

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

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE**  
**N° :**



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

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

**Par : ALLAL Rabiaa**

**THEME**

**Etude d'une antenne imprimée BIE-FSS à défaut**  
**dans la 5G**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. ZERDOUMI Zahra	MCB	Université de M'sila	Président
Dr. BENMEDDOUR Fadila	MCA	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. KEBAILI Farida	MCB	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Mme. CHABANE Rayene	MAA	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2021/2022**

# Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Dieu Tout Puissant, de m'avoir armée de courage, de patience et santé pour y parvenir au bout de ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon encadrante, le **Dr Fadila BENMEDDOUR**, pour avoir accepté de me superviser, pour sa présence à tout moment, de près ou de loin, et pour ses nombreux commentaires et conseils.

J'exprime mes sincères remerciements à **Dr. Farida KEBAILI** pour avoir accepté de m'aider dans mes travaux.

J'adresse également mes remerciements aux honorables membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier particulièrement mes parents, mes succès demeurent de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et d'éducation.

Grand Merci ...

## Sommaire

Titre	page
Remerciements	I
Sommaire	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Résumé	IX
Abstract	IX
ملخص	IX
Introduction générale	2
Chapitre 1 Antenne imprimée dans la bande 5G	4
1.1.Introduction	5
1.2.Définition d'une antenne	5
1.3. Différent types d'antennes	5
1.4.Antenne imprimée (microbande)	5
1.4.1. Structure d'une antenne imprimée	6
1.4.2. Techniques d'alimentation des antennes imprimée	6
1.4.2.1. : Alimentation par ligne par micro ruban :	7
1.4.2.2 Alimentation par sonde coaxiale :	7
1.4.2.3. Alimentation couplée par ouverture	8
1.4.3. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes	8
1.4.3.1. Directivité	8
1.4.3.2. Gain	8
1.4.3.3. Fréquence de résonance et bande passante :	9
1.4.3.4..Le coefficient de réflexion $S_{11}$	9
1.4.5. Avantages et inconvénients de l'antenne imprimée	10
1.4.5.1. Avantages	10
1.4.5.2. Inconvénients	10
1.5. La Bande 5G (la bande Millimétrique)	11

## SOMMAIRE

<b>1.6. L'utilisation de la bande 5G (Millimétrique)</b>	<b>12</b>
<b>1.6.1. Agriculture</b>	<b>12</b>
<b>1.6.2. Véhicules</b>	<b>12</b>
<b>1.6.3. Santé</b>	<b>12</b>
<b>1.7. Antennes imprimée dans la bande millimétrique</b>	<b>12</b>
<b>1.8. Applications des antennes imprimées dans 5G</b>	<b>13</b>
<b>1.9. Conclusion</b>	<b>13</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>14</b>
<b>Chapitre 2.les matériaux BIE et FSS</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Introduction :</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Bref historique</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Les structures à bande interdite électromagnétique (BIE)</b>	<b>18</b>
<b>2.4. Description des matériaux BIE :</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1. Descriptions des matériaux diélectriques</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1.1 Réseaux unidimensionnels :</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1.2. Réseaux bidimensionnels :</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1.3Réseaux tridimensionnels :</b>	<b>21</b>
<b>2.4.2. Structures BIE sans défaut</b>	<b>21</b>
<b>2.4.3. Structures BIE avec défaut</b>	<b>22</b>
<b>2.4.4. Description des structures BIE métalliques :</b>	<b>22</b>
<b>2.5. Les surfaces sélectives en fréquence (FSS)</b>	<b>23</b>
<b>2.6. Différent type de motif de FSS</b>	<b>24</b>
<b>2.7. Différents types de FSS</b>	<b>25</b>
<b>1.7.1 les FSS à motifs gravés</b>	<b>25</b>
<b>1.7.1.1. Influence des différents paramètres intervenant dans une FSS à motif gravé</b>	<b>26</b>
<b>2.7.1.2. Différentes variantes des FSSs à motif gravé</b>	<b>26</b>
<b>1.7.2 les FSS à grille</b>	<b>26</b>
<b>2.8. Domaine d'application de BIE</b>	<b>27</b>
<b>2.9. Domaine d'application de FSS</b>	<b>27</b>
<b>2.10. Conclusion</b>	<b>29</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre 3 Résultats et discussions</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Introduction:</b>	<b>34</b>

## SOMMAIRE

<b>3.2 Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO :</b>	<b>34</b>
<b>3.3 La méthode d'intégration finie</b>	<b>34</b>
<b>3.4. Exemple d'un projet en CST</b>	<b>35</b>
<b>3.5 Présentation de la structure simple</b>	<b>42</b>
<b>3.6. Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité</b>	<b>43</b>
<b>3.6.1 Effet de la variation de rayon du patch R</b>	<b>43</b>
<b>3.6.2 Effet de la variation de l'épaisseur h du substrat hs</b>	<b>45</b>
<b>3.6.3 Variation la surface du slot du patch S</b>	<b>47</b>
<b>3.7. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal :</b>	<b>49</b>
<b>3.8. La variation de la permittivité du substrat antenne à BIE</b>	<b>51</b>
<b>3.8.1. Effet de la variation de la permittivité <math>\epsilon r_1</math> du substrat:</b>	<b>51</b>
<b>3.8.2 Effet de la variation de la permittivité <math>\epsilon r_2</math> du substrat:</b>	<b>53</b>
<b>3.9. Comparaisons entre une antenne à BIE avec FSS et une antenne à BIE sans FSS</b>	<b>55</b>
<b>3.10. Antenne à BIE avec FSS</b>	<b>57</b>
<b>3.10.1. La variation de la distance K</b>	<b>57</b>
<b>3.11. Antenne à BIE avec FSS à défaut</b>	<b>58</b>
<b>3.11.1. Couche FSS à un motif supprimé et FSS à motifs différents</b>	<b>58</b>
<b>3.11.2 Couche FSS à deux motifs supprimés à deux coté</b>	<b>61</b>
<b>3.12. Conclusion</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>

**Liste des figures**

<b>N° de figure</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE 1</b>		
<b>Figure 1.1</b>	Structure d'une antenne imprimée.	<b>6</b>
<b>Figure1.2</b>	Différentes forme des éléments rayonnants	<b>6</b>
<b>Figure 1.3</b>	Alimentation par ligne microruban	<b>7</b>
<b>Figure 1. 4</b>	Alimentation par sonde coaxiale	<b>7</b>
<b>Figure 1.5</b>	Alimentation couplée par ouverture	<b>8</b>
<b>Figure 1.6</b>	Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne	<b>9</b>
<b>Figure 1.7</b>	Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétriques	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 2</b>		
<b>Figure 2.1</b>	Principe du miroir de Bragg	<b>18</b>
<b>Figure 2.2</b>	Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D.	<b>19</b>
<b>Figure 2.3</b>	Structure 1D et son diagramme de dispersion	<b>20</b>
<b>Figure 2.4</b>	Exemples de différents réseaux 2D.	<b>20</b>
<b>Figure 2.5</b>	Différentes structures 3D	<b>21</b>
<b>Figure 2.6</b>	Structures BIE sans défaut	<b>22</b>
<b>Figure 2.7</b>	Structures BIE à défaut	<b>22</b>
<b>Figure2.8</b>	Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).	<b>23</b>
<b>Figure 2.9</b>	Réseau bidimensionnel périodique de patches métalliques d'une. structure FSS	<b>24</b>
<b>Figure 2.10</b>	Motifs élémentaires pouvant constituer une Surface Sélective en Fréquence.	<b>25</b>
<b>Figure 2.11</b>	Exemples d'applications des FSS. D'après Munk	<b>28</b>
<b>CHAPITRE 3</b>		
<b>Figure 3.1</b>	La fenêtre d'accueil.	<b>35</b>
<b>Figure3 .2</b> <b>(A-B-C-D-</b> <b>E-F)</b>	Les fenêtres pour créer un nouveau projet.	<b>36</b>
<b>Figure 3.3</b>	Créer un plan de masse.	<b>37</b>
<b>Figure 3-4</b>	Créer de substrat diélectrique	<b>38</b>
<b>Figure 3-5</b>	Créer le patch	<b>38</b>
<b>Figure 3-6</b>	Créer le motif de patch	<b>39</b>
<b>Figure 3-7</b>	Définir le port	<b>40</b>
<b>Figure 3-8</b>	Définir le domaine de fréquence	<b>40</b>
<b>Figure 3-9</b>	Définir les conditions au bord.	<b>41</b>
<b>Figure 3-10</b>	choisir la précision	<b>41</b>
<b>Figure 3-11</b>	Coefficient de réflexion S11 pour une antenne patch circulaire simple	<b>42</b>
<b>Figure 3-12</b>	La Structure simple de l'antenne imprimée.	<b>42</b>
<b>Figure3-13</b>	Coefficient de réflexion S11 pour différentes valeurs rayon du patch	<b>43</b>
<b>Figure 3.14</b>	Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs rayon du patch	<b>44</b>
<b>Figure 3.15</b>	gain de l'antenne simple pour différentes valeurs rayon du patch	<b>44</b>
<b>Figure3-16</b>	Coefficient de réflexion S11 pour différentes épaisseurs du substrat	<b>45</b>
<b>Figure 3.17</b>	Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs d'épaisseurs du substrat	<b>46</b>
<b>Figure 3.18</b>	gain de l'antenne simple pour différentes valeurs d'épaisseurs du substrat	<b>46</b>
<b>Figure3-19</b>	Coefficient de réflexion S11 pour différentes valeurs surfaces de motif du	<b>47</b>

## LISTE DES FIGURES

	patch	
<b>Figure 3.20</b>	Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs surface de motif du patch	<b>48</b>
<b>Figure 3.21</b>	gain de l'antenne simple pour différentes valeurs surface de motif du patch	<b>48</b>
<b>Figure 3-22</b>	Structure des antennes : A) à substrat à BIE B) à substrat normal	<b>49</b>
<b>Figure3-23</b>	Coefficient de réflexion S11 pour antenne avec BIE et sans BIE	<b>50</b>
<b>Figure 3.24</b>	Directivités pour antenne avec BIE et sans BIE	<b>50</b>
<b>Figure 3.25</b>	gain pour antenne avec BIE et sans BIE	<b>51</b>
<b>Figure.3-26</b>	Figure.3-26: Coefficient de réflexion S11 pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 1$	<b>51</b>
<b>Figure 3.27</b>	Directivités pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 1$	<b>52</b>
<b>Figure 3.28</b>	gain pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 1$	<b>53</b>
<b>Figure3-29</b>	Coefficient de réflexion S11 pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 2$	<b>53</b>
<b>Figure 3.30</b>	Directivité pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 2$	<b>54</b>
<b>Figure 3.31</b>	gain pour différentes permittivité du substrat $\epsilon r 2$	<b>54</b>
<b>Figure 3.32</b>	Antenne imprimée à FSS	<b>55</b>
<b>Figure3-33</b>	Coefficient de réflexion S11 pour antenne avec FSS et sans FSS	<b>56</b>
<b>Figure 3.34</b>	Directivités pour antenne avec FSS et sans FSS	<b>56</b>
<b>Figure 3.35</b>	gain pour antenne avec FSS et sans FSS	<b>56</b>
<b>Figure.3-36</b>	Coefficient de réflexion S11 pour différentes valeurs du distance K	<b>57</b>
<b>Figure 3.37</b>	Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs de la distance K	<b>58</b>
<b>Figure 3.38</b>	gain de l'antenne simple pour différentes valeurs de la distance K	<b>58</b>
<b>Figure 3.39</b>	FSS à défaut à un motif supprimé(A) et motifs différents(B)	<b>59</b>
<b>Figure.3-40</b>	Coefficient de réflexion S11 pour motif supprimé et motifs différents	<b>59</b>
<b>Figure 3.41</b>	Directivités FSS à défaut à un motif supprimé(A) et motifs différents(B)	<b>60</b>
<b>Figure 3.42</b>	gain FSS à défaut à un motif supprimé(A) et motifs différents(B)	<b>60</b>
<b>Figure 3.43</b>	FSS à défaut à deux motif supprimé à deux coté	<b>61</b>
<b>Figure.3-44</b>	Coefficient de réflexion S11 pour motif supprimé à deux coté	<b>61</b>
<b>Figure 3.45</b>	Directivités FSS à défaut motif supprimé à deux coté	<b>62</b>
<b>Figure 3.46</b>	gain FSS à défaut motif supprimé à deux coté	<b>63</b>

**Liste des tableaux**

<b>N° du tableau</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 3.1</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction de rayon de patch	<b>43</b>
<b>Tableau 3.2</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction d'épaisseurs du substrat	<b>45</b>
<b>Tableau3. 3</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction de motif surface du patch	<b>47</b>
<b>Tableau3. 4</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction d'antenne avec BIE Et sans BIE	<b>50</b>
<b>Tableau3. 5</b>	Caractéristiques de l'antenne à BIE en fonction permittivité du substrat $\epsilon r 1$	<b>52</b>
<b>Tableau3. 6</b>	Caractéristiques de l'antenne à BIE en fonction permittivité du substrat $\epsilon r 2$	<b>53</b>
<b>Tableau3. 7</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction d'antenne avec FSS et sans FSS	<b>56</b>
<b>Tableau3. 8</b>	Caractéristiques de l'antenne simple en fonction de distance K	<b>57</b>
<b>Tableau3. 9</b>	Caractéristiques de FSS à défaut à un motif supprimé et motifs différents	<b>59</b>
<b>Tableau3. 10</b>	Caractéristiques de FSS à défaut motif supprimé à deux coté	<b>61</b>

**Liste des abréviations**

**5G** : Cinquième génération

**FCC** : La commission fédérale des communications

**LAN** : Local area network

**WAN** : Wide area network

**WiFi** : Wireless Fidelity

**Z-Wave** : Le protocole Z-Wave développé par la société danoise Zensys

**LoRa** : Long Range

**3G** : Troisième génération

**4G** : Quatrième génération

**BIE** : Bande Interdite Electromagnétique

**BIEM** : Bande Interdite Electromagnétique Métalliques

**SSF** : Surfaces Sélectives en Fréquence

**FSS** : Frequency selective surface

**HF** : Hautes fréquences

**DSRR** : Double Split Ring Resonator

**1D, 2D et 3D** : Une, Deux, ou Trois Dimensions

**TE** : Champ électrique parallèle

**TM** : Champ électrique perpendiculaire

**SER** : Section Equivalente Radar

**CDM** : Circuit et Dispositifs Microondes

**FIT** : Finite Integration Technique

## Résumé

L'objectif principal de notre travail est l'étude une antenne imprimée, de forme circulaire à bande interdite électromagnétique (BIE) 1D. et le superstrat BIE est à base de FSS (Frequency Surface Selectifs) à défaut de fréquences opérant dans la bande 5G seuls les spectres de fréquence sous 6GHz

Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physiques de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur le gain et la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : les dimensions de rayon du patch, la surface de motif du patch l'épaisseur du substrat le matériau du substrat (matériau à BIE), permittivité, la distance de la couche FSS et le défaut de motif de cette couche en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

**Mots clés :** antenne imprimée, bande interdite électromagnétique, Surfaces Sélectives en Fréquence, la bande 5G, CST

## Abstract

The main objective of our work is the study of a printed antenna, circular in shape, with an electromagnetic band gap (BIE) 1D, only frequency spectra below 6GHz.

We have studied the influence of the geometrical and physical parameters of the antenna on the resonance frequency and the bandwidth and on the gain and the directivity. The parameters we studied: the radius dimensions of the patch, the slot of the patch the thickness of the substrate the material of the substrate (material to BIE), permittivity, the distance of the FSS layer and the pattern defect of this layer using the CST frequency domain electromagnetic simulation tool which is based on the finite integration method.

**Key words:** printed antenna, electromagnetic band gap, FSS(Frequency selective surface), CST

## ملخص

الهدف الرئيسي من عملنا هو دراسة هوائي مطبوع ، دائري الشكل ، مع فجوة النطاق الكهرومغناطيسي (BIE) 1D. نطاق G5 فقط أطراف التردد أقل من 6 جيجاهرتز  
درسنا تأثير المعلمات الهندسية والفيزيائية للهوائي على تردد الرنين وعرض النطاق وعلى الكسب والاتجاهية. المعلمات التي أخذناها في الاعتبار: أبعاد نصف قطر التصحيح ، ومنطقة نمط التصحيح ، وسمك الركيزة ، ومواد الركيزة (المواد إلى BIE) ، والسماحية ، ومسافة طبقة FSS ، وعيوب النمط لهذه الطبقة باستخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية لمجال تردد CST والتي تعتمد على التكامل المحدود طريقة.

**الكلمات المفتاحية:** هوائي مطبوع, فجوة النطاق الكهرومغناطيسي, نطاق 5G

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Ces dernières années, nous assistons à un développement exponentiel de nouvelles applications et technologies dans les domaines de la santé, des médias, de l'industrie, du transport, de l'énergie... Cette évolution va de pair avec l'apparition de nouveaux services liés à une multiplication des objets connectés dont leur nombre va atteindre 50 milliards d'ici 2020.

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les applications de ce domaine qui ont attiré plus d'attentions sont les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil.

L'antenne est généralement utilisée en raison de sa haute performance, cependant, l'antenne présente quelques inconvénients tels que la taille et le coût. Par ailleurs, l'utilisation des fréquences de plus en plus élevées dans les systèmes micro-ondes à base de structure micro ruban a été à l'origine du développement des antennes micro ruban (imprimée) comme les antennes patchs, antenne à fente et à ouverture couplée. Ces antennes sont utilisées beaucoup dans les configurations réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation des fonctions très particulières, telles que : le pointage et le balayage électronique, la détection adaptative et la génération de diagrammes de rayonnement variés ou désirés.

Afin d'améliorer les performances des antennes micro rubans (imprimée) les chercheurs ont réussi à découvrir un type des antennes micro rubans à Bande Interdite Electromagnétique (BIE) ou à Surfaces Sélectives en Fréquences (FSS) qui sont aujourd'hui très utilisées dans les bandes millimétriques (5G).

Le but de ce travail est de concevoir, une antenne imprimée à BIE-1D et à FSS à défaut opérant dans la bande 5G, seules les spectres de fréquence sous 6GHz et étudier ces caractéristiques en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO. Nous avons étudié l'effet des variations des paramètres géométriques et physiques de l'antenne, du substrat BIE et celles du superstrat à FSS avec et sans défauts sur la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres :

## INTRODUCTION GENERALE

**Le premier chapitre** comprend des définitions et l'historique des antennes, leurs types, nous présentons la structure d'antenne imprimée les différents types d'alimentation, leurs caractéristiques telles que; (la fréquence, la bande passante gain et directivité), leurs avantages ainsi que leurs inconvénients, leurs domaines d'utilisation dans la bande 5G. Aussi nous présentons la bande millimétrique et ses utilisations.

**Le deuxième chapitre** nous avons commencé par une définition et l'historique des structures BIE, les concepts de base liés à ces matériaux. Nous étudions leurs différents types (1D ,2D, 3D), après nous avons donné la définition, un historique des structures FSS et les concepts de base liés à ces derniers. Nous citons les différents types de ces matériaux et les différents types des motifs, en plus les applications des matériaux FSS et BIE.

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

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

# **Chapitre 01:**

## **Antenne imprimée dans la bande 5G**

## **1.1. Introduction**

Le concept d'antennes imprimées est apparu dans les années 1950, mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires, et les années 1990 pour un véritable passage au stade industriel.

Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antenne : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes [1], dans ce chapitre nous aborderons et parlerons sur l'antenne imprimée (caractéristiques, techniques d'alimentation et avantages et inconvénients) et aussi la bande 5G par des détails et la relation entre l'antenne imprimée et 5G.

## **1.2. Définition d'une antenne**

Une antenne est un transducteur qui convertit l'onde radiofréquence qui propage dans l'espace libre en courant électrique et vice-versa. Une antenne de réception convertit un rayonnement électromagnétique en courant électrique. La même antenne peut servir en émission qu'en réception : réciprocité des antennes [2].

## **1.3. Différents types d'antennes**

Généralement, il existe une grande variété de techniques pour la réalisation des antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée. Il existe plusieurs types d'antennes selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. On peut citer quelques-unes : Antennes dipolaire, Antenne à boucle magnétique, Antenne cornet, Antenne à réflecteur parabolique, Antenne microruban (imprimée) [3].

## **1.4. Antenne imprimée (microbande)**

Une antenne imprimée est généralement constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrat qui sont de permittivités égales ou différentes. Sur la surface, on a un élément rayonnant de géométrie quelconque appelé Patch. Il existe plusieurs modes d'alimentations ou d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnements en polarisations linéaires ou circulaires [4] [5].

### 1.4.1. Structure d'une antenne imprimée

L'antenne imprimée qui porte aussi l'appellation Microstrip, micro-ruban, ou encore patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Ce type d'antennes est caractérisé par une bonne directivité avec un rayonnement maximal dans la direction perpendiculaire à l'antenne [6].

La figure suivante, montre une simple géométrie de l'antenne imprimée avec ses éléments constitutants.

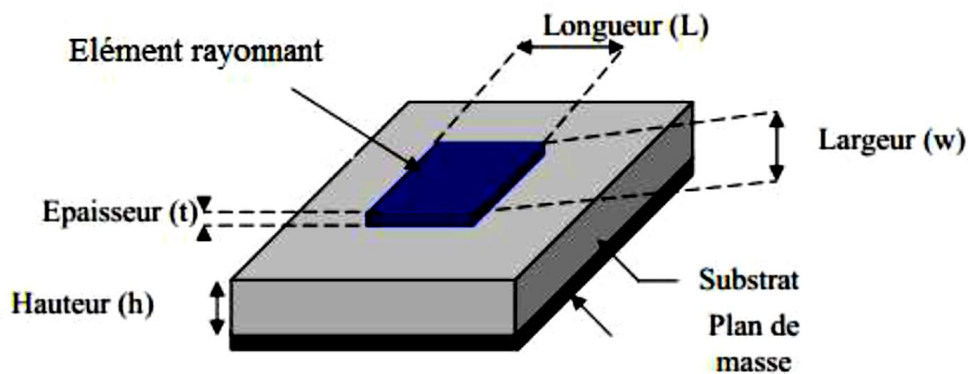


Figure 1.1: Structure d'une antenne imprimée [6].

L'élément rayonnant de l'antenne imprimée peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, triangulaire, circulaire, ...etc. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, et également un diagramme de rayonnement très intéressant. La figure ci-dessous illustre les formes des éléments rayonnants les plus utilisées.



