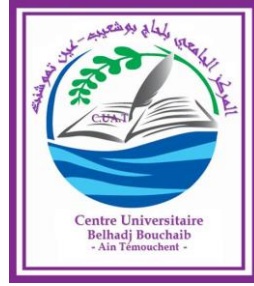


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Filière : Télécommunications  
Spécialité : Réseaux de Télécommunications  
Thème

**Modélisation et simulation d'une nouvelle structure  
d'antenne patch pentagone pour des applications ISM**

Soutenu : le 02/ juillet/2020

Présenté Par :

Kehloul Nadia

Bouchikhi Rahmouna

Devant les jurys composés de :

Mr Bendimerad Karim

MAA CUBBAT

Président

Mme Moulessehoul Wassila

MCB CUBBAT

Examinatrice

Mme Ferouani Souheyla

MCA CUBBAT

Encadrante

*Année universitaire 2019/2020*

## REMERCIEMENTS

*Mes louanges et remerciements à « Allah » avant tout, pour ses bienfaits indénombrables, en outre, de m'avoir aidé dans l'accomplissement de ce projet.*

*Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'étude mené au niveau du département de Génie Electrique du Centre Universitaire BLHADJ Bouchaib d'Ain Témouchent.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrante Docteur « FEROUANI Souheyla », Maitre de conférences classe A au Centre Universitaire d'Ain Témouchent de nous avoir encadré le long de ce travail tout en apportant les meilleures idées, son orientation, son suivi, ses conseils et ses remarques durant toute la période de la préparation de ce mémoire ; nous lui présentons toutes nos reconnaissances et notre gratitude.*

*Nous remercions tout particulièrement les membres de jury, Dr Moulessehouli Maitre de conférences classe B au Centre Universitaire d'Ain Témouchent et Mr Bendimerad Karim, Maitre-Assistant classe A au Centre Universitaire d'Ain Témouchent.*

*Nous tenons à remercier sincèrement tous les profs de promotion de master2 RT 2019-2020.*

*Nous remercions également toutes les personnes qu'ils nous ont apportés leurs aides et leurs soutiens que ce soit de prêt ou de loin.*



## Dédicace

Je dédie ce modeste travail  
A mon Père **SAID** « paix a  
son âme »

A ma chère Mère

**KHEIRA**

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont  
permis de vivre ce jour.

A mes frères

A mes sœurs

A toute la famille

A tous les gens m'aiment

A tous les étudiant (e)s de ma promotion.

**NADIA. NIHED**



## Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,  
L'amour, le respect la reconnaissance, c'est tout simplement

que : Je dédie ce travail A ma chère Mère **Zahra**

Tu représentes pour moi la source de tendresse et  
l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu  
as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivant  
le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon cher Père **Driss**

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as sa consentis pour  
mon éducation et ma formation le long de ces années

A mes sœurs

Rania, Farah

A tous les gens qui m'aiment

A toute la famille

A tous les étudiants (e)s de ma promotion.



**Rahmouna**

## Résumé

Notre projet de fin d'étude est consacré à la modélisation et simulation d'une antenne patch pentagone dans la bande de fréquence ISM [2.4-2.4835] GHz. Cette antenne est alimentée par une sonde coaxiale d'impédance adaptée à  $50\Omega$  et, avec des caractéristiques de rayonnement optimal, un faible encombrement et un cout limité. Les résultats de simulations ont été validés par une méthode numérique d'analyse à l'aide du logiciel CST.

**Mots clés :** Antennes imprimées, Technologie ISM, Fentes, Antenne omnidirectionnelle, parametre de reflexion S11, diagramme de rayonnement.

## Abstract

Our end-of-study project is devoted to both modeling and simulation of a pentagon patch antenna in the ISM frequency band [2.4-2.4835] GHz. A coaxial impedance probe adapted to  $50\Omega$  and, with optimal radiation characteristics, a low congestion and limited cost powers this antenna. The simulation results have been validated by a numerical analysis method using CST software.

**Keywords:** Printed antennas, ISM Technology, Slots, Omnidirectional antenna, S11 reflection parameter, radiation pattern.

## ملخص

مشروع نهاية الدراسة مخصص اعداد نموذج ومحاكاة هوائي رقعة خماسية في نطاق تردد [ISM 2.4-2.4835] غيغاهرتز. يعمل هذا الهوائي بواسطة مسبار معاوقة محورية يتكيف مع 50 ohms، وبخصائص إشعاعية مثالية واحتقان منخفض وتكلفة محدودة. تم التحقق من نتائج المحاكاة بطريقة التحليل العددي باستخدام برنامج CST.

**الكلمات المفتاحية:** هوائيات مطبوعة، تكنولوجيا ISM، فتحات، هوائي متعدد الاتجاهات، معلمة انعكاس S11، نمط إشعاع.

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Tables des Figures

Listes des Tableaux

Listes des acronymes et abréviations

*Chapitre I : Généralités sur les Antennes Imprimées*

Introduction Générale .....	1
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition d'une antenne imprimée .....	3
I.3. Description des antennes imprimées.....	3
<i>I.3.1 Formes du patch .....</i>	<i>4</i>
<i>I.3.2 Les Caractéristiques des antennes imprimées .....</i>	<i>5</i>
a) Coefficient de Réflexion (S11) .....	5
b) Directivité .....	5
c) Rendement de l'antenne .....	6
d) Gain d'une antenne .....	6
e) L'ouverture d'une antenne .....	6
f) Impédance d'entrée .....	7
g) Diagramme de rayonnement.....	8
h) La Bande passante .....	9
I.4. Techniques d'alimentations des antennes imprimées.....	10
<i>I.4.1 Alimentation par ligne micro ruban .....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2 Alimentation par sonde coaxial .....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.3 Alimentation par couplage électromagnétique.....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.5 Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse.....</i>	<i>12</i>
I.5. Techniques d'adaptation des antennes imprimées .....	12
<i>I.5.1 L'adaptation par quart d'onde .....</i>	<i>12</i>
<i>I.5.2 L'adaptation par STUB .....</i>	<i>12</i>
<i>I.5.3 L'adaptation avec encoches .....</i>	<i>13</i>
I.6. Modélisation de l'Antenne patch pentagone proposée .....	14
I.7. Applications des antennes imprimées dans la bande ISM .....	15
<i>I.7.1 Bluetooth .....</i>	<i>15</i>
<i>I.7.2 ZIGBEE.....</i>	<i>17</i>
<i>I.7.3 WIFI .....</i>	<i>18</i>

## TABLES DES MATIERES

<b>I.8.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>19</b>
	<i>Chapitre II : Simulations et résultats</i>	
<b>II.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2</b>	<b>Choix de l’outil de simulation .....</b>	<b>21</b>
<b>II.3</b>	<b>Antenne patch pentagone alimenté avec une sonde coaxiale - Géométrie de base .....</b>	<b>21</b>
<b>II.4</b>	<b>Résultats de simulations .....</b>	<b>22</b>
	<i>II.4.1 Coefficient de réflexion <math>S [1,1]</math>.....</i>	<i>22</i>
	<i>II.4.2 Adaptation de l’antenne avec insertion d’encoches sur le patch .....</i>	<i>23</i>
	<i>II.4.3 Elargissement de la bande passante de l’antenne patch pentagone proposée .....</i>	<i>24</i>
	<i>a) Coefficient de réflexion <math>S [1,1]</math> .....</i>	<i>25</i>
	<i>b) Diagramme de rayonnement.....</i>	<i>26</i>
	<i>c) Distribution du courant dans l’antenne patch pentagone .....</i>	<i>27</i>
<b>II.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>27</b>
	<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>28</b>
	<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>29</b>



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I :

Figure I-1 : Schéma de principe d'une antenne à éléments rayonnants imprimés .....	3
Figure I-2 : Schéma de principe d'une antenne à éléments rayonnants imprimés .....	4
Figure I-3 : Formes d'une antenne patch .....	4
Figure I-4 : Ouverture d'une antenne .....	7
Figure I-5 : Antenne en mode d'émission. ....	7
Figure I-6 : diagramme de rayonnement isotope .....	8
Figure I-7 : diagramme de rayonnement omnidirectionnel .....	8
Figure I-8 : diagramme de rayonnement d'une antenne directive .....	9
Figure I-9 : Bande passante à partir de TOS (ou $S_{11}$ ) .....	9
Figure I-10 : Alimentation par ligne micro ruban .....	10
Figure I-11 : Alimentation par sonde coaxiale.....	11
Figure -12 : Alimentation par couplage électromagnétique .....	11
Figure I-13 : alimentation à travers une fente .....	12
Figure I-14 : adaptation par quart d'onde .....	12
Figure I-15 : Adaptation par STUB.....	13
Figure I-16 : adaptation avec encoches .....	13
Figure I-17 : Antenne patch pentagone proposée.....	15
Figure I-18 : Fonctionnement de standard WPAN IEEE 802.15 Bluetooth.....	16
Figure I-19 Fonctionnement du standard WLAN IEEE 802.11 Wifi .....	18

### Chapitre II :

Figure II-1 : Antenne patch pentagone simple .....	22
Figure II-2 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	22
Figure II-3 : Antenne pentagone proposée adaptée à 2.4 GHz .....	23
Figure II-4: Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne initiale proposée. ....	23
Figure II-5 : Antenne pentagone proposée adaptée à la bande ISM .....	24
Figure II-6 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne patch. ....	26
Figure II-7: Diagramme de rayonnement de l'antenne patch .....	27
Figure II-8: Distribution de courant dans l'antenne patch pentagone proposée .....	27



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I-1</b> Paramètre de l'antenne patch pentagone .....	14
<b>Tableau I-2</b> : Classe des appareils certifiés Bluetooth .....	16
<b>Tableau I-3</b> : caractéristiques des versions successives du Bluetooth .....	17
<b>Tableau I-4</b> : caractéristiques du standard wifi 802.11 .....	18
<b>Tableau II-1</b> : Dimensions de l'antenne patch pentagone. ....	22
<b>Tableau II-2</b> : Dimensions de l'antenne patch pentagone proposée.....	24

## LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

<b>BW :</b>	Bande passante
<b>CST :</b>	Computer Simulation Technology
<b>dB:</b>	Décibel
<b>dB<sub>i</sub>:</b>	Décibel isotropic
<b>IEEE:</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ISM:</b>	Industrial, Scientific and Medical
<b>LOS:</b>	Line Of Sight
<b>MICS :</b>	Medical Implant Communication Services
<b>NLOS:</b>	No line Of Sight
<b>NB:</b>	Narrow Band
<b>RF:</b>	Radio Frequency
<b>ROS :</b>	Rapport d'Onde Stationnaire
<b>VSWR :</b>	Voltage Standing Wave Ratio
<b>WI-FI:</b>	Wireless Fidelity
<b>EM:</b>	Electromagnétiques
<b>QoS:</b>	Quality of Service
<b>TOS :</b>	Taux d'ondes stationnaires
<b>S11 :</b>	Coefficient de réflexion
<b>WPAN:</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WLAN:</b>	Wireless Local Area Network
<b>EDR:</b>	Enhanced Data Rate
<b>HS:</b>	High Spe
<b>LE :</b>	Low Energy
<b>FIT</b>	Finite Integration Technique

## Introduction Générale

Avec l'évolution du domaine des télécommunications, les communications filaires sont remplacées par des réseaux sans fil, pour plus de mobilité et pour des applications à haut débit. En plus l'enjeu est devenu de proposer des structures d'antennes micro-ruban permettant de remplacer l'ancienne génération des antennes ayant des grandes dimensions par une nouvelle génération a taille assez minimale permettant de les embarquer dans des espaces plus restreintes, tout en conservant leurs caractéristiques électromagnétiques [1-7]. Dans le domaine de communication radio, il existe plusieurs techniques pour la réalisation et la fabrication des antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée.

Le travail présenté dans ce manuscrit a pour objectif la conception d'une antenne patch pentagone pour des applications ISM. Notre travail de mémoire est organisé en deux chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des antennes imprimées, les différentes caractéristiques et les différents mécanismes d'alimentation, puis nous avons parlé sur la technologie ISM et les domaines d'applications.
- Dans le deuxième chapitre nous présenterons la conception logicielle et les résultats de simulations de l'antenne imprimée étudiée à savoir le paramètre S11, le diagramme de rayonnement, le gain, l'ouverture du lobe, etc...

## ***CHAPITRE 1***

***Généralités sur les antennes imprimées***

***Modèle à l'étude : antenne patch pentagone***

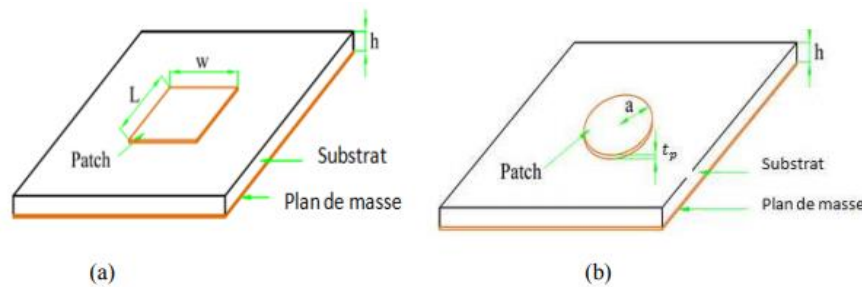
### I.1. Introduction

Le développement des télécommunications de jours en jours fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique [1].

Dans ce chapitre nous allons décrire les antennes imprimées, leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentation et adaptation, puis nous allons donner une idée générale sur notre travail de simulation, Enfin nous allons parler sur la technologie ISM dans laquelle s'intègre notre antenne patch proposée.

### I.2. Définition d'une antenne imprimée

Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée antenne patch est une ligne micro ruban de forme particulière. Elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques [2-3]. **Figure I-1**



**Figure I-1** : Schéma de principe d'une antenne à éléments rayonnants imprimés [2-3]

### I.3. Description des antennes imprimées

Une antenne à éléments rayonnants imprimés est constituée d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique, dont la surface porte un ou plusieurs éléments métallisés, appelés en anglais « patch » (« pavé » ou « motif » en français) [4]. **Figure I-2**

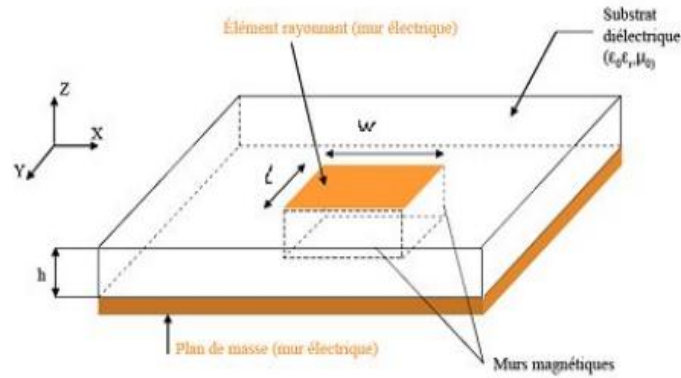


Figure I-2 : Schéma de principe d'une antenne à éléments rayonnants imprimés [4]

Ces éléments rayonnants sont de différentes formes et leur alimentation peut être effectuée par divers procédés permettant d'obtenir un diagramme en polarisation linéaire ou circulaire. Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont [5-6] :

- La permittivité relative de diélectrique ( $\epsilon_r$ ).
- La tangente des pertes ( $\tan\delta$ ) dans ce même substrat, avec dominance des pertes par effet joule.
- L'épaisseur du diélectrique (elle doit rester faible).

### I.3.1 Formes du patch (Figure I-3)

Les différentes formes du patch présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant, car présentant une faible composante croisée. Les dipôles micro rubans ont la particularité de présenter une large bande passante et d'occuper très peu d'espace, ce qui les rend particulièrement adaptés à la réalisation de réseaux d'antennes [7].

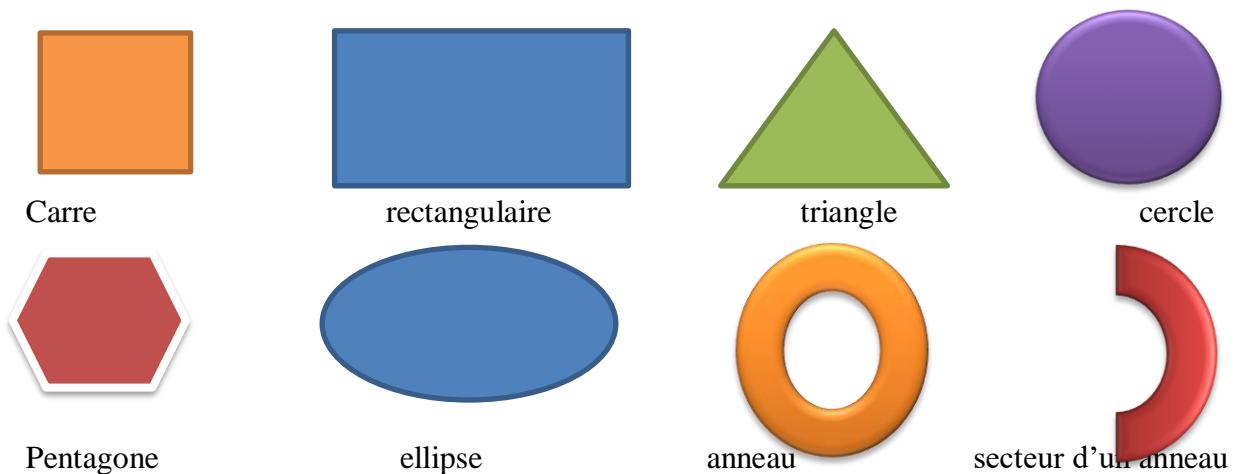


Figure I-3 : Formes d'une antenne patch

**I.3.2 Les Caractéristiques des antennes imprimées**

**a) Coefficient de Réflexion (S11)**

En général, lorsqu'une onde incidente se déplace d'un milieu de propagation à un autre, où rencontre une nouvelle interface, elle est divisée en deux parties, l'une est réfléchiée et l'autre transmise dans le second milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchiée et l'onde incidente. Il est identique à celui du S11 lorsque l'antenne est connectée au port 1 d'analyseur de réseau. Pour une impédance d'antenne ZA, reliée à la source par une ligne d'impédance Zc (Zc : impédance caractéristique souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être exprimé comme suit [8-9] :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_c}{Z_A + Z_c} \quad (I.1)$$

- ❖ Si le coefficient de réflexion est plus faible, l'antenne est plus adaptée. Ainsi, avec un coefficient de réflexion à -10dB, 90% de puissance est transmise à l'antenne (faible perte). Il est exprimé souvent en décibel (dB) et noté par |S11| et défini comme suit :

$$S_{11 \text{ dB}} = 20 \log \Gamma = 20 \log S_{11} \quad (I.2)$$

- ❖ Le rapport d'ondes stationnaires en tension (ROS) est le rapport entre la tension maximale et la valeur minimale de l'onde stationnaire existant aux bornes d'entrée de l'antenne :

$$ROS = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)} \quad (I.3)$$

**b) Directivité**

La directivité de l'antenne est sa capacité à concentrer l'énergie dans une direction. La norme IEEE 145-1983 définit la directivité comme suit : « La directivité d'une antenne dans une direction donnée est le rapport entre l'intensité de rayonnement d'antenne dans une direction donnée U et l'intensité de rayonnement moyenne calculée dans toutes les directions  $U_{moy}$  » [8-9].

$$D = \frac{U}{U_{moy}} \quad (I.4)$$

Lorsque la direction n'est pas spécifiée, on applique la direction de l'intensité maximale du rayonnement comme suit [8-9] :

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_{moy}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{ray}} \quad (I.5)$$

Avec  $P_{ray}$  est la puissance rayonnée de l'antenne.



