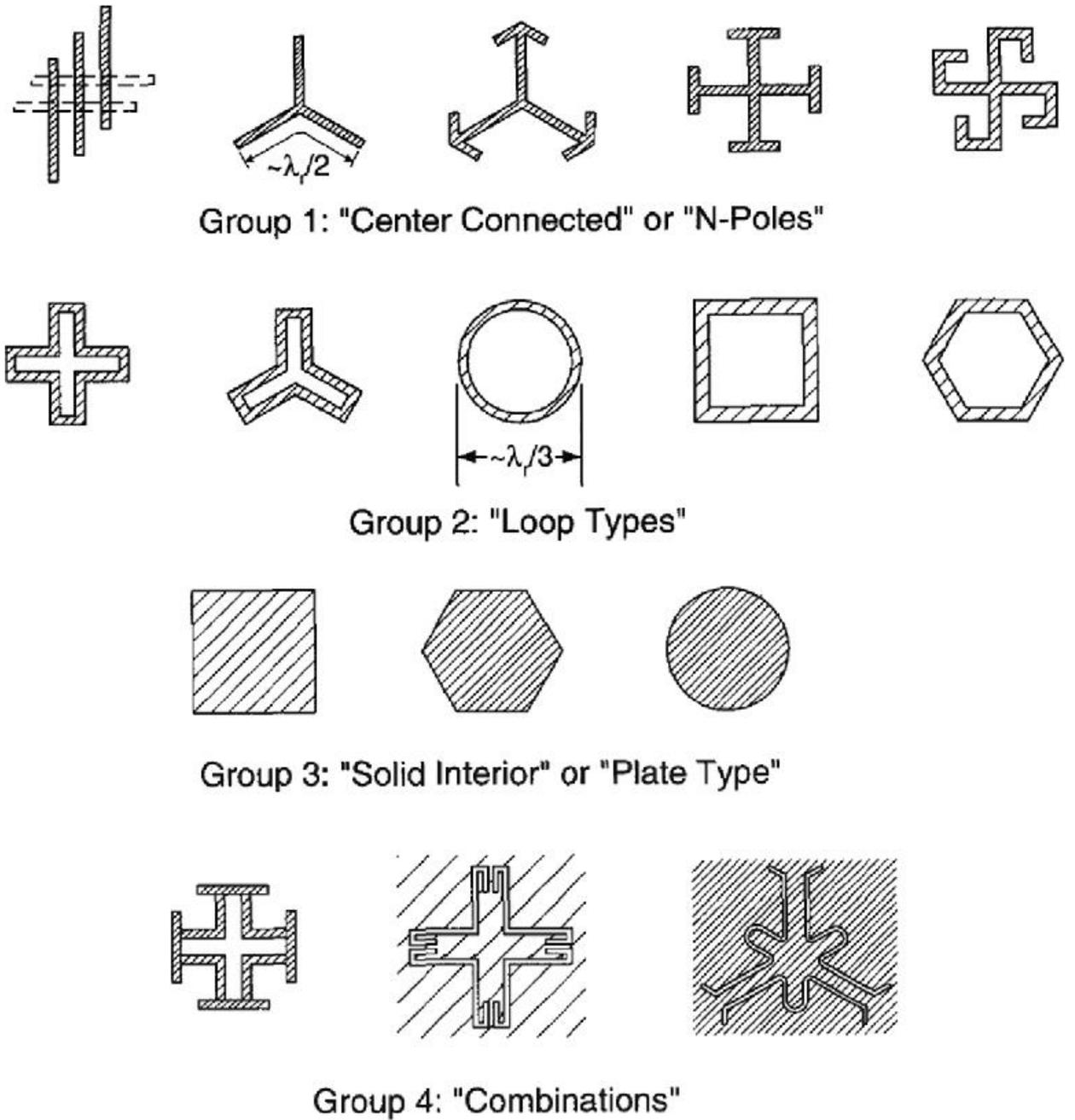


Figure I-8 : Motifs de base pour une FSS [16]

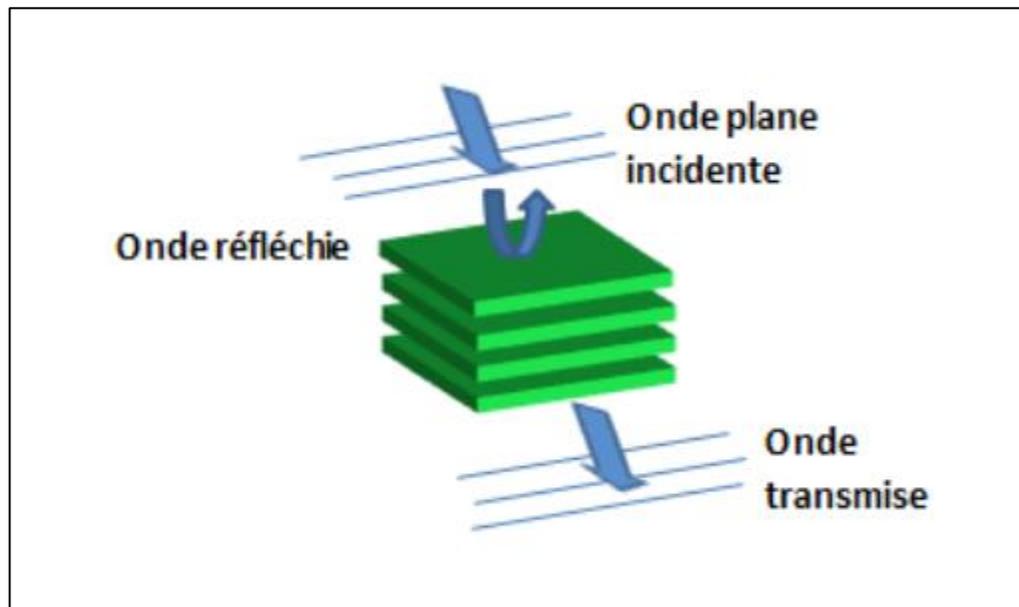
### I.3.3 Structures EBG sans défaut

Les structures EBG sans défaut sont des structures qui ont une périodicité régulière et une absence de défauts dans leur structure.

En 1915, le premier exemple d'application de ce principe a été proposé, qui est connu sous le nom de miroir de Bragg. Ce miroir fonctionne en réfléchissant partiellement la lumière au niveau de l'interface entre deux couches successives, en raison de la différence d'indice entre elles [18][19].

La périodicité de la structure est calculée de manière à ce que toutes les réflexions partielles interagissent de manière constructive, permettant de construire facilement un miroir dont le coefficient de réflexion peut atteindre jusqu'à 99,95 %, à condition de respecter une distance de  $\lambda/4$  entre les différentes couches. Le graphique montre le module du coefficient de réflexion d'une structure sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.

Le principal avantage des matériaux BIE est leur capacité à agir comme un filtre, c'est-à-dire leur capacité à réfléchir partiellement ou totalement les ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence donnée [19].



**Figure I-9** : Structure EBG sans Défaut [18]

Ces matériaux périodiques obtiennent leurs propriétés de manière similaire à un filtre sélectif qui autorise la propagation de certaines fréquences tout en interdisant d'autres, en établissant une analogie entre l'équation de Schrödinger qui contrôle la fonction d'onde des électrons et les équations de Maxwell qui régissent les ondes électromagnétiques [18][19].

### I.3.4 Structures EBG avec défaut

Il existe plusieurs méthodes pour introduire un défaut dans une structure, telles que la modification de la permittivité des empilements ou la suppression de plaques. Lorsqu'une onde plane illumine la structure présentant un défaut, un pic de transmission apparaît à la fréquence centrale  $f_0$  (Figure I-10), indiquant la création d'une bande permise à l'intérieur de la bande interdite. Ces résultats sont également applicables aux structures en deux ou trois dimensions [20].

Les structures EBG avec défaut sont souvent utilisées pour leur capacité à filtrer les ondes électromagnétiques de certaines fréquences et à permettre la propagation d'autres fréquences. Les défauts introduits dans ces structures peuvent également modifier la direction et la vitesse de propagation des ondes, ce qui peut être utile dans la conception d'antennes et de dispositifs optiques [20][21].

Pour créer un défaut, on peut introduire une couche d'air  $\lambda_0$  dans la structure, créant ainsi une bande passante étroite au milieu de la bande interdite.

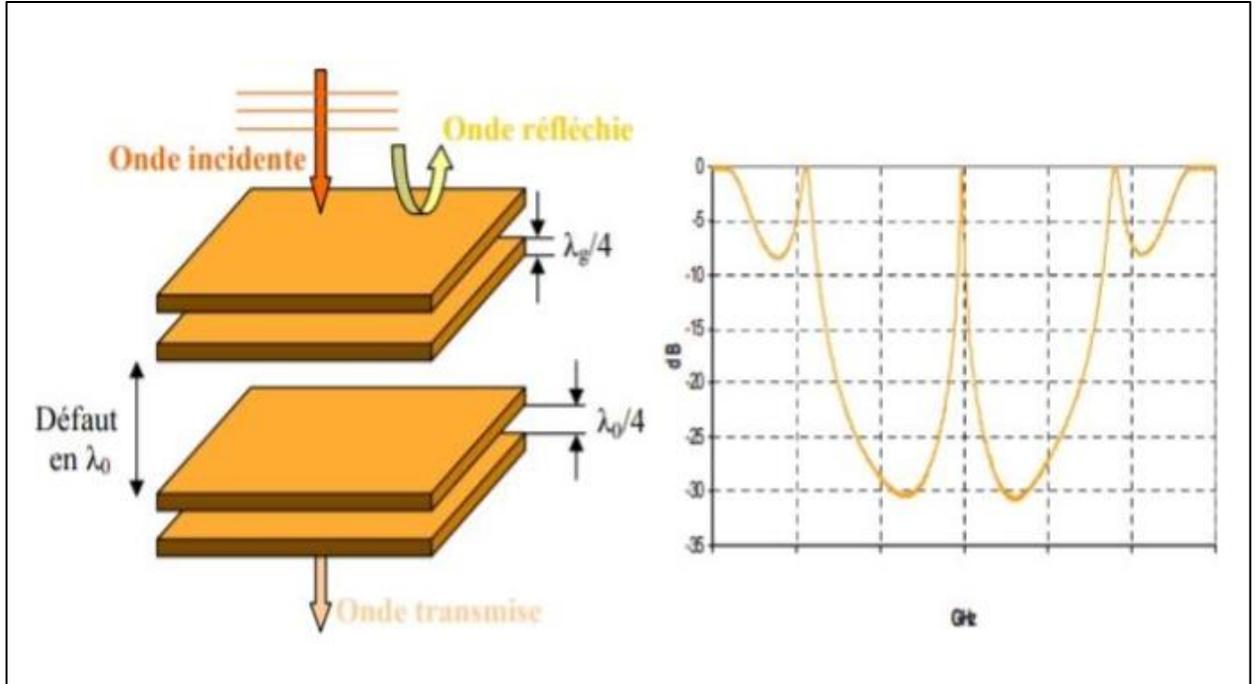
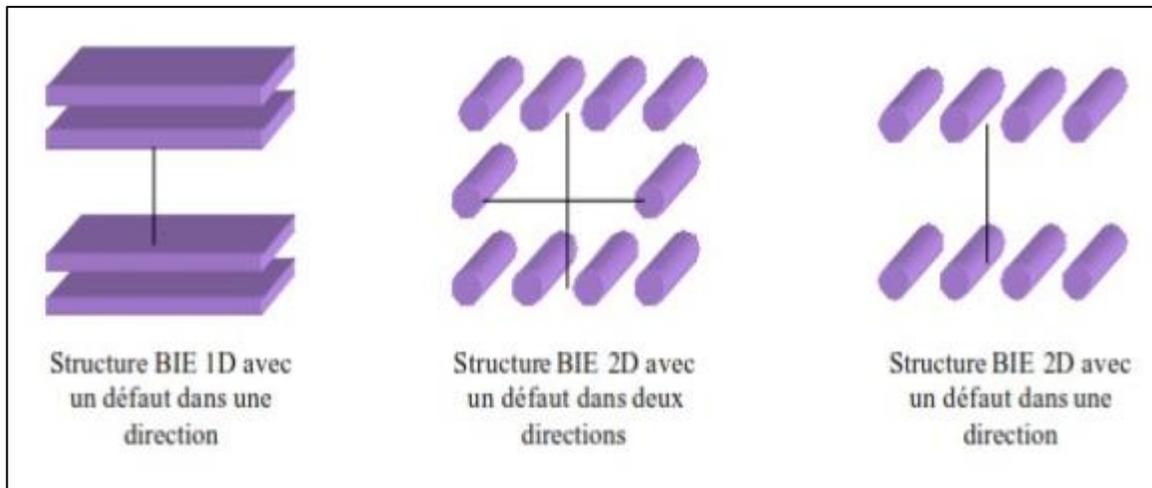


Figure I-10 : Structures BIE avec défaut [20]

La largeur de cette bande dépend de la taille et de la position du défaut et des propriétés électromagnétiques du matériau.

La caractérisation de la structure à défaut en termes de fréquence met en évidence une propriété importante des matériaux BIE : le filtrage fréquentiel.

L'utilisation de matériaux BIE dans le domaine des antennes permet également la réalisation d'un filtrage spatial.



**Figure I-11** : Structures EBG avec défaut [20]

### I.4 Les applications des structures EBG

Les structures EBG sont utilisées dans divers domaines, tels que la conception d'antennes, de circuits micro-ondes, de guides d'ondes, de filtres, de résonateurs et de dispositifs optiques. Les EBG sont également utilisées dans les domaines de la communication sans fil, du radar, de la télévision numérique, de la radioastronomie et de la sécurité des communications.

Les propriétés des structures EBG peuvent être adaptées en fonction des besoins spécifiques de chaque application, ce qui en fait une technologie polyvalente et adaptable [24].

#### I.4.1 Application des structures EBG dans le domaine des micro-ondes

Les structures Electromagnétique Band Gap ont plusieurs applications dans le domaine des micro-ondes, qui est un domaine de la physique et de l'électronique qui traite des ondes électromagnétiques ayant des fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz.

De nombreuses équipes de recherche se sont penchées sur l'étude des Bandes Interdites en Electromagnétisme (BIE), dans le domaine des fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables [24].

Le secteur des télécommunications, en particulier celui des antennes, est très concerné par ces recherches. En effet, les matériaux à bandes photoniques interdites peuvent être utilisés pour fabriquer des substrats d'antennes, comme l'ont montré les premières expériences menées par ER. Brown et ses collaborateurs. Les surfaces à hautes impédances peuvent également être utilisées pour améliorer la directivité des antennes [24].

Les structures EBG ont des applications importantes dans divers domaines, notamment :

**Antennes :** Les structures EBG peuvent être utilisées pour améliorer les performances des antennes en réduisant le rayonnement à des angles indésirables, en supprimant les résonances indésirables et en augmentant la directivité.

**Filtres :** Les structures EBG peuvent être utilisées pour créer des filtres micro-ondes à bande étroite ou à bande large avec une meilleure sélectivité et une meilleure isolation.

**Amplificateurs :** Les structures EBG peuvent être utilisées pour améliorer la linéarité et la stabilité des amplificateurs micro-ondes à faible bruit [25].

**Circuits intégrés :** Les structures EBG peuvent être utilisées pour créer des circuits intégrés micro-ondes compacts et efficaces avec une meilleure isolation entre les composants et une réduction des pertes par rayonnement.

**Radars :** Les structures EBG peuvent être utilisées pour améliorer la performance des radars micro-ondes en réduisant le bruit et en augmentant la sensibilité [24][25].

### **I.4.2 Application des structures EBG dans le domaine de l'optique**

**Fibres optiques à cristaux photoniques :** Les fibres optiques à cristaux photoniques sont fabriquées à partir de matériaux à haute permittivité et faible perméabilité, qui présentent des bandes interdites pour certaines gammes de fréquences. Ces bandes interdites peuvent être utilisées pour supprimer la dispersion de groupe dans les fibres optiques, permettant une transmission plus rapide et plus efficace des signaux optiques [26].

Filtrage optique : Les structures EBG peuvent être utilisées comme filtres optiques pour contrôler la propagation de la lumière dans certaines gammes de fréquences. Les filtres optiques basés sur les structures EBG sont utilisés dans diverses applications, telles que les réseaux de télécommunications, les systèmes de capteurs et les dispositifs optiques.