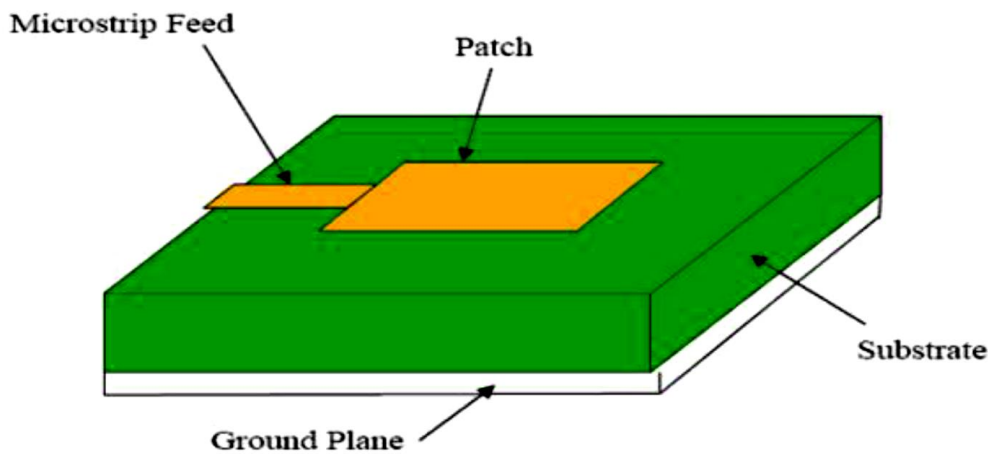
Figure1.2: Différentes forme des éléments rayonnants [7].

### 1.4.2. Techniques d'alimentation des antennes imprimée

L'alimentation de l'antenne imprimée dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les principales techniques d'alimentations sont :

### **1.4.2.1. : Alimentation par ligne par micro ruban :**

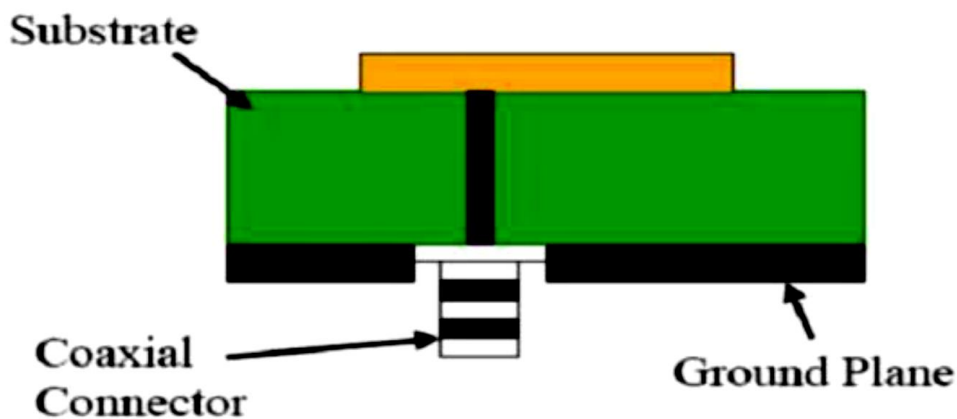
Dans ce cas, une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la (Figure 1.3 ), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance [8]. Ce type d'alimentation est facile à mettre en oeuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5 % [8].



**Figure 1.3 :** Alimentation par ligne microruban

### **1.4.2.2 Alimentation par sonde coaxiale :**

L'alimentation par sonde coaxiale est montrée sur la (Figure 1.4), dans ce cas, le conducteur central (intérieur) est soudé directement à l'élément rayonnant (patch) après avoir traversé le diélectrique et le plan de masse, le conducteur extérieur est relié directement à ce dernier. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut appliquer à n'importe quel endroit du patch avec une facilité de fabrication et moins de rayonnement parasite [9].



**Figure 1. 4 :** Alimentation par sonde coaxiale

### 1.4.2.3. Alimentation couplée par ouverture

Dans cette technique d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme indique sur la Figure (Figure 1.5). La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse [10].

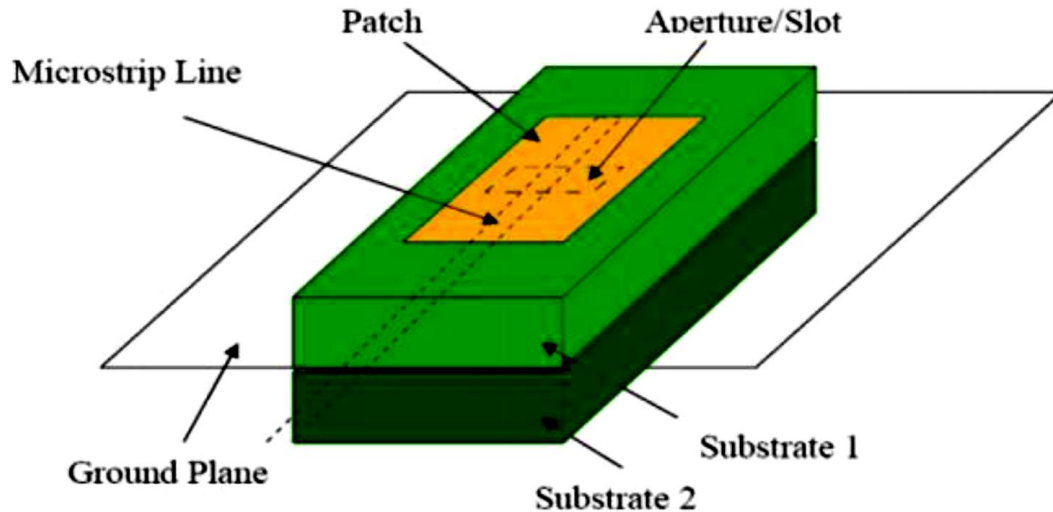


Figure 1.5 : Alimentation couplée par ouverture

## 1.4.3. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes

### 1.4.3.1. Directivité

La directivité est le rapport de la puissance émise dans la direction maximum sur toute sa répartition spatiale. On dira donc qu'une antenne fortement directive quand l'antenne admet une faible ouverture de rayonnement, et qu'une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [11].

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

Ou : U est l'intensité de rayonnement de l'antenne, et P est la puissance totale Rayonnée

### 1.4.3.2. Gain

Le gain est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Le gain d'une antenne isotrope est pris comme une référence unité (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité de rayonnement et de celle d'une antenne isotrope [12].

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\left(\frac{Pa}{4\pi}\right)} \quad (1.2)$$

Avec :

$P(\theta)$  : Puissance rayonnée dans une direction.  
l'antenne

$P_a$  : Puissance rayonnée par

### 1.4.3.3. Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante de l'antenne détermine la bande de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur au seuil arbitrairement défini. La bande passante est généralement proportionnelle à la bande de fréquence avec un facteur de réflexion inférieur à -10 dB. Dans certaines applications, ce niveau peut être augmenté à -6dB, ce qui permet certaines limitations dans la conception de l'antenne, par exemple, pour certaines antennes mobiles.

La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minima donc plusieurs fréquences de résonance [13].

La bande passante est définie par la formule suivante :

$$BP(\%) = \left[ \frac{F_{min} - F_{max}}{F_c} \right] * 100 \quad (1.3)$$

Avec :

$F_c$  : est la fréquence centrale ou de résonance

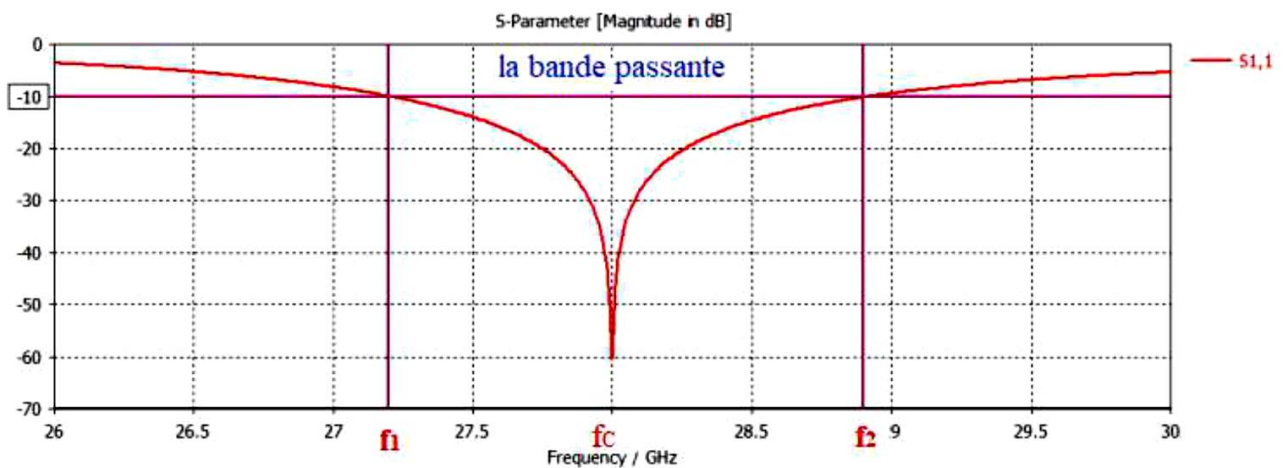


Figure 1.6 : Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne [14].

### 1.4.3.4. Le coefficient de réflexion S11

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se

définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies [15].

Pour une antenne d'impédance  $Z$ , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique  $Z_0$  (souvent égale à  $50\Omega$ ), le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (1.4)$$

Avec :

$Z$ : est l'impédance d'entrée de l'antenne.

$Z_0$ : est l'impédance caractéristique (Généralement égale à  $50 \Omega$ )

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté  $|S_{11}|$  et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (1.5)$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

### **1.4.5. Avantages et inconvénients de l'antenne imprimée**

Il existe de nombreux avantages et limites pour les antennes imprimées lorsqu'on les compare à d'autres types d'antennes :

#### **1.4.5.1. Avantages**

- Poids et volume réduits ;
- Faible coût et robustesse (monté sur des surfaces rigides) ;
- Polyvalence (fréquence, polarisation, diagrammes, ...) ;
- IL est facile d'être intégré aux circuits intégrés micro-ondes ;
- Adaptable aux surfaces courbes.

#### **1.4.5.2. Inconvénients**

- Ils nécessitent des substrats de qualité avec des valeurs comprises entre :  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$  ;
- Faible puissance ;

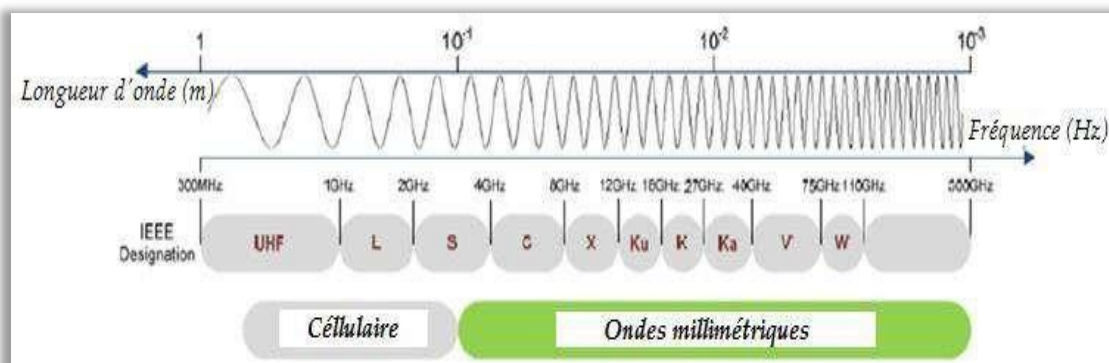
- L'impédance d'entrée est difficile à calculer et à ajuster ;
- Réduction de l'efficacité des correctifs (pertes dans le réseau électrique) [16].

### **1.5. La Bande 5G (la bande Millimétrique)**

Les ondes radio millimétriques sont le candidat prometteur et pratique pour les réseaux cellulaires 5G à l'avenir. Le spectre des ondes millimétriques inclut des fréquences de 30 GHz à 300 GHz qui correspondent à une longueur d'onde dans l'ordre du millimètre (de 1mm à 1 cm). En général, le spectre des ondes millimétriques sans licence offre les avantages suivants :

- La distribution des fréquences en GHz est généralement dans la plupart des régions du monde ;
- Beaucoup d'énergie radioactive efficace ;
- Spectre propre, pas d'occupants ;
- Aucun signal d'onde n'est largement distribué dans les environnements intérieurs et extérieurs, il y a donc moins de risque d'interférences.
- Une fréquence élevée avec une petite longueur d'onde permet d'utiliser des petites antennes à gain élevé [17] ;

La 5G se présente comme une technologie qui utilisera à la fois 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 hautes, dites « millimétriques » ( $f > 6\text{GHz}$ ). L'organisme de normalisation, la commission fédérale des communications (FCC) et les chercheurs ont identifié un certain nombre de bandes de fréquences comprises entre 6 et 100 GHz avec des largeurs de bande variables comme fréquences candidates pour la prochaine génération [18].



**Figure 1.7 :** Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétriques [18].

## **1.6. L'utilisation de la bande 5G (Millimétrique)**

- 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 façon de répondre à ce besoin aujourd'hui se fait en regroupant un grand nombre de réseaux de communication (WiFi, Z-Wave, LoRa, 3G, 4G, etc.).
- La 5G est conçue pour permettre à des configurations de réseaux virtuels simples d'obtenir un meilleur alignement des coûts du réseau par rapport aux besoins des applications.
- Cette nouvelle approche permettra aux opérateurs de réseaux mobiles 5G de s'emparer d'une plus grande part du marché de l'IoT tout en étant capables de proposer des solutions économiques pour les applications à faible bande passante et faible consommation [19].

**1.6.1. Agriculture :** Développe par l'utilisation de capteurs et de moteurs, par exemple, pour mesurer et relier la qualité du sol, la pluie, la température et le vent pour surveiller la croissance des cultures.

**1.6.2. Véhicules :** De nombreuses applications concernent la communication sans fil intelligente, par exemple pour réguler les routes, assurer la communication entre véhicule et véhicule et éviter les accidents.

**1.6.3. Santé :** comprend plusieurs améliorations mineures au complexe, comme des exercices de contrôle, capteur de la santé des consommateurs, la connectivité sans fil dans les hôpitaux, le suivi des patients, la télésanté, la chirurgie à distance, etc... [20].

La 5G va avoir sans doute de nombreuses autres applications et améliorations incroyables dans tous les domaines.

## **1.7. Antennes imprimée dans la bande millimétrique**

Les antennes patch ont attiré beaucoup d'attention ces dernières années pour les applications d'ondes millimétriques en raison de leur faible coût, de leur facilité de fabrication et de leur grande efficacité. Une petite longueur d'onde aux fréquences des ondes est un avantage dans la conception de petites antennes efficaces. La taille de l'antenne est déterminée par les lois de la physique pour un rayonnement efficace, la taille de l'antenne doit être inférieure ou égale à la moitié de la longueur d'onde, pour la gamme ( $f=30$  à  $300\text{GHz}$ ) et une longueur d'onde ( $\lambda =10-1$  mm), il est possible de construire des petites antennes physiquement et en même temps être suffisamment grandes afin de rayonner électriquement

d'une manière efficace. Cependant, les fréquences aux longueurs d'onde sont généralement plus élevées que les basses fréquences, le concepteur d'antenne doit concevoir l'antenne avec soin et sélectionner le substrat approprié pour minimiser les pertes et atteindre une efficacité de rayonnement élevée [21].

## **1.8. Applications des antennes imprimées dans la 5G**

Avec les recherches continues et les développements et l'utilisation des antennes microbandes, il est attendu qu'elles remplacent les antennes classiques pour la plupart des applications [22]. Il existe différentes applications réussies :

- Télécommunication par satellites ;
- Commande et contrôle ;
- Télémétrie (télémessure) par missile ;
- Equipements portatifs ;
- Des éléments d'alimentation dans les antennes complexes ;
- Antenne d'émission utilisée en médecine ;
- Récepteur satellite de navigation.

## **1.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref sur les réseaux antennes patchs et les paramètres importants : la présentation et caractéristiques de l'antenne imprimée, leur avantages, inconvénients avec les techniques d'alimentation, comme nous avons cités quelques applications des antennes patch dans le domaine de télécommunication 5G. Comme nous avons présenté la relation entre la révolution de la technologie 5G et les antennes imprimées.

## **Bibliographie**

- [1] VAUDON Patrick – Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM –Université de Limoges
- [2] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.
- [3] les antennes , théorie , conception et applications. Maurice BELLANGER Professeur au CNAM.Paris, le 26 juin 2009
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [7] 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.
- [8] J. Dauvignac, N. fortino, S. Tourette, G. Kassiavas, P. Ciais. « Miniaturisation Des Antennes UWB Planaires » Université De Nice-Sophia Antipolis. 25 OCT 2006.
- [9] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 2 edition John Wiley and Sons, 1997.
- [10] Choutti Leila ‘’ Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage ‘’mémoire pour l'obtention de grade Magister, université de Constantine, 2009.
- [11] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire deMagister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [12] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Repliement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.
- [13] E. Dreina « Conception, Optimisation et Intégration Rf d'un Système d'antennes Miniatures Multi Capteurs utilisant La diversité en Vue d'augmenter les performances Radio d'un Terminal Mobile 4g » Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 01 juillet 2010.

- [14] S.Vergerio « Recherche Des Caractéristiques Optimales D'antennes Multi-Capteurs Pour Les Systèmes Mimo » Thèse Doctorat, Université de Provence, 06 juillet 2007.
- [15] S. Tebache .« Méthode De Caractérisation Hyperfréquence Des Antennes Imprimées » Magister, Faculté des Sciences Et De La Technologie, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [16] F.D.Valdivia « Implementación De Arreglos De Antenas En La Banda De 28 GHz Para La Quinta Generación Móvil » Mémoire, Université Marta Abreu de las Villas 2016.
- [17] R. Ghayoula « Contribution A L'optimisation De La Synthèse Des Antennes Intelligentes Par Les Réseaux De Neurones » Thèse Doctorat, Université de Tunis El Manar 27 /12/ 2008.
- [18] Assane Ngom. Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "Small Cells" pour le standard 5G. Electronique. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019); Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2019. Français.
- [19] <https://www.thalesgroup.com/fr/europe/france/dis/mobile/inspiration/5g>
- [20] A.Osseiran, J. F. Monserrat, P. Marsch « 5g Mobile and Wireless communications Technology » Livre, Juin 2016.
- [21] R. Alhalabi « High efficiency planar and RFIC-based antennas for millimeter-wave communication systems » Thèse Doctorat, Université de California-San Diego 2010.
- [22] Juan R. Mosing, Fred E. Gardiol, "Rayonnement d'une antenne microruban de forme arbitraire," Ann. Télécommum., vol. 40, no.3-4

**Chapitre 02:**  
**Les matériaux**  
**BIE et FSS**

## 2.1. Introduction

Récemment, les structures périodiques connues sous le nom méta matériaux ont trouvé un grand intérêt dans le domaine des télécommunications grâce à leurs propriétés spectrales intéressantes qui permettent de créer des dispositifs radiofréquences et d'améliorer les caractéristiques des antennes. Elles permettent de créer des matériaux présentant simultanément une permittivité et une perméabilité négatives; ces méta-matériaux sont obtenus par la combinaison de motifs métalliques et de couches diélectriques. Ces structures sont connues sous le nom de méta matériaux main gauche [1]. Parmi les structures les plus connues, nous trouvons les surfaces sélectives en fréquence FSS [2,3] et les matériaux à bande interdite électromagnétique BIE [4], étudiés depuis 1915, sont des structures composés d'un empilement de couches diélectriques ou métalliques. L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés aux matériaux BIE et FSS

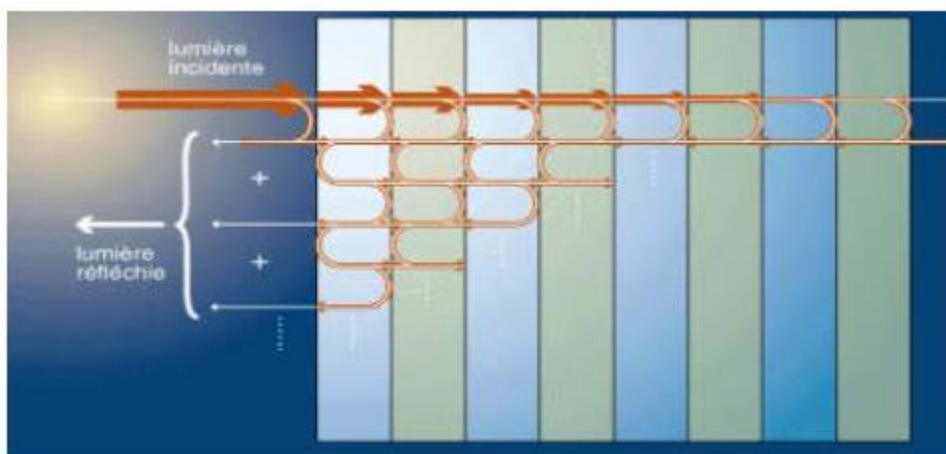
## 2.2. Bref historique :

Ce nouveau type de structure a été développé par E. Yablonovitch à la fin des années quatre-vingts [5] [6]. En réalité, le tout premier matériau BIE a été réalisé sans le savoir par le physicien anglais William Laurence Bragg en 1915. Ce dernier a réussi par l'empilement périodique de couches transparentes à indices de réfraction différents à réfléchir 99,5% de l'énergie incidente, ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce phénomène s'explique par de multiples réflexions à l'intérieur même de chaque interface. Elles sont constructives pour une épaisseur particulière des différentes couches.

Ces matériaux dont la constante diélectrique est structurée de manière périodique possèdent des fréquences pour lesquelles il n'existe aucun mode de propagation possible à l'intérieur du matériau, autrement appelé bande de fréquence interdite. Ces structures périodiques à une dimension sont déjà connues sous le nom de miroirs de Bragg. Depuis, E. Yablonovitch [7] a eu l'idée d'étendre leur fonctionnement à plusieurs dimensions. Pour simplifier les réalisations, un prototype a été défini avec des bandes interdites mesurables en micro-ondes. Depuis cette innovation, les études qui ont pour objet ces matériaux se sont considérablement accrues. Les domaines de fréquences où ces matériaux sont étudiés correspondent aux fréquences optiques (de 1THz jusqu'à 1000THz) et aux fréquences microondes ou hyperfréquences. La gamme de fréquences facilite la conception et la réalisation de ces matériaux.

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

A l'image des semi-conducteurs, dont la régularité du paysage atomique entraîne l'existence d'une bande d'énergie interdite, nous pouvons donc obtenir des bandes de fréquences interdites pour des matériaux diélectriques périodiques. Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré selon la structure étudiée. Ces plages de fréquences ont pris le nom générique de Bande Interdite Electromagnétique. Le principe du miroir de Bragg est présenté sur la *Figure 2.1*.