**c) Rendement de l'antenne**

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée  $P_r$  et la puissance fournie à l'antenne  $P_f$ , soit [8-9]:

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad \text{(I.6)}$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne.

**d) Gain d'une antenne**

Le gain d'une antenne est défini comme le rapport entre la densité de puissance d'antenne dans une direction donnée ( $P_r$ ) à la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope ( $P_{ri}$ ) (sans perte).

$$G(\theta, \Phi) = P_r(\theta, \Phi) / P_{ri} \quad \text{(I.7)}$$

La densité de puissance rayonnée de l'antenne isotrope sans perte est égale à la puissance de l'antenne divisée par un angle solide de  $4\pi$  stéroïdiens [8-9], il est donné par l'équation suivante :

$$G(\theta, \Phi) = 4\pi P_r(\theta, \Phi) / P_e \quad \text{(I.8)}$$

**Avec :**

G : Le gain de l'antenne.

$P_r$  : La densité de puissance rayonnée.

$P_e$  : Puissance d'entrée.

$\theta$  : Angle d'azimut.

$\Phi$  : Angle d'élévation.

**e) L'ouverture d'une antenne**

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable [9-10]. **Figure I-4**

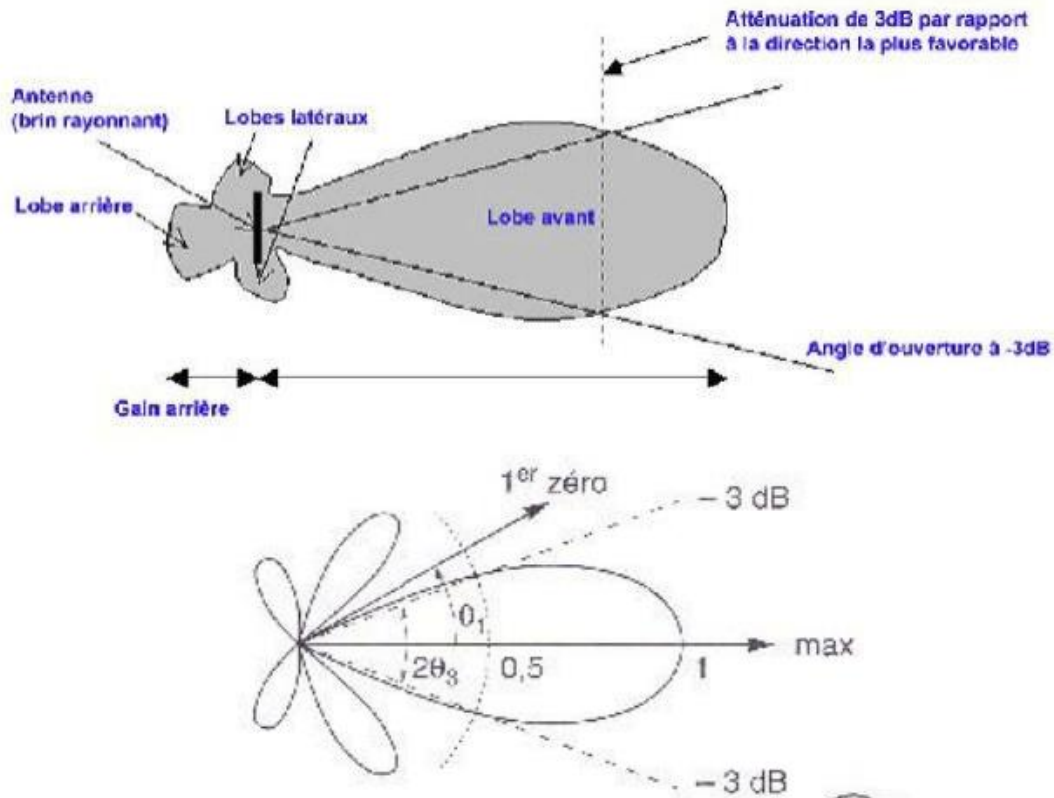


Figure I-4 : Ouverture d'une antenne [9-10]

f) Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ou le rapport de la tension au courant à la paire de bornes ou le rapport des composants appropriés des champs électriques aux champs magnétiques à un point [10]. On peut obtenir l'impédance d'entrée d'une paire de bornes qui sont les bornes d'entrée de l'antenne (entre les points a et b), comme le montre la figure suivante : **Figure I-5**

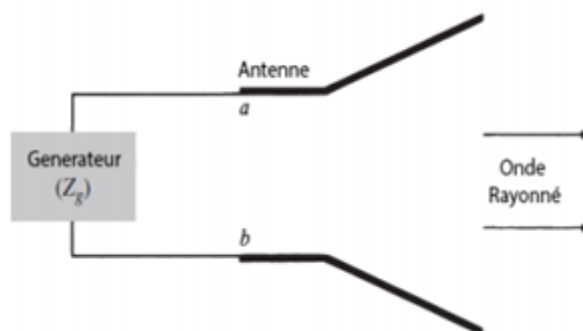


Figure I-5 : Antenne en mode d'émission [10].

**g) Diagramme de rayonnement**

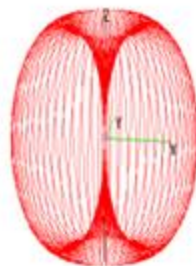
Le diagramme de rayonnement représente la puissance rayonnée par l'antenne dans toutes les directions de l'espace autour d'elle en champ lointain. Ce paramètre n'est pas maîtrisable par le concepteur. Il dépend de la structure globale de l'antenne. Le diagramme de rayonnement permet de localiser les zones de l'espace entourant l'antenne et les directions où le rayonnement est intense ou faible. Même si chaque diagramme de rayonnement est différent en fonction des antennes, il est possible de différencier trois formes typiques de diagramme de rayonnement (Isotrope, omnidirectionnel et directif) [10-11] :

- Une antenne isotrope est une antenne qui rayonne son énergie uniformément dans toutes les directions de l'espace (figure I-6). Même si différents travaux tentent de s'approcher de cette propriété, cette antenne reste purement théorique et sert de référence pour établir la directivité ou le gain d'une antenne réelle.



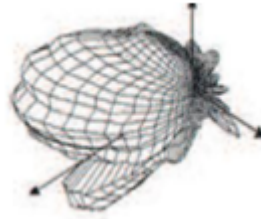
**Figure I-6** : diagramme de rayonnement isotrope [10-11].

- Une antenne omnidirectionnelle se caractérise par la faculté à rayonner de manière générale dans toutes les directions contenues dans un plan (figure I-7) [10-11].



**Figure I-7** : diagramme de rayonnement omnidirectionnel [10-11].

- A l'inverse, une antenne directive est une antenne qui va concentrer l'énergie qu'elle rayonne dans une direction de l'espace [10-11]. **Figure I-8**



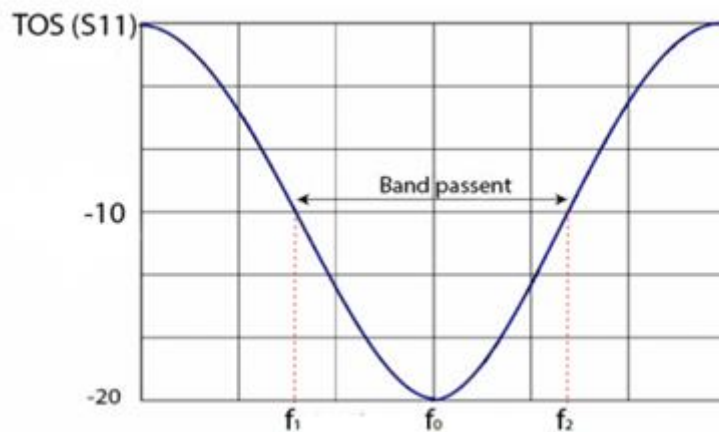
**Figure I-8** : diagramme de rayonnement d'une antenne directive [10-11].

**h) La Bande passante (Figure I-9)**

La bande passante considérée comme la gamme de fréquences, des deux côtés de la fréquence centrale, aussi il peut définir d'autres caractéristiques exigées pour le fonctionnement d'une antenne (telles que l'impédance d'entrée, le diagramme, l'ouverture du faisceau, la polarisation, le niveau des lobes latéraux, le gain, la direction du faisceau, l'efficacité du rayonnement,). La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale  $f_1$  et une valeur maximale  $f_2$  [10-11]. La largeur de bande  $\Delta f$  il donnée par :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (\text{I. 9})$$

La largeur relative de bande est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale  $f_0$ .



**Figure I-9** : Bande passante à partir de TOS (ou s11) [10-11]

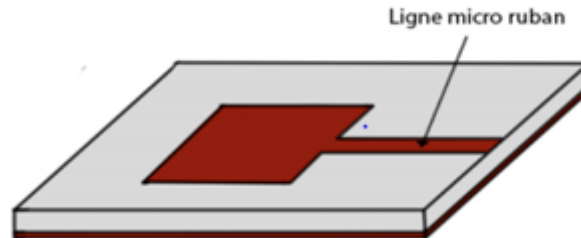
**I.4. Techniques d'alimentations des antennes imprimées**

La technique d'alimentation représente un élément important sur la conception d'antenne microbande, il peut être transféré l'énergie en hyperfréquence du système de transmission vers l'antenne. L'adaptation d'impédance d'entrée, la polarisation, les modes de fonctionnement, le parasite de rayonnement, les ondes de surface et la géométrie de l'antenne sont affectés par ces techniques d'alimentation [12-13]. Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories :

- Alimentation par contact (par sonde ou ligne micro-ruban).
- Alimentation sans contact (couplage électromagnétique par ligne ou par fente).

