

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

- *Ghouali taha seyf el'islam*
- *Amrouche asma*

Intitulé

*Etude et Conception des antennes PIFAs tri-bandes pour
applications biomédicales*

Évalué le : 19/09/2022

Par la commission d'évaluation composée de :*

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. Messaoudene idris</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Melizi Nora</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. Belazoug Masinisa</i>	<i>MAR</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

*Il nous est agréable et important de réserver cette page
comme un témoin de
Reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus
et encadrés pour la
Réalisation de ce travail.*

*Tous d'abord, nous remercions Allah le tout puissant de nous
ouvrir les portes du savoir,*

*De nous avoir aidé dans les moments difficiles, et de nous
avoir permis d'être ce que nous
Somme devenues.*

*Nos sincères remerciements vont également à tous nos
professeurs durant ces cinq
Années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur
soutien. Nos grands*

*Remerciements et sincères respect vont à notre encadreur
Madame N. Melizi pour l'intérêt
Qu'il a porté à notre travail ainsi que ses précieux conseils et
sa critique fondée.*

*Nos plus sincères remerciements vont aux membres du jury
et de la sentence pour avoir
Accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions aussi tous nos camarades de la faculté de
la science et de la technologie*

En particulier nos amis de la promotion "M2 télécom 2022".

On leur exprime notre profonde

Sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

*Finalement, nous remercions toute personne ayant
contribué de près ou de loin à*

*L'élaboration de ce mémoire, sans oublier tous ceux qui nous
ont encouragé le long de notre*

Parcours universitaire, A tous ceux qui nous aimons.

..... merci

Dédicace

*Après chaque effort il y'a un résultat obtenu, et après tous
ça il y'a aussi une dédicace, pour cela :*

*Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de me longues
études :*

*Spécialement à celle qui m'a donné le courage pour continue
à ma mère (Samira Bouarissa) la plus belle mère au monde,
pour sa présence et son soutien durant Ma*

*Carrière, je viens de te dire qu'à cause de toi, je suis là. Ma
mère toi qui attendais ce jour*

Avec une impatience.

*A ma chère binôme Amrouche Asma
Pour s'entente et sympathie.*

*A mes chère grand père et grande mère (عليهما رحمة الله) vous été
toujours dans mon cœur .*

A mon cher oncle karim bouarissa qui m'as encouragé.

*A toute ma famille sans exception, A tous mes amis. A tous
ceux et celles qui me sont*

Chers ...

Tous mes enseignants et toute la promotion Master II –

Système de Télécommunication 2022.

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de
continuer.*

Ghouali taha Seyf el'islam

Dédicace

A ma chère mère,

A mon cher papa,

***Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard
de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre
mes objectifs***

A mon frère, A ma chère sœur

A ma grande sœur et son mari,

***Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au
long mes étude***

A mon cher grand père et ma grand-mère

Qui je souhaite une bonne santé

A mon binôme ghoulali taha seyfel'islam

Pour s'entente et sympathie.

Pour leurs indéfectibles soutiens, leurs patiences infinies

A toute ma famille,

Amrouche Asma

Résumé

Ce travail port une contribution à l'étude de trois types d'antennes PIFAs, le premier types est une antenne PIFA mono-bande, le deuxième est une antenne PIFA bi-bande et le troisième est un antenne PIFA tri-bande adaptées à des applications biomédicales dans les trois bandes MedRadio (401 - 406) MHz et ISM (902 - 928) MHz et 2.4 GHz. Le but de cette étude est de calculer les caractéristiques électromagnétiques d'antennes en termes de coefficient de réflexion (S11), diagramme de rayonnement, impédance caractéristique, gain et distribution du courant. L'analyse de ces trois structures d'antennes est effectuée en utilisant le logiciel commercial de modélisation électromagnétique Ansoft HFSS.

Mots clé : Antenne miniature, Antenne PIFA, Bandes MedRadio et ISM, Ansoft HFSS.