*Figure 2.1 : Principe du miroir de Bragg.*

Pour le domaine des hautes fréquences (HF) ou micro-ondes, on utilise plutôt le terme de matériaux à Bande Interdite Electromagnétique ou BIE qui correspond aux bandes de fréquences étudiées. En effet, leurs propriétés fréquentielles sont transposables pour d'autres longueurs d'ondes car elles sont surtout induites par la ou les périodicités du matériau.

### **2.3. Les structures à bande interdite électromagnétique (BIE)**

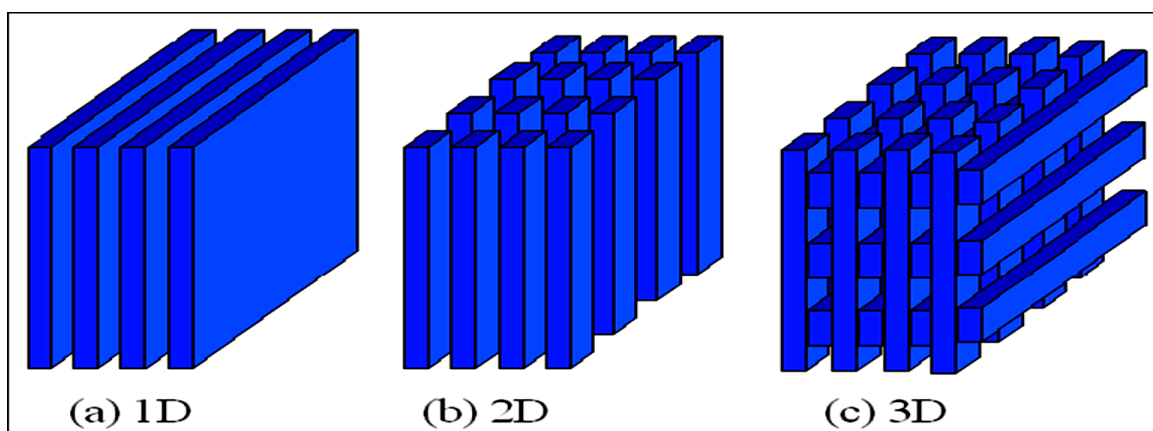
Ces surfaces sont des structures périodiques de matériaux diélectriques et/ou métalliques généralement référencées comme des structures à bandes interdites électromagnétiques (BIE) et qui sont extrapolées des structures photoniques à bandes interdites. Ces structures artificielles ont la propriété de supprimer la propagation des ondes de surface [8]. Ces structures sont utilisées comme un filtre fréquentiel, filtre spatial ou de miroirs à très forte réflectivité. Parmi les cellules les plus utilisés, on cite, les DSRR (Double Split Ring Resonator) [9].

## 2.4. Description des matériaux BIE

### 2.4.1. Description des matériaux BIE diélectriques

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétiques [10].

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques (*Figure 2.2*). Ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial.



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

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

#### 2.4.1.1. Réseaux unidimensionnels

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

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

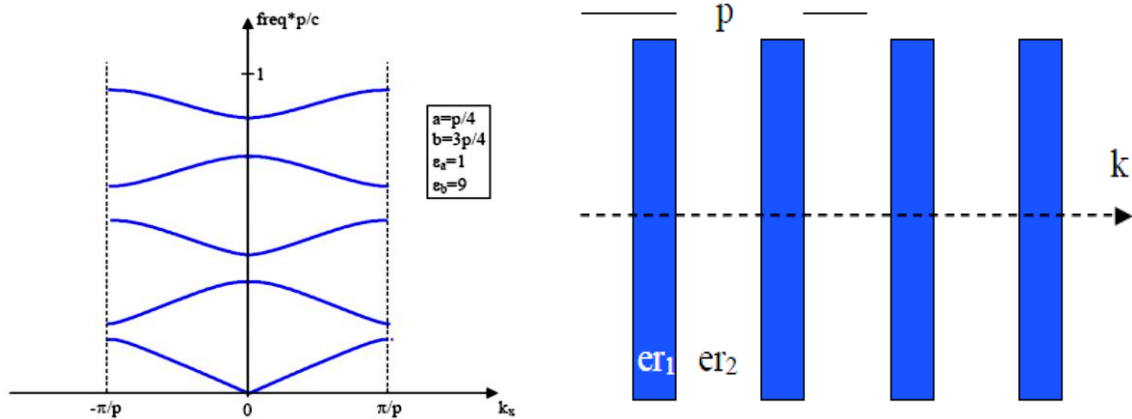


Figure 2.3 : Structure 1D et son diagramme de dispersion.

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

#### 2.4.1.2 Réseaux bidimensionnels

Les matériaux 2D [11] sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidente à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux).

Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau. Nous présentons sur la **Figure 2.4**, plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

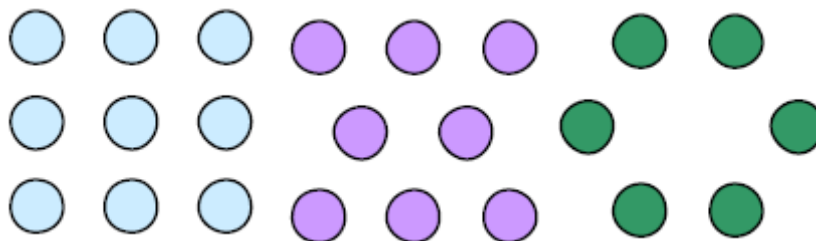
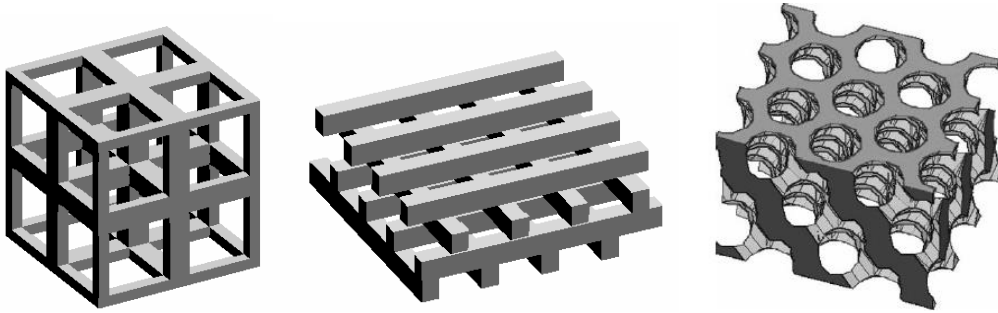


Figure 2.4 : Exemples de différents réseaux 2D.

### 2.4.1.3. Réseaux tridimensionnels

Les structures 3D [12] sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite photonique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles (*Figure 2.5*).

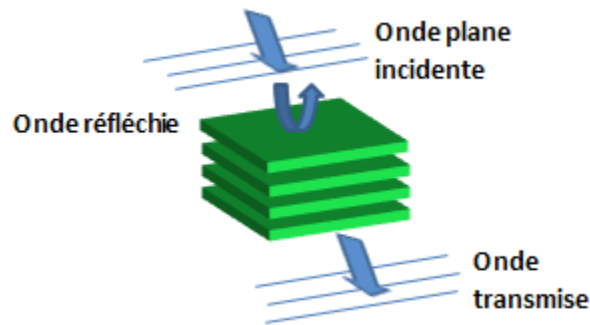


*Figure 2.5 : Différentes structures 3D*

### 2.4.2. Structures BIE sans défaut

C'est en 1915 que la première application de ce principe a été mise de l'avant, à savoir le miroir de Bragg [13]. La lumière est alors réfléchi partiellement au niveau de l'interface entre deux couches successives à cause de la différence d'indice. La périodicité de la structure est calculée de façon à ce que toutes les réflexions partielles interagissent de manière constructive et si on considère que les conditions sont optimales, on peut facilement construire un miroir dont le coefficient de réflexion est de l'ordre de 99.95 %, Une distance de  $\lambda g/4$  entre les différents empilements est exigée pour atteindre cet objectif. montre le module du coefficient de réflexion d'une structure sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.

Le point fort des matériaux BIE est leur possibilité d'agir comme un filtre [14] c'est à dire : leur capacité de réfléchir partiellement ou totalement les ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquence (voir figure 2.6).

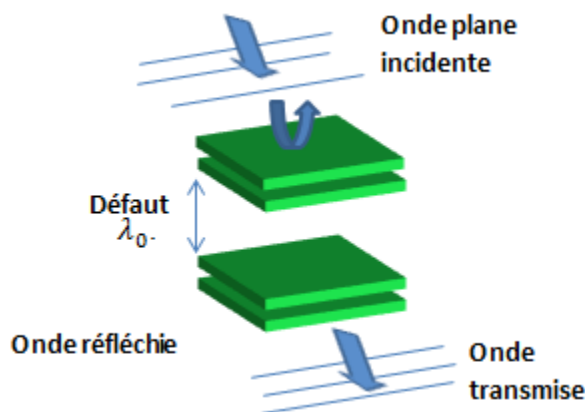


*Figure 2.6 Structures BIE sans défaut*

Ces matériaux périodiques tirent leurs propriétés de façon similaire à un filtre sélectif capable de permettre la propagation de certaines fréquences et d'en interdire d'autres, de l'analogie entre l'équation de Schrödinger qui contrôle la fonction d'onde des électrons et les équations de Maxwell qui régit les ondes électromagnétiques.

### 2.4.3. Structures BIE avec défaut

La façon la plus simple pour créer un défaut est l'introduction d'une couche d'air  $\lambda_0$  au sein du matériau (voir figure 2.7). L'insertion d'un défaut (rupture) dans cette structure entraîne la création d'une étroite bande passante au milieu de la bande interdite [15].



*Figure 2.7 Structures BIE à défaut*

### 2.4.4. Description des structures BIE métalliques

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc

de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau  $d$  est très faible devant la longueur d'onde, qui est bien en dessous des fréquences optiques.

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs. Elles ont aussi permis de concevoir des Surfaces Sélectives en Fréquence ou SSF (**Figure2.8**) mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les structures BIE Métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions [16].



**Figure2.8:** Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).

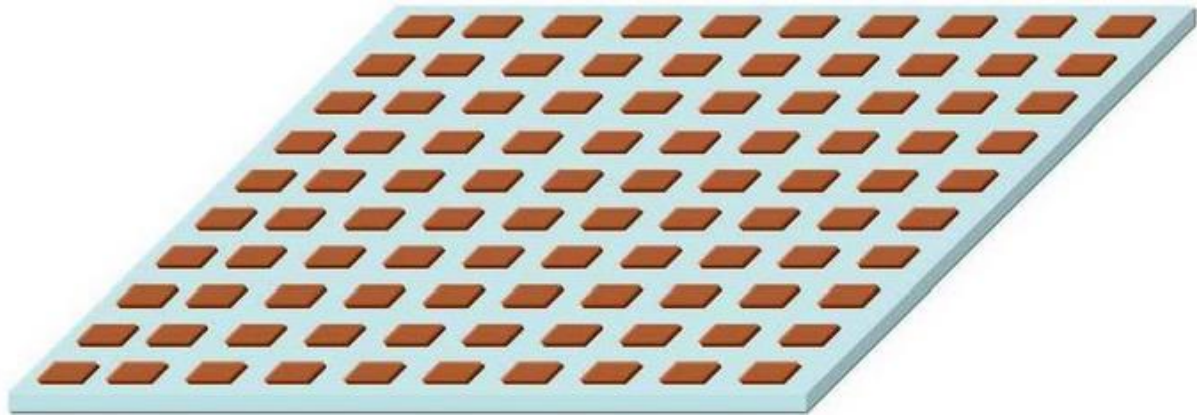
## 2.5. Les surfaces sélectives en fréquence (FSS)

Les surfaces sélectives en fréquence ont fait l'objet de diverses études [17] tel que le filtrage fréquentiel pour atténuer les signaux indésirables et limiter les phénomènes d'interférences, le contrôle des caractéristiques d'une antenne tel que son gain, sa directivité, sa bande passante ...

Les FSS sont en général constituées d'éléments métalliques et diélectriques arrangés en réseaux périodiques planaires (Figure 2.9). La réaction d'une FSS face à une excitation est déterminée par :

La géométrie des motifs périodisés, par le pas du réseau et par leurs propriétés de dispersion, généralement établies lorsqu'on considère des surfaces infinies, et les phénomènes de résonance apparaissent quand la taille effective des éléments du réseau est un multiple de la longueur d'onde d'excitation [18]. En effet, après le passage de l'onde électromagnétique à travers le FSS, certaines fréquences sont transmises tandis que d'autres sont réfléchies.

Les surfaces FSS ont été utilisées pour des applications militaires à partir des années 1960 afin de rendre les objets non détectables par les radars comme les avions furtifs, ou bien insérés dans les Radômes pour protéger l'antenne des intempéries [19].



*Figure 2.9: Réseau bidimensionnel périodique de patches métalliques d'une structure FSS*

## 2.6. Différent type de motif de FSS

Malgré les nombreuses années de recherche sur les FSSs, de nouveaux modèles apparaissent toujours et continuerons sans doute à apparaître. Comme le montre Munk [20], les motifs utilisés dans les FSSs sont classés en quatre groupes de base (voir figure 2.10).

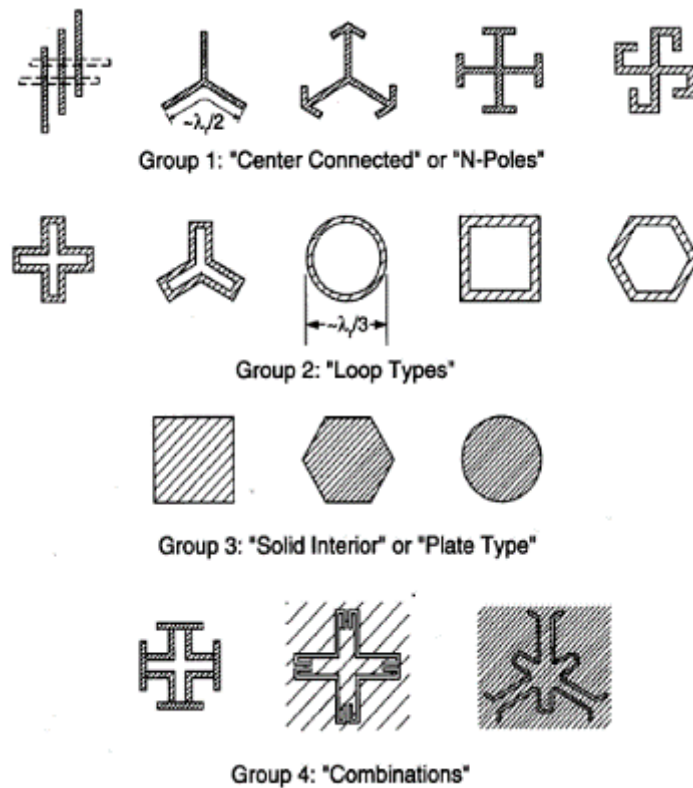
**Groupe 1** : Formé des éléments connectés au centre ayant N pôles comme: dipôles, tripodes et les croix de Jérusalem. Les éléments les plus populaires de ce groupe sont les suivants: (a) Croix de Jérusalem [20]; (b) tripodes [21]. Certains de ces éléments ont été combinés avec d'autres types d'éléments pour produire de nouvelles configurations de FSS [22].

**Groupe 2** : Types en anneau ; comme anneau circulaire, anneau carré et hexagonal. Ce groupe est probablement le plus populaire, avec de nombreux articles écrits sur les anneaux carrés, anneaux (simple et concentriques) [23]. Les anneaux tripolaires [21] entrent aussi dans cette catégorie.

**Groupe 3** : Formé par des ouvertures de forme quelconque dans un plan conducteur ou des patches de formes diverses imprimés sur du substrat. Ces structures prennent généralement la forme d'ouvertures ou de patches. Ils peuvent apparaître dans des configurations multicouches ou à couche unique [24]. La configuration à simple couche avec des ouvertures est utilisée comme filtres dichroïques [25].

**Groupe 4** : Combinaisons des éléments ci-dessus. Des combinaisons de différents types d'éléments des FSSs ont été employées au cours de ces dernières années afin d'atténuer certains des problèmes liés à des FSSs constituées par un seul type d'élément (motif). Par exemple, une FSS formée par des anneaux carrés avec des fentes a été employée pour tenter de surmonter les problèmes de sensibilité angulaire observés dans les FSSs formées par les anneaux carrés seuls. Ces nouvelles structures ont également été utilisées pour réduire la SER (Section Equivalente Radar) des radômes [26].

Ces quatre modèles de base peuvent être combinés [20] pour générer de nombreuses nouvelles FSSs dont les caractéristiques sont uniques. Contient beaucoup de références



**Figure 2.10** : Motifs élémentaires pouvant constituer une Surface Sélective en Fréquence.  
D'après Munk

## 2.7. Différents types de FSS

### 2.7.1. Les FSSs à motifs gravés

Les surfaces sélectives à motifs gravés sont généralement assimilables à un filtre passe-bas. Pour les fréquences basses la structure diélectrique de l'écran ne provoque qu'une atténuation de l'onde dépendant de la permittivité et de la tangente de pertes du milieu considéré. Pour les fréquences hautes, le motif entre alors en résonance, le courant induit sur les métallisations est important et provoque la réflexion de l'onde incidente.

L'efficacité de la réflexion dépend de différents paramètres, comme la géométrie des gravures, leur taille vis à vis de la période du réseau, mais aussi de la permittivité ou de l'épaisseur du substrat sur lequel est imprimé le motif.

### 1.7.1.1. Influence des différents paramètres intervenant dans une FSS à motif gravé

#### a) Période du réseau

Lorsque l'on varie la période du réseau, la variation est surtout présente au niveau de la largeur de bande de la réponse. Pour une même taille de motif, plus la période est petite, plus la largeur de bande sera importante [27]

#### b) Influence de l'épaisseur du substrat

La variation de l'épaisseur du substrat provoque un décalage de la fréquence de résonance du motif. Mais ce déplacement tend vers une limite lorsque le substrat atteint une épaisseur de quelques millimètres [27].

#### c) Influence de la permittivité du substrat

Une variation de la permittivité du substrat a les mêmes conséquences qu'une modification des dimensions du motif : la fréquence de résonance est modifiée. En augmentant la permittivité du substrat, la fréquence de résonance des patchs baisse. Ce constat est très problématique, car la plupart des fabricants ne peuvent certifier la valeur de permittivité de leurs matériaux à moins de  $\pm 2\%$  près pour les forts indices [27].

### 2.7.1.2. Différentes variantes des FSSs à motif gravé

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

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

### 2.7.2. Les FSSs à grille

Les grilles ou plaques métalliques trouées ont un comportement fréquentiel de type passe-haut.

Pour les fréquences basses, la grille dichroïque est vue comme un plan parfaitement conducteur, l'onde incidente est donc totalement réfléchi.

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

Les FSSs à grille sont largement utilisées dans le domaine des micro-ondes [28]. La forme et la taille des ouvertures, leur périodicité, l'épaisseur de l'écran métallique, déterminent le comportement fréquentiel de la FSS. Les ouvertures les plus courantes sont rectangulaires ou circulaires [29]; des ouvertures en forme de Croix sont également utilisées.

Des ouvertures ayant des formes plus complexes et des grilles à écrans multiples sont parfois utilisées en vue de parvenir à des performances spécifiques, ou pour satisfaire des spécifications de conception très serrées

## 2.8. Domaine d'application de BIE

- ✚ Amélioration de l'émission spontanée (Effet Purcell) [30].
- ✚ Miroirs omnidirectionnels à haute réflectivité.
- ✚ Guides d'ondes à faibles pertes.
- ✚ Senseur de micro-cavités.
- ✚ Résonateurs optiques pour lasers à faible seuil.
- ✚ **Fréquences optiques** Les intérêts portés aux matériaux à bande interdite photonique ont tout d'abord été dans le domaine optique [31].
- ✚ **Fréquence micro-ondes** Dans le domaine des micro-ondes, les matériaux à bande interdite photonique trouvent leurs applications aussi bien dans la conception des circuits que pour améliorer les performances des antennes [32].
- ✚ **. Dispositifs filtrants** Parmi les dispositifs utilisant des structures périodiques dans le domaine du filtrage on trouve par exemple des filtres micro-ondes, des guides d'onde et des structures planaire. Au sein de l'IRCOM, dans l'équipe CDM (Circuit et Dispositifs Microondes), des études sont menées pour valider théoriquement et expérimentalement le principe de filtres micro- ondes à structures périodiques [33].
- ✚ **Dispositifs rayonnants** Une des voies les plus développées pour l'application des BIE aux fréquences micro-ondes concerne le domaine des antennes et leurs effets sur le rayonnement. De nombreuses études ont été menées et montrent l'utilisation de matériaux BIE comme substrat d'antennes, comme réflecteur ou comme radôme dans le but d'augmenter la directivité des antennes, ou encore en utilisant des matériaux BIE actifs [34].

## 2.9. Domaine d'application de FSS

A l'origine, la technologie des FSS faisait partie du domaine militaire. Aujourd'hui, les FSS ont trouvé de nombreuses applications en Électromagnétisme micro-ondes antennes radar communications par satellite. Parmi ces applications diverses, on peut citer:

- ✚ Radôme ;
- ✚ Réflecteurs ;
- ✚ Filtres ;

✚ Absorbants ... [35].

La figure suivante présente des exemples d'applications des FSS.