Lentilles photoniques : Les structures EBG peuvent être utilisées pour créer des lentilles photoniques, qui sont des lentilles qui fonctionnent sur la base des propriétés électromagnétiques plutôt que de la réfraction. Les lentilles photoniques basées sur les structures EBG peuvent offrir des performances améliorées par rapport aux lentilles optiques traditionnelles en termes de qualité d'image et de focalisation.

Guides d'ondes : Les structures EBG peuvent également être utilisées pour créer des guides d'ondes optiques, qui sont des structures qui guident la propagation de la lumière le long d'un trajet spécifique. Les guides d'ondes optiques basés sur les structures EBG peuvent offrir des performances améliorées par rapport aux guides d'ondes traditionnels en termes de dispersion, de réflexion et d'absorption de la lumière [26][27].

Métamatériaux optiques : Les structures EBG peuvent être utilisées pour créer des métamatériaux optiques, qui sont des matériaux artificiels conçus pour avoir des propriétés électromagnétiques qui ne se trouvent pas dans la nature. Les métamatériaux optiques basés sur les structures EBG peuvent être utilisés dans diverses applications, telles que l'invisibilité optique, la détection de gaz et la manipulation de la polarisation de la lumière [26][27].

### **I.5 Conclusion**

La technologie EBG (Electromagnetic Band Gap) continue d'être étudiée pour améliorer les performances des antennes et des systèmes de transmission en générale. Elle est utilisée dans diverses applications de communication sans fil.

Ce chapitre a été consacré au structure EBG (Electromagnetic Band Gap). Pour mettre en évidence les propriétés attractives des matériaux EBG, nous avons présenté la structure EBG, en commençant par sa définition, ensuite un historique, nous avons aussi présenté les matériaux EBG, et ses applications.

**Chapitre II : Les antennes  
imprimées pour les applications 5G**

## II.1 Introduction

Les antennes sont devenues les composants fondamentaux de la communication radio. Les technologies modernes visent à rendre ces antennes plus petites tout en conservant leurs performances supérieures. Ces dernières années, divers types d'antennes imprimées ont été développés pour améliorer leurs performances dans plusieurs applications.

Ce chapitre donne des généralités sur les antennes imprimées en commençant par la définition d'une antenne imprimée ensuite les différentes techniques d'alimentation de ces antennes, leurs caractéristiques ainsi que leurs avantages et inconvénients.

## II.2 Antenne imprimée

Une antenne imprimée, également appelée antenne microruban ou patch, est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice placée sur la face supérieure du substrat diélectrique. Sur l'autre face du substrat se trouve le plan de masse. La figure ci-dessous illustre la géométrie d'une antenne imprimée simple [2] [3].

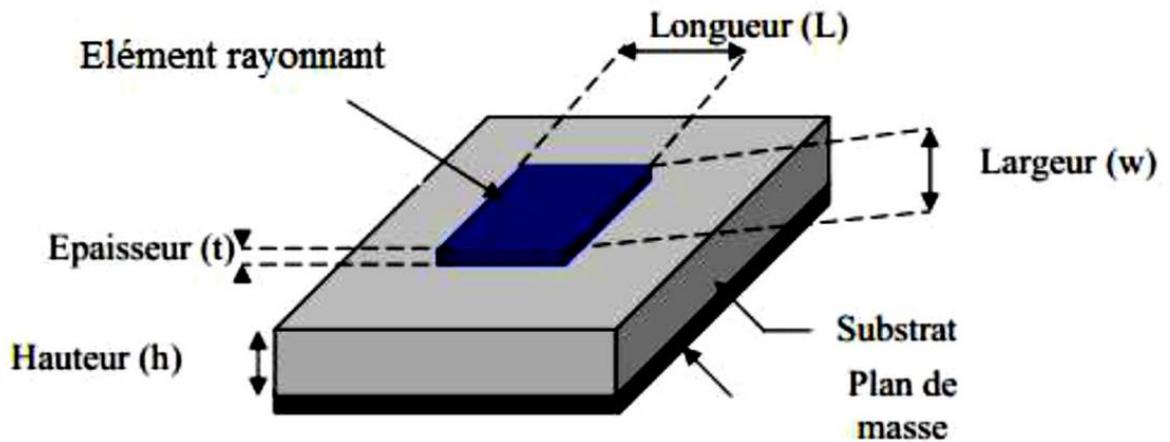


Figure II-1 : Structure d'une antenne imprimée [2]

L'élément rayonnant peut adopter différentes formes telles que rectangulaire, carré, triangulaire, circulaire, etc. Ces formes très utilisées sont faciles à analyser et à fabriquer.

La figure suivante présente les formes d'éléments rayonnants les plus fréquemment utilisées.



Figure II-2 : Formes des éléments rayonnants [3]

### II.3 Alimentation des antennes imprimées

Lors de la conception d'antennes imprimées, l'alimentation joue un rôle crucial et peut altérer les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. Il existe plusieurs méthodes d'alimentation qui peuvent être utilisées pour fournir l'énergie nécessaire à l'antenne pour rayonner efficacement.

#### II.3.1 Alimentation avec contact

##### II.3.1.1 Alimentation par ligne microruban

Cette méthode d'alimentation implique la connexion directe d'une ligne microruban (généralement de  $50\Omega$ ) au bord du patch rayonnant, avec une bande conductrice de longueur inférieure à celle du patch. Cette technique est peu coûteuse et facile à mettre en œuvre [12] [13]et [14].

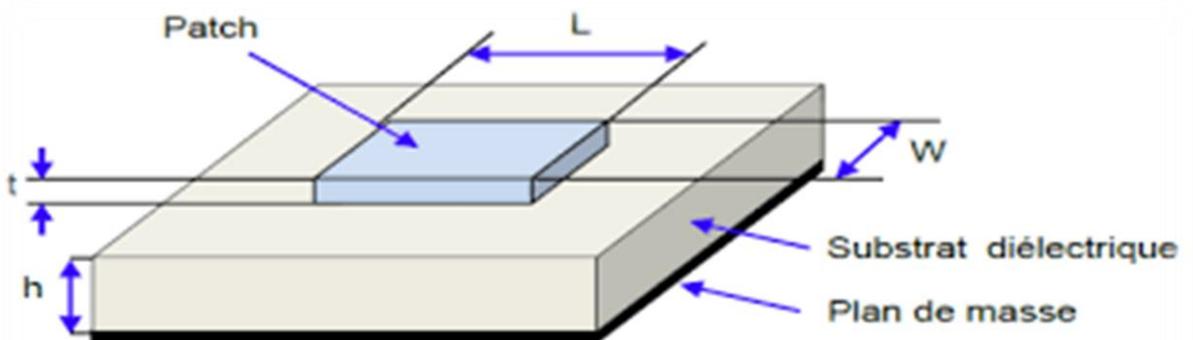


Figure II-3 : Alimentation par ligne Micro ruban [12]

### II.3.1.2 Alimentation par sonde coaxiale

Cette technique d'alimentation présente l'avantage de placer l'alimentation sous l'élément rayonnant et d'utiliser une ligne coaxiale non rayonnante appliquée à n'importe quel endroit souhaité dans le patch, ce qui réduit significativement les rayonnements parasites [15] [17] [13].

Le conducteur central du câble coaxial est soudé à l'élément rayonnant après avoir traversé le plan de masse et le diélectrique, tandis que le conducteur extérieur est relié au plan de masse [14] [18].

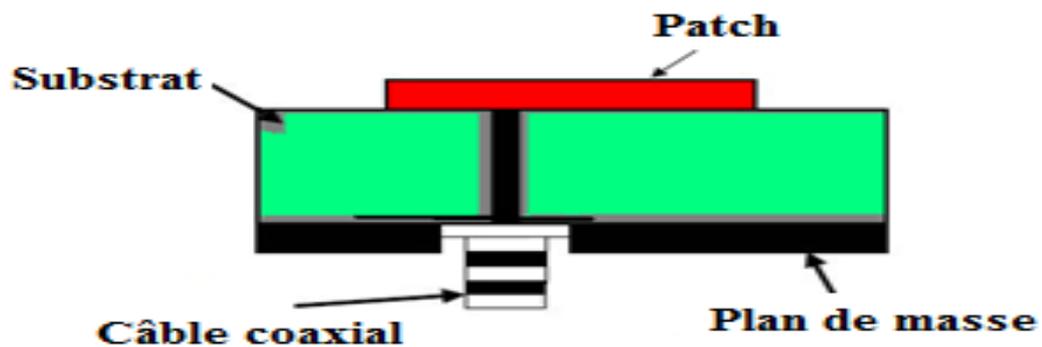


Figure II-4 : Alimentation par sonde coaxiale [15] [17].

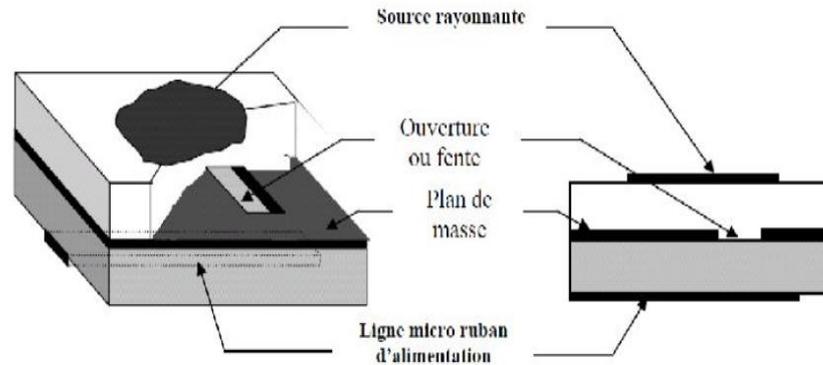
### II.3.2 Alimentation sans contact

#### II.3.2.1 Alimentation couplée par fente

En utilisant cette méthode d'alimentation, l'élément rayonnant et la ligne microruban d'alimentation sont séparés du plan de masse, comme illustré dans la figure I.9. La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation se fait par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Généralement, les substrats inférieurs avec une permittivité élevée sont employés, tandis que les substrats supérieurs avec une faible constante diélectrique sont utilisés pour optimiser le rayonnement du patch [13] [14] [15] [17].

Cependant, cette méthode est difficile à concevoir en raison de ses couches multiples, qui augmentent l'épaisseur de l'antenne. Toutefois, elle offre une large bande passante [6], ce qui la rend utile pour certaines applications. Un inconvénient majeur de cette technique est sa complexité de fabrication, qui est due à l'ouverture dans les plans de masse et à la nécessité de

réaliser deux couches diélectriques [29] [11]. Même avec cette complexité, elle reste utilisée pour améliorer la bande passante jusqu'à 25% dans certaines applications [8].



**Figure II-5** : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse [13] [14]

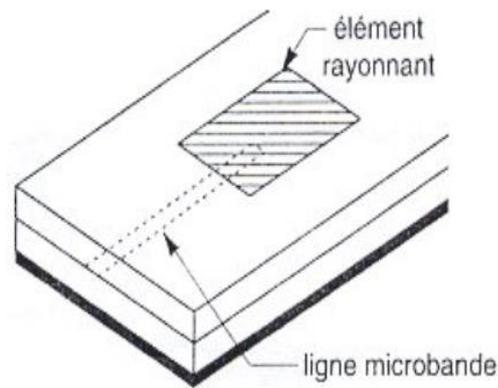
### II.3.2.2 Alimentation couplée par proximité

Elle est utilisée dans les antennes microbandes pour fournir une largeur de bande élevée et éliminer le rayonnement parasite dû à l'alimentation.

Le couplage électromagnétique utilise deux substrats diélectriques, avec la ligne d'alimentation située entre les deux substrats et le patch imprimé sur le substrat supérieur. Cette méthode permet d'optimiser les performances de l'antenne en choisissant des milieux diélectriques différents pour le patch et la ligne d'alimentation.

Cependant, cette méthode présente des inconvénients, notamment la difficulté de fabrication en raison des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié. De plus, l'intégration de dispositifs actifs peut être difficile avec cette méthode d'alimentation.

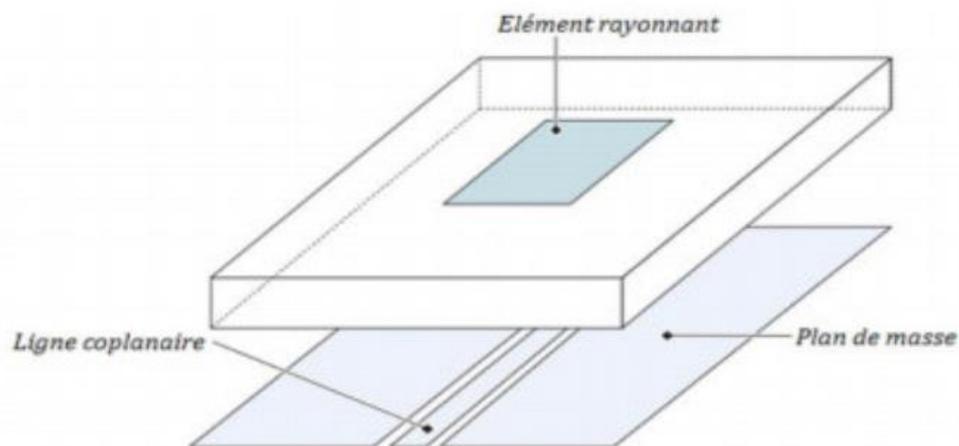
En résumé, le couplage électromagnétique est une technique d'alimentation utilisée dans les antennes microbandes pour fournir une largeur de bande élevée et éliminer le rayonnement parasite. Cependant, cette méthode présente des défis de fabrication et d'intégration de dispositifs actifs.



**Figure II-6** : Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande [13]

### II.3.2.3 Alimentation par couplage par guide d'ondes coplanaires

Dans cette technique le plan de masse et la ligne d'alimentation sont situés sur la même face du substrat, tandis que l'élément rayonnant est imprimé sur un second substrat qui est déposé au-dessus, à la hauteur des fentes rayonnantes. Le pavé rayonnant est activé par le biais d'un couplage électromagnétique entre les deux substrats.



**Figure II-7** : Alimentation par guide d'ondes coplanaires [29]

## II.4 Caractéristiques des antennes imprimées

Les antennes présentent des caractéristiques spécifiques mises en évidence par chaque application. En règle générale, une antenne adaptée à un type d'application ne conviendra pas à d'autres types d'applications. Les caractéristiques d'une antenne peuvent être décrites par :

### II.4.1 Impédance d'entrée

Une antenne est caractérisée par deux bornes d'entrée, A et B. Soit la tension entre les bornes A et B, et soit le courant alimentant l'antenne. L'impédance d'entrée de l'antenne est définie par la formule suivante [7] :

$$z_e = \frac{v_e}{i_e} = R + jX \quad \text{II. 1}$$

Où :

$Z$  : impédance d'entrée aux bornes A et B.

$R$  : résistance de l'antenne aux bornes A et B.

$X$  : réactance de l'antenne aux bornes A et B

### II.4.2 Bande passante

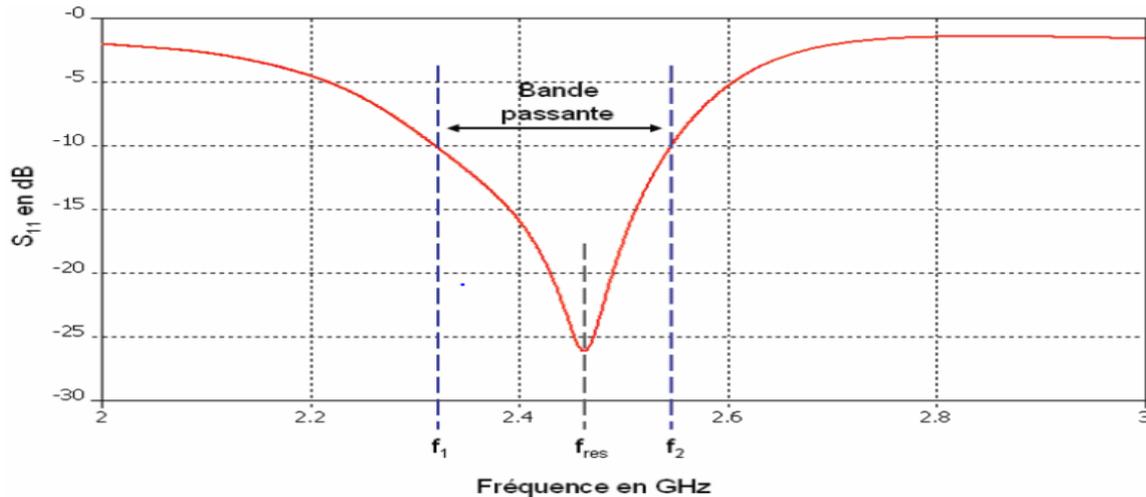
Ce paramètre correspond à la gamme de fréquences où le transfert d'énergie vers ou depuis l'antenne vers le récepteur est à son maximum (largeur de bande de fonctionnement) [29]. Par conséquent, la bande passante d'une antenne définit la gamme de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB.