Abstract

This work contributes to the study of three types of PIFAs antennas, the first type is a mono-band and the second is a dual-band and the third is a Tri-Band PIFA antenna suitable for biomedical applications in the three frequencies MedRadio bands (401 - 406) MHz and ISM (902 - 928) MHz and (2.4) GHz. The aim of this study is to calculate the electromagnetic characteristics of antennas in terms of reflection coefficient (S11), radiation pattern, characteristic impedance, gain and current distribution. Analysis of these three antenna structures is performed using commercial Ansoft HFSS electromagnetic modeling software.

Keywords: miniature antenna, PIFA antenna, MedRadio and ISM bands, Ansoft HFSS.

المخلص

يساهم هذا العمل في دراسة ثلاثة أنواع من هوائيات PIFA ، النوع الأول هو هوائي أحادي النطاق PIFA، والثاني هو هوائي PIFA مزدوج النطاق والثالث هو هوائي PIFA ثلاثي النطاق يتكيف مع التطبيقات الطبية الحيوية في الثلاثة. نطاقات (401-406) MedRadio ميغاهرتز. و(902-928) ISM ميغاهرتز و2.4 جيجاهرتز. الغرض من هذه الدراسة هو حساب الخصائص الكهرومغناطيسية للهوائيات من حيث معامل الانعكاس (S11) ومخطط الإشعاع والمقاومة المميزة والكسب وتوزيع التيار.

يتم إجراء تحليل هياكل الهوائيات الثلاثة باستخدام برنامج النمذجة الكهرومغناطيسية التجارية

Ansoft HFSS.

الكلمات المفتاحية: هوائي مصغر، هوائي PIFA ، نطاقات MedRadio و ISM ، Ansoft HFSS.

Table des matières

Introduction Générale	1
<i>Chapitre I : Généralités sur les antennes imprimées</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique des antennes imprimées	3
I.3 Structure d'une antenne imprimée.....	3
I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées	4
I.4.1 La directivité	4
I.4.2 Coefficient de réflexion	4
I.4.3 Impédance d'entre de l'antenne	4
I.4.4 Rendement de l'antenne.....	5
I.4.5 Le gin.....	5
I.5 Polarisation de l'antenne	5
I.6 Les techniques d'alimentation	5
I.6.1 Alimentation directe par une ligne microruban	6
I.6.5 Alimentation coaxiale	7
I.6.6 Alimentation couplée par ouverture.....	7
I.7 Méthodes d'analyses des antennes	8
I.7.1 Les méthodes analytiques.....	8
I.7.2 Méthodes numériques exactes (full-wave)	10
I.8 Avantages et limitations des antennes imprimées	11
I.9 Les applications des antennes imprimées	12
I.10 Conclusion.....	12
<i>Chapitre II : Les antennes miniatures PIFA pour applications biomédicales</i>	
II.1 Introduction	14
II.2 Etat de l'art sur les antennes miniatures	14
II.2.1 L'antenne monopole.....	15
II.2.2 L'antenne ILA	16
II.2.3 L'antenne IFA	16
II.2.4 L'antenne PIFA	17
II.2.4.1 Définition des antennes PIFA.....	18
II.2.4.2 Les types d'antennes PIFA.....	19
II.2.4.3 Caractéristiques radioélectriques des antennes PIFA	19
II.2.4.3.2 Distribution du courant	19

II.2.4.4	Les performances des antennes PIFA	19
II.3	Les techniques de miniaturisation	20
II.3.1	Modification de l'élément rayonnant	20
II.3.2	Ajout de court-circuit	20
II.3.3	L'insertion des fentes dans l'élément rayonnant	21
II.3.4	Repliement des éléments rayonnant.....	22
II.4	Application biomédicale.....	22
II.4.1	Communications sans fils à travers le corps humain dans le domaine médical.....	22
II.4.2	Modèle du corps humain.....	22
II.4.3	Bandes de fréquence pour application biomédicale.....	23
II.5	Conclusion.....	24
 Chapitre III : Simulation d'antennes bio-implantables PIFA		
III.1	Introduction.....	26
III.2	Présentation du logiciel An soft HFSS	26
III.3	Antenne PIFA Mono bande	27
III.3.1	Description de la structure	27
III.3.2	Résultats de simulation	28
III.3.2.1	Coefficient de réflexion	28
III.3.2.2	Diagramme de rayonnement.....	28
III.3.2.3	Distribution du courant	29
III.3.2.4	Impédance d'entrée.....	30
III.4	Antenne PIFA bi-bande	31
III.4.1	Description de la conception.....	31
III.4.2	Résultats de simulation.....	32
III.4.2.1	Coefficient de réflexion.....	32
III.4.2.2	Diagramme de rayonnement	33
III.4.2.3	Distribution du courant.....	35
III.4.2.4	Impédance d'entrée	36
III.5	Antennes PIFA tri-bande	36
III.5.1	Description de la conception	36