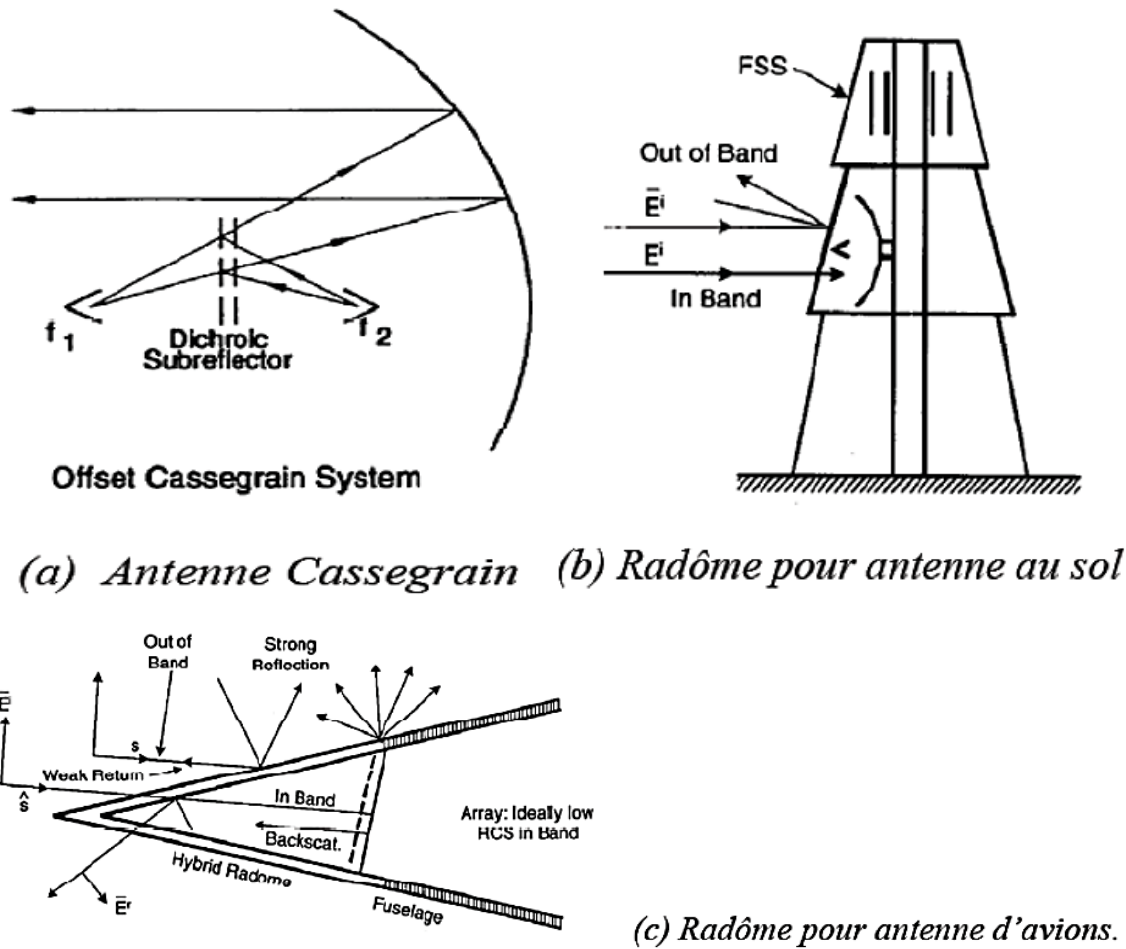


Figure 2.11: Exemples d'applications des FSS. D'après Munk .

La figure montre trois applications typiques d'une FSS, dans la figure. 1.11 (a), la FSS est utilisée comme réflecteur Cassegrain, si la surface dichroïque est transparente à la fréquence  $f_1$  et opaque à la fréquence  $f_2$ , il est possible de placer un cornet d'alimentation au niveau du point focal du réflecteur principal, fonctionnant à la fréquence  $f_1$ , et une autre alimentation au foyer Cassegrain, fonctionnant à la fréquence  $f_2$ . De cette façon, les coûts de fabrication et l'espace requis sont réduits.

La figure 1.11 (b) montre un mât du navire dans lequel est montée une FSS couvrant un compartiment où se situe une antenne radar

La figure 1.11 (c), la FSS est montée sur un nez d'avion où se trouve une antenne radar plane, dans ces deux dernières figures la FSS est conçue pour être transparente pour un signal dans la bande de fonctionnement de l'antenne, alors qu'elle se comporte comme une plaque fortement conductrice en dehors de cette bande [36].

## **2.10. Conclusion**

Ce chapitre est consacré brièvement sur les matériaux périodiques BIE ; les matériaux BIE diélectrique et métalliques (FSS).

D'abord nous a permis de présenter l'essentiel de la théorie ou bien bref historique sur les structures à bande interdite électromagnétique (BIE) avec et sans défaut et description des matériaux BIE diélectriques et métalliques et leur application.

Finalement, nous essayons de collecter les informations les plus importantes sur le FSS en mentionnant ses principes les plus importants et ses différentes formes, et nous avons montré quelques domaines de ses applications.

## Bibliographie

- [1] J.B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, 2000.
- [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] A. Foroozesh, L. Shafai, "Investigation into the effects of the patch type FSS superstrate on the high-gain cavity resonance antenna design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 2, pp. 258–270, 2010.
- [4] Z. C. Ge, W. X. Zhang, Z. G. Liu et al., "Broadband and high-gain printed antennas constructed from Fabry-Perot resonator structure using EBG or FSS cover," *Microwave & Optical Technology Letters* 48 (7), pp.1272–1274, 2006.
- [5] E. YABLONOVITCH "Photonic Band-Gap crystals" *Phys.: Condens. Matter* 5, No 16, April 1993, pp. 2443-2460
- [6] E. YABLONOVITCH "Photonic Band-Gap structure" *J. Opt. Society* Vol 10, p.283-293, Fev 1993
- [7] E. YABLONOVITCH "Photonic crystals semi conductors of light" *Scientific American*
- [8] S.N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain Study of the effect of dielectric split-ring resonators on microstrip-line transmission *Microwave and Optical Technology Letters*, 44 (2005), pp. 445-448
- [9] B. Mukherjee, P. Patel and J. Mukherjee, "A Novel Hemispherical Dielectric Resonator Antenna With Complementary Split-Ring-Shaped Slots and Resonator for Wideband and Low Cross-Polar Applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 1, pp. 120-128, Feb. 2015.
- [10] A. POLMAN, P. WITZIUS "Materials science aspects of photonic crystals" Guest editors *MRS bulletin* August 2001
- [11] M. PLIHAL, A.A MARADUDIN" Photonic band structure of two dimensional systems: the triangular lattice" *Phys .Rev B / vol 44* 1991 – pp 8565
- [12] G.S SMITH, M.P KESLER, J.G MALONEY "Dipole antennas used with all dielectric photonic band gap reflector: gain, field, patterns and input impedance crystals" *M.O.T.L / Vol* 21, N°3, May 5 1999 – pp191-196
- [13] M. Thévenot, A. Reineix, B. Jecko, "F.D.T.D. approach for modelling P.B.G. structure," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 1, pp.495-500, 1999.

- [14] A. A. Oliner, "Periodic structures and photonic band-gap terminology: Historical perspectives," 29th Eur. Microwave Conf, vol. 3, Munich, Germany, Oct. 1999, pp. 295–298.
- [15] D.R. Bullock, C. Shih, R. S. Margulies, "Photonic band structure investigation of two dimensional Bragg reflector mirrors for semiconductor laser mode control," Journal of the Optical Society of America B, Vol. 10, pp. 399-403, 1993.
- [16] M. M. SIGALAS, C. T. CHAN, K. M. HO and C. M. SOUKOULIS "Metallic photonic band-gap materials" Appl. Phys letters (1995)
- [17] B.A. Munk. Frequency-selective surfaces : Theory and design. Wiley, New York, 2000.
- [18] T. K. Wu. Frequency-selective surface and grid array. Wiley, New York, 1995.
- [19] Grimlock. F -117 furtif (wikipedia), 2004. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier: US\\_ Air Force F-117 Nighthawk.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:US_Air_Force_F-117_Nighthawk.jpg).
- [20] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, Wiley Interscience, 2000
- [21] Parker E.A., Hamdy S.M.A., Langley R.J., "Modes of resonance of the Jerusalem cross in frequency selective surfaces", IEE Proceedings, Pt. H, Vol. 130, No. 3, April 1983, pp. 203-208.
- [22] J. C. Vardaxoglou, Frequency Selective Surfaces, John Wiley and Sons, 1997.
- [23] Parker E.A., Antonopoulos C., Simpson N.E., "Microwave band FSS in optically transparent conducting layers: Performance of ring element arrays." Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 16, No. 2, October 1997, pp. 61-63.
- [24] Wakabayashi H., Kominami M., Kusaka H., Nakashima H., "Numerical simulations for frequency selective screen with complementary elements", IEE Proceedings Microwave Antennas and Propagation, Vol. 141, No. 6, December 1994, pp. 477-482.
- [25] Winnewisser C., Lewen F., Weinzierl J., Helm H., "Frequency-selective surfaces analyzed by THz-time-domain spectroscopy". IEEE Sixth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings. THZ 98, IEEE 1998, New York, NY, USA, pp.196-198.
- [26] Wahid M., Morris S.B., " Metal radomes reduced RCS performance", GEC Journal of Research, Vol. 9, No. 3, 1992, pp. 166-171.
- [27] Bertrand. Debonne. Modélisation et Intégration d'un écran Dichroïque dans un système d'antennes spatiales, Université Blaise pascal-Clermont II
- [28] T. K. Wu, Frequency Selective Surface and Grid Array, John Wiley and Sons, 1995
- [29] C. C. Chen, "Transmission of Microwave Through Perforated Flat Plates of Finite Thickness," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-21, No. 1, pp. 1-6, Jan. 1973.

- [30] G.Poislane "Antennes et Matériaux à BIP" Thèse de doctorat n° 2194, université de Rennes I, Juillet 1999
- [31] B.Lenoir "Applications de structures périodiques diélectriques et métalliques à la conception dispositifs microondes volumiques et planaire" Thèse de doctorat n° 14-2001, Université de Limoges, 23 Mars2001
- [32] Halim BOUTAYEB, "Etude des structures périodiques planaires et conformes associées aux antennes. application aux communications mobiles", Thèse doctorat DE l'université de Rennes 1, décembre 2003.
- [33] B. A. Munk, "Frequency selective surfaces: Theory and Design ", John Wiley & sons, 2000.
- [34] Stefania Monni, "Frequency Selective Surfaces: Integrated with Phased Array Antennas ", Juin 2005.
- [35]. Daihei Hippo, Kei Urakawa, Yoshishige Tsuchiya, Hiroshi Mizuta, Nobuyoshi Koshida, Shunri Oda., "Spontaneous emission control of silicon nanocrystals by silicon three-dimensional photonic crystal structure fabricated by self-aligned two-directional electrochemical etching method", Materials Chemistry and Physics., vol. 116, 2009, p. 107-111.
- [36] A. de Lustrac, F. Gadot, S. Gabret, J.M. Lourtioz, T. Britllet, A. Priou, E. Akmansoy "Experimental demonstration of electrically controllable photonic crystals at centimetres wavelength" Appl.Phys.Letters, vol 75, September 1999, ppl. 1625-1627

**Chapitre 03:**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

### **3.1. Introduction**

Ce chapitre sera consacré à l'étude des antennes imprimée à BIE et FSS fonctionnant dans la bande 5G à l'aide du logiciel CST Microwave Studio. Nous étudions l'influence de quelques paramètres importants qui affectent les performances d'une antenne et nous allons comparer une antenne patch à substrat simple et avec BIE, les caractéristiques de l'antenne BIE étudiés : (coefficient de réflexion  $S_{11}$ , fréquence de résonance, bande passante, gain et directivité). Comme, nous nous sommes insérés à l'insertion d'une couche FSS et étudier l'influence de ses différents paramètres et ses défauts.

### **3.2. Présentation du logiciel CST MICROWAVE STUDIO**

CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique en trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences [1].

Il simplifie le processus de l'introduction de la structure et la définition des équipements en fournissant une interface graphique de modélisation puissante et solide après la modélisation du composant, une procédure de maillage automatique peut être appliquée avant que la simulation ne soit lancée [1].

CST MICROWAVE STUDIO est un module qui fait partie du logiciel CST STUDIO SUITE et propose un certain nombre de solveurs pour différents types d'application. Comme aucune méthode ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'application, le logiciel contient quatre techniques différentes de simulation (solveur transitoire, solveur fréquentiel, solveur d'équation intégrale, et solveur de mode propre) pour mieux répondre aux applications particulières. L'outil le plus flexible est le solveur transitoire, qui peut obtenir le comportement fréquentiel pour une large bande de fréquence par une seule et unique simulation (contrairement à l'approche fréquentielle de nombreux autres simulateurs) [1][2].

Et il est basé sur la technique FIT (en anglais : Finite Integration Technique) qui a été introduite en électrodynamique plus de trois décennies auparavant. Ce solveur est efficace pour la plupart des types d'applications à haute fréquence tels que des connecteurs, des lignes de transmission, filtres, antennes etc...

### **3.3. La méthode d'intégration finie**

CST microwave studio utilise la méthode d'intégration finie (FIT) introduite par Weiland en 1977. Elle consiste en une discrétisation spatio-temporelle des équations de

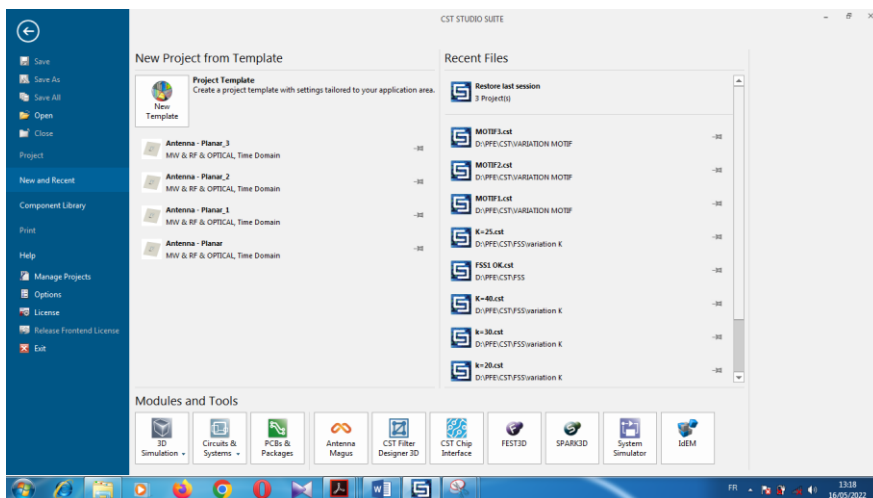
Maxwell dans une formulation intégrale. Le domaine de calcul est décomposé en cellules élémentaire cubiques [3].

La FIT est utilisée par le logiciel d'analyse électromagnétique 3D Microwave studio de CST qui présente de nombreuses optimisation de calcul et une interface graphique conviviale. En raison de sa capacité à résoudre des problèmes électromagnétiques à la fois dans le temps et dans le domaine fréquentiel, pour une variété de propriétés des matériaux, et à son exceptionnel numérique efficacité et précision, la FIT a été utilisé dans le monde entier dans la simulation d'une large gamme d'appareils, de DC à THz. Par ailleurs, la méthode d'intégration finie contribue, dans la dernière décennie, à des changements fondamentaux de point de vue pour d'autres méthodes numérique, telles que la méthode des éléments finis [4].

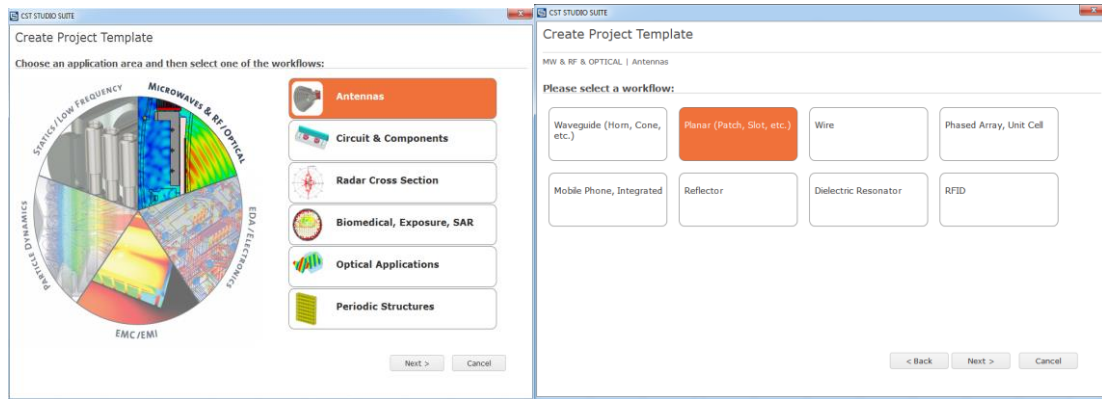
### 3.4. Exemple d'un projet en CST

#### 3.4.1. Démarrer le logiciel

Après le démarrage CST Studio Suite, vous serez invité à ouvrir un fichier existant ou à créer un nouveau projet:

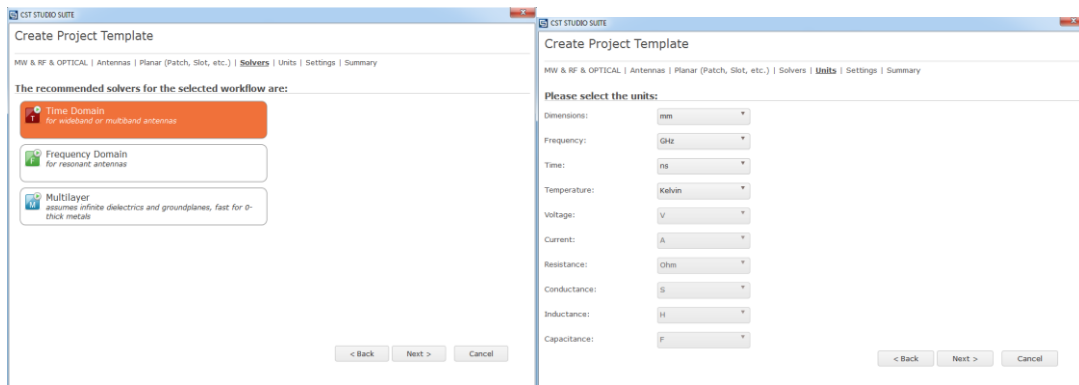


**Figure 3.1 :** *La fenêtre d'accueil.*



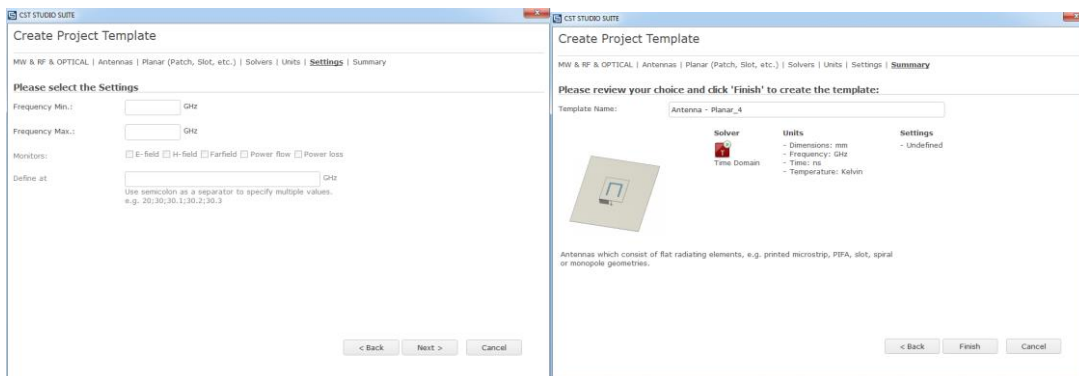
A

B



C

D



E

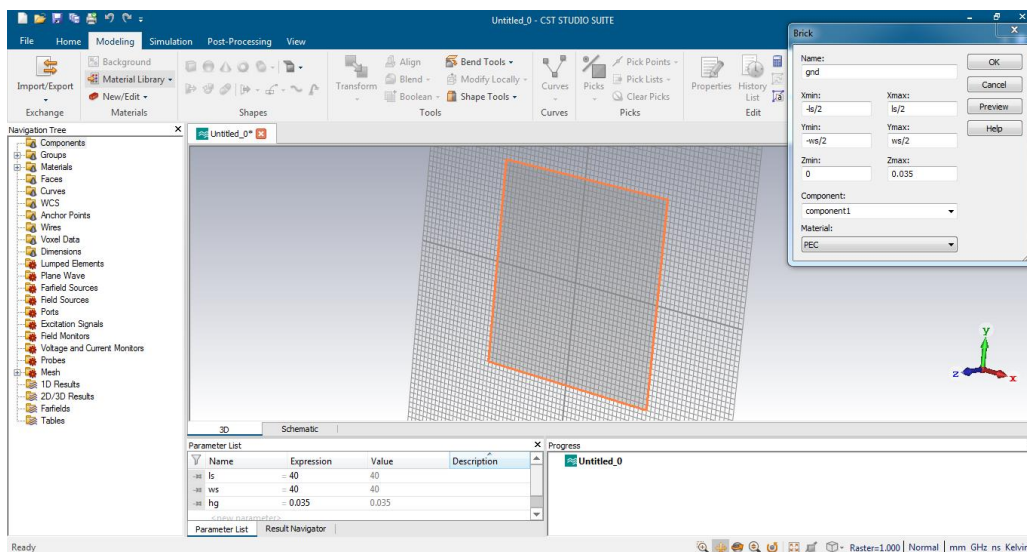
F

Figure3 .2 (A-B-C-D-E-F) : Les fenêtres pour créer un nouveau projet.

### 3.4.2. Créer le plan de masse (GND)

1. Activez l'outil de briques en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet.

2. On peut définir un point de départ par un double-clic sur un emplacement sur le plan du dessin.
3. Maintenant, on peut sélectionner la base de la face de coin de la brique sur le plan du dessin par double-cliquant dessus.
4. Ensuite, définir la hauteur de la brique en faisant glisser la souris. Double-cliquez pour fixer la hauteur de la brique.
5. Enfin, une boîte de dialogue s'ouvre où on peut introduire les valeurs numériques de tous les coordonnées et choisir le matériau dans ce cas (PEC : perfect electric conductor) et cliquez sur OK.



**Figure 3.3 :** Créer un plan de masse.

### 3.4.3. Créer de substrat diélectrique

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes que celles du plan de masse.
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas « **Epoxy resin** » puis cliquez sur OK.

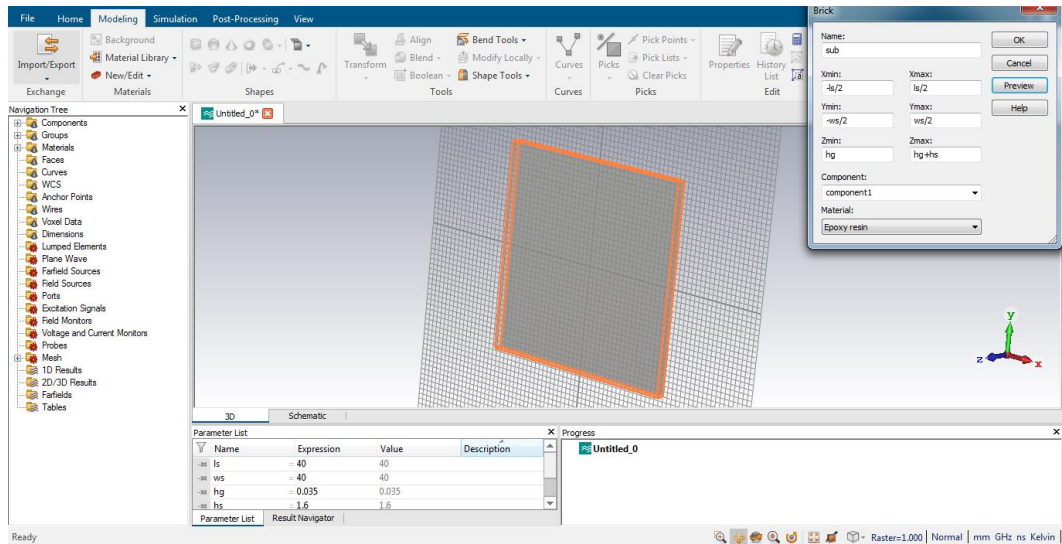


Figure 3-4 : Créer de substrat diélectrique

### 3.4.4. Créer le patch

- 1- Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes du plan de masse.
- 2- En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et cliquez sur OK.