La Figure I.4 montre le paramètre  $S_{11}$  d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB.

$$|BP| = f_2 - f_1$$

Habituellement, ce paramètre est également évalué en pourcentage de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale  $f_m$  [29] :

$$BP = \frac{|BP|}{f_m} \quad \text{II. 2}$$



**Figure II-8 :** Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [29]

### II.4.3 Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \phi)$  à la puissance qu'une source isotrope de référence rayonnerait par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [8] :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta P_A} \quad \text{II. 3}$$

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou pire que celle de l'antenne isotrope [9].

### II.4.4 Gain

Le gain d'une antenne dans une direction donnée  $(\theta, \phi)$  représente le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction  $P(\theta, \phi)$  à la puissance qu'aurait une source isotrope de référence, émettant avec la même puissance totale et répartie uniformément dans toutes les directions, par unité d'angle solide. Cette grandeur est généralement utilisée pour caractériser les performances d'une antenne, et elle est donnée par l'expression suivante [16] :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} = D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_A} \quad \text{II. 4}$$

### II.4.5 Rendement

L'efficacité d'une antenne, qui mesure son rendement en termes de conversion de la puissance électrique en énergie rayonnée, est donnée par la relation entre le gain de l'antenne et sa directivité. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad \text{II. 5}$$

### II.4.6 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre les variations de la densité de puissance rayonnée par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace. Sauf pour les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas leur puissance uniformément dans toutes les directions de l'espace [11].

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se concentre une grande partie de la puissance rayonnée, ainsi que des directions secondaires où la fraction de la puissance restante est répartie. La fonction caractéristique de rayonnement  $(\theta, \varphi)$  de l'antenne est définie comme le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $(\theta, \varphi)$  à la puissance  $P_{\max}$  de la direction où le rayonnement est maximal [11].

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad \text{II. 6}$$

Différents types de représentation des diagrammes sont utilisées tel que le diagramme en coordonnées polaires et le diagramme en coordonnées cartésiennes comme la montre les figures.

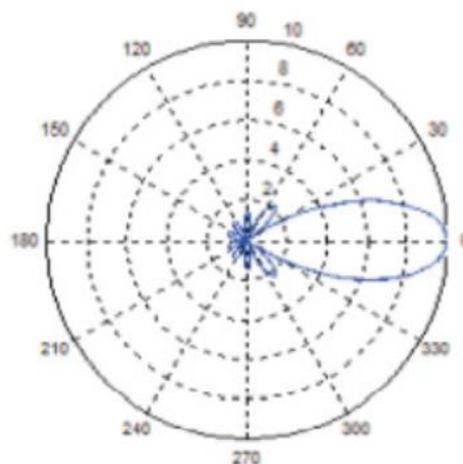
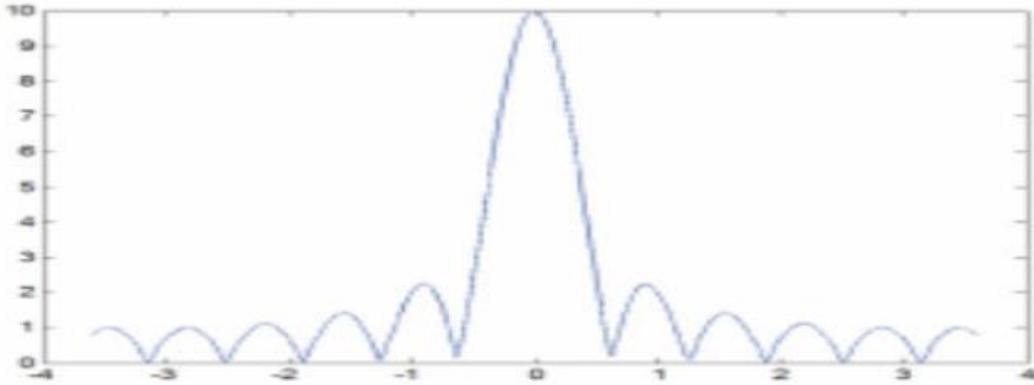


Figure II-9 : Diagramme en coordonnées polaires [11].



**Figure II-10 :** Diagramme en coordonnées cartésiennes [11].

### II.4.7 Coefficient de réflexion $s_{11}$

Un faible coefficient de réflexion est nécessaire pour assurer un transfert de puissance maximal entre les différents éléments d'un circuit d'émission/réception radiofréquence. Pour cela, les différents éléments du circuit sont conçus pour être adaptés à une impédance caractéristique  $Z_c$ .

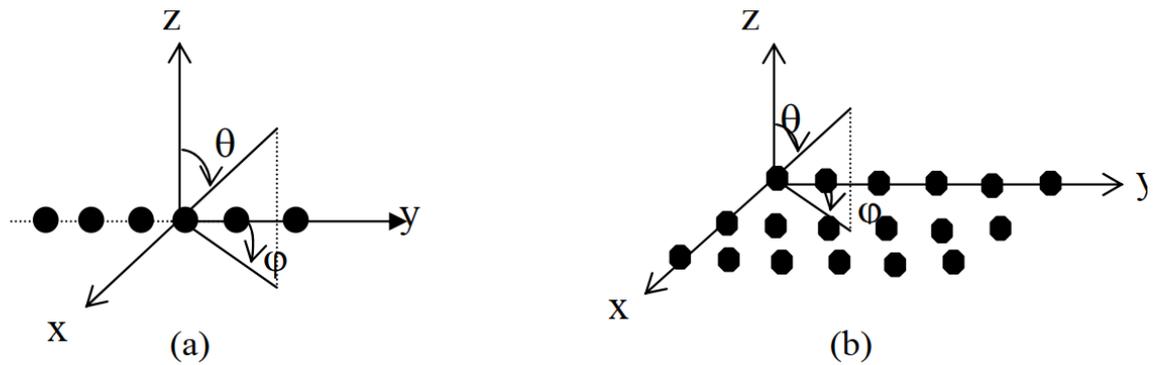
L'impédance caractéristique peut prendre différentes valeurs selon l'application. Elle est par exemple de 75 ohms pour des applications grand public comme la réception de télévision terrestre ou par satellite. Cependant, dans la plupart des configurations professionnelles, l'impédance caractéristique est fixée à 50 ohms.

Le coefficient de réflexion est un indicateur de la quantité d'énergie absorbée par l'antenne. Il est utilisé pour optimiser les performances de l'antenne [30].

## II.5 Réseau d'antennes imprimées

Souvent, l'utilisation d'une seule antenne patch est insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement requises. Les réseaux d'antennes imprimées sont constitués d'éléments rayonnants fonctionnant à la même fréquence et sont agencés périodiquement dans une ou plusieurs directions.

Les réseaux d'antennes peuvent avoir différentes géométries, y compris des réseaux linéaires et plans (bidimensionnels) [17].



**Figure II-11** : Différents types de réseaux (a) linéaire (b) bidimensionnels [17]

## II.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et limitations.

### II.6.1 Avantages des antennes imprimées

- Poids et volume réduits ;
- Faible coût et robustesse (montage sur surfaces rigides) ;
- Polyvalence (fréquence, polarisation, graphique...) ;
- Facilité d'intégration dans les circuits intégrés hyperfréquences ;
- Convient aux surfaces courbes

### II.6.2 Inconvénients des antennes imprimées

- Ils ont besoin d'un substrat de bonne qualité :  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$  ;
- Courant faible ;
- L'impédance d'entrée est difficile à calculer et à régler ;
- Efficacité réduite des actions correctives (pertes de réseau)

## II.7 Applications des antennes imprimées dans la 5G

Grâce aux recherches continues et aux développements dans l'utilisation des antennes microbandes, on s'attend à ce qu'elles remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications, selon [22].

Différentes applications ont déjà été couronnées de succès, notamment :

- Télécommunications par satellites
- Commande et contrôle
- Télémétrie (télémesure) par missile
- Équipements portatifs
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes
- Antennes d'émission utilisées en médecine
- Récepteurs de navigation par satellite

### II.8 Cinquième génération 5G

La technologie 5G vise à se positionner comme une génération révolutionnaire qui va au-delà du domaine des opérateurs mobiles et des communications grand public. Au lieu de cela, il offre de nouvelles possibilités et facilite la coexistence d'un large éventail d'applications et d'utilisations au sein d'une même technologie [25].

#### II.8.1 Historique

Les organisations mondiales de développement de normes telles que le 3rd Group Partnership Project (3GPP) sont responsables de la prise en charge des technologies de communication mobile, qui sont souvent classées en différentes générations. Par exemple, la première génération (1G) fait référence au système mobile analogique utilisé dans les années 1980, tandis que la deuxième génération (2G) était le premier système mobile numérique. La troisième génération (3G) a été le premier système capable de prendre en charge les données à large bande. L'évolution à long terme (LTE), souvent appelée "4G", représente l'évolution à long terme des systèmes mobiles, avec LTE Advanced marquant l'étape réelle vers la 4ème génération, et la version initiale de LTE, la version 8, étant surnommée "3.9G". Comme le montre le tableau I.3, il existe un écart de dix ans entre les premières générations de technologies de communication sans fil.

Le tableau suivant présente également les spécificités de chacune des cinq générations [26].

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

**Tableau II-1** : Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobiles.

## II.8.2 Définition de la 5G

La « 5G » est une nouvelle génération de technologie de télécommunication sans fil qui succède aux précédentes générations de téléphonie mobile. Il promet de révolutionner la façon dont nous communiquons à l'échelle mondiale. Cette cinquième génération (5G) vise à améliorer la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Avec la 5G, la transmission de données sur des connexions sans fil à haut débit pourrait potentiellement atteindre une vitesse de 20 Gbit/s, dépassant celle des réseaux filaires, et avec une latence égale ou inférieure à 1 ms pour les applications de bouclage en temps réel, selon certaines estimations. La 5G, avec son avantage en bande passante et sa technologie d'antenne avancée, ouvre également la voie à une croissance exponentielle des données transmises sur les systèmes sans fil [27].

## II.8.3 Objectif et Principe

La technologie 5G permet des connexions et des téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une gamme de nouveaux usages, avec un accent particulier sur l'Internet des objets. La 5G vise à :

- Assurer un accès internet haut débit depuis les smartphones ou les tablettes.

- Atteindre les meilleurs débits (1 Gbps). Avoir des forfaits de données plus importants : le volume de données devrait être 1000 fois plus élevé.
- Atteindre un délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Avoir un temps de « latence » plus court, donnant l'impression que le réseau est très réactif.
- Nécessite moins d'antennes : le nombre de terminaux connectables par antenne doit être 100 fois plus élevé, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.

La 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique en exploitant plusieurs bandes de fréquences, y compris les ondes millimétriques entre 24 et 300 GHz, ainsi que les bandes entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas utilisées en 4G [28].

## II.9 La Bande 5G

La 5G prendra en charge tous les besoins en communication des réseaux locaux (LAN) (comme les réseaux domestiques) aux réseaux étendus (WAN), avec les paramètres latence/vitesse qui conviennent.

La 5G est une technologie qui utilise des fréquences basses ( $f < 1\text{GHz}$ ), des fréquences hautes ( $1\text{GHz} < f < 6\text{GHz}$ ) et, pour la première fois dans des réseaux grand public, des fréquences très élevées appelées "millimétriques" ( $f > 6\text{GHz}$ ).

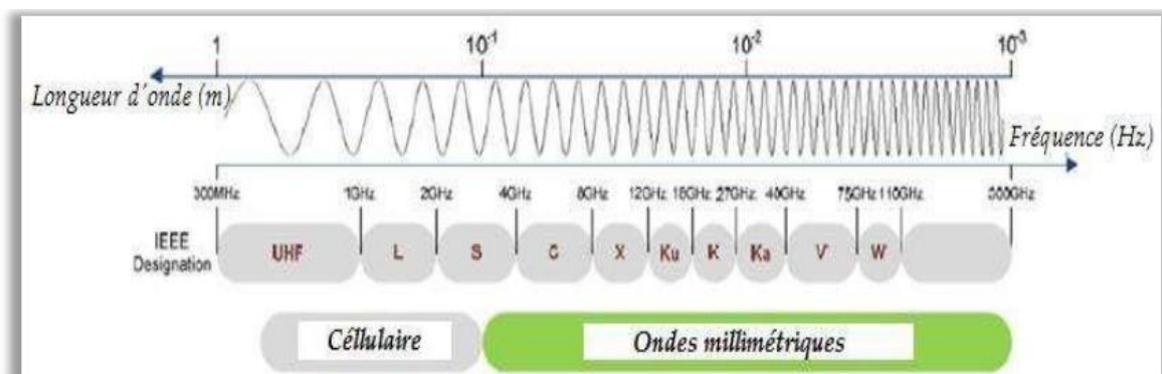


Figure II-12 : Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétrique [20]

## **II.10 Conclusion**

Les antennes imprimées sont une solution prometteuse pour les applications 5G en raison de leur compacité, de leur faible coût et de leur facilité de fabrication.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux des antennes imprimées et des généralités sur la technologie 5G. Nous avons présenté brièvement au premier lieu la définition d'une antenne imprimée ensuite les différentes techniques d'alimentation de ce type antennes, leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'application. La deuxième partie du chapitre a été consacrée à la technologie 5G.

## **Chapitre III : Simulations & résultats**

### **III.1 Introduction :**

La simulation des structures EBG dans le contexte du 5G est un outil essentiel pour garantir des performances optimales des antennes et des systèmes de communication.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation des antennes conçues. Nous examinons aussi les avantages des structures EBG qu'elles offrent en termes d'amélioration du gain et d'optimisation des performances des antennes dans le contexte du déploiement du 5G.

### **III.2 Choix de l'outil de simulation**

Il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques couramment utilisés pour la conception de composants micro-ondes tels que les antennes imprimées, les filtres HF, etc. Parmi ces simulateurs, le HFSS (High Frequency Simulation Software), ADS (Advanced Distribution System) Momentum, IE3D (Integral Equation Three-Dimensional) et CST MICROWAVESTUDIO sont tous des outils bien connus dans le domaine [1] [2].

Dans notre travail, nous avons utilisé le CST MICROWAVESTUDIO qui est un logiciel spécialisé dans la simulation en 3D des composants à haute fréquence. Ce logiciel est basé sur la résolution des équations de Maxwell à l'aide de la technique des intégrales finies (FIT : Finite Integration Technique). La méthode des intégrales finies permet de discrétiser les équations de Maxwell sur une grille et de résoudre numériquement le problème électromagnétique [1].

L'un des avantages de l'utilisation de CST MICROWAVESTUDIO est sa capacité à traiter différentes structures homogènes, indépendamment de la technologie utilisée. Cela signifie que nous pouvons modéliser et simuler une variété de composants micro-ondes, qu'ils soient fabriqués à partir de substrats diélectriques classiques, de guides d'ondes, ou d'autres matériaux homogènes.