**I.4.1 Alimentation par ligne micro ruban**

Un patch micro ruban excité par une ligne microbande (figure I-10), cette ligne est définie comme une bande conductrice de largeur plus petite que celle du patch [12-13]. La ligne microbande est connectée directement au bord du patch pour transférer la puissance maximale, il faut que l'impédance de bord soit adaptée à l'impédance de la ligne d'alimentation.



**Figure I-10** : Alimentation par ligne micro ruban [12-13]

Cette technique d'alimentation présente l'avantage d'avoir la ligne graver la ligne sur le même substrat avec le patch, et d'être aussi facile à fabriquer et facile à modéliser. Les deux types d'alimentation (sonde coaxial et ligne micro ruban) ont le même circuit équivalent. Ce circuit est formé par un réseau RLC parallèle qui représente la pièce métallique (patch) rayonnante et un inducteur série représentant l'inductance de la sonde coaxiale d'alimentation ou de la ligne d'alimentation micro-ruban [12-13].

**I.4.2 Alimentation par sonde coaxial**

Le conducteur du câble coaxial connecté à l'extérieur du plan de masse jusqu'au patch (figure I-11). Ce type d'alimentation présente des avantages tels que la facilité de fabrication,

faible parasite de rayonnement et l'adaptation. Mais il offre une bande passante étroite et il est difficile à modéliser particulièrement pour des épaisseurs du substrat supérieures à  $0.02 \cdot \lambda_0$ . Cette alimentation occupée moins d'espace par rapport à l'alimentation par ligne microruban [12-13].

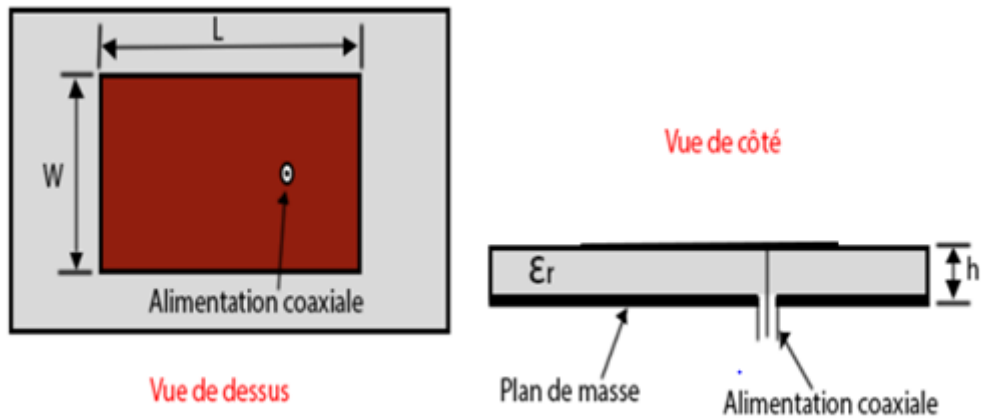


Figure I-11 : Alimentation par sonde coaxiale [12-13]

#### I.4.3 Alimentation par couplage électromagnétique

On appelle en anglais (Proximity coupled feed). Cette technique d'alimentation faite par couplage électromagnétique d'une ligne microbande à un élément rayonnant (figure I-12). Il fournit deux substrats diélectriques, un pour l'élément rayonnant et l'autre pour la ligne d'alimentation [12-13].

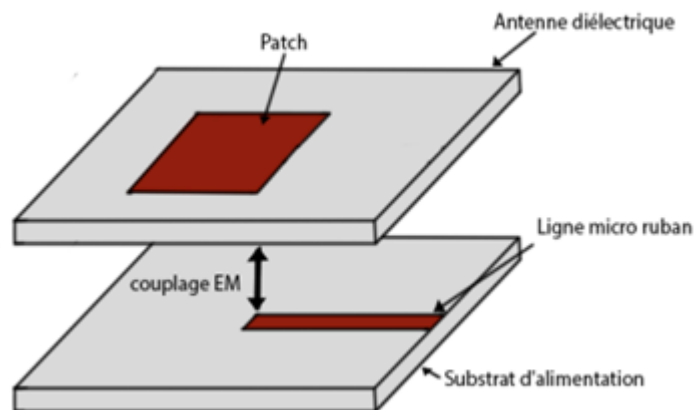
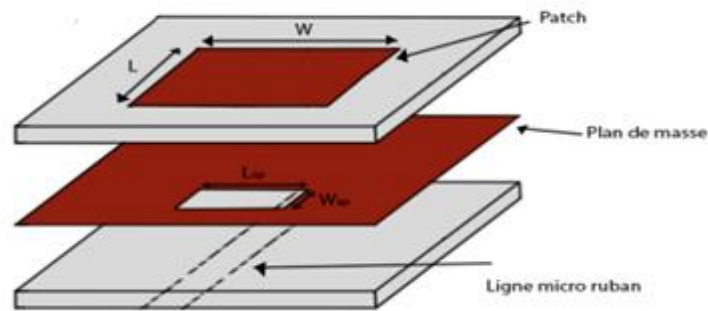


Figure I-12 : Alimentation par couplage électromagnétique [12-13].

***1.4.5 Alimentation au travers d'une ouverture au plan de masse***

Ce type d'alimentation (Figure I-13) est constitué par deux substrats séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure du substrat, se trouve une ligne d'alimentation micro-ruban dont l'énergie est couplée au patch par l'intermédiaire d'une fente située sur le plan de masse [12-13].



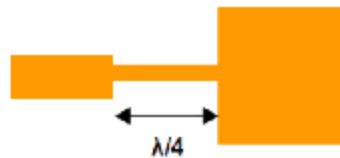
**Figure I-13** : alimentation à travers une fente [12-13]

**1.5. Techniques d'adaptation des antennes imprimées**

Pour chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation car la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [14-15].

***1.5.1 l'adaptation par quart d'onde***

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation ( figure I-14), c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [14-15].



**Figure I-14** : adaptation par quart d'onde [14-15].

***1.5.2 L'adaptation par STUB***

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub ( figure I-15) [12]. Son principe est que à partir de la charge, grâce à un tronçon de ligne d'impédance caractéristique  $Z_c$  et de longueur adéquate  $l$ , le point



représentant l'admittance  $y_{L0} = 1/Z_{L0}$  parcourt un cercle jusqu'à ce que celui-ci croise le cercle représentant les admittances du type l'adaptation en partie réelle est ainsi réalisée. L'adaptation de la partie imaginaire se fait en ramenant dans le plan une partie imaginaire pure grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [14-15].

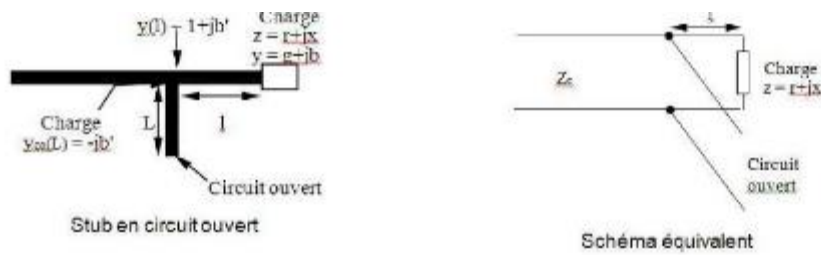


Figure I-15 : Adaptation par STUB [14-15].

1.5.3 L'adaptation avec encoches

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches ( figure I-16), il suffit de modifier la géométrie du patch [14-15] :

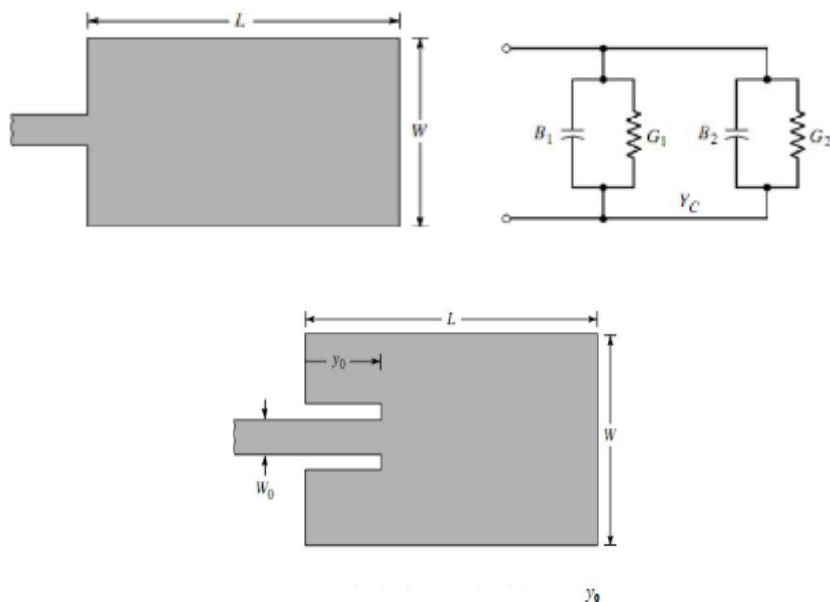


Figure I-16 : adaptation avec encoches [14-15].

I.6. Modélisation de l'Antenne patch pentagone proposée

Nous avons choisi dans notre mémoire d'étudier et de simuler une antenne patch pentagone pour des raison de facilité de conception et de fabrication ainsi que sa capacité de résonance à la bande ISM souhaité. Un substrat de type Rogers RO3003 est choisi pour fabriquer l'antenne avec l'épaisseur  $h= 0.75$  mm et une constante diélectrique  $\epsilon_r = 3$ .