III.5.2	Résultats de simulation	38
III.5.2.1	Coefficient de réflexion	38
III.5.2.2	Diagramme de rayonnement	38
III.5.2.3	Distribution du courant	39
III.5.2.4	Impédance d'entrée	40
III.6	Conclusion	41

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: structure de base d'une antenne imprimée	4
Figure I.2 : patch alimenté par une ligne microruban à travers un bord rayonnant.....	6
Figure I.3 : patch alimenté par une ligne microruban à travers un bord non rayonnant.....	6
Figure I.4 : patch couplé capacitivement à une ligne microruban.....	7
Figure I.5 : antenne microruban alimentée par sonde	7
Figure I.6 : alimentation couplée par ouverture	8
Figure I.7 : modèle de la ligne de transmission	9
Figure I.8 : modèle de la cavité.....	9
Figure I.9 : distribution des charges et création de courant dans une antenne patch	10

Chapitre II

Figure II.1 : antenne monopole	14
Figure II.2 : structure d'une antenne ILA.....	15
Figure II.3 : géométrie de l'antenne F inversée (IFA)	16
Figure II.4 : antenne PIFA	17
Figure II.5 : les méandres latéraux.....	19
Figure II.6 : cartographies du champ dans la cavité d'une antenne microruban.....	20
Figure II.7 : PIFA avec court-circuit	20

Chapitre III

Figure III.1: interface graphique du simulateur HFSS	26
Figure III.2: géométrie de l'antenne PIFA mono-bande , (a) ; vue de dessus , (b) ; vue de cote	27
Figure III.3 : coefficient de réflexion (s_{11}) de l'antenne PIFA mono-bande à la fréquence 401 MHz	28
Figure III.4: diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA mono-bande en 2D pour $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$	29
Figure III.5: gain total de l'antenne PIFA mono-bande en 3D	29
Figure III.6: distribution du courant pour l'antenne PIFA mono-bande.....	30
Figure III.7: impédance d'entrée d'antenne PIFA mono-bande	30

Figure III .8: géométrie de l'antenne PIFA bi-bande,(a).Vue de dessus,(b).Vue de côté.....	31
Figure III .9:coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne PIFA bi-bande	32
Figure III .10: diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne PIFA bi-bande à la fréquence de résonnance 401MHz(a) $\phi=90^\circ$, (b) $\phi=0^\circ$	33
Figure III .11: gain total de l'antenne PIFA bi-bande à $f=401\text{MHz}$ en 3D	33
Figure III .12: diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne PIFA bi-bande à la fréquence de résonnance 915MHz(a) $\phi=90^\circ$, (b) $\phi=0^\circ$	34
Figure III .13: gain total de l'antenne PIFA bi-bande à $f=915\text{MHz}$ en 3D	34
Figure III .14: distribution du courant pour l'antenne bi-bande à $f=401\text{ MHz}$	35
Figure III .15: distribution du courant pour l'antenne bi-bande à $f=915\text{ MHz}$	35
Figure III .16: impédance d'entrée d'antenne PIFA bi-bande	36
Figure III .17: géométrie de l'antenne PIFA tri-bande.....	37
Figure III .18: coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne PIFA tri-bande	38
Figure III .19: diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne PIFA tri-bande à la fréquence de résonnance 2400MHz(a) $\phi=90^\circ$, (b) $\phi=0^\circ$	39
Figure III .20: gain total de l'antenne PIFA tri-bande à $f=2400\text{MHz}$ en 3D	39
Figure III .21: distribution du courant pour l'antenne tri-bande à $f=2400\text{ MHz}$	40
Figure III .22: impédance d'entrée d'antenne PIFA bi-bande	40

Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres géométrique de l'antenne PIFA mono-bande	28
Tableau 2: paramètres géométriques de l'antenne PIFA-bi bande	32
Tableau 3: paramètres géométriques de l'antenne PIFA-tri bande	37

Listes des acronymes et des symboles

Acronymes :

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

GI : Gastro Intestinal

MICS: Medical Implant Communication

Service **EIRP:** Effective Isotropic Radiated

Power **PIFA:** Planar Inverted-F Antenna

Med Radio : Le service de radiocommunications pour dispositifs médicaux

ISM: Industrial, Scientific and Medical bands

UIT : Union internationale des télécommunications

EM : électromagnétique

IFA: Inverted F Antenna

FCC: Federal Communications Commission

Symboles :

$s(\omega)$: La permittivité complexe d'un tissu en fonction de la fréquence

\bar{s} : La permittivité relative complexe d'un milieu à pertes

Z : L'impédance dans un milieu à pertes

R : La résistance

X : La réactance

γ : La constante de propagation

α : L'atténuation

β : Constante de phase

μ : La perméabilité

s : Permittivité diélectrique

f : La fréquence de résonance

S11: Coefficient de réflexion

E : Le vecteur champ électrique

H : Le vecteur champ magnétique

Introduction Générale

Introduction générale

Les dispositifs biomédicaux implantés témoignent d'une grande attention dans la recherche de solutions à des problèmes médicaux complexes. La conception de dispositifs biomédicaux implantables pose de nombreux défis, notamment la conception et l'implantation d'antennes dans un environnement hostile en raison des tissus environnants du corps humain. Les antennes implantées doivent être compactes, efficaces, sûres et capables de fonctionner efficacement dans des bandes de fréquences médicales adéquates.

L'antenne PIFA était l'une des solutions, elle n'a pas été choisie arbitrairement, elle fait l'objet d'une grande attention pour les antennes implantables car elle est très flexible dans sa conception et sa forme. Théoriquement, un PIFA peut résonner à un quart de longueur d'onde, il réduira donc la longueur du patch d'antenne dans la moitié d'une antenne patch micro rubanordinaire. De ses avantages aussi, sa petite dimension, son poids léger, son profil bas et sa fabrication facile. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail, il s'agit de concevoir et d'étudier des antennes PIFAs adaptées à des applications biomédicales dans les trois bandes MedRadio(401-406)MHz et ISM(902-928)MHz et (2.4)GHz.

Le présent manuscrit comporte trois chapitres:

- Le premier chapitre présente des généralités sur des antennes imprimées en commençant par un bref historique sur ces dernières et par la suite leur structure ainsi que ses caractéristiques, les techniques d'alimentation et les différentes méthodes utilisées pour analyser ces structures à fin de les optimiser. En fin, on cite certains domaines d'application des antennes imprimées.

- Le deuxième chapitre est consacré à une étude sur les antennes miniatures en commençant par un état de l'art, leur définition et leurs types passant à leurs caractéristiques et techniques de miniaturisation et en fin l'application des antennes PIFA dans le domaine Biomédical en présentant un modèle du corps humain ainsi que les bandes de fréquences disponibles pour ce type d'application.

- Le troisième chapitre présente la mise en œuvre du simulateur HFSS. Tout d'abord, on commence par analyser et optimiser une structure d'antenne PIFA mono-bande et bi-bande dans la bande MedRadio, ensuite une antenne PIFA tri-bande dans les deux gammes MedRadio et ISM. Les résultats obtenus sont discutés et commentés et des conclusions sont tirées de différents résultats obtenus.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale sur les travaux présentés.