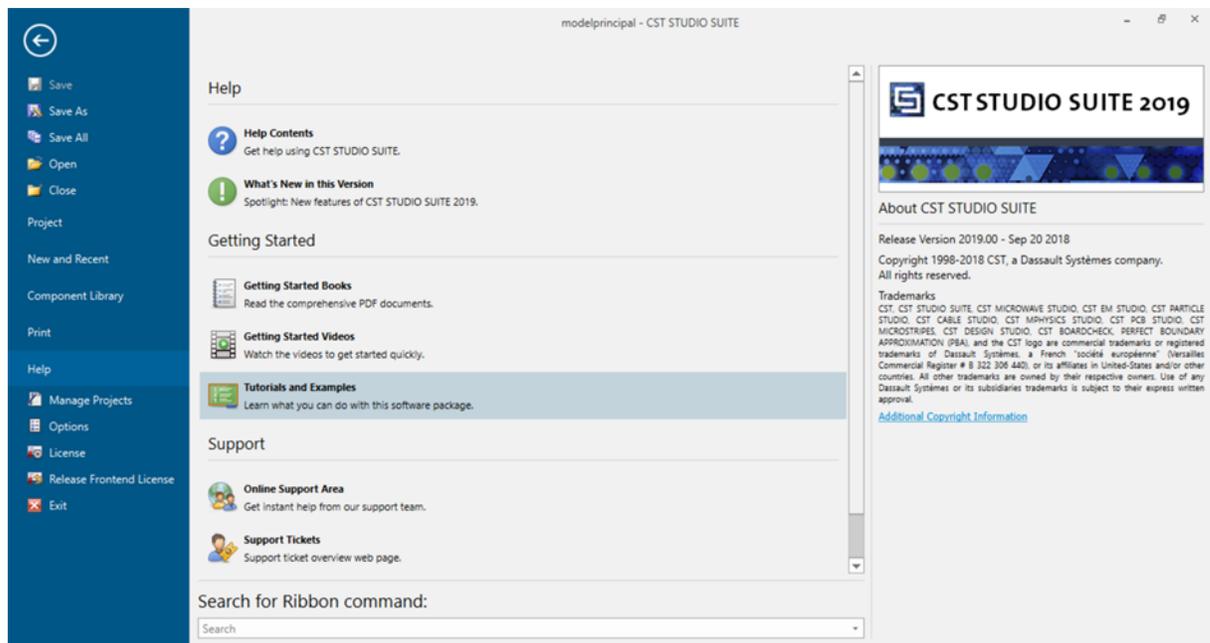


Figure III-1: Outil de simulation CST Studio Suite 2019.

### III.3 Les Structures proposées

#### III.3.1 Antenne proposéé (1)

La géométrie de l'antenne proposée (1) est représentée sur la figure III-2. La structure initiale est une antenne patch rectangulaire.

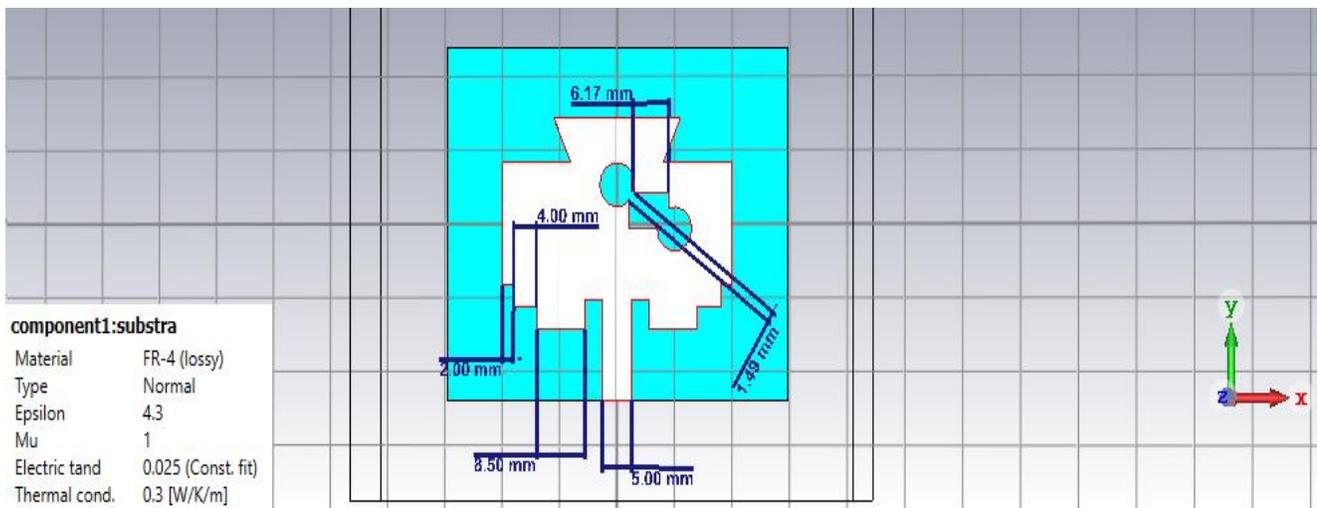


Figure III-2 : Géométrie de l'antenne proposée (1)

Pour calculer les dimensions de l'antenne initiale nous avons utilisé les équations présentées dans le tableau III.1 :

Paramètres de l'antenne	Equations
Longueur réelle du patch	$lp = leff - 2\Delta l$
Longueur effective	$Leff = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
L'extension de longueur	$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{reff} + 0.3)\left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258)\left(\frac{w}{h} + 0.8\right)}$
Constante diélectrique	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12\frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$
Largeur du patch	$Wp = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_r + 1}}$
Longueur du substrat	$ls = lp + 6h$
Largeur du substrat	$ws = wp + 6h$
Largeur de la ligne	$Wf = \frac{8e^A}{e^{2A-2}} \times h$ <p>Avec <math>A = \frac{Z\sqrt{2(\epsilon_r+1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}\right) \times \left(h \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \times \ln \frac{4}{\pi}\right)</math></p>

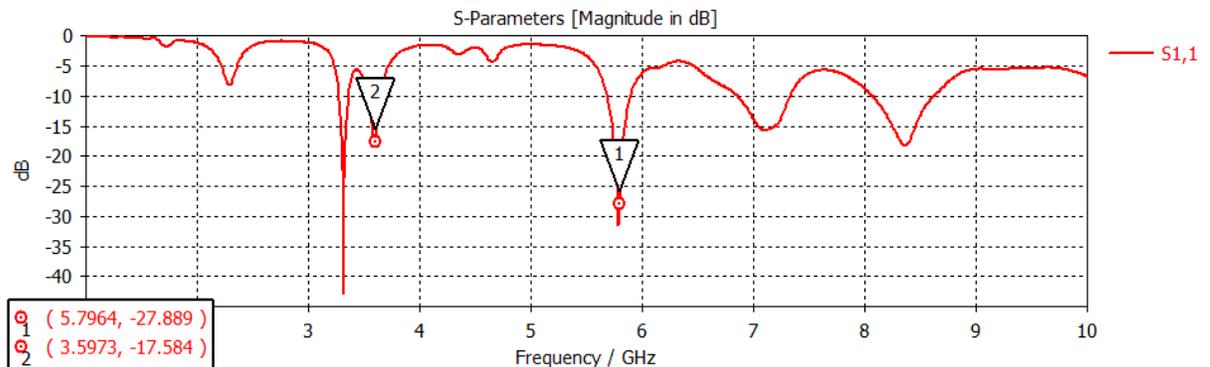
**Tableau III-1** : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.

Les paramètres calculés sont mentionnés dans le tableau III.2.

Paramètres	Ws	Ls	wp	Lp	Wf	Lf	hs	em
Dimensions (mm)	$Wp/2+6hs=29.5$	$lp/2+6hs=29.5$	40	40	3.8	$Wp/2+lp/2+6*hs$	1.6	0.035

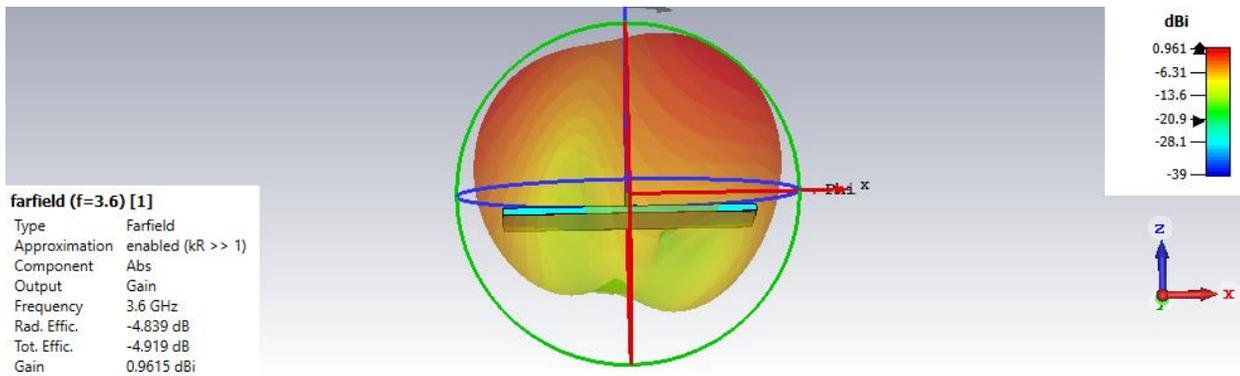
**Tableau III-2** : Les paramètres géométriques calculés

Le coefficient de réflexion de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-3. Ce résultat montre que l'antenne est bien adaptée à 3.6 et 5.8 GHz.



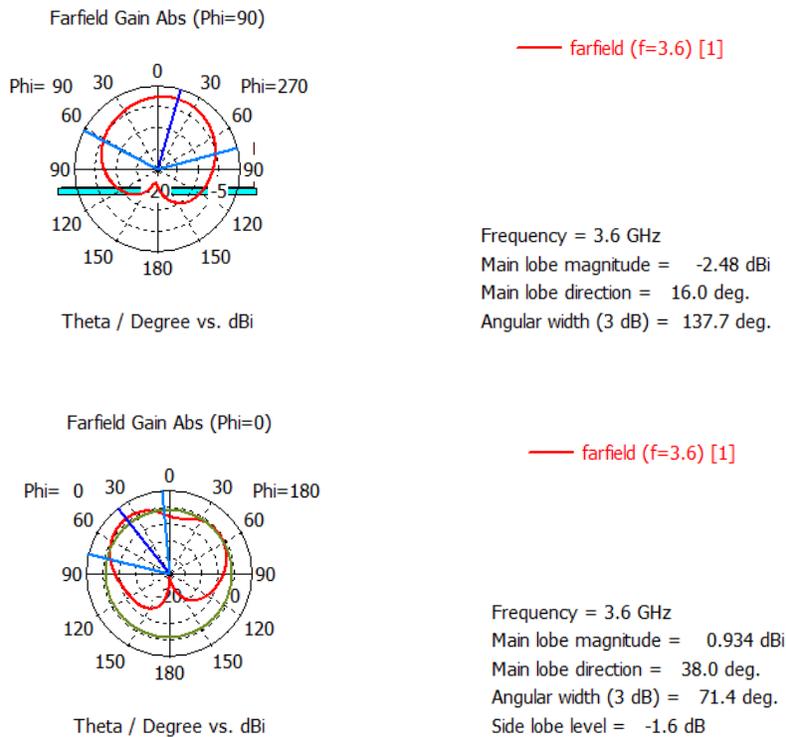
**Figure III-3** : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée (1)

Le diagramme de rayonnement 3D à la fréquence de résonance 3.6 GHz de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-4. Le gain obtenu à cette fréquence est de l'ordre 0.961dB.



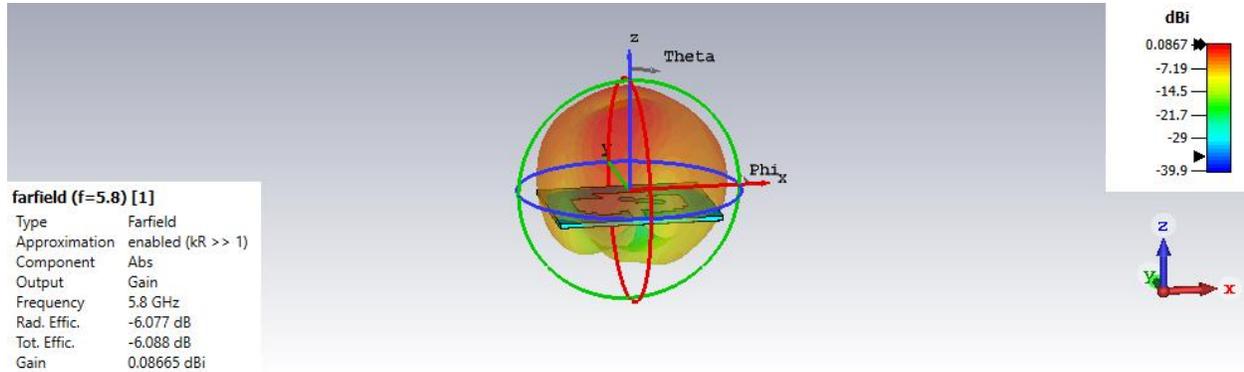
**Figure III-4 :** Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée (1) à 3.6 GHz

Le diagramme de rayonnement en coordonnées polaire à la fréquence 3.6 GHz de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-5. Nous que ce diagramme de rayonnement est omnidirectionnel.



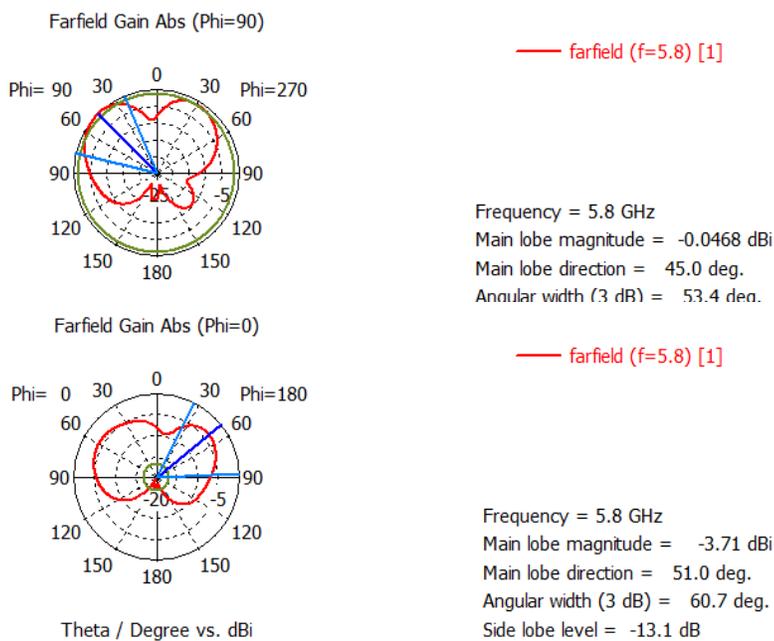
**Figure III-5 :** Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (1) à 3.6 GHz

Le diagramme de rayonnement à 5.8 GHz de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-6. Le gain obtenu à cette fréquence est de l'ordre 0.0867dB.



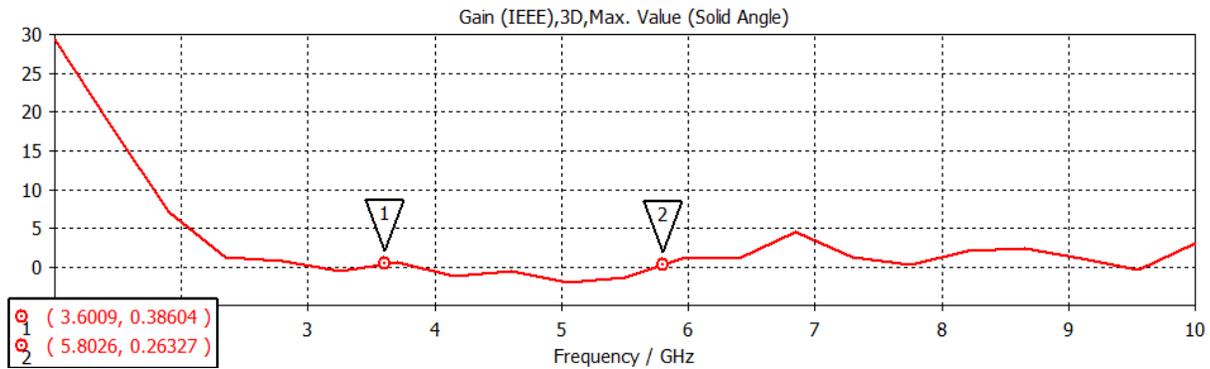
**Figure III-6 :** Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée (1) à 5.8Ghz

Le diagramme de rayonnement en coordonnées polaire à la fréquence 5.8 GHz de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-7. Ce diagramme de rayonnement assemble deux lobes d'ouvertures différentes pour  $\Phi=0^\circ$  et  $\Phi=90^\circ$ .