Les paramètres de calcule de cette antenne sont donnés sur le tableau I.1 [16-17]

Paramètre d'antenne	Equation	Légende
Largeur efficace de l'antenne(W)	$W = \frac{1}{2fr\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}}$	$F_r$ : fréquence de résonance $\epsilon_r$ : permittivité du substrat $h$ : l'épaisseur du substrat
Constante diélectrique ( $\epsilon_{eff}$ )	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$	
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)}$	
Longueur réelle (L)	$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L$	
Longueur effective ( $L_{eff}$ )	$L_{eff} = L + 2\Delta L$	

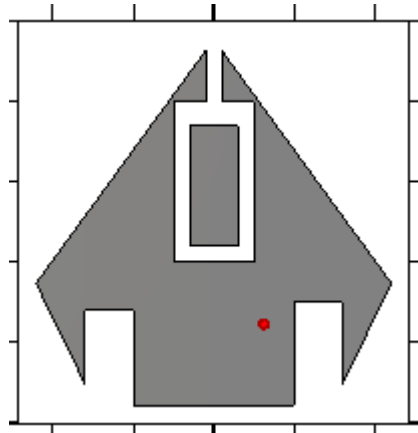
Tableau I-1 Paramètres de l'antenne patch pentagone [16-17]

La largeur et la longueur du plan de masse et du substrat sont calculés à partir des équations empiriques suivante :

$$W_g = W + 6 \cdot h, \tag{I. 10}$$

$$L_g = L + 6 \cdot h. \tag{I. 11}$$

La figure I-17 montre la géométrie de notre antenne proposée :



**Figure I-17** : Antenne patch pentagone proposée.

### **I.7. Applications des antennes imprimées dans la bande ISM**

Dans ce que suit, une présentation générale de différentes technologies qui utilisent la bande ISM [18-19].

#### ***I.7.1 Bluetooth***

Bluetooth est surnommé sur le roi du Danemark (Harald Blatand) de 940 à 981 par « la dent bleu ». Ce surnom a été donné à cette technologie, mise au point par le Suédois Ericsson qui recherchait des alternatives au câblage pour le transport de la voix et de données d'un téléphone cellulaire à ces accessoires. Cette technologie est basée sur une hiérarchie maître/esclave. Cette norme majeure utilise la bande libre ISM 2.4 GHz. Le Bluetooth (standard IEEE 802.15) a été créé pour répondre aux besoins de réseaux à très faible portée appelés réseaux personnels (WPAN, Wireless Personnel Area Network). A la différence des autres technologies sans fils, le Bluetooth n'est pas destiné à remplacer les câbles des réseaux locaux traditionnels, mais a pour but d'interconnecter tout type d'objet électronique nomade ayant besoin de communiquer sans nécessiter forcément un débit important [19-20].



Figure I-18 : Fonctionnement de standard WPAN IEEE 802.15 Bluetooth [19-20].

La robustesse, la faible consommation d'énergie, le faible cout, sont les principales caractéristiques de la technologie Bluetooth. Il garantit une connexion de base entre plusieurs appareils d'origines différents mais certifiés compatibles grâce a l'utilisation d'un protocole commun. Par ailleurs, certaines spécifications étant personnelles, le Bluetooth autorise les fabricants à différencier leurs produits sur le marché. Cette technologie est aujourd'hui largement répandue dans le monde. Elle équipe notamment les téléphones portables, ordinateurs portables, périphériques informatiques (clavier, souris), casques audio, oreillettes mains-libres, autoradios appareils photos numériques [19-20-21].

- **Fonctionnement :** le Bluetooth opère dans le spectre de fréquence 2.4 GHz. Sa portée est limitée à 10 ou 100m selon la classe de l'appareil (voir le tableau 1-2). Le débit maximal s'élève à 24Mbps. Le système utilise un émetteur récepteur exploitant la technique du saut fréquence pour minimiser les interférences rencontrées sur ces fréquences encombrées. Un algorithme peut modifier le modèle de saut de fréquence à la volée pour exclure les fréquences utilisées par d'autres technologies [21-22].

Classe	Puissance max	Portée max
1	100 mW	100 m
2	2.5 mW	10 m
3	1 mW	1 a 3 m

Tableau I-2 : Classe des appareils certifiés Bluetooth [21-22].

➤ **Standards (Tableau I-3)**

Les travaux de recherche se rapportant à la technologie Bluetooth ont évolué de manière progressive grâce à l'alliance de plusieurs fabricants dans le Bluetooth Special Interest Group (SIG) [I-1]. En partant de la version d'origine, on constate que les efforts ont été portés successivement sur l'amélioration de l'interopérabilité, puis des débits, et enfin de la consommation de l'énergie grâce au mode Low Energy [22-23].

<b>Version</b>	<b>Débit max Mbit/s</b>	<b>Caractéristiques majeurs</b>
1.0 à 1.2	1	Interopérabilité et standardisation IEEE 802.15
2.0 à 2.1	3	Amélioration du débit EDR (Enhanced Data Rate)
3.0	24	Ajout du mode HS (High Speed)
4.0	24	Ajout du mode LE (Low Energy)

**Tableau I-3** : caractéristiques des versions successives du Bluetooth [22-23].

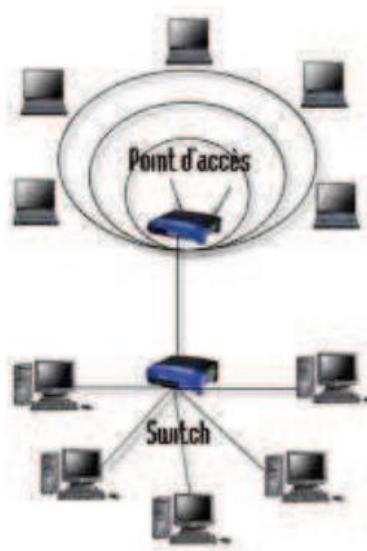
Les avancées concernant le Bluetooth Low Energy ont pour objectif de conserver la consommation de l'énergie, de façon à alimenter un appareil avec une simple pile bouton pendant plusieurs années. Le but est de conquérir le marché des montres, capteurs divers, équipements sportifs, implants médicaux. D'autres travaux visent notamment à améliorer la qualité de service QoS (Quality of Service) et la sécurité [22-23].

**1.7.2 ZIGBEE**

La norme ZigBee est réservée à des applications basses débit et dédiées à des communications embarquées (capteurs par exemple) [24-25]. La portée de la technologie ZigBee ne dépasse pas quelques dizaines de mètres avec un débit de 20 à 250 kbit/s. Cette norme prévoit l'utilisation de trois fréquences (868, 915 ou 2400 MHz). La spécification ZigBee s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4. L'une des caractéristiques majeures de ZigBee est qu'elle est une forte économie d'énergie grâce à une optimisation du regroupement des communications de manière à favoriser de larges périodes de mise en veille du matériel. L'objectif en termes d'autonomie est d'atteindre deux ans avec des piles alcalines standard pour des dispositifs embarqués faiblement communicants [24-25].

**1.7.3 WIFI**

L'accroissement exponentiel des besoins en communications sans fil et l'explosion du trafic internet grand public ont poussé l'industrie et la recherche à imaginer une solution de connexion entre les réseaux fixes et les appareils nomades. Le standard Wireless LAN IEEE 802.11 (figure 1-19) a été créé pour répondre à cette problématique et assurer l'interopérabilité de ces appareils communicants. L'idée était de décliner une version sans-fil du célèbre IEEE 802.3 plus connu sous le nom d'Ethernet [25-26]. La famille des standards Wifi permet de mettre en place un réseau sans fil sur des distances de quelques centaines de mètres. L'utilisation des réseaux de type Wifi est dite nomade, car bien que l'utilisation en situation de mobilité soit possible, au-delà de quelques km/h, le fonctionnement n'est plus assuré [25-26].



**Figure I-19** Fonctionnement du standard WLAN IEEE 802.11 Wifi [25-26].

**Standards**

Le tableau 1-4 décrit les différents standards 802.11. Le débit maximum est uniquement atteint à proximité directe du point d'accès, sans obstacle [27-28]. De plus, la bande ISM étant libre, elle est utilisée par plusieurs autres technologies. Des interférences peuvent donc perturber le signal Wifi et diminuer les performances de la liaison sans fil. Enfin, le Wifi étant destiné à des réseaux locaux à portée limitée, puissance d'émission est strictement Limitée [27-28].

IEEE 802.11	Fréquences	Débit max
A	5Ghz	54 Mbps

B	2.4Ghz	11Mbps
G	2.4Ghz	54 Mbps
N	2.4Ghz à 5Ghz	300Mbps

**Tableau I-4** : caractéristiques du standard wifi 802.11 [27-28].

La norme Wifi n'a cessé d'être améliorée au cours des dernières années pour atteindre depuis 2007 la déclinaison 802.11 n. Cette dernière version utilise les deux fréquences 2,4 GHz et 5 GHz, l'agrégation de canaux, ainsi que la technique de diversité de MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) pour augmenter les débits et la portée [29-30].

**I.8. Conclusion**

La technologie micro ruban en général, et les antennes patch en particulier connaissent un succès croissant auprès des industriels et des professionnels de télécommunication, qu'elle soit spatiale ou terrestre. Il est nécessaire de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation d'une part, et de s'assurer qu'elles se conformeront aux exigences des systèmes d'autre part.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale des antennes imprimées, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques et leurs techniques d'alimentations. En fin nous avons présentés le domaine d'applications ISM de notre antenne proposée.