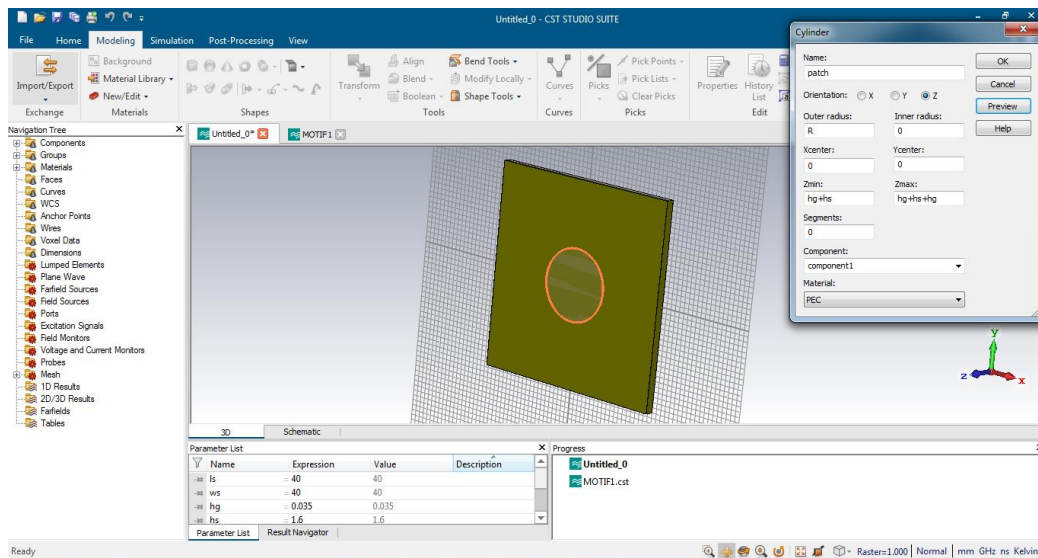



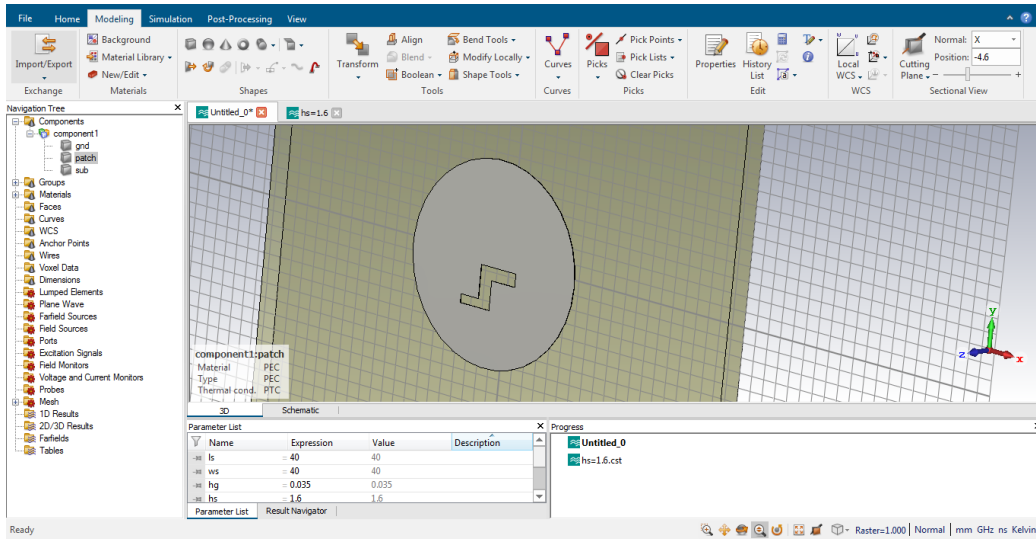
Figure 3-5 : Créer le patch

### 3.4.5. Créer le slot du patch :

Pour créer le slot de patch qui contient 3 solids il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes du plan de masse;

2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (vacum) et clique sur **OK**;
3. On clique sur le solid1, ensuite sur la barre d'outils on clique sur  Boolean et choisir «add+», après un autre clique sur le solid2 qu'on a créé puis sur **Entrée**;
4. Les mêmes étapes pour solid3;
5. On clique sur le patch, ensuite sur la barre d'outils on clique sur et choisir «subtract-», après un autre clique sur le solid1 (solid1+solid2+solid3) qu'on a créé puis sur **Entrée**;



**Figure 3-6 : Créer le slot du patch**

### 3.4.6. Définir le port

1. Activez l'outil de PORT en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue s'ouvre on va entrer l'emplacement de ce port suivant x, y et z.

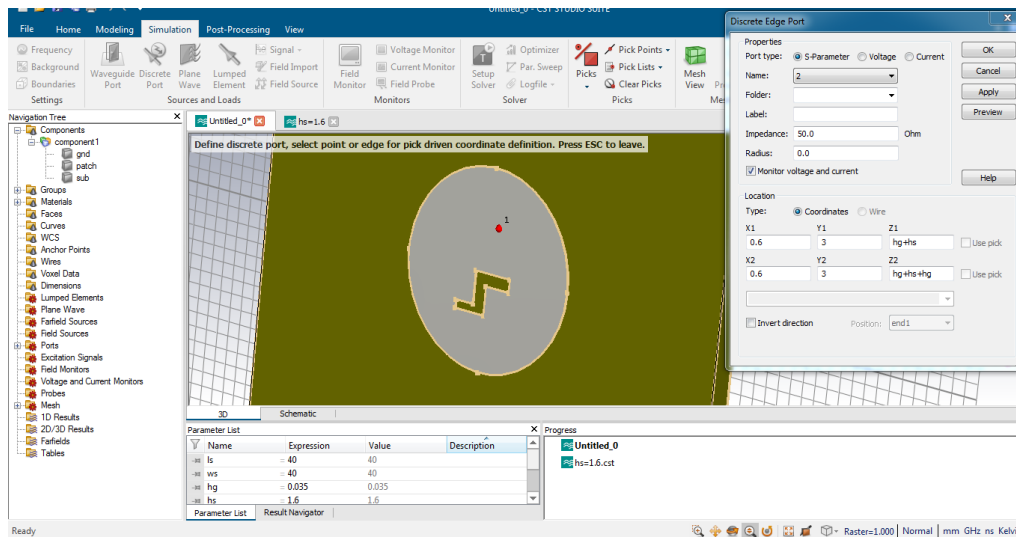


Figure 3-7 : Définir le port

### 3.4.7. Définir le domaine de fréquence

1. Activez l'outil de fréquence en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue on limite le domaine de fréquence et cliquez sur OK.

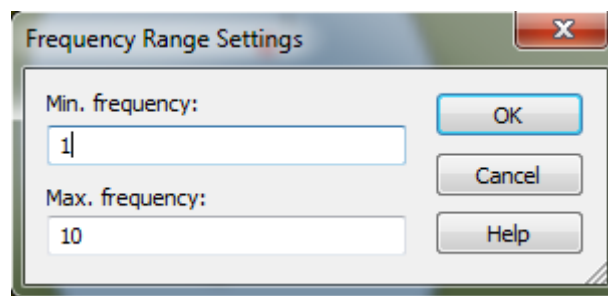


Figure 3-8 : Définir le domaine de fréquence

### 3.4.8. Définir les conditions au bord

- 1- Activez l'outil de condition au bord en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
- 2- En utilisant la boîte de dialogue on choisit (open add space) sur tous les directions dans notre cas et cliquez sur OK.

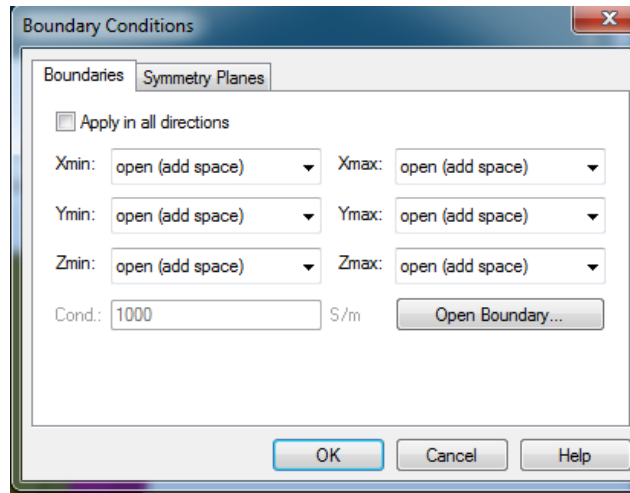


Figure 3-9 : Définir les conditions au bord.

### 3.4.9. La simulation

Pour lancer la simulation il faut :

1. Activez l'outil de simulation en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue on peut choisir la précision ;
3. cliquez sur <Start>

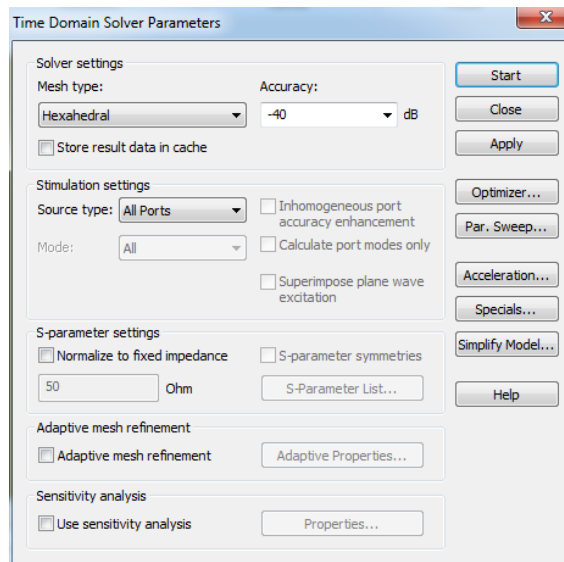
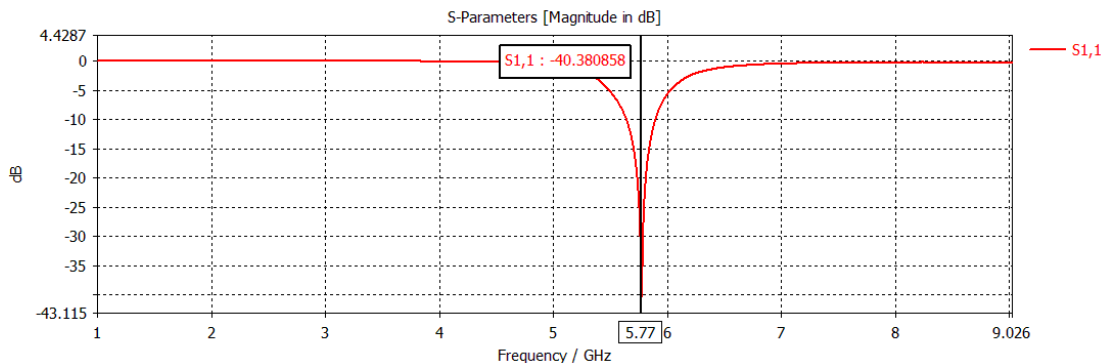


Figure 3-10 : Choisir la précision

### 3.4.10. Résultats :

#### A)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

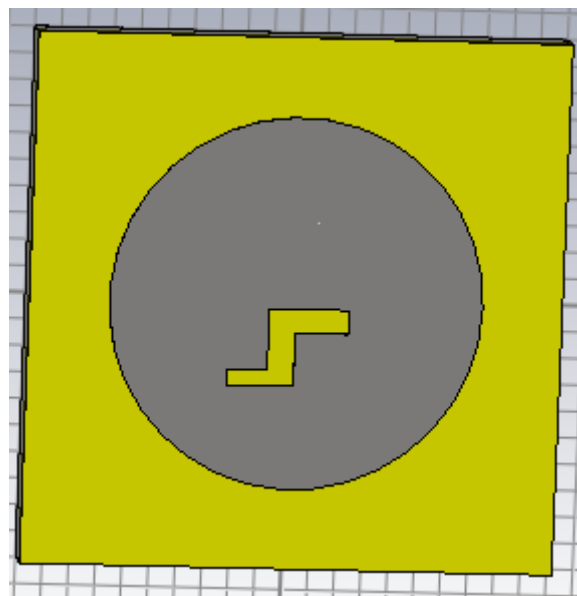


**Figure 3-11 :** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch circulaire simple

A partir du Figure (3-11) qui représente le coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour une antenne patch circulaire, on remarque que la fréquence de résonance est 5.77GHz.

### 3.5. Présentation de la structure simple

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse  $(20 \times 20)mm^2$ , et son épaisseur  $h = 0.035mm$ . Au-dessus d'un substrat diélectriques d'une permittivité de  $\epsilon_r=4$  (Epoxy resin), d'épaisseur  $h=1.6mm$  avec la même longueur et largeur du plan de masse, et le rayon du patch circulaire  $R=7mm$  avec un slot, notre antenne est alimentée par une sonde coaxiale (Figure 3-12).



**Figure 3-12 :** La Structure simple de l'antenne imprimée.

### 3.6. Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité

#### 3.6.1. Variation du rayon du patch R

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction des différents valeurs du rayon du patch circulaire : R=7mm, R=8mm, R=6mm.

##### A)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

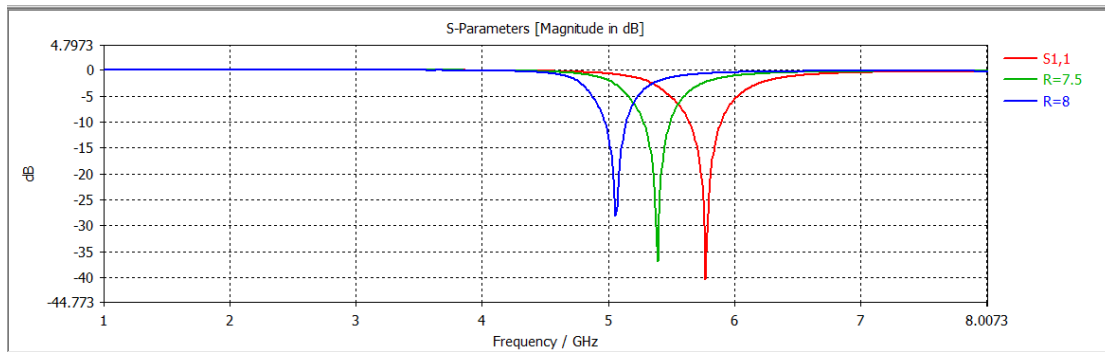
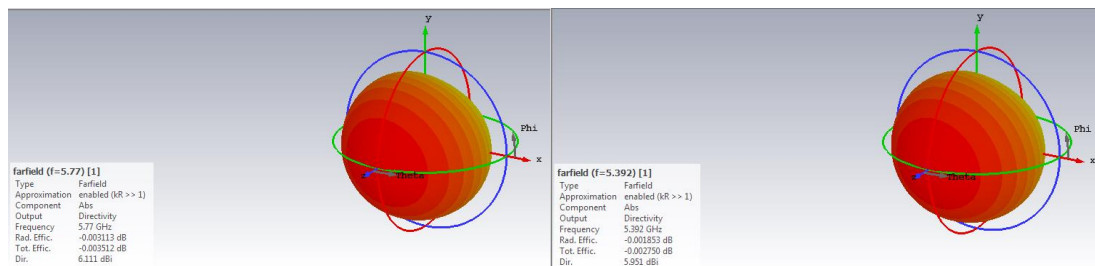


Figure3-13 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs rayon du patch

	R=7mm	R=7.5mm	R=8mm
Fréquence	5.77	5.392	5.059
Bande passante	0.253	0.215	0.173
$S_{11}$	-40.380	-36.857	-28.019
Directivité	6.111	5.951	5.772
Gain	6.108	5.949	5.771

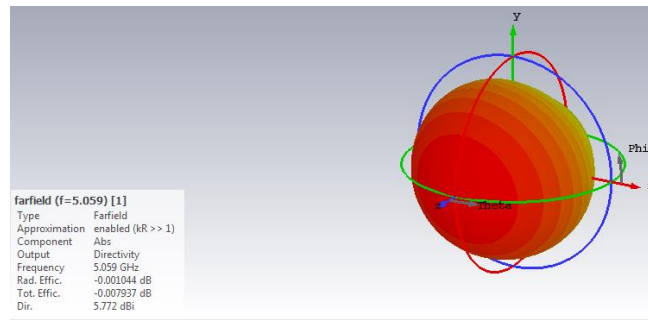
Tableau 3.1. Caractéristiques de l'antenne simple en fonction du rayon du patch

##### B) La Directivité



R=7mm

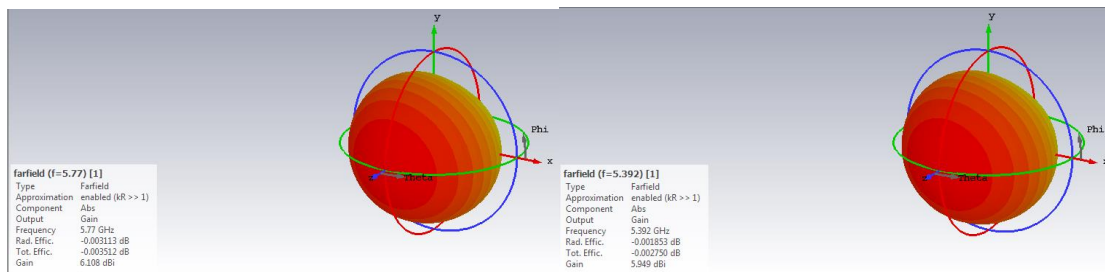
R=7.5mm



**R=8mm**

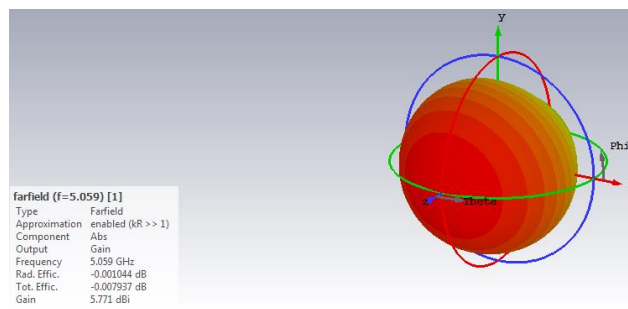
Figure 3.14. Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs du rayon du patch

C) Le gain



**R=7mm**

**R=7.5mm**



**R=8mm**

Figure 3.15 Gain de l'antenne simple pour différentes valeurs rayon du patch

A partir du Tableau 3.1 et les figures (3.13-3.14-3.15) on remarque :

- ✚ Lorsque le rayon de patch diminue, la fréquence de résonance augmente ;
- ✚ Coefficients de réflexion change avec la variation du rayon du patch ;

- ✚ Nous constatons un élargissement de la bande passante à mesure que rayon du patch diminue ;
- ✚ Le gain et la directivité varient non-uniformément avec la diminution du rayon du patch ;
- ✚ La valeur  $R=7\text{mm}$  est la meilleur pour des caractéristiques de l'antenne idéale.

### 3.6.2. Variation de $h_s$

On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, la directivité et le gain en fonction des différentes valeurs de l'épaisseur du substrat lorsque  $h_s=1.4\text{mm}$ ,  $1.6\text{mm}$  et  $1.8\text{mm}$ .