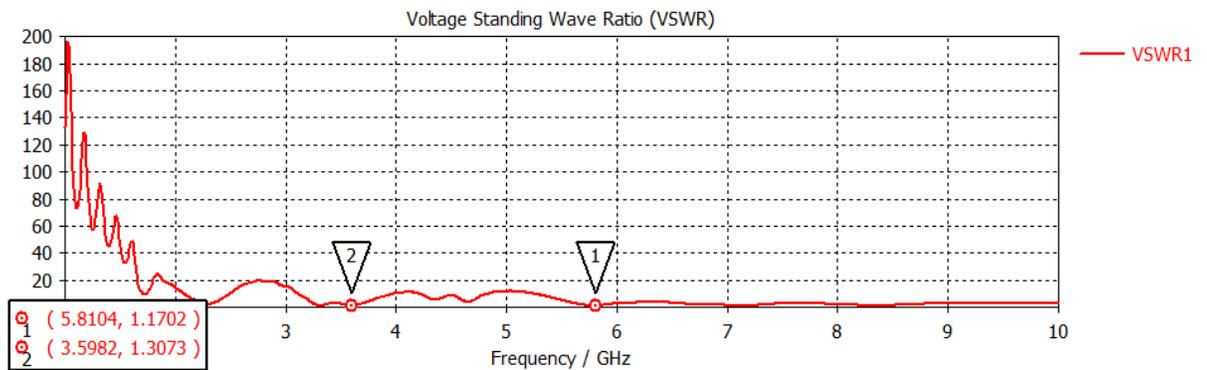
**Figure III-7 :** Diagramme de rayonnement en coordonnées polaire de l'antenne proposée (1) à 5.8Ghz

Le gain de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-8. On remarque que le gain est de l'ordre de 0.386 à la fréquence 3.6 GHz et de 0.263 à la fréquence 5.8 GHz.



**Figure III-8** : le gain de l'antenne proposée (1)

Le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) de l'antenne proposée (1) est représenté sur la figure III-9. Nous avons une bonne adaptation de l'antenne puisque le TOS est inférieur à 2 aux deux fréquences désirées.



**Figure III-9** : VSWR de l'antenne proposée (1)

### III.3.2 Antenne proposée (2)

La structure initiale est une antenne patch rectangulaire adaptée à une impédance d'entrée de  $50 \Omega$ . Le substrat utilisé est de type FR-4 (LOSSY) de permittivité relative  $\epsilon_r = 4.3$  et d'épaisseur  $h = 1.6 \text{ mm}$ .

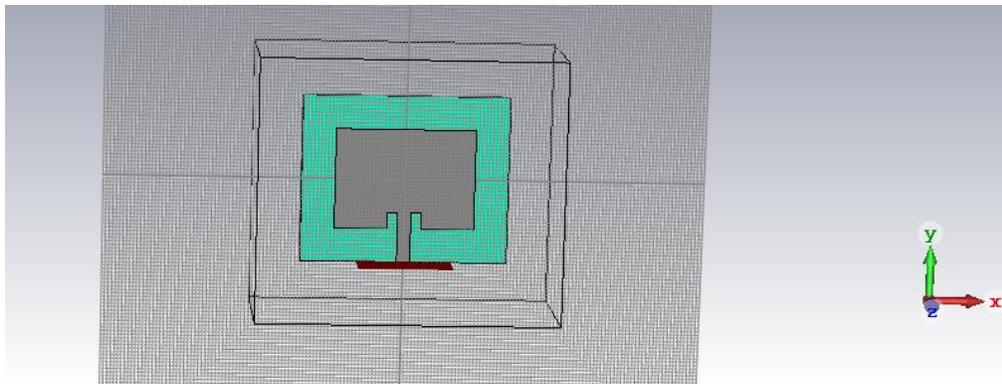
Le plan de masse ainsi que le patch sont faits de cuivre avec une épaisseur  $t = 0.035 \text{ mm}$ .

Les paramètres calculés sont mentionnés dans le tableau III.3.

Paramètres	Ws	Ls	wp	Lp	Wf	Lf	hs	em
Dimensions (mm)	$Wp/2+6hs=29.5$	$lp/2+6hs=29.5$	40	40	3.8	$Wp/2+lp/2+6*hs$	1.6	0.035

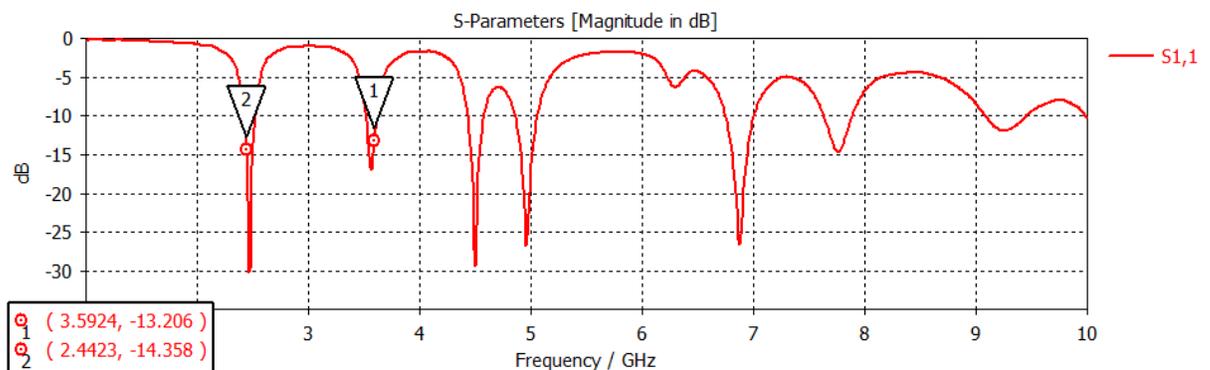
**Tableau III-3 :** Les paramètres géométriques calculés

La géométrie de l'antenne est représentée sur la figure III-10.



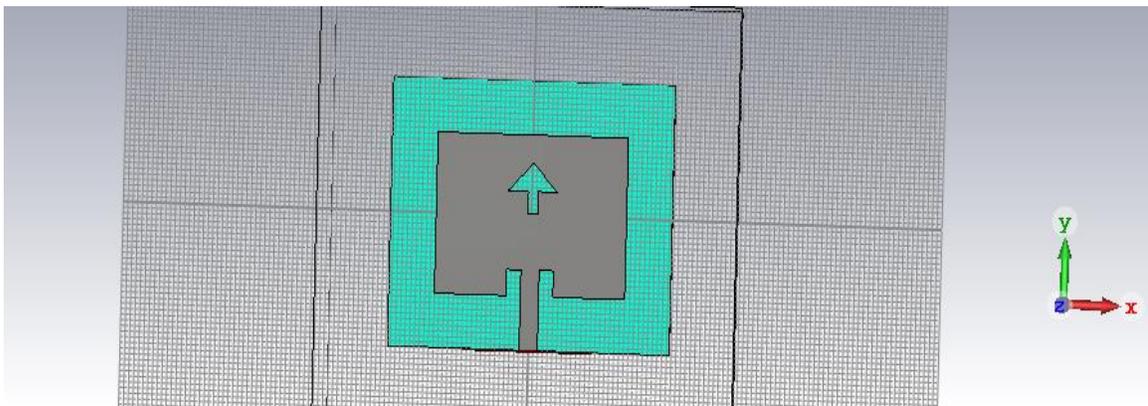
**Figure III-10 :** Structure initiale de l'antenne

Le coefficient de réflexion de l'antenne initiale est représenté sur la figure III-11. On remarque sur cette figure qu'on a une adaptation à la fréquence de 2.44 GHz et 3.59 GHz avec un coefficient de réflexion  $S_{11}$  plus de 10 dB.



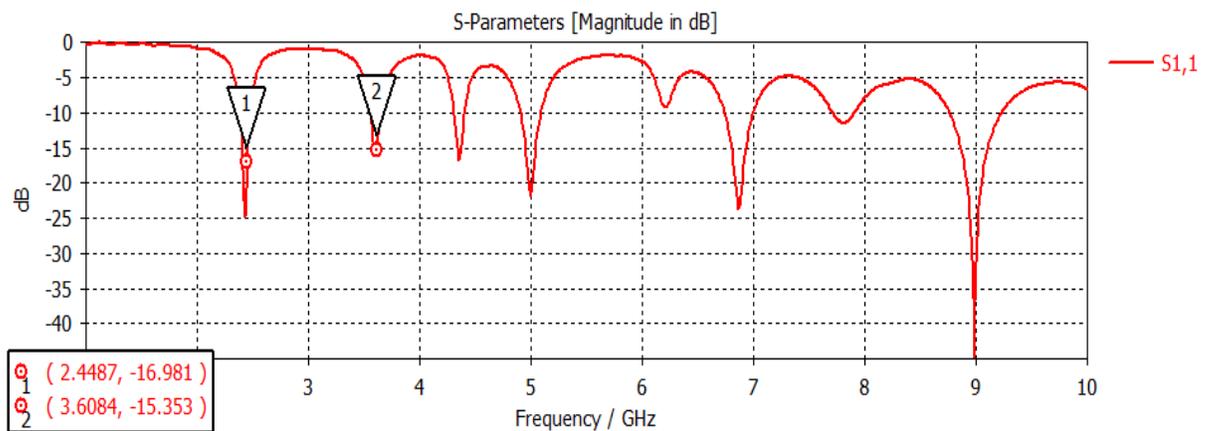
**Figure III-11 :** Coefficient de réflexion de l'antenne initiale

Pour avoir les performances souhaitées, nous introduisons en premier lieu une fente dans le patch comme illustrée sur la figure III-12.



**Figure III-12 :** Antenne avec un fente

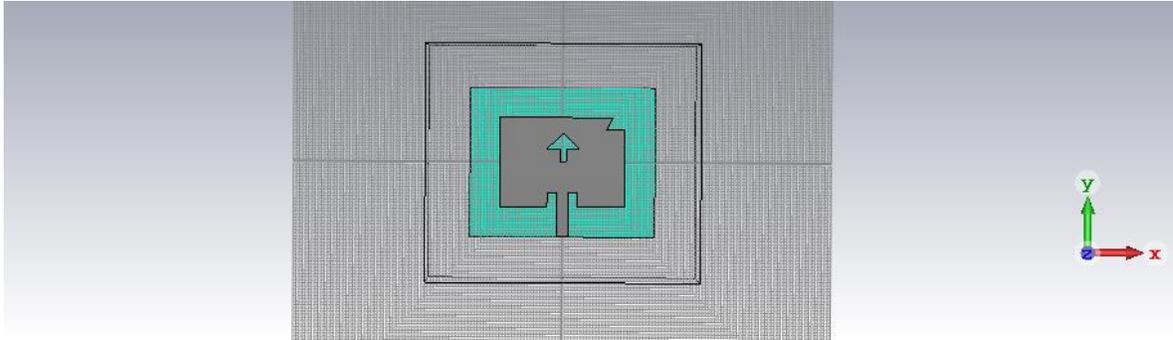
Le Coefficient de réflexion de l'antenne avec un fente est représenté sur la figure III-13.



**Figure III-13 :** Coefficient de réflexion de l'antenne avec un fente

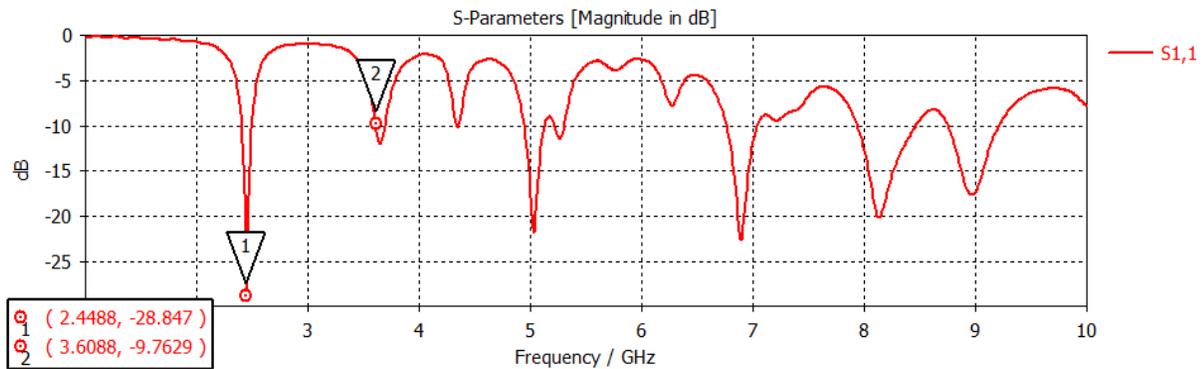
En pratiquant une fente dans le patch, il est notable sur la figure III-13 que le coefficient de réflexion à la fréquence de 2,45 GHz et 3,6 GHz est supérieurs à 15 dB, donc une amélioration de l'adaptation.

Toujours dans le but d'obtenir les performances désirées, nous avons fait une troncature du coin droit de l'antenne comme montré sur la figure III-14.



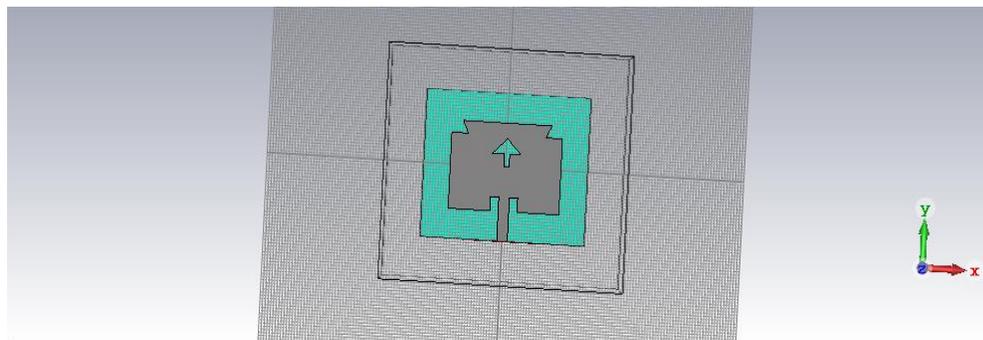
**Figure III-14** : Antenne avec fente et troncature

Le coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et troncature est représenté sur la figure III-15. Avec fente et troncature nous remarquons sur cette figure qu'on a une bonne adaptation à la fréquence de 2.45 GHz avec un coefficient de réflexion  $S_{11}$  plus de 28 dB mais on obtient une mauvaise adaptation à la fréquence de 3.6 GHz.



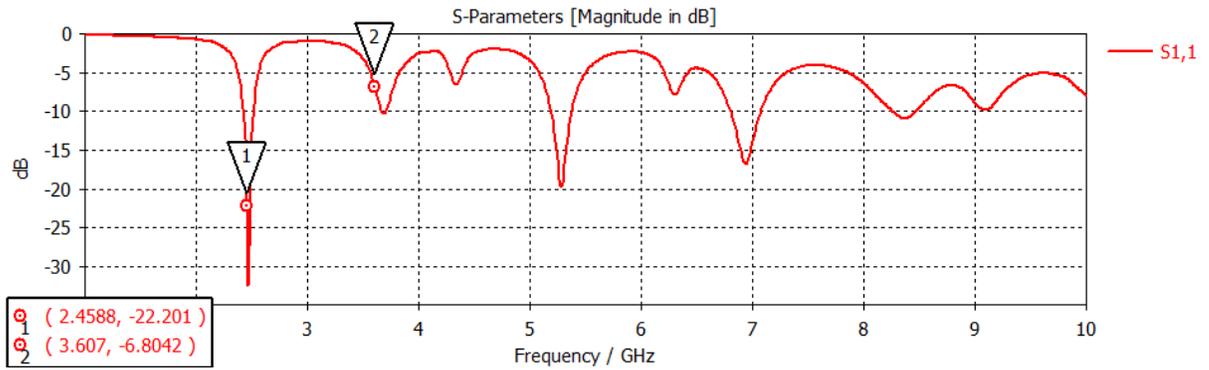
**Figure III-15** : Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et troncature

La figure III-16 représente la géométrie de l'antenne avec une seule fente et deux troncutures.