<b>IEEE 802.11</b>	<b>Fréquences</b>	<b>Débit max</b>
A	5Ghz	54 Mbps
B	2.4Ghz	11Mbps
G	2.4Ghz	54 Mbps
N	2.4Ghz à 5Ghz	300Mbps

**Tableau I-4** : caractéristiques du standard wifi 802.11 [27-28].



## **Chapitre 2**

### ***SIMULATIONS ET RESULTATS***

## **II.1 Introduction**

Ce chapitre a pour objectif de concevoir et simuler à l'aide du logiciel CST Microwave une antenne patch pentagone. Cette dernière doit travailler dans la norme ISM [2.4-2.4835] GHz. Nous allons donner les résultats de simulation de notre antenne proposée en termes de paramètre de réflexion S11, de diagramme de rayonnement, de gain et de distribution de courant.

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

Une des priorités de ce mémoire est de concevoir des antennes qui répondent à la norme GSM et UMTS au point de vue rayonnement et gain, tout en gardant les meilleures caractéristiques de l'antenne d'un point de vue bande passante et adaptation. Pour cela nous avons choisis un outil de simulations CST Microwave Studio, qui utilise la technique d'intégration finie (FIT). Il fait appel à la résolution des équations de Maxwell en trois dimensions suivant une formulation intégrale. La solution logicielle offerte par CST Microwave Studio, est une option très intéressante pour la conception d'antenne en micro-ruban. Des fonctions comme l'optimisation, l'édition en 3D, la modélisation par variable, la mise à la terre finie et la possibilité de définir les conditions aux bornes, en font un logiciel très intéressant pour la tâche à effectuer dans le cadre de ce travail. Cet outil est très complet pour le développement de composante micro-onde allant de composante en microruban aux composantes coaxiales. Le CST Microwave Studio utilise deux techniques de discrétisation : une discrétisation surfacique (cellules en 2D) et une discrétisation volumique (cellule en 3D). L'objectif du maillage en cellule, consiste à calculer les densités de courants surfaciques électriques ou magnétiques de chaque cellule, afin de calculer le champ total de toute la structure. Une fois ces courants déterminés, les caractéristiques de la structure étudiée peuvent être visualisées sous différentes formes : paramètres [S], lieu d'impédance, diagramme de rayonnement à deux ou trois dimensions, représentation des densités de courants...

## **II.3 Antenne patch pentagone alimenté avec une sonde coaxiale - Géométrie de base**

L'antenne proposée est une antenne patch pentagone, alimentée par une sonde coaxiale ( $50 \Omega$ ), avec un substrat de type Rogers3003 d'une permittivité relative  $\epsilon_r=3$  et d'une épaisseur  $h=0.75$  mm. Cette dernière fonctionne aux fréquences [2.4-2.4835] GHz. Les paramètres géométriques de l'antenne patch pentagone sont représentés dans la figure II-1.

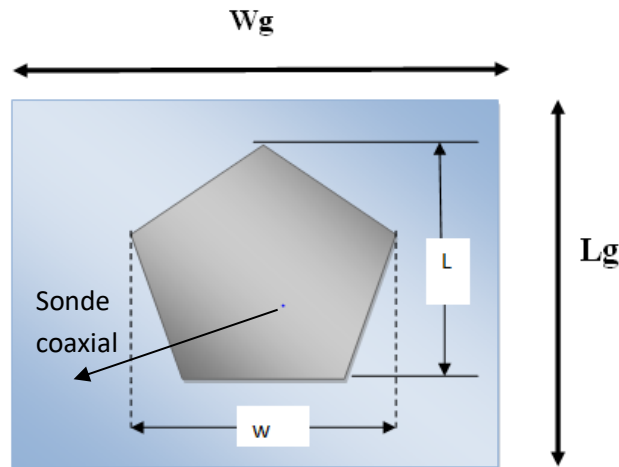


Figure II-1 : Antenne patch pentagone simple

Les dimensions de notre antenne sont calculées à partir du tableau I.1 du chapitre I : **Tableau II-1**

Paramètres	Dimensions (mm)
<b>L</b>	<b>45.45</b>
<b>Lg</b>	<b>49.95</b>
<b>W</b>	<b>44.19</b>
<b>Wg</b>	<b>48.69</b>

Tableau II-1 : Dimensions de l’antenne patch pentagone.

## II.4 Résultats de simulations

### II.4.1 Coefficient de réflexion $S_{1,1}$

Nous allons représenter dans la figure II-2 le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , qui va nous permettre de visualiser le niveau d’adaptation et la bande passante à la fréquence de résonance entre [2.4-2.4835] GHz pour cette antenne patch pentagone.

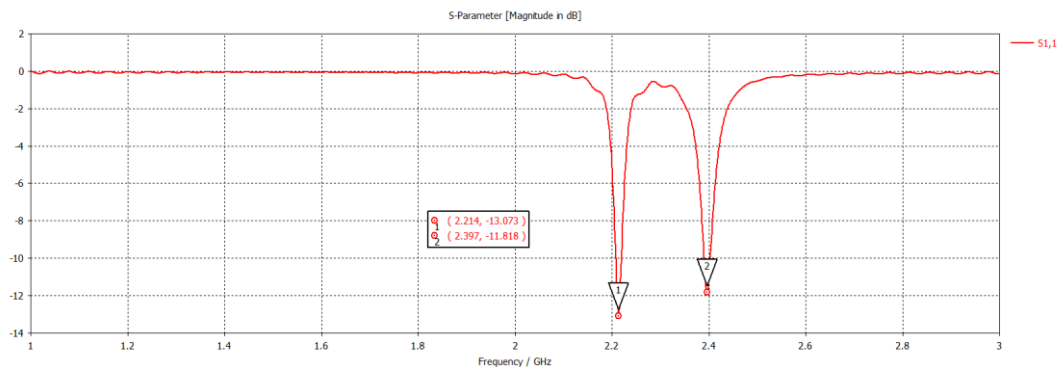
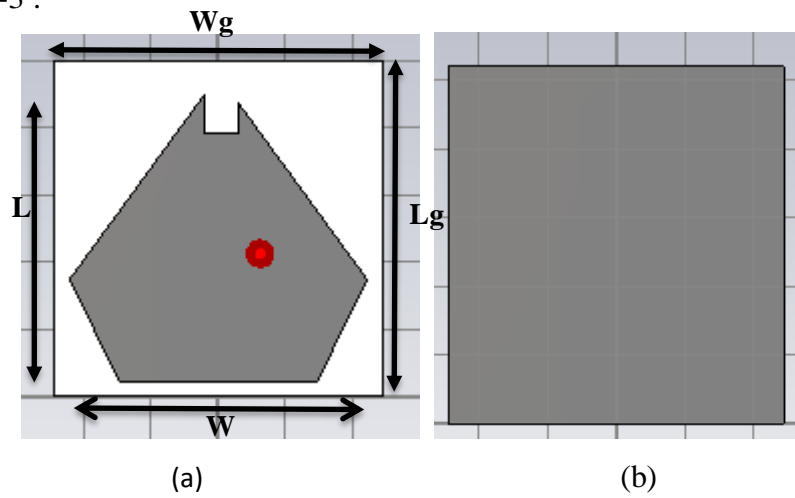


Figure II-2 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$

Nous avons obtenu deux fréquences, une à 2.21GHz avec un S11 de -13.073dB, et l'autre à 2.397 GHz avec un paramètre S11 de -11.818 dB. Nous allons donc effectuer une étude paramétrique sous CST pour améliorer l'adaptation de notre antenne, les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous.

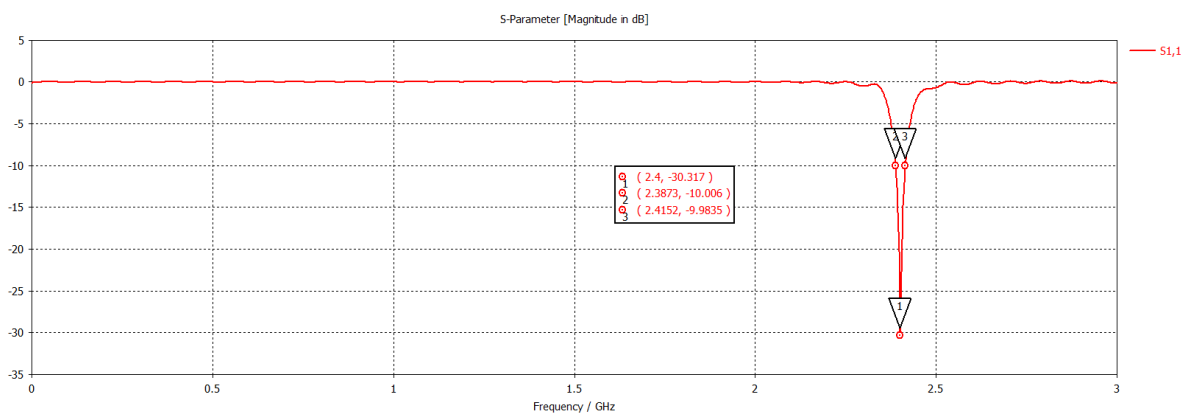
**II.4.2 Adaptation de l'antenne avec insertion d'encoches sur le patch**

Nous devons adapter le paramètre S11 de la figure II-2 à une valeur inférieure à -10dB, pour cela nous allons insérer des encoches au niveau du patch de l'antenne proposée comme le montre la figure II-3 :



**Figure II-3** : Antenne pentagone proposée adaptée à 2.4 GHz  
 (a) Vue de face (patch), (b) vue d'arrière (plan de masse)