#### a)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

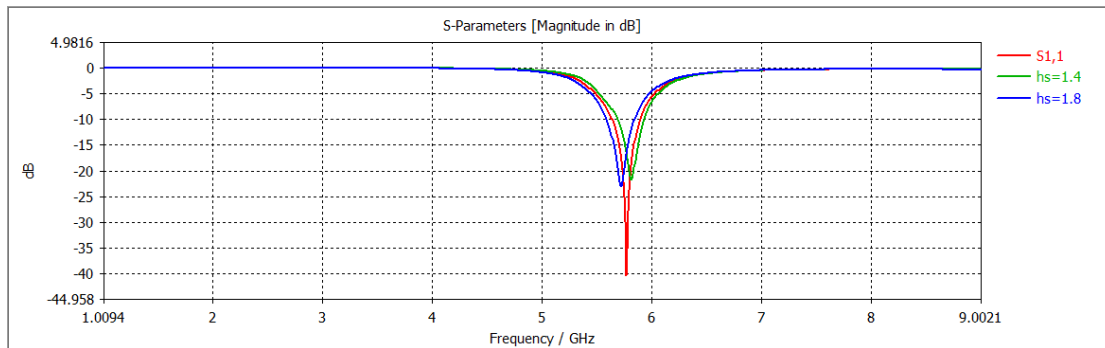
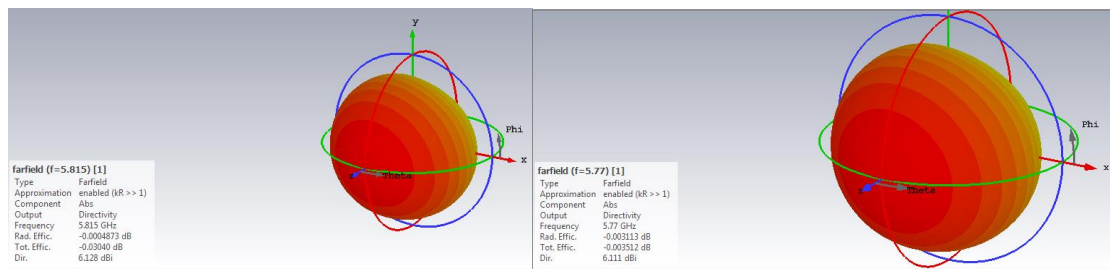


Figure3-16 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes épaisseurs du substrat

	$h_s=1.4\text{mm}$	$h_s=1.6\text{mm}$	$h_s=1.8\text{mm}$
Fréquence	5.815	5.77	5.725
Bande passante	0.241	0.253	0.254
$S_{11}$	-21.640	-40.380	-22.97
Directivité	6.128	6.111	6.095
Gain	6.128	6.108	6.090

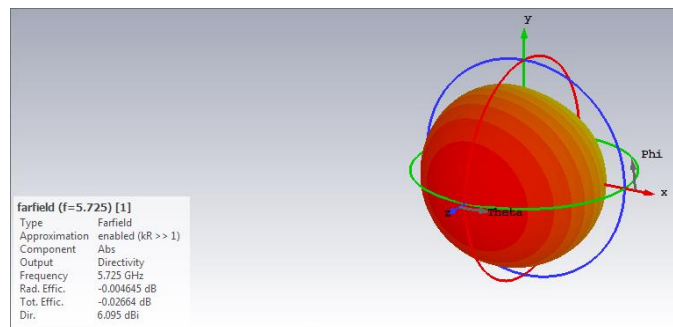
Tableau 3.2. Caractéristiques de l'antenne simple en fonction de l'épaisseur du substrat.

b) La Directivité



hs=1.4mm

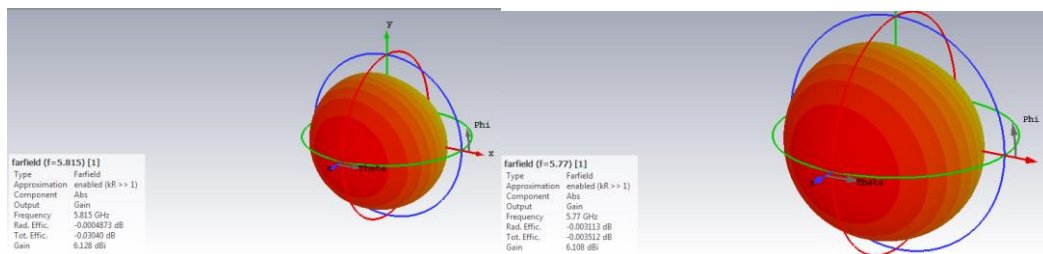
hs=1.6mm



hs=1.8mm

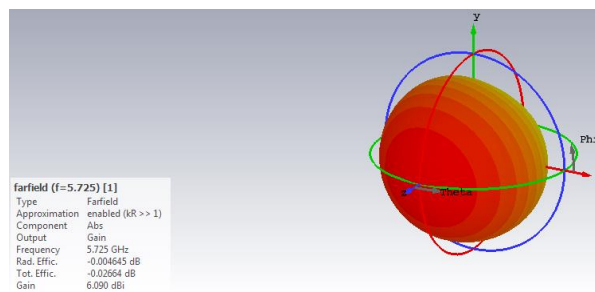
Figure 3.17. Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat

c) Le gain



hs=1.4mm

hs=1.6mm



hs=1.8mm

Figure 3.18 Gain de l'antenne simple pour différentes valeurs d'épaisseurs du substrat.

A partir du Tableau 3.2 et les figures (3.16-3.17-3.18) on remarque :

- ✚ Le coefficient de réflexion change avec la variation de l'épaisseur du substrat ;
- ✚ On note la diminution de la fréquence de résonance avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat;
- ✚ Nous constatons un élargissement de la bande passante à mesure que l'épaisseur du substrat augmente ;
- ✚ Le gain et la directivité varient non-uniformément avec la diminution de l'épaisseur du substrat ;
- ✚ La valeur  $h_s=1.6\text{mm}$  est la meilleur pour des caractéristiques d'une antenne idéal.

### 3.6.3 Variation de la surface du slot du patch

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante et la directivité en fonction des différentes valeurs surfaces du slots du patch  $S=1.93\text{mm}^2$ ,  $5.9\text{mm}^2$  et  $18.85\text{mm}^2$ .

#### A)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

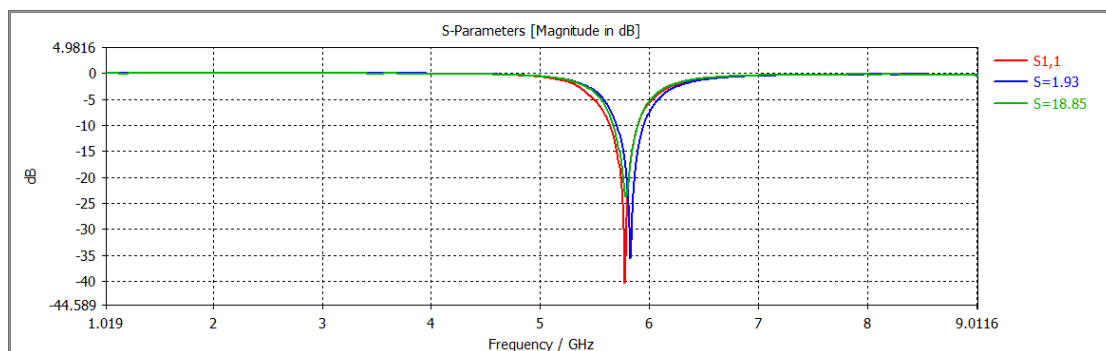


Figure3-19: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs surfaces du slot du patch

	$S=1.93\text{mm}^2$	$S=5.9\text{mm}^2$	$S=18.85\text{mm}^2$
Fréquence	5.842	5.77	5.689
Bande passante	0.247	0.253	0.235
$S_{11}$	-30.773	-40.380	-24.041
Directivité	6.130	6.111	6.109
Gain	6.089	6.108	6.109

Tableau 3.3. Caractéristiques de l'antenne simple en fonction de la surface du slot du patch

b) La Directivité

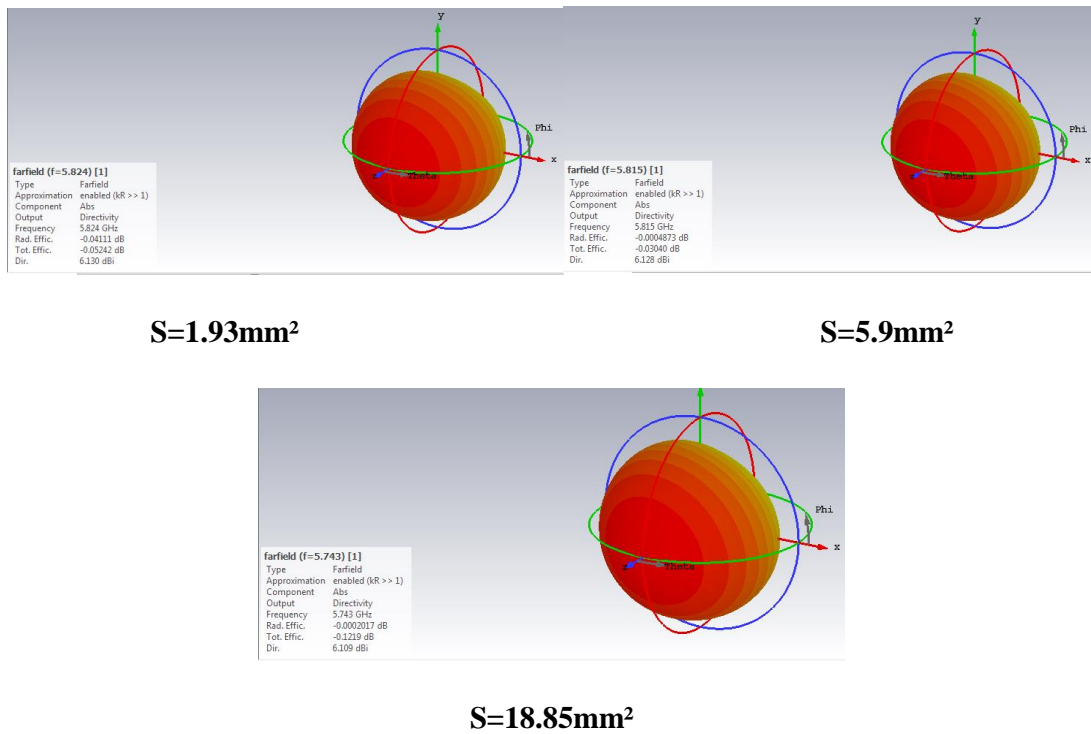


Figure 3.20 Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs de la surface du slot du patch

c)-le gain

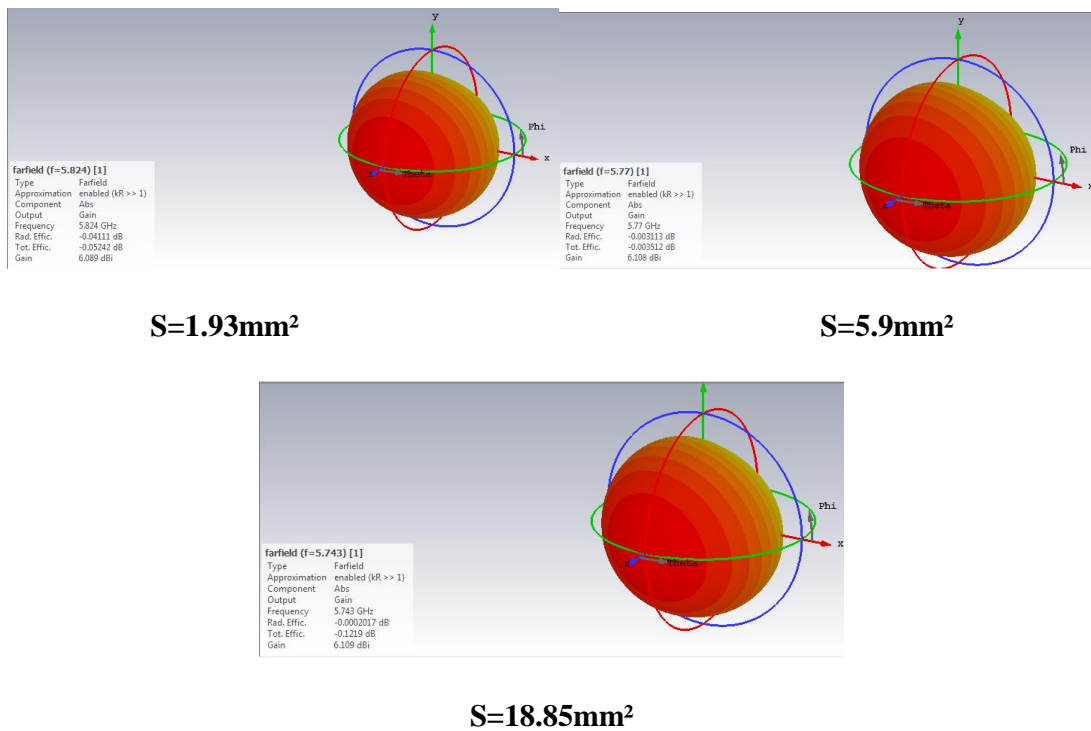


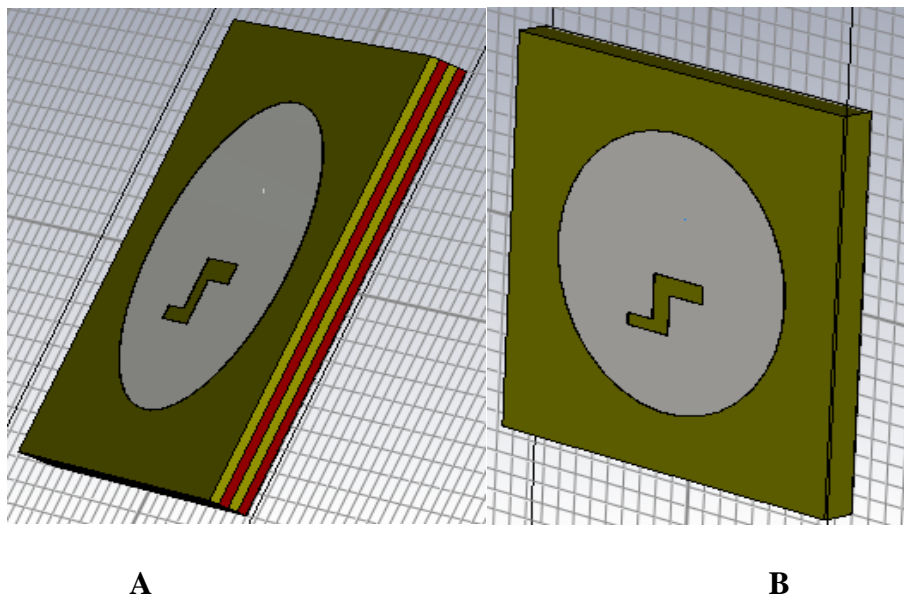
Figure 3.21 Gain de l'antenne simple pour différentes valeurs de la surface de slot du patch

A partir du Tableau 3.3 et les figures (3.19-3.20-3.21) on remarque :

- ✚ Le coefficient de réflexion change avec la variation de surface du slot du patch
- ✚ Notez que la fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de surface du slot du patch
- ✚ Nous constatons un élargissement de la bande passante à mesure que surface du slot du patch augmente ;
- ✚ Le gain et la directivité varient non-uniformément avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat.
- ✚ La valeur  $S=5.9\text{mm}^2$  est le meilleur pour garder les caractéristiques d'une antenne idéale.

### **3.7. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal**

On étudie la variation de la directivité et le gain la fréquence de deux antennes imprimée de forme circulaire: une à substrat à BIE, de rayon  $R=7\text{mm}$ , la permittivité du substrat qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r1}=3.37$ , et leurs épaisseur  $h1=0.4\text{mm}$  et les deux autres couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r2}=4$ , d'épaisseur  $h2=0.4\text{mm}$ , et une antenne à substrat normal dans ce cas on utilise le diélectrique de permittivité  $\epsilon_r=4$  d'épaisseur  $h=1.6\text{mm}$ .



**Figure 3-22** : Structure des antennes : A) à substrat à BIE B) à substrat normal.

a)- Coefficients de réflexion  $S_{11}$

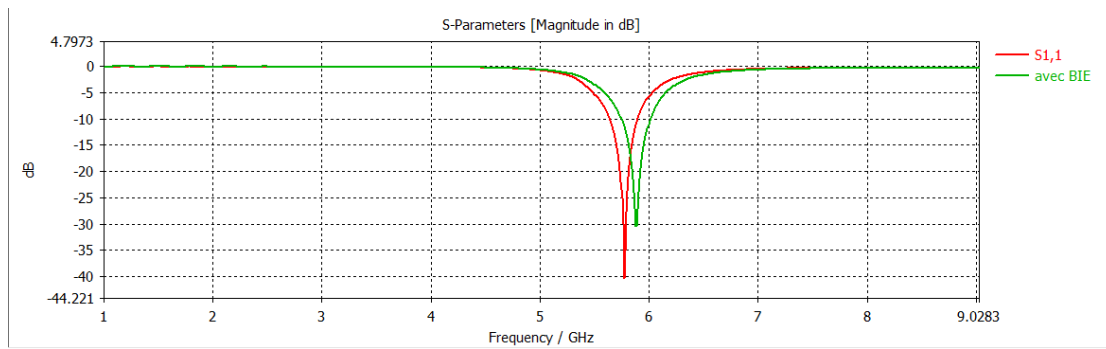
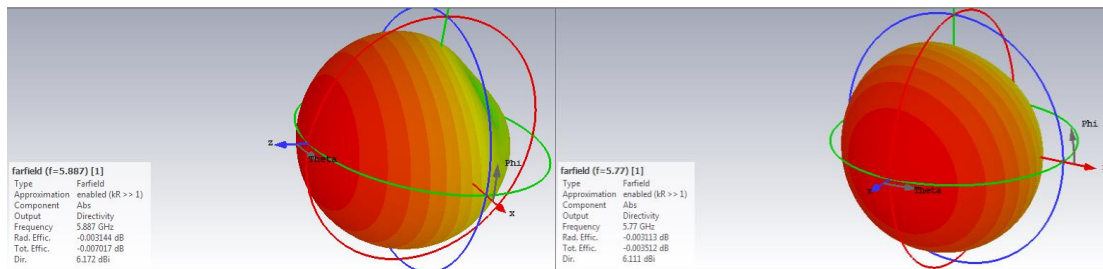


Figure3-23: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour antenne avec BIE et sans BIE

	Structure sans BIE	Structure avec BIE
Fréquence	5.77	5.887
Bande passante	0.253	0.264
S11	-40.380	-30.50
Directivité	6.111	6.172
Gain	6.108	6.169

Tableau 3.4. Caractéristiques de l'antenne simple en fonction d'antenne avec BIE et sans BIE

b) La Directivité

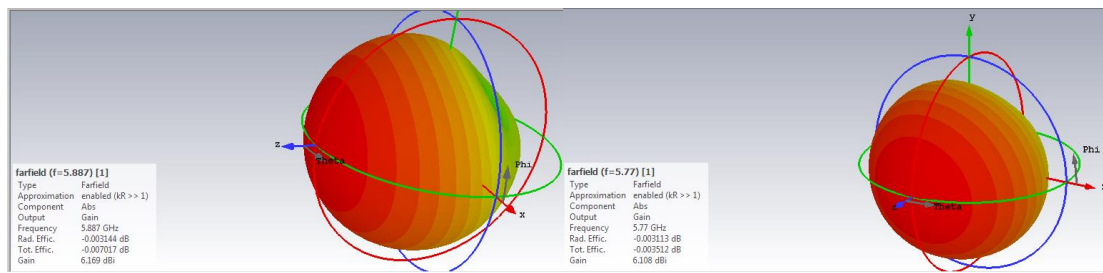


Avec BIE

Structure normal

Figure 3.24 Directivités pour antenne avec BIE et sans BIE

c) Le gain



Avec BIE

Structure normal

Figure 3.25 Gain pour antenne avec BIE et sans BIE

A partir du Tableau 3.4 et les figures (3.23-3.24-3.25) on remarque :

- Les caractéristiques d'une antenne imprimée à BIE sont mieux que celle d'une antenne sans BIE (Le gain et la directivité pour une antenne à substrat BIE sont plus importants).
- Les caractéristiques d'une antenne imprimée sans BIE sont mieux que celle d'une antenne à BIE (la fréquence et bande passant, le coefficient de réflexion).

### 3.8. La variation de la permittivité du substrat antenne à BIE

#### 3.8.1. La variation de $\epsilon_r1$

##### A)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

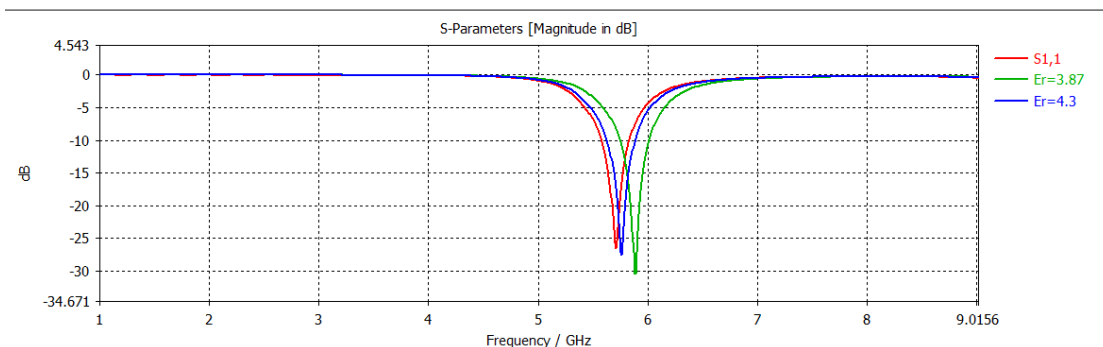


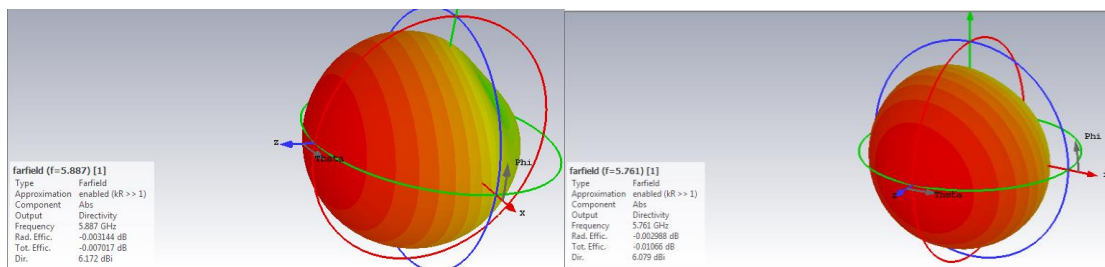
Figure.3-26: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes permittivités du substrat  $\epsilon_r1$

	$\epsilon_{r1}=3.87$	$\epsilon_{r1}=4.3$	$\epsilon_{r1}=4.5$
Fréquence	<b>5.887</b>	<b>5.761</b>	<b>5.707</b>
Bande passante	<b>0.264</b>	<b>0.257</b>	<b>0.254</b>
S11	<b>-30.50</b>	<b>-27.53</b>	<b>-26.57</b>
Directivité	<b>6.172</b>	<b>6.079</b>	<b>6.040</b>
Gain	<b>6.169</b>	<b>6.076</b>	<b>6.036</b>

Tableau 3.5. Caractéristiques de l'antenne à BIE en fonction de la permittivité du substrat

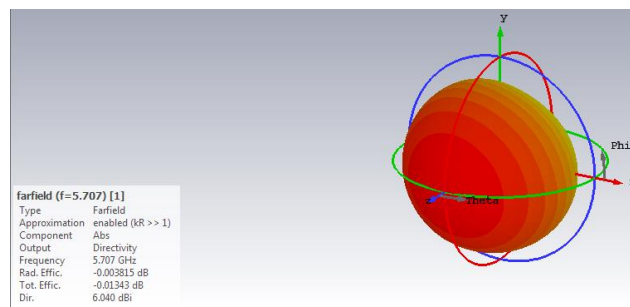
$\epsilon_{r1}$

b) La Directivité



$\epsilon_{r1}=3.87$

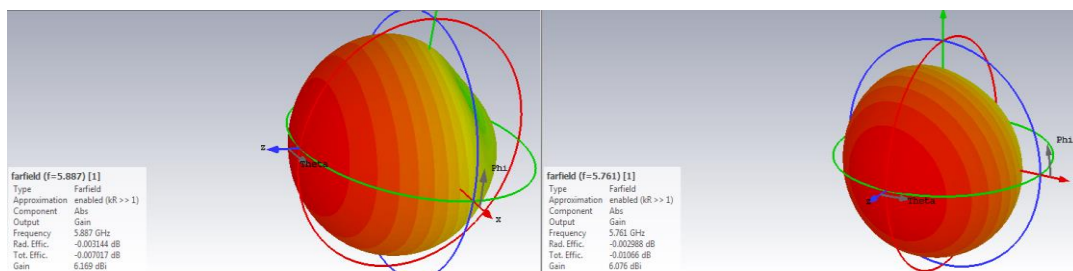
$\epsilon_{r1}=4.3$



$\epsilon_{r1}=4.5$

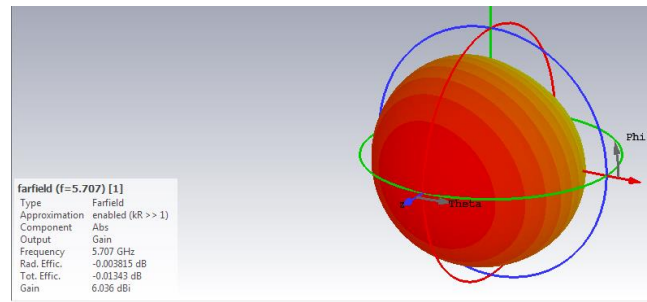
Figure 3.27 Directivités pour différentes permittivités du substrat  $\epsilon_{r1}$

c) Le gain



$\epsilon_{r1}=3.87$

$\epsilon_{r1}=4.3$



$$\epsilon_r1=4.5$$

Figure 3.28 Gain pour différentes permittivités du substrat  $\epsilon_r1$

A partir du Tableau 3.5 et les figures (3.26-3.27-3.28) on remarque :

- Les caractéristiques d'une antenne imprimée à BIE (la fréquence de résonance, la bande passant et le coefficient de réflexion S11 ainsi que la directivité et le gain) diminuent avec l'augmentation de la permittivité.