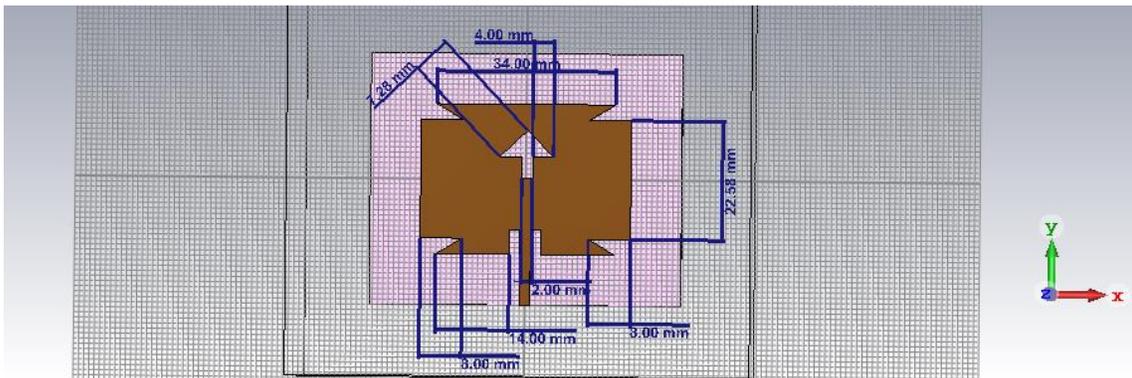
**Figure III-16** : Antenne avec fente et deux troncutures

Le Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et deux tronçatures est représenté sur la figure III-17. Nous remarquons que l'antenne avec fente et deux tronçatures n'est pas adaptée à la fréquence 3.6 GHz (moins 10 dB) mais elle est bien adaptée à la fréquence de 2.45 GHz avec un coefficient de réflexion  $S_{11}$  de 22 dB.



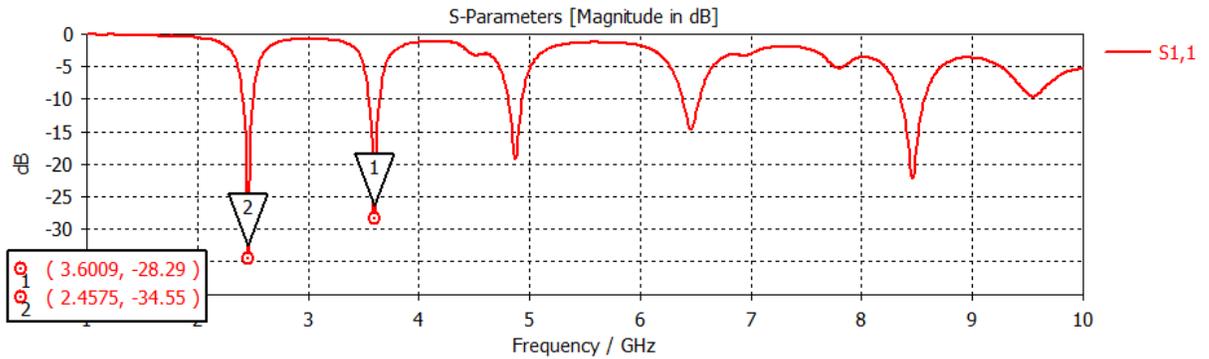
**Figure III-17 :** Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente et deux tronçatures

Toujours pour arriver à obtenir les performances désirées, nous ajoutons deux autres tronçatures dans la géométrie de l'antenne. La figure III-18 montre la géométrie de l'antenne proposée.



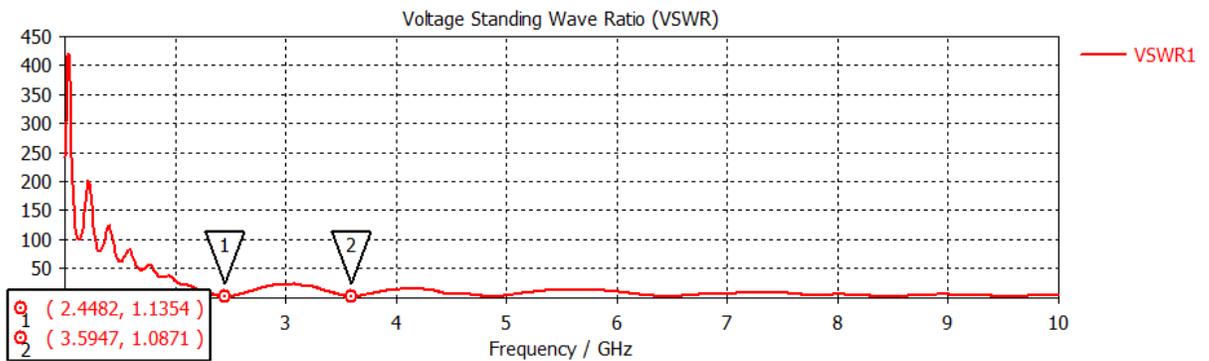
**Figure III-18 :** Géométrie de l'antenne proposéé (2)

Le coefficient de réflexion de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-19. Nous observons que notre antenne présente une bonne adaptation aux fréquences de 2,45 GHz et 3,6 GHz avec un coefficient de réflexions de -34.55 et -28.29db.



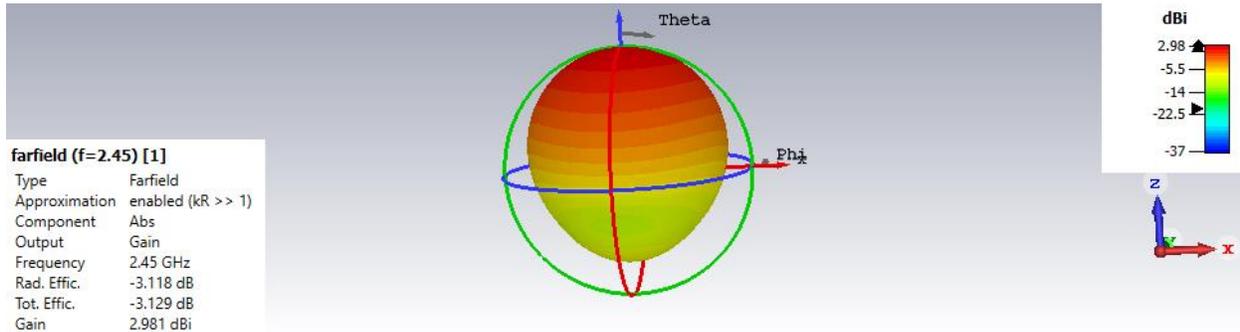
**Figure III-19** : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée (2)

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-20. Ce résultat montre que le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) est inférieur à 2 aux deux fréquences désirées et donc nous avons une bonne adaptation de l'antenne à la ligne de transmission, ce qui signifie que la majeure partie de la puissance est efficacement transférée de la ligne de transmission à l'antenne.



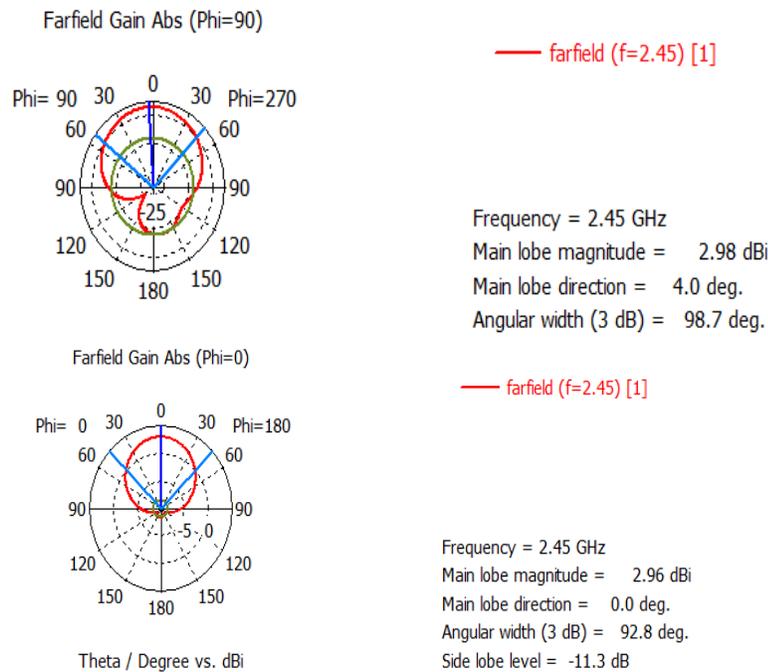
**Figure III-20** : VSWR de l'antenne proposée (2)

Le diagramme de rayonnement 3D à 2.45 GHz de l'antenne est représentée sur la figure III-21. Selon les diagrammes de rayonnement en 3D. Le gain de l'antenne proposée est de l'ordre 2.98 dB pour la fréquence de résonances 2.45 GHz.



**Figure III-21** : Diagramme de rayonnement 3D a 2.45Ghz

Le diagramme de rayonnement polaire à 2.45 GHz de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-22. Le diagramme de rayonnement polaire en 2D pour la fréquence de résonance 2.45 GHz est composé de deux lobes d'ouvertures différentes ce qui donne un diagramme de rayonnement dipolaire pour  $\Phi = 90^\circ$  et d'un seul lobe d'ouverture importante pour  $\Phi = 0$ .



**Figure III-22** : Diagramme de rayonnement polaire à 2.45 GHz

Le diagramme de rayonnement 3D à 3.6 GHz de l'antenne est représenté sur la figure III-23. Le gain de l'antenne proposée (2) est de l'ordre 0.23 dB pour la fréquence de résonance 3.6 GHz

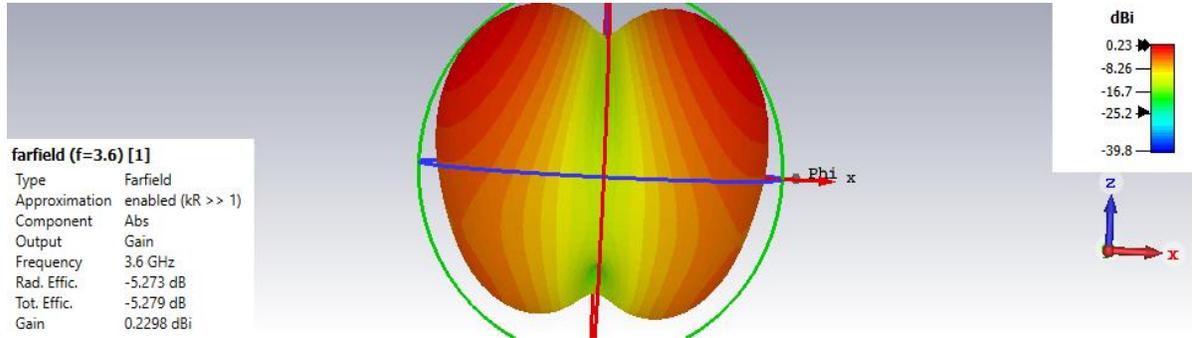


Figure III-23 : Diagramme de rayonnement 3D à 3.6 GHz

Le diagramme de rayonnement polaire à 2.45 GHz de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-24. Le diagramme de rayonnement polaire en 2D pour la fréquence de résonance 3.6 GHz est composé de deux lobe d'ouvertures pour  $\Phi = 90^\circ$  et deux lobes d'ouvertures différentes pour  $\Phi = 0^\circ$ .

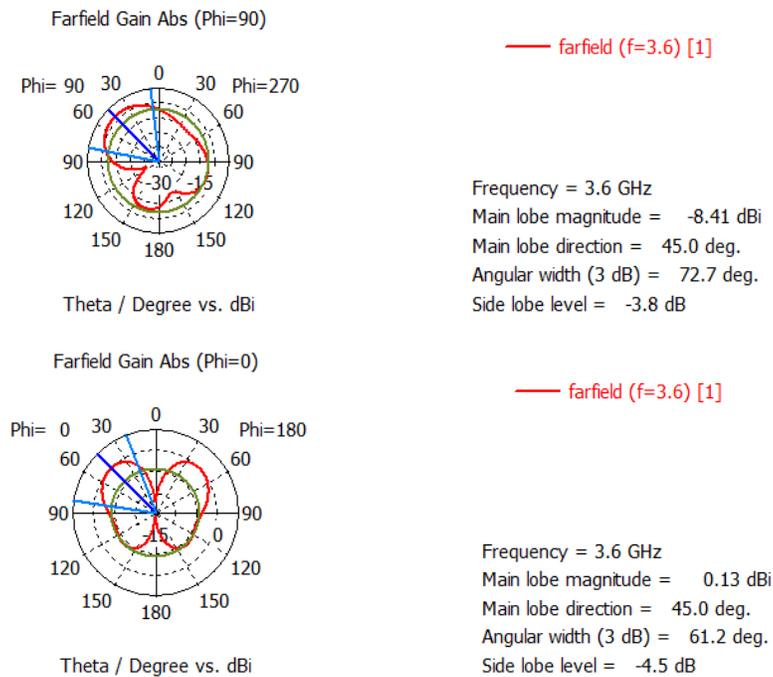
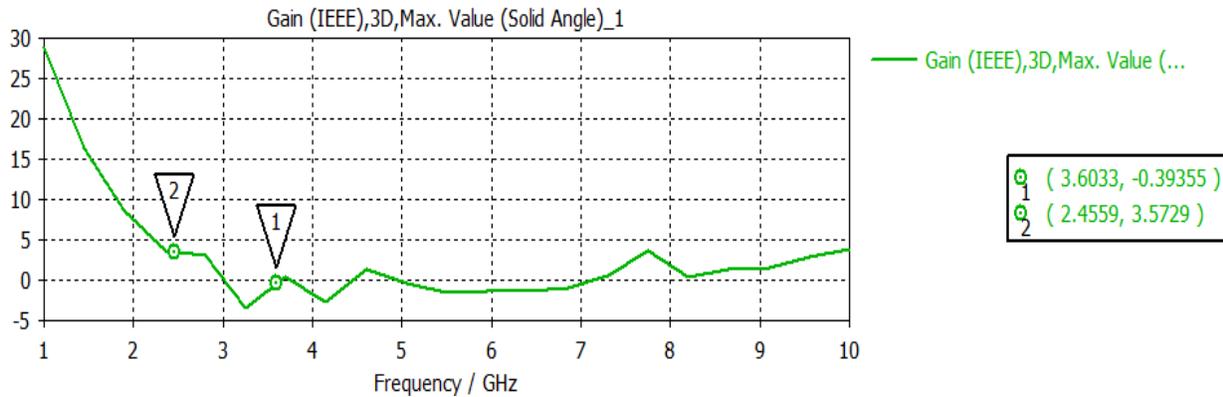


Figure III-24 : Diagramme de rayonnement polaire à 3.6 GHz

Le gain de l'antenne proposée (2) est représenté sur la figure III-25. Ce résultat montre que le gain est de l'ordre de 3.5729 à la fréquence 2.45 GHz et -0.39355 à la fréquence 3.6 GHz.