**a) Coefficient de réflexion S [1,1]**



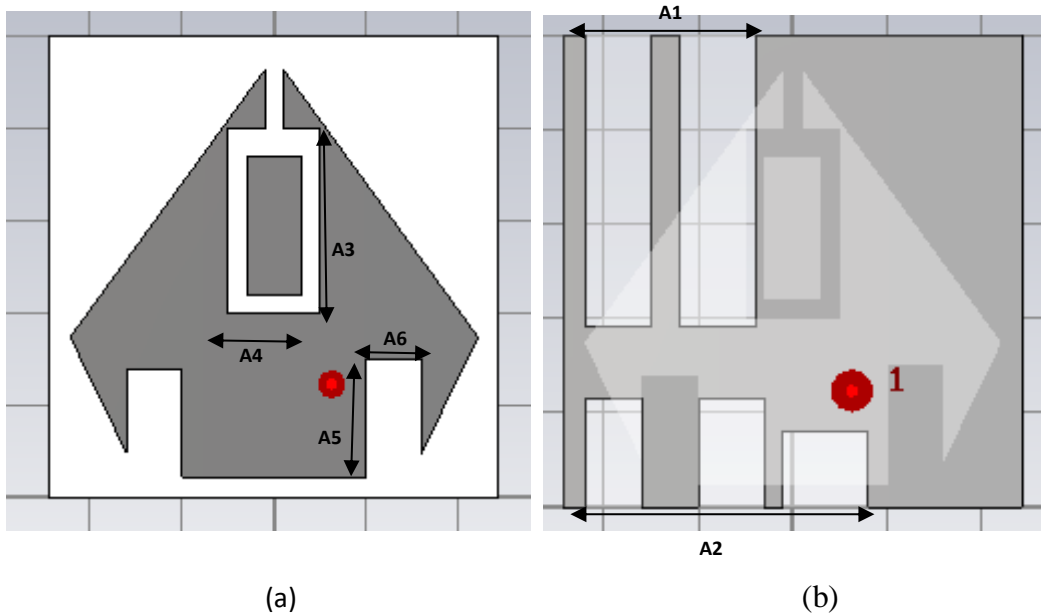
**Figure II-4** : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne initiale proposée.

La figure II-4 montre que l'antenne pentagone fonctionne à la fréquence 2.4 GHz avec un coefficient de réflexion de -30.31 dB. La bande de fréquence n'est pas encore dans la bande ISM [2.4-2.4835] GHz, pour cela nous allons utiliser une autre technique d'adaptation et

d'élargissement de la bande passante. Cette dernière est appelée technique du plan de masse partiel.

**II.4.3 Elargissement de la bande passante de l'antenne patch pentagone proposée**

La figure II-5 montre la structure de notre antenne patch pentagone proposée avec une bonne adaptation et une bande passante élargie :



**Figure II-5 :** Antenne pentagone proposée adaptée à la bande ISM  
 (a) Vue de face (patch), (b) vue d'arrière (plan de masse)

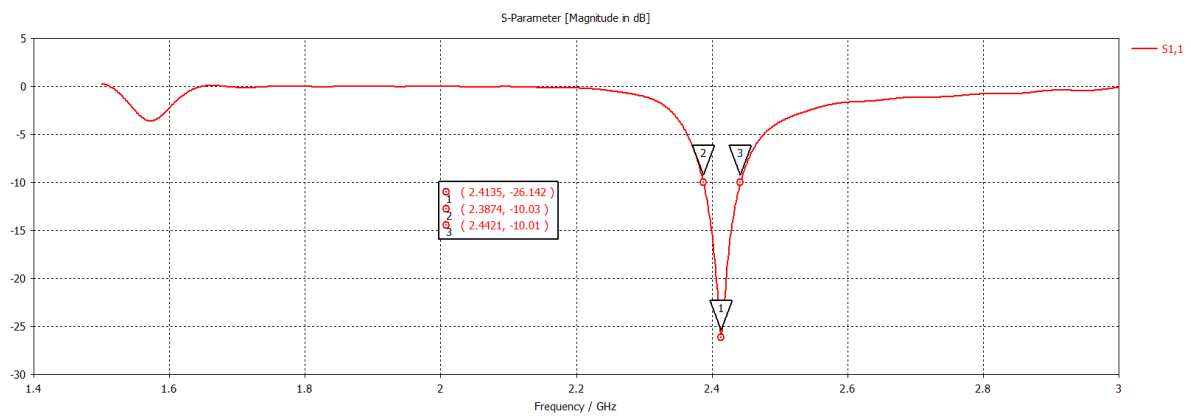
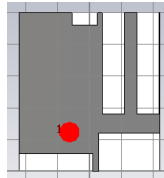
Les dimensions de l'antenne proposée sont données sur le tableau II-2 :

Paramètres	Dimensions (mm)
<b>L</b>	<b>45.45</b>
<b>Lg</b>	<b>49.95</b>
<b>W</b>	<b>44.19</b>
<b>Wg</b>	<b>48.69</b>
<b>A1</b>	<b>16</b>
<b>A2</b>	<b>29</b>
<b>A3</b>	<b>20</b>
<b>A4</b>	<b>10</b>
<b>A5</b>	<b>12</b>
<b>A6</b>	<b>6</b>

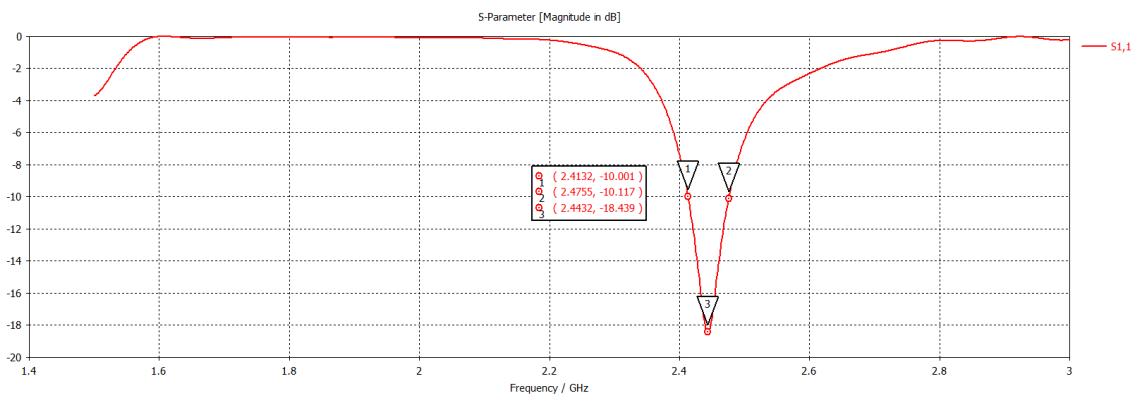
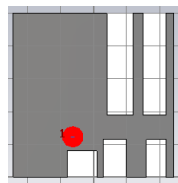
**Tableau II-2 :** Dimensions de l'antenne patch pentagone proposée.

a) Coefficient de réflexion  $S_{1,1}$

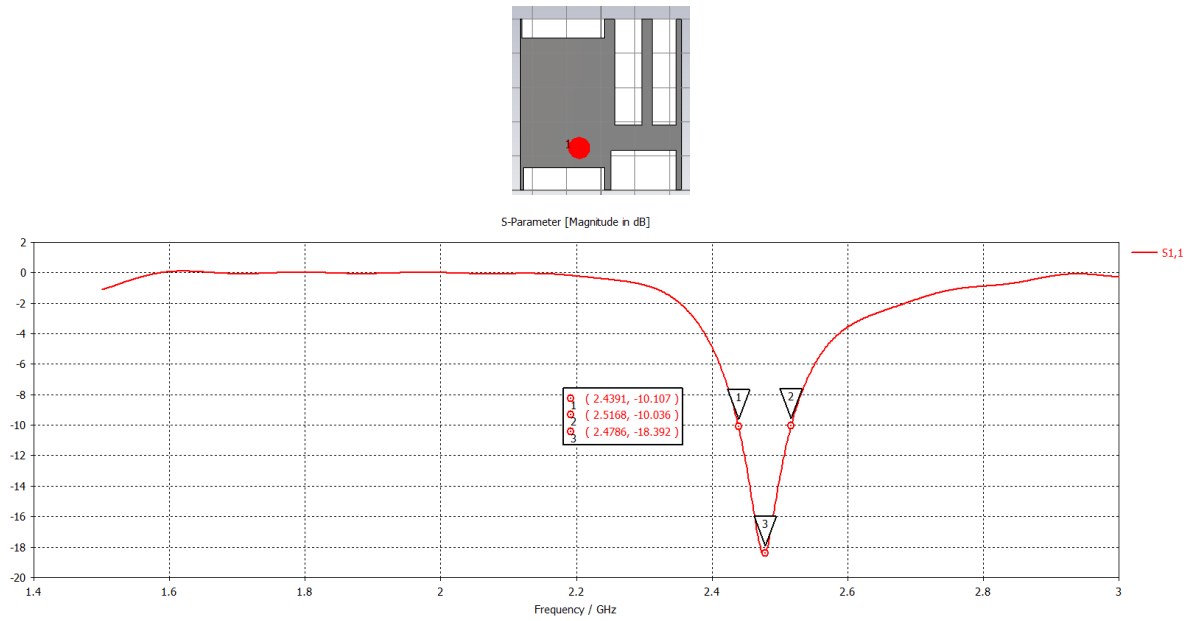
Nous allons appliquer la technique du plan de masse partiel afin d'élargir la bande passante de notre antenne patch. Plusieurs résultats de simulations sont présentés sur la figure II-6 :