### 3.8.2. La variation de $\epsilon_r2$

#### A)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

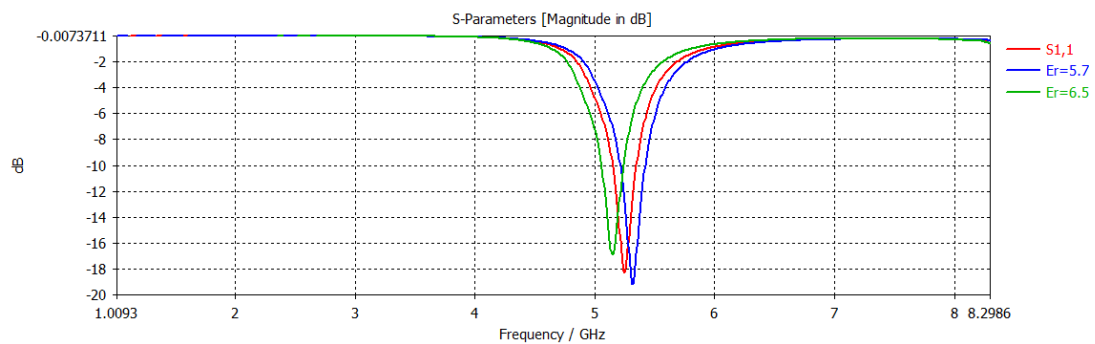


Figure3-29: Coefficient de réflexion S11 pour différentes permittivité du substrat  $\epsilon_r2$

	$\epsilon_r=5.7$	$\epsilon_r=6$	$\epsilon_r=6.5$
Fréquence	<b>5.32</b>	<b>5.248</b>	<b>5.149</b>
Bande passante	<b>0.207</b>	<b>0.193</b>	<b>0.184</b>
S11	<b>-19.16</b>	<b>-18.27</b>	<b>-16.905</b>
Directivité	<b>5.783</b>	<b>5.731</b>	<b>5.656</b>
Gain	<b>5.781</b>	<b>5.729</b>	<b>5.655</b>

Tableau 3.6. Caractéristiques de l'antenne à BIE en fonction permittivité du substrat  $\epsilon_r2$

b) La Directivité

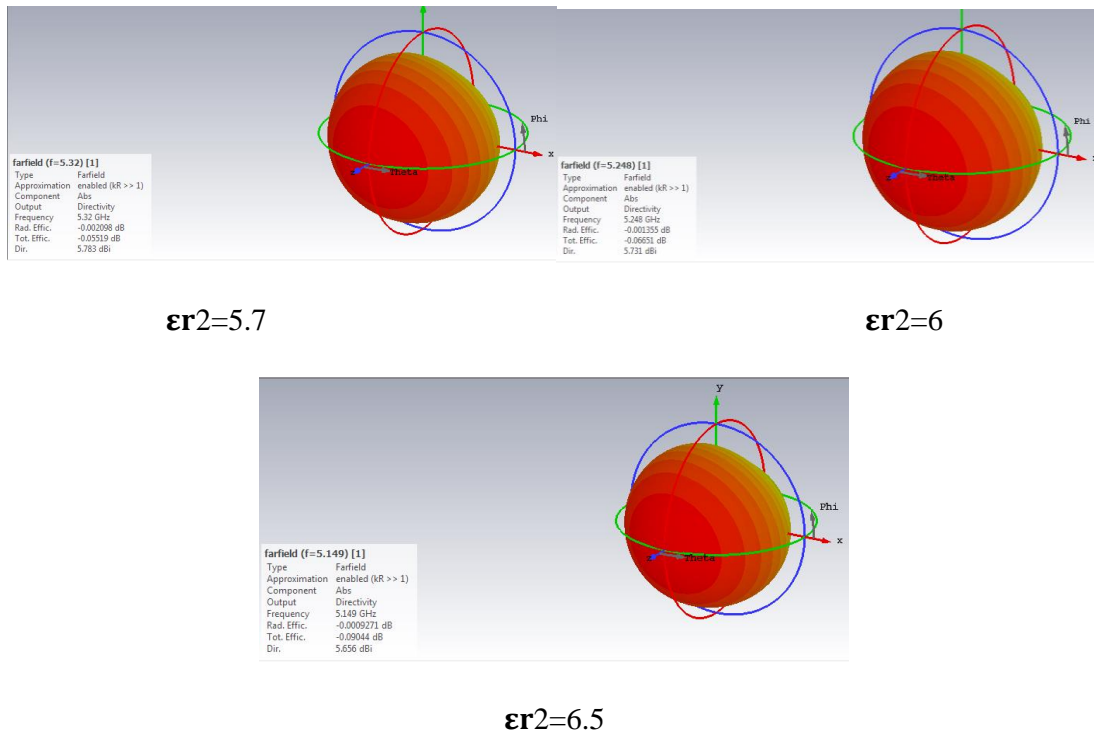


Figure 3.30 Directivité pour différentes permittivités du substrat  $\epsilon_r2$

c) Le gain

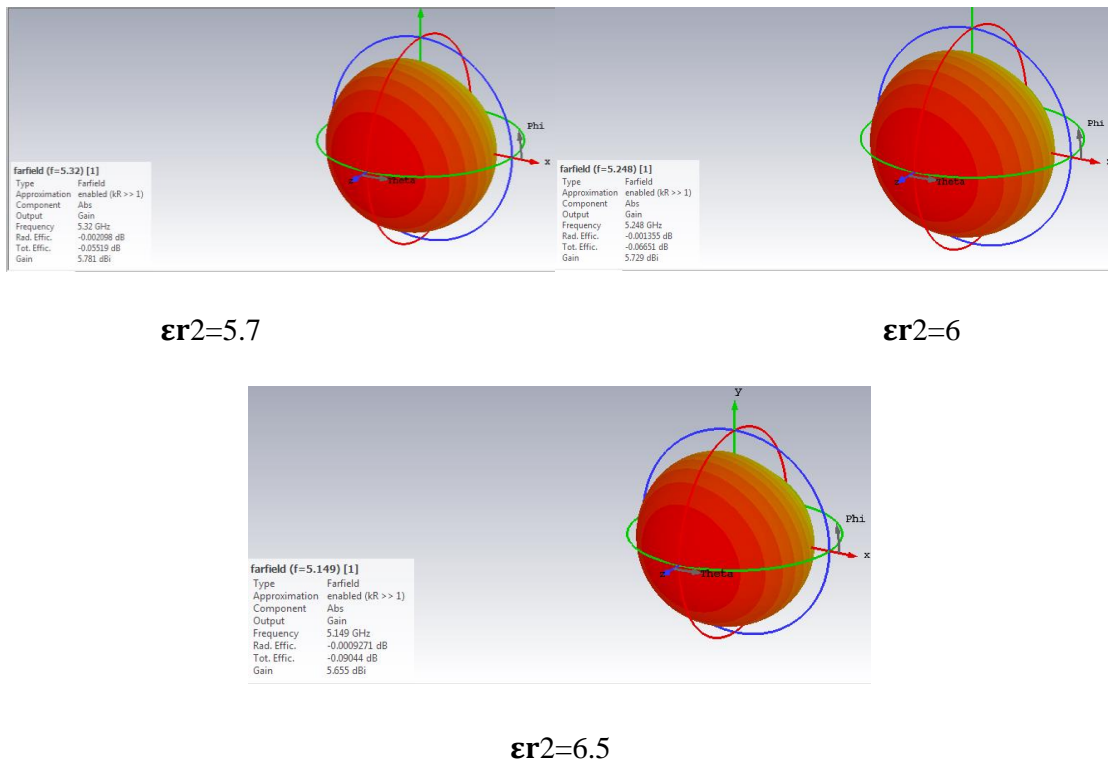


Figure 3.31 Gain pour différentes permittivité du substrat  $\epsilon_r2$

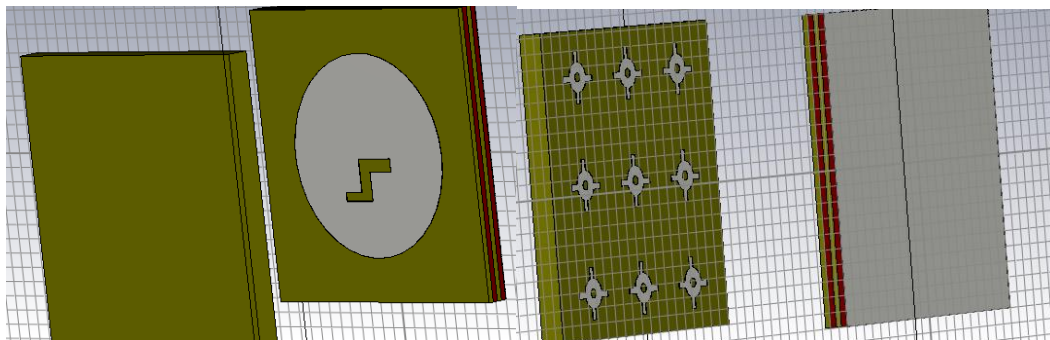
A partir du Tableau 3.6 et les figures (3.29-3.30-3.31) on remarque :

- ✚ L'augmentation de la permittivité diminue les caractéristiques d'une antenne imprimée à BIE (la fréquence de résonance et la bande passant et le coefficient de réflexion S11 ainsi que la directivité et le gain).

### **3.9. Comparaisons entre une antenne à BIE avec FSS et une antenne à BIE sans FSS**

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

On étudie la variation de la directivité et le gain la fréquence de deux antennes imprimée de forme circulaire: une à substrat à BIE, de rayon  $R=7\text{mm}$ , la permittivité du substrat qui est constitué de quatre couches : deux couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r1} = 3.37$ , et leurs épaisseur  $h1=0.4\text{mm}$  et les deux autres couches diélectriques de permittivité  $\epsilon_{r2}=4$ , d'épaisseur  $h2=0.4\text{mm}$ , et une antenne à substrat FSS dans ce cas on utilise le diélectrique de permittivité  $\epsilon_r = 4$  d'épaisseur  $h=1.6\text{mm}$ , et de longueur et largeur  $20\text{mm}$  et motifs de surface  $S=2.065\text{mm}^2$  La couche FSS est une couche au-dessus du patch d'antenne que nous avons décrite précédemment avec une distance de  $K=20\text{mm}$  au-dessus du patch, constituée d'un groupe de motifs



**Figure 3.32** Antenne imprimée à FSS.

A)- Coefficients de réflexion  $S_{11}$

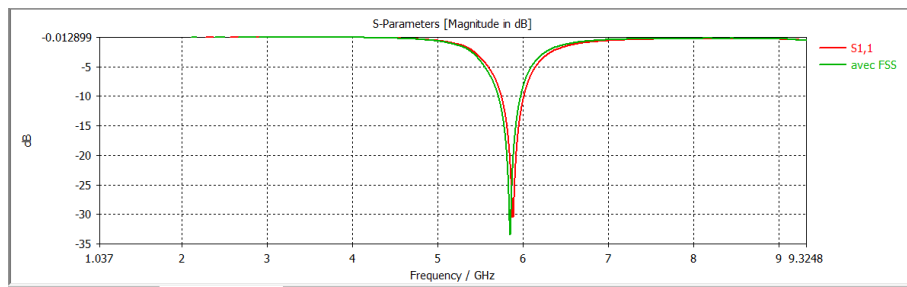


Figure 3-33: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour antenne avec FSS et sans FSS

	Antenne BIE sans FSS	Antenne BIE avec FSS
Fréquence	<b>5.887</b>	<b>5.851</b>
Bande passante	<b>0.264</b>	<b>0.262</b>
$S_{11}$	<b>-30.50</b>	<b>-33.36</b>
Directivité	<b>6.172</b>	<b>6.676</b>
Gain	<b>6.169</b>	<b>6.677</b>

Tableau 3.7. Caractéristiques d'antenne avec FSS et sans FSS

b) La Directivité

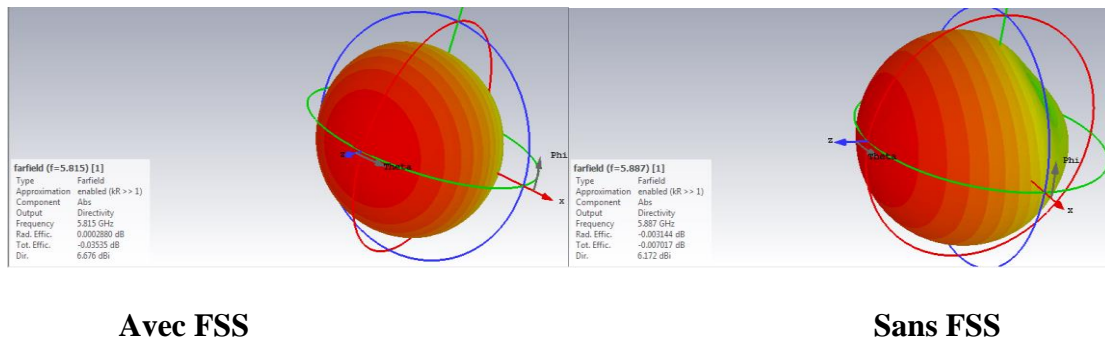


Figure 3.34 Directivités pour une antenne avec FSS et sans FSS

c) Le gain

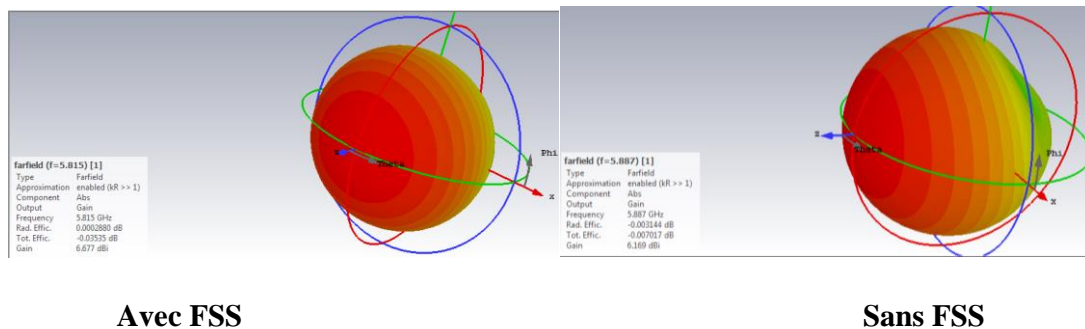


Figure 3.35 gain pour antenne avec FSS et sans FSS

A partir du Tableau 3.7 et les figures (3.33-3.34-3.35) on remarque :

- Les caractéristiques d'une antenne imprimée à FSS sont mieux que celle d'une antenne sans FSS (Coefficient de réflexion Directivités et le gain).

### 3.10. Antenne à BIE avec FSS

#### 3.10.1. La variation de la distance K

##### a)- Coefficients de réflexion $S_{11}$

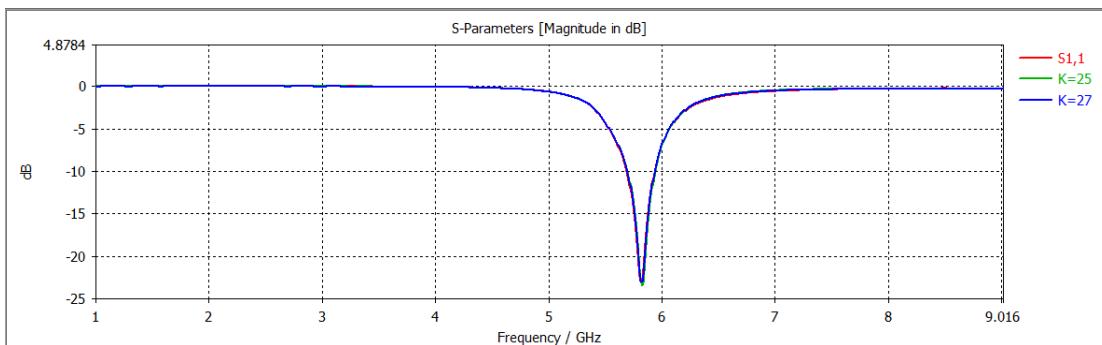
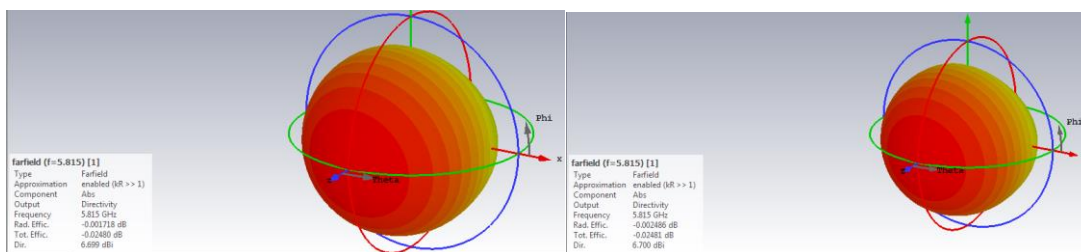


Figure.3-36: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour différentes valeurs de la distance K

	K=25mm	K=27mm	K=30mm
Fréquence	5.82	5.824	5.815
Bande passante	0.243	0.241	0.24
$S_{11}$	-23.45	-23.04	-22.903
Directivité	6.699	6.700	6.689
Gain	6.697	6.697	5.689

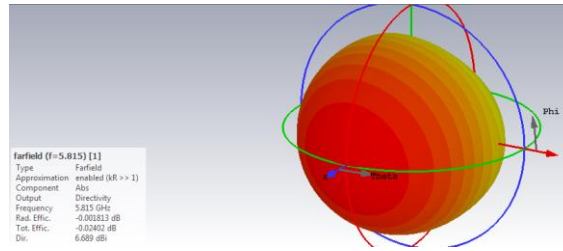
Tableau 3.8. Caractéristiques de l'antenne à BIE avec FSS en fonction de distance K

##### b) La Directivité



K=25mm

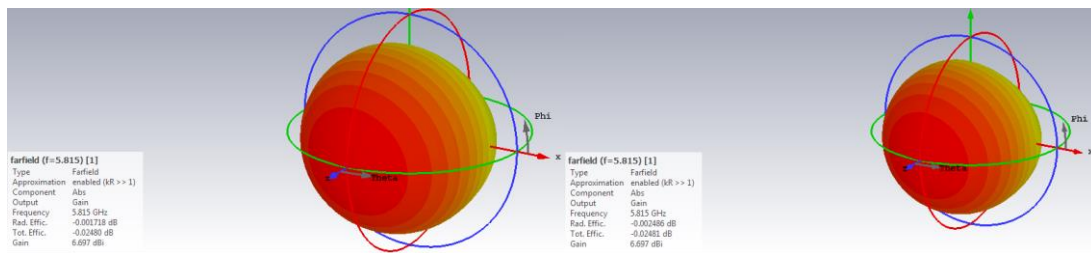
K=27mm



K=30mm

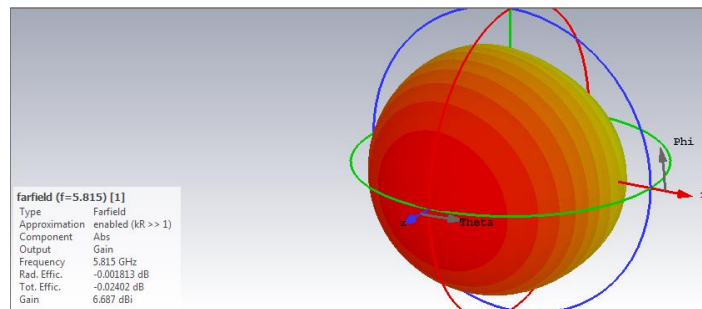
Figure 3.37 Directivités de l'antenne simple pour différentes valeurs de la distance  $K$

c) Le gain



K=25mm

K=27mm



K=30mm

Figure 3.38 Gain de l'antenne simple pour différentes valeurs de la distance  $K$

A partir du Tableau 3.8 et les figures (3.36-3.37-3.38) on remarque :

- ✚ La valeur  $K=27\text{mm}$  c'est le meilleur pour garde les caractéristiques d'une antenne idéal