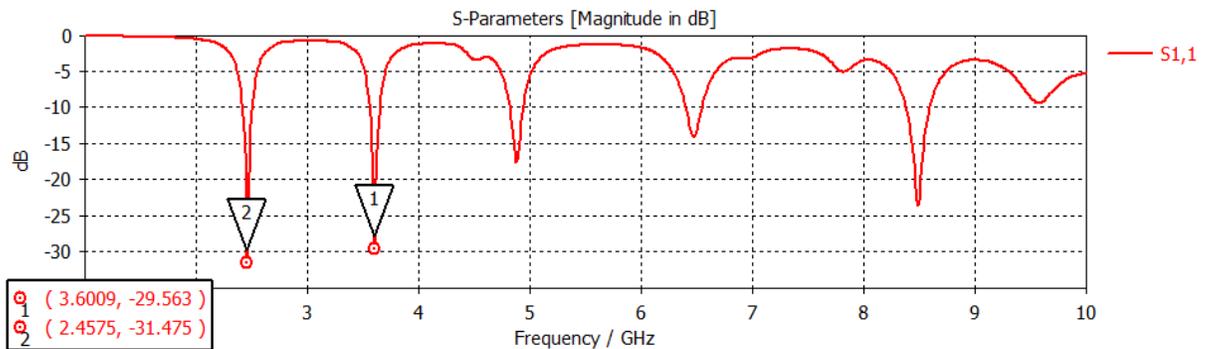


**Figure III-25** : Gain de l'antenne proposé (2)

### III.3.3 Antenne proposée et réalisée

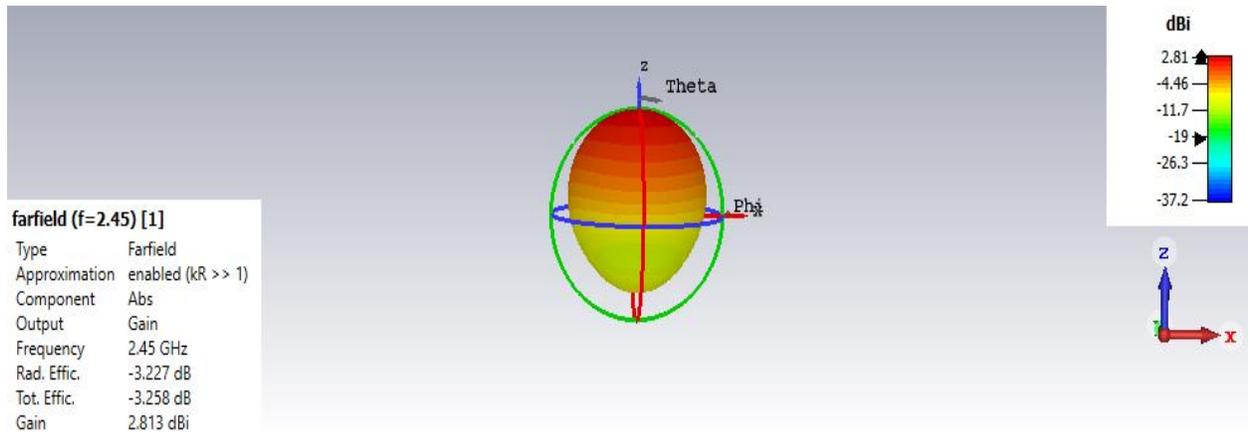
Nous avons réalisé notre antenne sur un substrat d'épaisseur de 1,5 mm au lieu de 1.6 mm, ce qui nous a amené à refaire la conception de notre antenne.

Le coefficient de réflexion de l'antenne proposée et réalisée est représenté sur la figure III-26. D'après ce résultat nous remarquons que l'antenne reste bien adaptée aux fréquences 2.45 et 3.6 GHz.



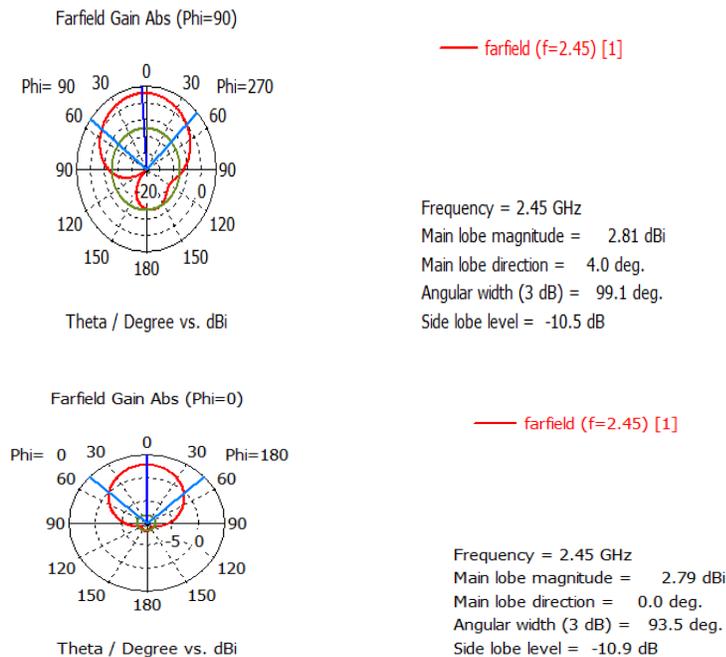
**Figure III-26** : Coefficient de réflexion de l'antenne proposée et réalisée

Le diagramme de rayonnement 3D à la fréquence 2.45 GHz est représenté sur la figure III-27. Le gain de notre antenne est de l'ordre 2.81 dBi.



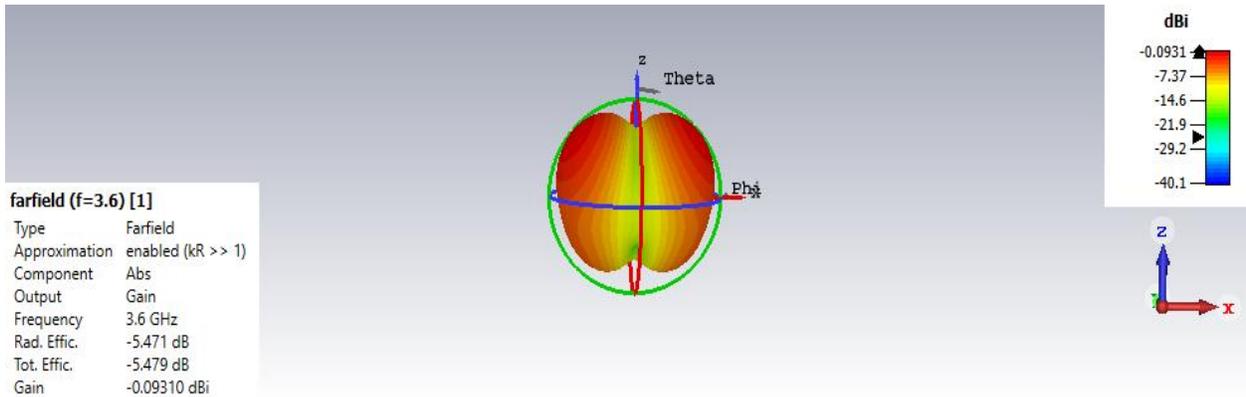
**Figure III-27** : Diagramme de rayonnement 3D à la fréquence 2.45 GHz

Le diagramme de rayonnement en coordonnées polaires à la fréquence 2.45 GHz de l'antenne proposée et réalisée est représenté sur la figure III-28.



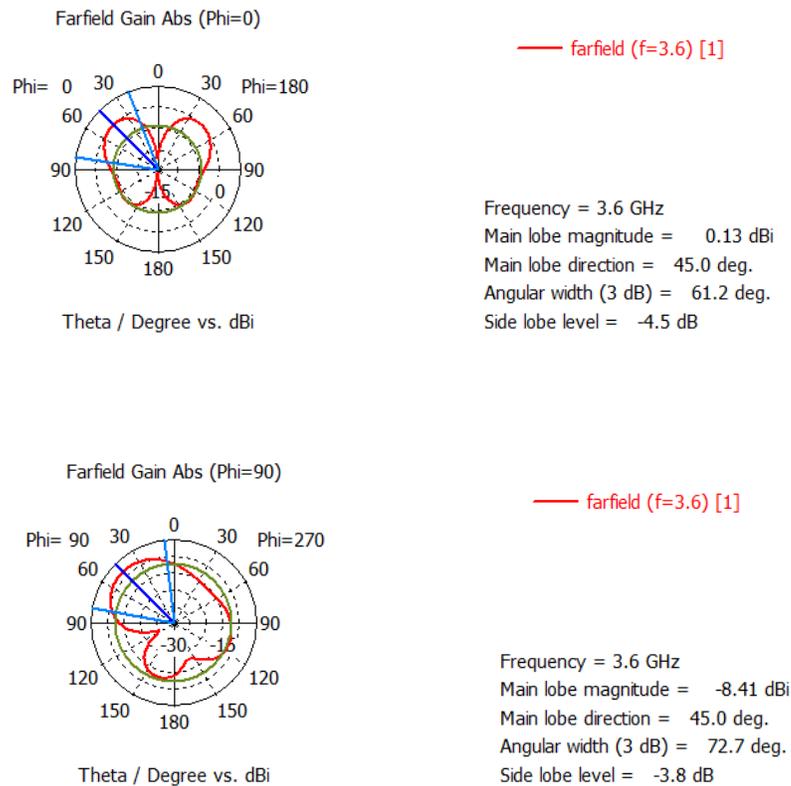
**Figure III-28** : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz de l'antenne proposée et réalisée

La figure III-29 représente le diagramme de rayonnement 3D à la fréquence de résonance 3.6 GHz de l'antenne proposée et réalisée. Le gain obtenu à cette fréquence est de l'ordre de -0.0931 dBi.



**Figure III-29** : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée et réalisée à 3.6 GHz

La figure III-30 donne la représentation du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires de notre antenne à la fréquence 3.6 GHz.



**Figure III-30** : Diagramme de rayonnement à 3.6 GHz de l'antenne proposée et réalisée

Le Taux d'Onde Stationnaire (TOS) de l'antenne proposée et réalisée est représenté sur la figure III-31. Nous avons une bonne adaptation de l'antenne puisque le TOS est inférieur à 2 aux deux fréquences désirées.

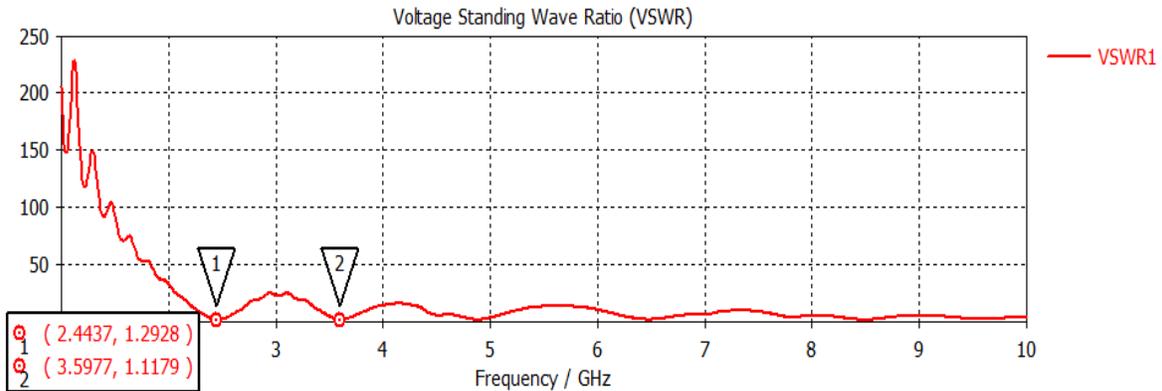


Figure III-31 : VSWR de l'antenne proposée et réalisée

Le gain de l'antenne proposée et réalisée est représenté sur la figure III-32. On remarque que le gain est de l'ordre de 3.5729 à la fréquence 2.45 GHz et de -0.675 à la fréquence 3.6 GHz.

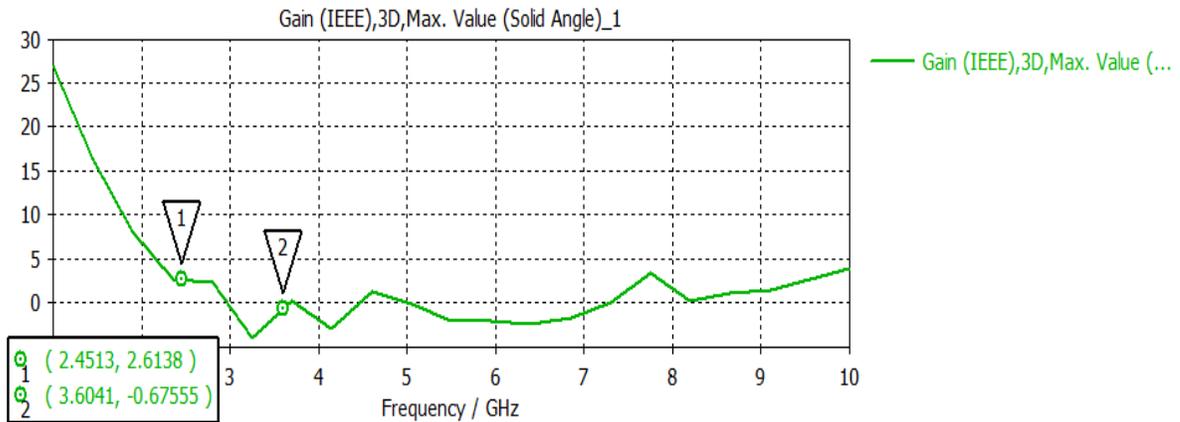
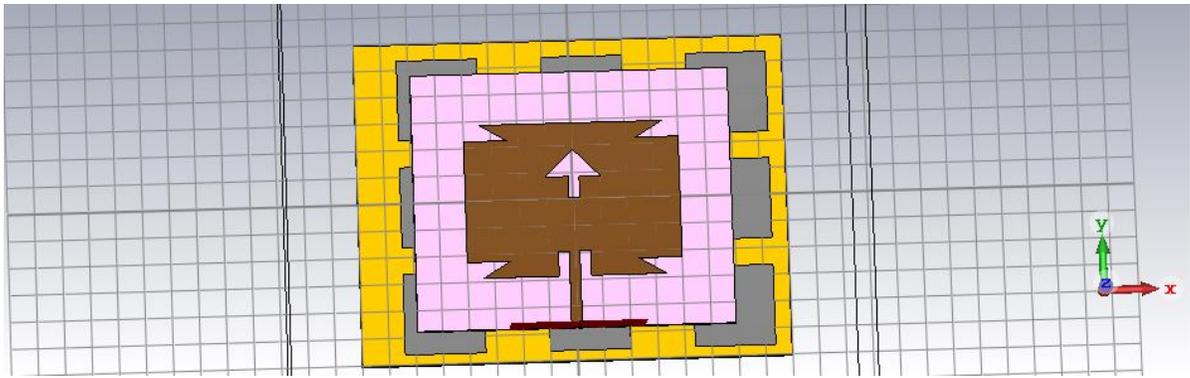


Figure III-32 : Gain de l'antenne proposée et réalisée

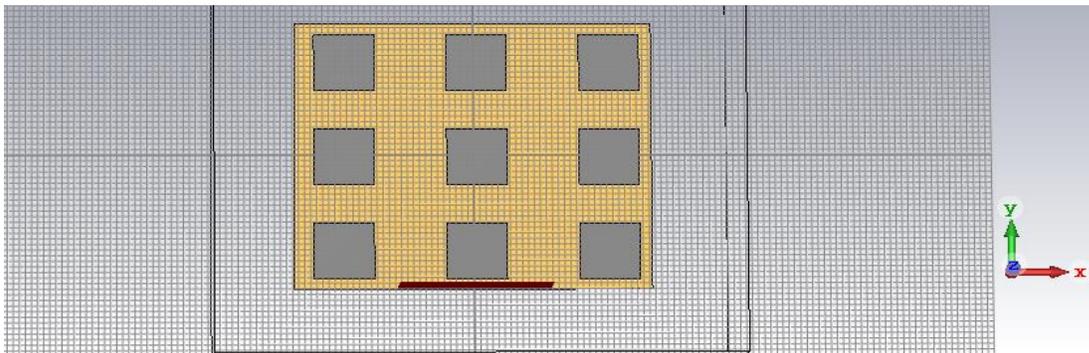
### III.4 Antenne avec EBG

Pour atteindre notre objectif visant à améliorer les performances de l'antenne, nous avons introduit une structure EBG à l'antenne comme montré sur figure III-33.



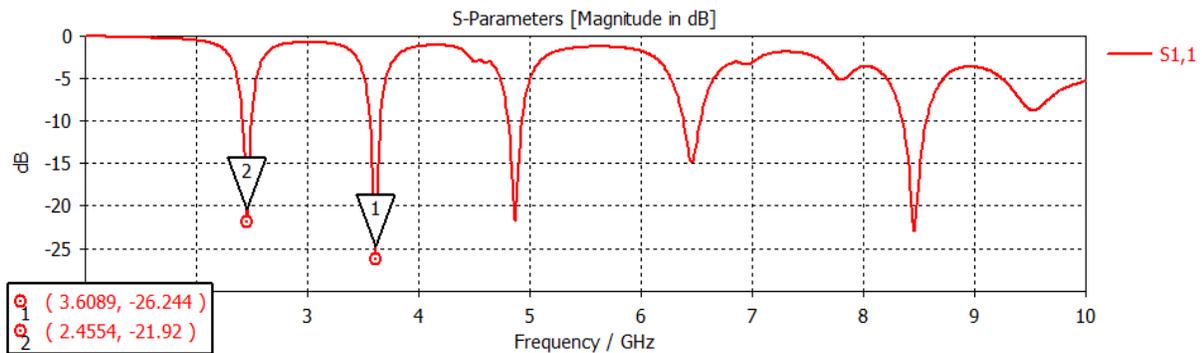
**Figure III-33** : Antenne avec EBG

La figure III-34 représente la structure EBG utilisée pour améliorer les performances de notre antenne.