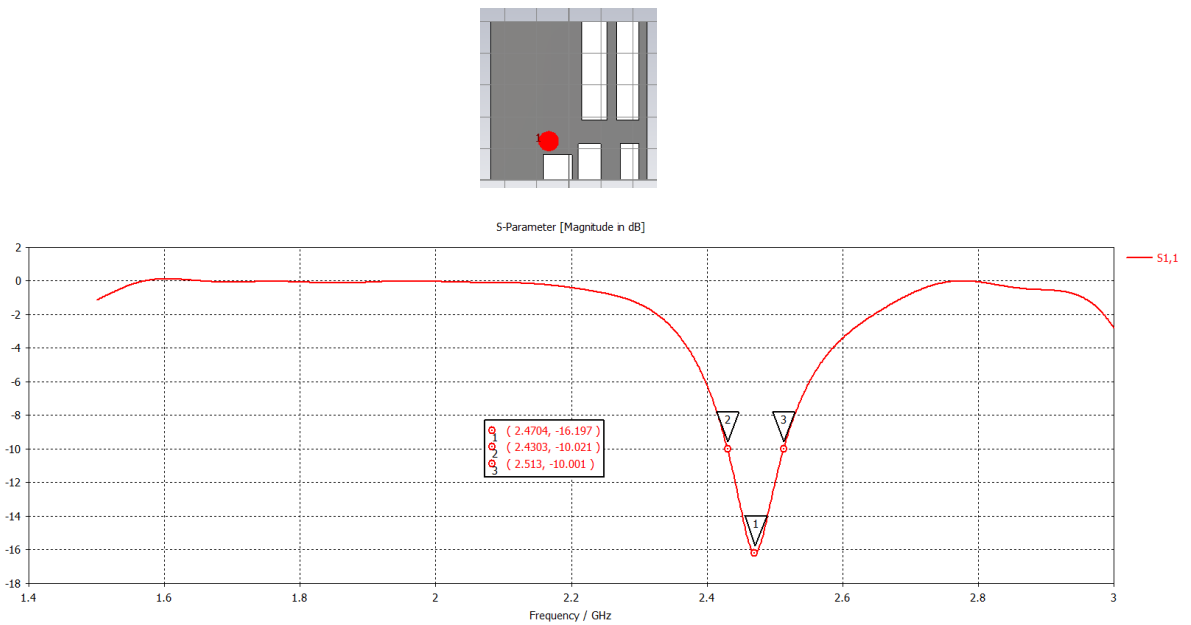
(a)



(b)



(c)



(d)

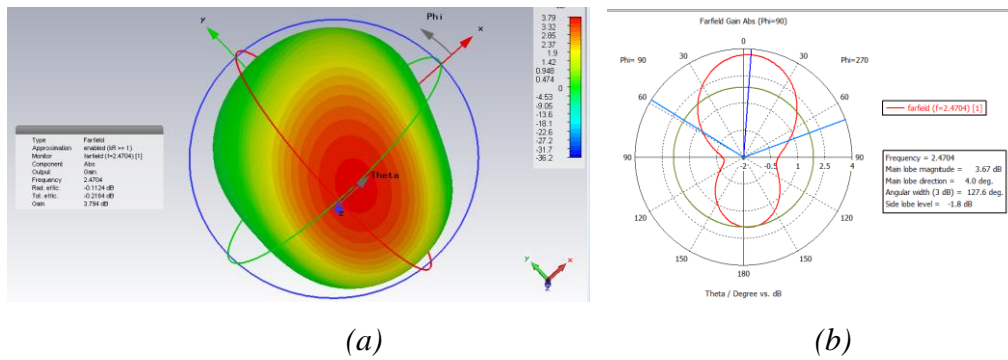
**Figure II-6 :** Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch.

- (a) Bande passante 54MHz, (b) Bande passante 62MHz, (c) Bande passante 77.8MHz, (d) Bande passante 81.3MHz

**b) Diagramme de rayonnement**

La figure II-7 montre bien que le diagramme de rayonnement obtenu est omnidirectionnel, avec un gain de 3.97 dB et une ouverture de 127.6 deg.

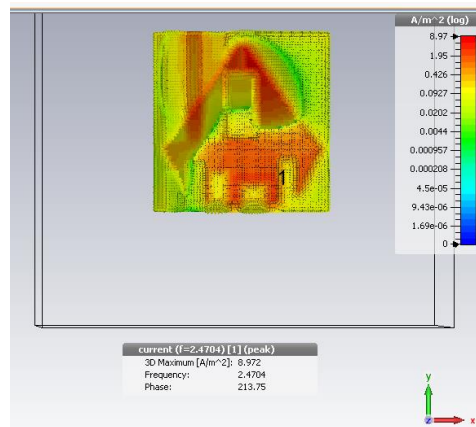




**Figure II-7 :** Diagramme de rayonnement de l’antenne patch  
(a) En 3D, (b) polaire

*c) Distribution du courant dans l’antenne patch pentagone*

La figure II-8 montre bien la distribution de courant sur toute l’interface de l’antenne patch pentagone proposée.



**Figure II-8 :** Distribution de courant dans l’antenne patch pentagone proposée

**II.5 Conclusion**

Nous avons modélisé et simulé dans ce travail une nouvelle forme d’une antenne patch pentagone. Les résultats de simulations sont satisfaisants en termes de paramètre de réflexion S11 ; de gain et de directivité de l’antenne. L’antenne patch pentagone proposée est bien adaptée à la norme ISM [2.4- 2.4835] GHz.

## Conclusion Générale

**L**e domaine des télécommunications a connu une grande évolution technologique au cours de ces dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie, parmi les applications de ce domaine nous trouverons les antennes. Ces derniers assurent l'émission ou la réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil [20].

L'objectif de notre travail est la conception d'une antenne patch pentagone travaillant dans la bande ISM. Pour ce faire, on a utilisé un logiciel de simulation électromagnétique 3D CST qui est un outil performant à onde électromagnétique (EM) commercial qui fait la simulation du champ d'un model arbitraires en 3D. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision [20].

Les résultats de simulations obtenus dans ce travail sont très satisfaisants en termes de paramètre de réflexion S11, de diagramme de rayonnement et de gain etc..., l'antenne est prête pour être utiliser dans toutes applications ISM [2.4-2.4835] GHz.

## Références Bibliographiques

- [1] **Chouti Leila**, « contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage », mémoire de fin d'étude master, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [2] **kebbab radhwane**, « conception d'antennes ultra large bande en technologie imprimée », thèse de magister de télécommunication, université aboubekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [3] **Boussaha Somia**, « contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires applications aux systèmes de communication », mémoire de fin d'études master, Université 8 Mai 1945 Guelma ; 2012.
- [4] **Djamel khedrouche**, « analyse et conception des antennes micro rubans alimentées par guide d'onde coplanaire », mémoire de fin d'études master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA ; 2016.
- [5] **Ogunlade michael adegoke, Ismael saadeltoum**, «analysis and design of rectangular microstrip patch antenna at 2.4GHz WLAN applications », IJERT vol. 3 issue 8, ISSN: 2278-0181, pp.1239-1245, Aout .2014
- [6] **Fouad benamrane**, « conception d'une antenne patch micros trip », master télécom hyper fréquence, Université sidi mohamed ben abdallah (Fès) Maroc, 2011.
- [7] **Drif chahinez, Hasni youssuf**, « étude et conception d'une antenne micro ruban bi bande pour des applications sans fil », Centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain Témouchent, juin 2016.
- [13] **Pele, Mahe, Y. chousseaud, A. Toutain, S. Garel**, « antenna design with control of radiation pattern and frequency bandwidth». antennas and propagation society international symposium 2004, vol.1, p. 783-786.
- [14] **Ziane cherif abderrahman, behaddoudi abderrahim**, « conception, modélisation et réalisation d'une antenne micro ruban triangulaire miniature ULB », Centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2017.
- [15] **k. Wong, L. Chou et C.M. Su**, « dual-band flat-plate antenna with a shorted parasite inclement for laptop applications». IEEE transaction son antennas and propagation, vol. 53, no. 1, pp 539–544, janvier 2005.
- [16] **Laure Freytag**, « conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour stations de base des réseaux de télécommunication sans fil », thèse de doctorat, université de limoge, 2004.
- [17] **C. Luxey, R. Staraj, G. Kossiavas, A. Papiernik**, « antennes imprimées-bases et principes », éditions des techniques de l'ingénieur, pp. Fascicule E 3310, 2007.

- [18] **Benabadji selma, Lallam chafika**, « conception et modélisation d'une antenne micro-ruban compacte pour une utilisation dans les terminaux mobiles », Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, juillet 2012.
- [19] **Jean-marc, Laheurte**, « Petites antennes- communications sans fil et terminaux », Institut Télécom et Lavoisier, Paris 2011.
- [20] **Tchouar Faiza**, « étude et conception d'une antenne micro ruban pour des applications WBAN », Mémoire de fin d'études Master, année universitaire, 2016/2017.
- [21] **Dreina Emmanuel**, « 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 ». Université de Grenoble, juillet 2010.
- [22] **David Carsenat**, « contribution à l'étude de réseaux de communication sans fil, application au LMDS », thèse de doctorat, Université de Limoge, 2003.
- [23] **Berkat abdallatif**, « conception et réalisation d'antennes miatures isotropes dans les bandes C et ISM », Université Abou Bakrbelkaid Tlemcen, Mai 2014.
- [24] **Djalal ziani kerarti**, « étude et conception d'antennes ultra large bande », thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [25] **Radouane karli, Hassan ammor**, « a simple and original design of multi-band microstrip patch antenna for wireless communication », Université Mohammed Gdal, Rabat-Maroc, march – April 2013.
- [26] **Arab Tarek**, « étude des matériaux composites (titanate oxyde) : application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures », 04 /11/2014.
- [27] **P. Ciaï**, « Antennes multistandards pour Communications mobiles ». Phd thèses, Leat - Université de Nice Sophia Antipolis, Décembre 2004.
- [28] **Bendahmane Zhor, kellal rahmouna**, « étude et conception logicielle des antennes imprimées pour les réseaux sans fil 802.11 ». Centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain Témouchent, Juin 2015.
- [29] **Malfi née Hariz manal**, « antennes miniatures ultra large bande pour des applications sans fil » Université Abou Bekr Belkaid UABT -Tlemcen, 13-fév-2014.

**[30] Dida houdaifa et Bouhrari ala eddine**, « conception et simulation d'antenne micro ruban a polarisation circulaire pour les applications wifi », Mémoire de fin d'études Master, Kasdi Merbah University Ouargla, 9-Nov-2019.