### 3.11. Antenne à BIE avec FSS à défaut

#### 3.11.1. Couche FSS à un motif supprimé et FSS à motifs différents

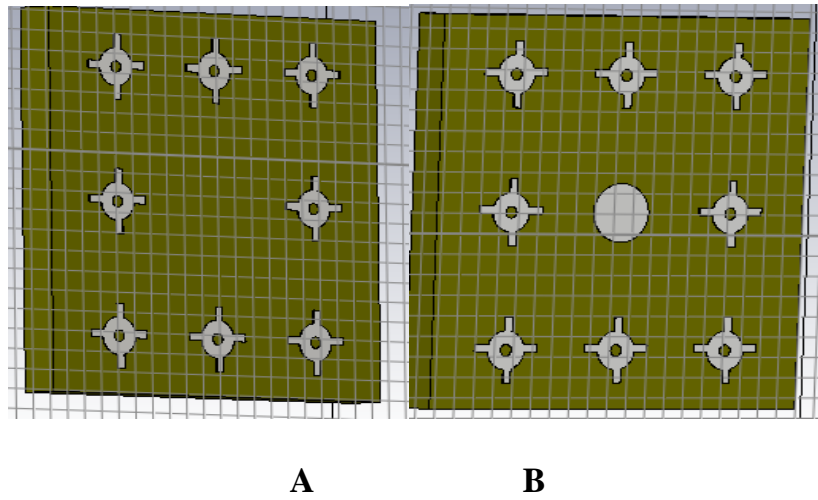


Figure 3.39 FSS à défaut à un motif supprimé(A) et motifs différents(B)

a)- Coefficients de réflexion  $S_{11}$

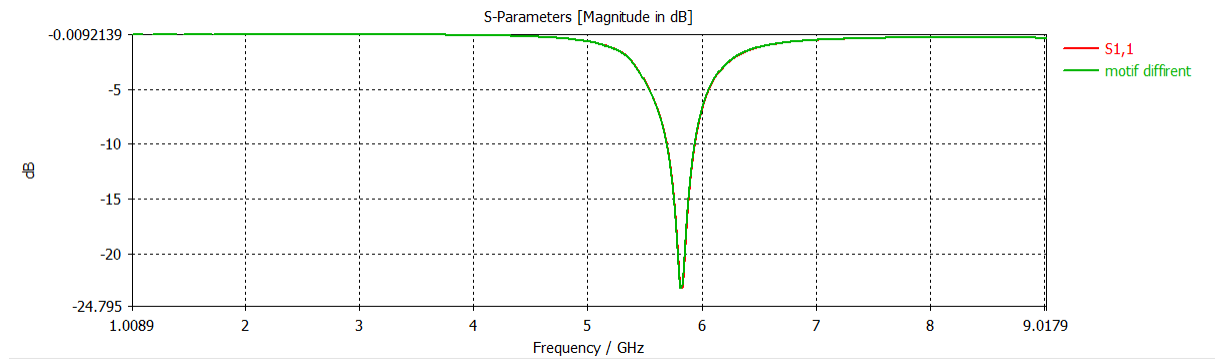
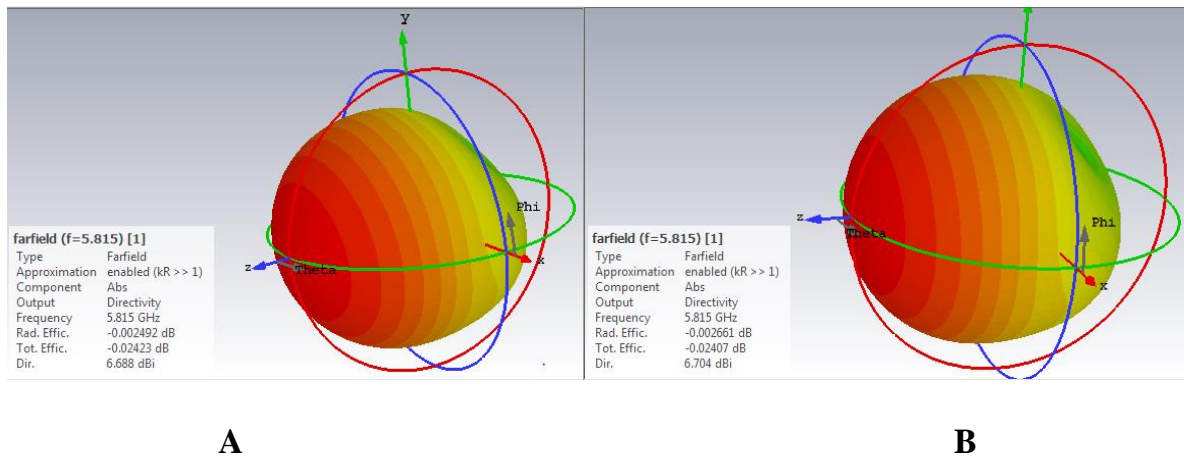


Figure.3-40: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  pour motif supprimé et motifs différents

	<i>motif supprimé</i>	<i>motifs différents</i>
Fréquence	5.824	5.815
Bande passante	0.242	0.242
$S_{11}$	-23.09	-23.10
Directivité	6.688	6.704
Gain	6.688	6.702

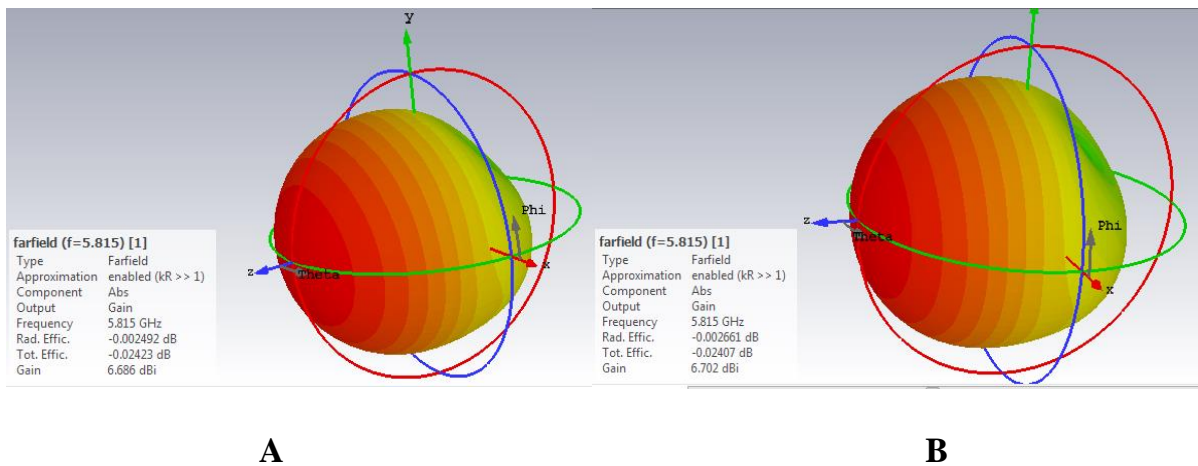
Tableau 3.9. Caractéristiques de FSS à défaut à un motif supprimé et motifs différents

**b) La Directivité**



**Figure 3.41** Directivités de l'antenne à FSS à défaut (un motif supprimé(A) et motifs différents(B))

**c) Le gain**



**Figure 3.42** Gain FSS à défaut à un motif supprimé(A) et motifs différents(B)

A partir du Tableau 3.9 et les figures (3.40-3.41-3.42) on remarque :

- ✚ Les caractéristiques d'une antenne imprimée à FSS motifs différents sont mieux que celle d'une antenne à FSS à un motif supprimé (Coefficient de réflexion Directivités et le gain).
- ✚ La meilleur directivité  $D=6.704$  et le meilleur gain  $G=6.702$  sont obtenus pour le cas d'une antenne imprimée à FSS motifs différents

### 3.11.2 Couche FSS à deux motifs supprimés

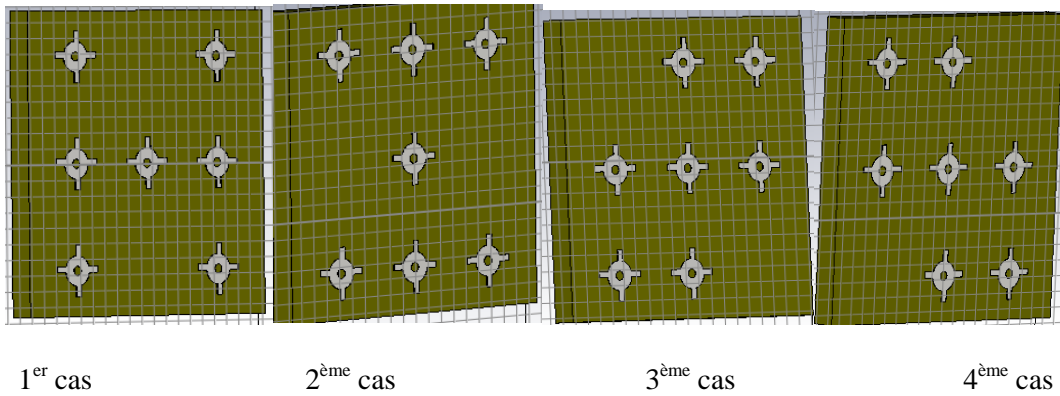


Figure 3.43 FSS à défaut à deux motifs supprimés.

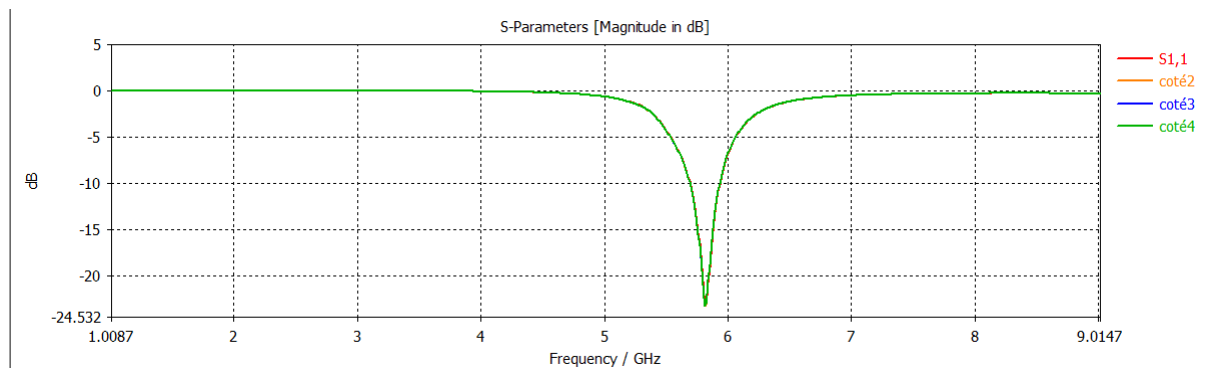


Figure.3-44: Coefficient de réflexion S11 pour motifs supprimés

	1 <sup>er</sup> cas	2 <sup>ème</sup> cas	3 <sup>ème</sup> cas	4 <sup>ème</sup> cas
Fréquence	<b>5.824</b>	<b>5.815</b>	<b>5.815</b>	<b>5.815</b>
Bande passante	<b>0.243</b>	<b>0.243</b>	<b>0.243</b>	<b>0.243</b>
S11	<b>-23.15</b>	<b>-23.34</b>	<b>-23.31</b>	<b>-23.28</b>
Directivité	<b>6.683</b>	<b>6.680</b>	<b>6.683</b>	<b>6.687</b>
Gain	<b>6.683</b>	<b>6.678</b>	<b>6.681</b>	<b>6.685</b>

Tableau 3.10. Caractéristiques de FSS à défaut motifs supprimés à deux coté

b) La Directivité

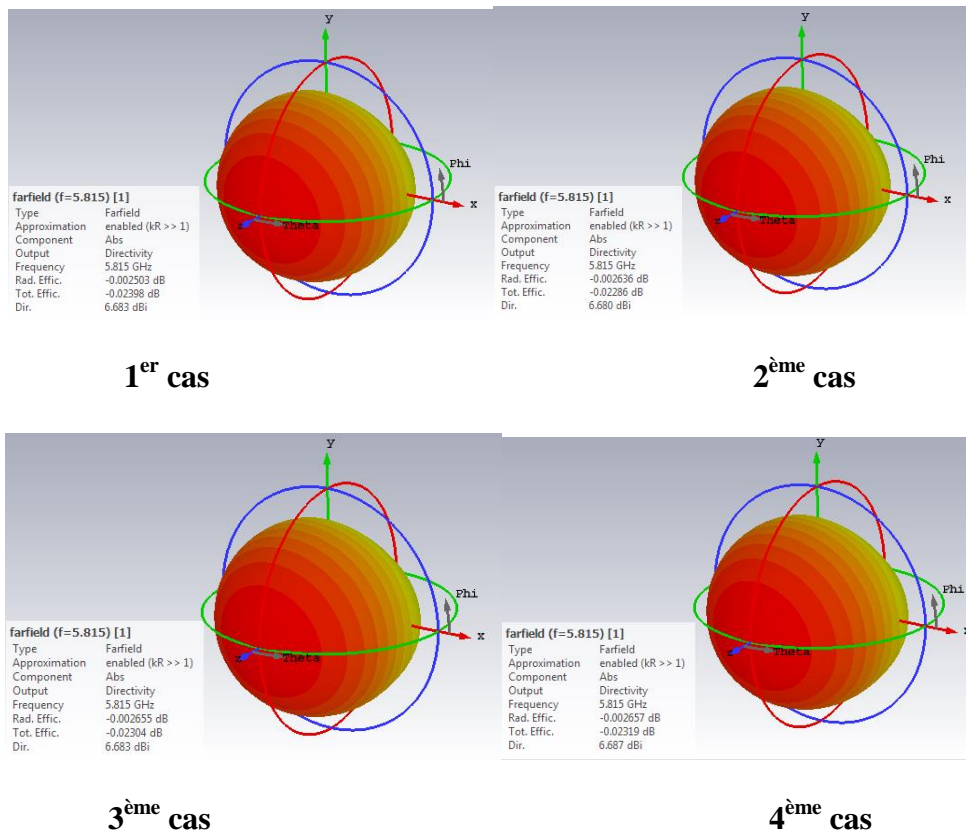
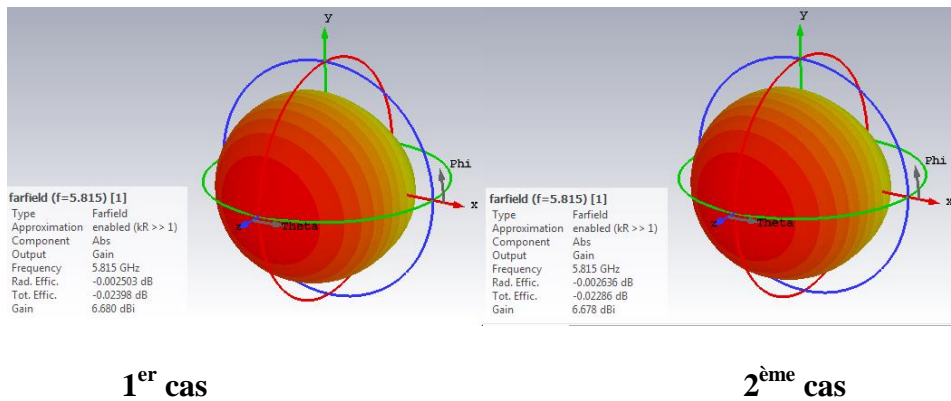


Figure 3.45 Directivités FSS à défaut motifs supprimés à deux coté

c) Le gain



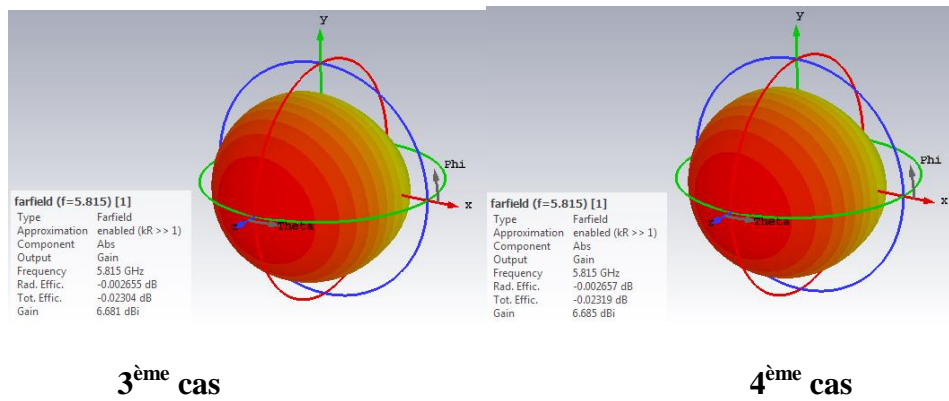


Figure 3.46 Gain FSS à défaut motifs supprimés à deux coté.

A partir du Tableau 3.9 et les figures (3.44-3.45-3.46) on remarque :

- ✚ Les caractéristiques d'une antenne imprimée à FSS à deux motifs supprimés (la fréquence, la bande passante, coefficient de réflexion directivités et le gain) c'est presque les même dans tous les cas
- ✚ La meilleur directivité  $D=6.687$  et le meilleur gain  $G=6.685$  sont obtenus pour le 4<sup>ème</sup> cas

### 3.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié des antennes imprimée à BIE et FSS fonctionnant dans la bande 5G à l'aide du logiciel CST Microwave Studio, et nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physique de l'antenne : le rayon du patch, la surface du slot du patch, l'épaisseur du substrat. A partir les résultats nous avons trouvé que  $R=7\text{mm}$ ,  $S=5.9\text{mm}^2$  et  $h_s=1.6\text{mm}$  c'est le meilleur pour l'antenne référence en suit nous avons ajouté le substrat à BIE séparée à 4couche et dans ce partie nous avons aussi étudié l'influence la permittivité du substrat, sur l'antenne et après nous avons faire la comparaison entre l'antenne référence et l'antenne à BIE Nous avons montré que la directivité et le gain d'une antenne à substrat à BIE est plus importante comparée à celle d'une antenne à substrat simple, et dans le dernier partie nous avons ajouté la couche FSS et trouvée que la distance entre le patch et le superstrat  $K=27\text{mm}$  c'est le meilleur pour garde les caractéristiques d'une antenne idéal et en suit nous étudié le défauts du matériau FSS sur les caractéristiques de l'antenne imprimée et conclus que lorsque nous supprimé un ou deux motif ne change rien sur l'antenne mais le changement du motif dans la couche FSS amélioré un peu les performances d'une antenne

## **Bibliographie**

- [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
- [3] Michael Grelier," Miniaturisation des antennes large bande à l'aide de matériaux artificiels", Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur, Ecole Doctorale d'Informatique, Télécommunications et électronique de Paris, le 28 janvier 2011.
- [4] BENDIABDALLAH Zakaria Amine BOUDJELAL Yassamina Ikram," Nouvelles Topologies Des Filtres Passe-Bandes A Base De La Technologie Siw Operant En Bandes Ku, C Et S Pour Des Applications Satellitaires", Pour l'obtention du diplôme de MASTER, Réseaux et Systèmes de Télécommunication, A L'UNIVERSITÉ DE TLEMCEM, 2015.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude intitulé « Etude d'une antenne micro ruban à BIE-FSS à défaut dans la bande 5G ». L'objectif principal de notre travail était d'étudier les antennes patches de forme circulaire à substrats BIE (1D) et à superstrat FSS opérant dans la bande 5G, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST (Computer Science Technology) basé sur la méthode d'intégration finie. Nous avons étudié l'influence des différents paramètres physiques et géométriques de l'antenne tel que (le rayon du patch, la surface du slot du patch, l'épaisseur du substrat, la permittivité du substrat, la distance entre le patch et le superstrat et les défauts du matériau FSS sur les caractéristiques de l'antenne imprimée : l'adaptation de l'antenne (S11), la fréquence de résonance, la bande passante, le gain et la directivité.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les antennes puis nous avons exposé la structure d'antenne imprimée, les différents types d'alimentation, où on a cité quelques caractéristiques telles que; (la fréquence, la bande passante, le gain et la directivité), ainsi leurs avantages et leurs inconvénients. On s'est intéressé par la suite aux bandes millimétriques : définition, et l'utilisation et domaines d'utilisation de l'antenne imprimée dans la bande 5G.

Quant au deuxième chapitre nous avons présenté des généralités sur les matériaux bande interdit électromagnétique (BIE), les surfaces en fréquence sélectives (FSS), les différents types et les applications de ces matériaux.

Le troisième chapitre est l'essentiel de notre travail. Nous avons présenté un bref aperçu du programme CST MICROWAVE STUDIO et présenté comment créer simuler, et analyser une antenne imprimée.

D'abord, nous commençons par la création de l'antenne patch simple opérant dans la bande 5G à caractéristiques idéales à partir de l'étude de l'influence des différents paramètres physiques et géométriques tel que : la variation du rayon (R) du patch , la surface du slot du patch (S) puis de la variation l'épaisseur du substrat (hs).

Ensuite, nous avons étudié l'antenne précédent avec un substrat BIE opérant dans la bande 5G à partir de la variation de la permittivité du substrat et nous l'avons comparée à l'antenne ayant un substrat normale (l'antenne simple).

## CONCLUSION GENERALE

Après nous avons ajouté une couche (superstrat) à FSS, cette couche FSS, placée au-dessus du patch à une distance de  $K$  composée de  $3 \times 3$  motifs, imprimées sur le superstrat nous l'avons comparé à l'antenne à substrat BIE, et nous avons étudié la variation de la distance  $K$ , et à la fin de notre études nous nous sommes concentrés aux défauts créés dans la couche FSS en changeant la forme d'un motif de FSS, supprimant un motif ou deux motif ; nous avons étudié l'effet de ces défauts sur les performances de l'antenne c'est-à-dire sur ses caractéristiques (la fréquence de résonance, la bande passante la directivité et le gain).

Ici nous mentionnons tous les résultats que nous avons obtenus :

- ✚ Les caractéristiques d'antennes patchs sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques.
- ✚  $R = 7mm$ ,  $hs = 1.6mm$ ,  $S = 5.9mm^2$  c'est les caractéristiques que nous avons choisi pour l'antenne patch simple de référence.
- ✚ La surface du slot du patch affecte toutes les caractéristiques de l'antenne, en particulier l'adaptation.
- ✚ Diminution de la directivité et du gain avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat, le rayon du patch et la surface du slot.
- ✚ La fréquence de résonance augmente avec la diminution de l'épaisseur du substrat le rayon du patch et la surface du slot.
- ✚ La fréquence de résonance est plus importante pour une antenne à substrat BIE par rapport à celle d'un substrat simple.
- ✚ La directivité est importante pour un substrat BIE par rapport à un substrat normal.
- ✚ Diminution de la directivité et du gain avec l'augmentation de la permittivité du substrat à BIE
- ✚ les caractéristiques ( $S_{11}$ , gain et directivité) de l'antenne à substrat à BIE-FSS sont meilleurs que celles d'une antenne à substrat BIE
- ✚ La variation de la distance  $K$  entre le patch et la couche FSS influent sur la bande passante, la directivité, le gain et la fréquence de résonance ;
- ✚ Les caractéristiques d'une antenne imprimée à FSS motifs différents sont mieux que celle d'une antenne à FSS à un motif supprimé (Coefficient de réflexion Directivités et gain).
- ✚ Les meilleurs caractéristiques sont pour le cas d'antenne à BIE avec FSS où la directivité est et le gain

## CONCLUSION GENERALE

- ✚ La meilleur directivité  $D=6.676$  et le meilleur gain  $G=6.677$  sont obtenus pour le cas d'une antenne imprimée à BIE avec FSS
- ✚ Les meilleurs caractéristiques sont pour le cas d'antenne à BIE avec FSS à motifs différents où la directivité est et le gain
- ✚ La meilleur directivité  $D=6.704$  et le meilleur gain  $G=6.702$  sont obtenus pour le cas d'une antenne imprimée à FSS motifs différents.