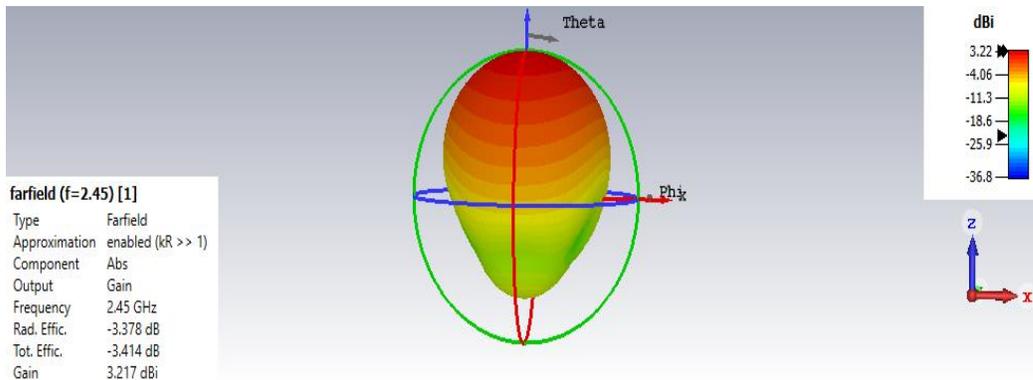
**Figure III-34** : Géométrie de la structure EBG

La figure III-35 représente le coefficient de réflexion de l'antenne avec la structure EBG. Ce résultat montre que l'antenne équipée d'une structure EBG présente une bonne adaptation aux fréquences de 2,45 et 3,6 GHz.



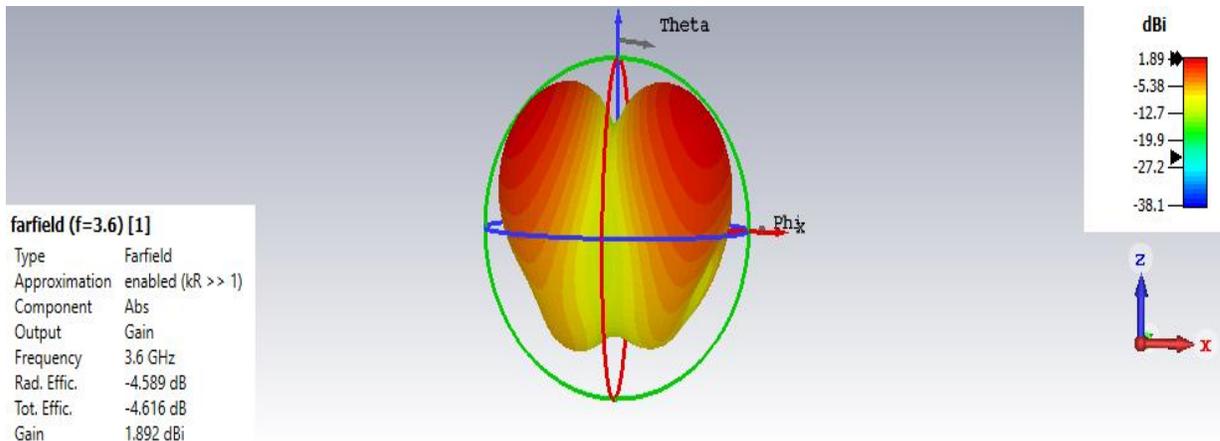
**Figure III-35** : Coefficient de réflexion de l'antenne avec EBG

La figure III-36 représente le diagramme de rayonnement 3D à la fréquence 2.45 GHz de l'antenne avec la structure EBG. Le gain obtenu est d'environ 3,22 dBi à cette fréquence.



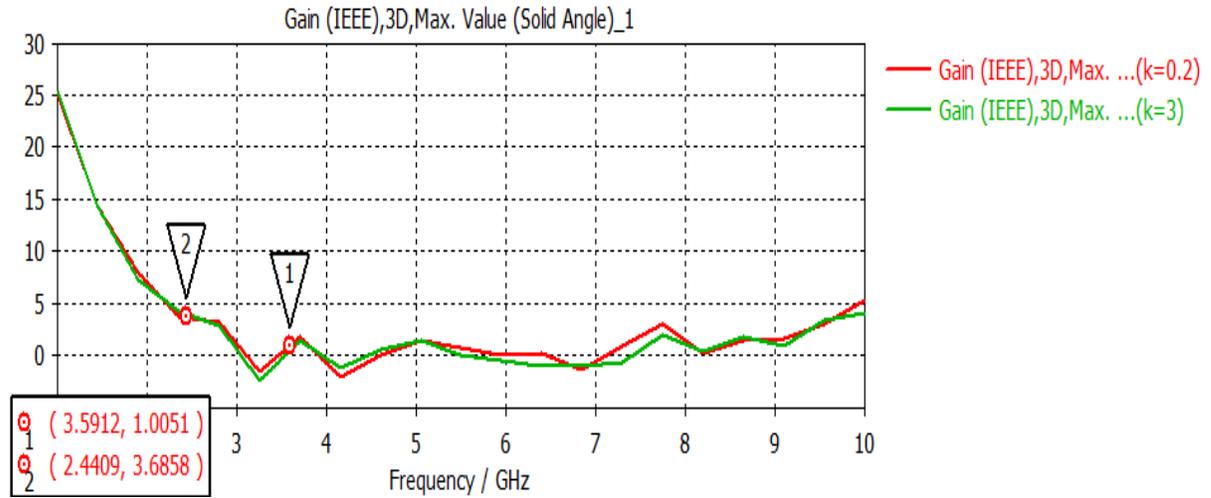
**Figure III-36** : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec EBG à 2.45GHz

La figure III-37 représente le diagramme de rayonnement 3D à 3.6 GHz de l'antenne avec structure EBG. Le gain de notre antenne est de l'ordre de 1.89 à la fréquence de résonances 3.6 GHz.



**Figure III-37** : Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne avec EBG à 3.6 GHz

Le gain de l'antenne avec structure EBG est représenté sur la figure III-38. Ce résultat montre une amélioration du gain de l'antenne aux deux fréquences de résonance.



**Figure III-38** : Gain de l'antenne avec EBG

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé, étudié et conçu deux antennes. Pour améliorer les performances des antennes conçues nous avons introduit une structure EBG à la géométrie de notre antenne. Les résultats obtenus sont très intéressants et montrent l'intérêt et le rôle des structures EBG dans la conception et l'optimisation des antennes. Les améliorations obtenues sont très utiles pour répondre aux exigences croissantes de la 5G.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

L'étude et la conception d'antennes avec des structures EBG (Electromagnetic Band Gap) pour les applications 5G sont un domaine de recherche prometteur dans le développement des technologies de communication sans fil.

Le but de ce projet était l'étude et la conception d'antennes adaptées aux applications 5G.

Le premier chapitre de ce mémoire a porté sur les structures EBG, qui sont des matériaux périodiques utilisés pour contrôler la propagation des ondes électromagnétiques.

Le deuxième chapitre a été consacré aux antennes imprimées pour les applications 5G. Les antennes imprimées sont des dispositifs compacts et légers, fabriquées en utilisant des techniques d'impression sur des substrats. Elles offrent une flexibilité de conception et sont adaptées aux systèmes de communication sans fil à haute fréquence, tels que ceux utilisés dans la 5G.

Le dernier chapitre a mis en évidence les étapes de modélisation, de simulation et d'analyse des performances des antennes avec structure EBG pour les applications 5G. Ces simulations ont permis d'évaluer et d'optimiser les caractéristiques des antennes, telles que le gain, l'efficacité et la bande passante, en fonction des besoins spécifiques de la 5G.

En conclusion, l'étude et la conception d'antennes avec structure EBG pour les applications 5G sont une voie prometteuse pour améliorer les performances des systèmes de communication sans fil. Les structures EBG permettent de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, tandis que les antennes imprimées offrent une flexibilité de conception.

Les résultats de simulation obtenus dans ce travail permettent de mieux comprendre et d'optimiser les performances des antennes pour répondre aux exigences croissantes de la 5G.

# Bibliographie

## Chapitre I :

- [1]: Itoh, T. (Ed.). (2005). *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*. Cambridge University Press
- [2]: Vinoy, K. J., & Jha, R. M. (Eds.). (2009). *Electromagnetic band gap structures: principles, design, and applications*. Wiley-IEEE Press
- [3]: Nayeri, P., & Simovski, C. R. (2017). Electromagnetic bandgap structures made of dielectrics: status and perspectives. *Metamaterials*, 11, 135-150
- [4]: Yablonovitch, E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical Review Letters*, 58(20), 2059-2062.
- [5]: Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (2nd Edition)*. Princeton University Press.
- [6]: Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), 1780-1782.
- [7]: Ho, K. M., Chan, C. T., & Soukoulis, C. M. (1990). Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Physical Review Letters*, 65(25), 3152-315
- [8]: Sánchez-Sánchez, A., & Meseguer, F. (2017). Three-dimensional photonic crystals: fundamentals, recent advances, and future directions. *Advanced Optical Materials*, 5(23), 1700401
- [9]: Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R., Alexopolous, N., & Yablonovitch, E. (1999). High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2059-2074.
- [10]: Itoh, T., & Caloz, C. (Eds.). (2013). *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications: the engineering approach*. John Wiley & Sons.
- [11]: Fomenko, V. S., & Tuz, V. R. (2003). Electromagnetic properties of periodic metal grids. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 48(7), 778-795

[12] : Kazakevitch, G. M., & Vinogradov, A. P. (2012). *Metallic grids and gratings: Theory and applications in electromagnetic radiation*. John Wiley & Sons

[13] : Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (2nd Edition)*. Princeton University Press

[14] : Soljačić, M., Ibanescu, M., Johnson, S. G., Skorobogatiy, M. A., & Joannopoulos, J. D. (2002). Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity. *Journal of the Optical Society of America B*, 19(9), 2052-2059

[15] : Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084

[16] : Lakhtakia, A., & Varadan, V. K. (Eds.). (2013). *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. John Wiley & Sons

[17] : Ma, Y., Ooi, B. L., & Gan, Y. B. (2009). Frequency selective surfaces and grids. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23(3-4), 501-518.

[18] : Kafar, A., & Zhadobov, M. (2018). *Electromagnetic Band Gap Structures : Design, Theory, and Applications*. CRC Press

[19] : Koshiba, M., & Saito, M. (2003). *Theory and design of periodic structures : wavelength and equivalent model representations*. IEEE Press.

[20] : Caloz, C., & Itoh, T. (Eds.). (2009). *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. John Wiley & Sons

[21] : Huang, C. Y., & Chang, Y. S. (2015). *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*. Springer.

[22] : Munk, B. A. (2005). *Frequency Selective Surfaces: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.

[23] : Zhang, Z., & He, S. (2013). Characterization and modeling of electromagnetic bandgap structures. In *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering* (pp. 31-66). Springer

[24] : Bayatpur, F., Gholamzadeh, R., & Encinar, J. A. (2016). Electromagnetic bandgap structures for antenna applications. In *Antenna Engineering Handbook* (pp. 15-1 to 15-21). McGraw-Hill Education.

[25] : Yang, F., & Li, H. (2005). Recent advances in electromagnetic bandgap structures for microwave and millimeter-wave applications. *IEEE Microwave Magazine*, 6(6), 32-39.

[26] : Arjavalingam, G., & Yablonovitch, E. (1987). Photonic band-gap materials. *Journal of the Optical Society of America B*, 4(10), 1499-1507.

[27] : Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (2nd ed.). Princeton University Press.

## **Chapitre II**

[1] : les antennes, théorie, conception et applications. Maurice BELLANGER Professeur au CNAM.Paris, le 26 juin 2009

[2] : A. P. Feresidis, J. C. Vardaxoglou, "High gain planar antenna using optimised partially reflective surfaces," *IEEE Proceedings*, vol. 148, no. 6, pp. 345–350, 2001.

[3] : M.L.Refice « Modélisation Et Simulation Des Antennes En Onde Millimétrique A Base De Méta Matériaux » Mémoire De Magister, Université Zian Achour de Djelfa 24/05/2014.

[4] : G.Irankunda, E. Ufiteyezu « Etude Et Conception D'une Antenne Patch Rectangulaire Pour Les Réseaux Personnels Sans Fils Wpan A 60 GHz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2011.

[5] : D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.

[6] : M.L.Refice « Modélisation Et Simulation Des Antennes En Onde Millimétrique A Base De Méta Matériaux » Mémoire De Magister, Université Zian Achour de Djelfa 24/05/2014

[7] : AMEZIANE Djamel « Etude et optimisation d'antennes fractales plaquées », Magister télécom, 20 mai 2009.

[8] : Abdenour Yassine, Université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen Faculté Technologie " Étude et conception des antennes miniatures pour les applications biomédicales".

[9] : De Recherche- Rabih A Slim Conception Antenne WIFI –Micro-ruban - HFSS\_Methodologie -Université Antonine Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique.

[10] : GUENNACH Mohamed, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Faculté des Sciences et Techniques Fès Département Génie Electrique "Conception d'une antenne ''PIFA'' Multibandes pour applications sans fil".

[11] : W.ABDELLAOUI. F.CHERGUI, Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle la cavité, mémoire fin d'étude, université de TIZI OUZOU, 2012

[12] : Abla Behloul « Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire»

[13] : Chouti Leila« Contribution à l'étude d'antennes imprimés rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage » Mémoire pour obtenir le diplôme de magister janvier 2009, université Mentouri-Constantine

[14] : Hafedh ben Ibrahim Gaha «Analyse et conception des antennes fractales applications à la télécommunication large bande » Thèse de doctorat juillet 2007

[15] : [www.techniques-ingenieur.fr/base.../antennes.../antennes-imprimées-e3310/](http://www.techniques-ingenieur.fr/base.../antennes.../antennes-imprimées-e3310/)

[16] : Vivekananda Lanka Subramanian « Pattern analysis of the rectangular microstrip patch antenna » final master degree thesis 30 ECTS, thesis No.: 4/2009 MSc. electrical engineering – communication & signal processing January 2009

[17] : Addaci Rafik «Evaluation de la fréquence de résonance complexe et de la bande passante d'une antenne microbande rectangulaire par la méthode neurospectrale » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en électronique 16/10/2006, Université de Constantine

[18] : Hatem Rmili «Étude, réalisation et caractérisation d'une antenne plaquée en polyaniline fonctionnant a 10 GHz » Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Bordeaux I, novembre 2004

[19] : Abdellatif Hafiane « Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique» Mémoire pour le grade de docteur de l'université de Marne la Vallée.Mars2003

[20] : S. BADRA "Utilisation de la méthode de l'équation du champ électrique et des réseaux de neurones artificiels pour l'étude d'une antenne imprimée bicouche fonctionnant en mode ", thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2011

[21] : D. KHEDROUCHE " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Juin 2009

[22] : M. Diblang, " Développement du concept de l'antenne a résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire," Université de Limoges. Thèse de doctorat 20 mars 2006

[23] : W.DECHFEL.R.MERZOUCI, étude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée, mémoire de fin d'étude, université de M'sila, 2017

[24] : A. Hafiane, "Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique," Université de Marne la Vallée Thèse de doctorat 10 mars 2003.

[25] : Rapport-Enjeux de la 5G « Autorité de régulation des communications électronique et des postes », République Française, Mars 2017.

[26] : A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei . «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004

[27] : Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. Walker Townes. « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Netcom, 32- 1/2 | 2018, 139-162

[28] : Olivier Ezratty . «Opinions Libres» <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018

[29] : Abdenour Yassine, Université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen Faculté Technologie " Étude et conception des antennes miniatures pour les applications biomédicales"

### **Chapitre III**

[1] : B. BECITA « Antenne microruban de forme rectangulaire à substrats cristaux photoniques » mémoire de Master, Institut d'électronique, Université de M'sila, juin 2014

[2] : L. Barlatey, T. Sphicopoulos, J. R. Mosig and F. E. Gardiol, « Un nouveau modèle pour l'excitation coaxiale d'une antenne microruban », JINA" 1986 Journées internationales de Nice sur les Antennes, Nice, France, 4-6 Novembre 1986, pp. 221-223