Chapitre I :

Généralités sur les antennes imprimées

I.1 Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Les systèmes microondes à structure microruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la technologie imprimée de manière générale. On commence tout d'abord par la structure et les techniques d'alimentation déployées, ensuite, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière et les méthodes d'analyse de ce type de structure et on clôture le chapitre par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et limitations des antennes imprimées.

I.2 Historique des antennes imprimées

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].

I.3 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'une fine couche conductrice métallique de forme arbitraire, appelée élément rayonnant, déposée sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour constituer un plan de masse. Même en haut de l'élément rayonnant on peut trouver un autre substrat (superstrat) [2].

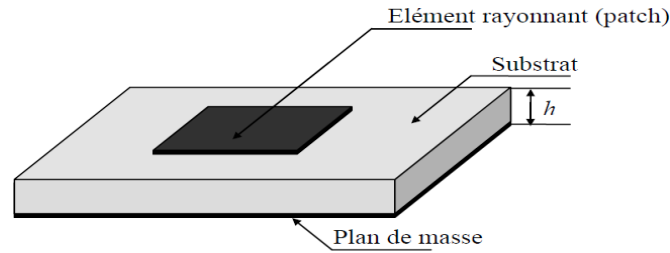


Figure I.1: Structure de base d'une antenne imprimée [2].

I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées

I.4.1 La directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [3].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{P_r / 4\pi} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (\text{Equ.I.1})$$

I.4.2 Coefficient de réflexion

La discontinuité présentée par l'antenne peut être caractérisée par le coefficient de réflexion. Ce coefficient est alors lié à l'impédance d'entrée de l'antenne par la relation classique [4] :

$$S_{11}(f) = \frac{(f) - Z_0}{(f) + Z_0} \quad (\text{Equ.I.2})$$

Où Z_0 est l'impédance de normalisation généralement égale à 50Ω . Ce paramètre permet de caractériser l'adaptation de l'antenne qui est idéale lorsque $S_{11}(f) = 0$, c'est à dire lorsque l'impédance d'entrée de l'antenne vaut : $Z_e(f) = Z_0$.

I.4.3 Impédance d'entrée de l'antenne

Une antenne patch alimentée par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c peut être considérée comme une impédance complexe ($Z_a = R_a + jX_a$). Cette impédance dépend bien évidemment de la géométrie de l'antenne mais aussi du couplage entre la ligne et l'antenne [5]. Dans le cas d'une alimentation directe (ligne coaxiale, ligne micro ruban), l'impédance d'entrée dépend aussi de la position du point d'alimentation sur l'antenne. Elle est d'autant plus faible que le point d'excitation se trouve près du centre de l'élément et elle augmente quand il se déplace vers le bord [6]. Pour une alimentation par sonde coaxiale, les caractéristiques de la sonde, diamètre et longueur (entre plan de masse et

Pavé), introduisent une partie réactive à l'impédance d'entrée de l'antenne. Dans le cas d'éléments de géométrie simple réalisés sur un substrat de faible épaisseur, l'antenne peut être considérée comme un circuit résonnant parallèle caractérisé par son facteur de qualité Q lié aux pertes par rayonnement (utiles) et par dissipation thermique (nuisibles). Pour un tel circuit, l'impédance d'entrée autour de la résonance est donnée par la relation [5]:

$$Z_a = R_a + jX_a = \frac{R_{F-F_r}}{1 + 2jQ(F - F_r)} \quad (\text{Equ.I.3})$$

Avec : f : fréquence d'alimentation.

f_r : Fréquence de résonance.

R : résistance de résonance.

I.4.4 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit [5]:

$$\eta = \frac{P_r}{P_F} \quad (\text{Equ.I.4})$$

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

I.4.5 Le gain

Il est défini par:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (\text{Equ.I.5})$$

Où D est la directivité de l'antenne [5].

I.5 Polarisation de l'antenne

La polarisation de l'antenne est déterminée par la polarisation de l'onde rayonnée dans une direction spécifique. La pointe du vecteur de champ électrique instantané trace une forme dans le temps. Si le chemin du vecteur champ électrique suit une ligne, l'antenne est dite polarisée linéairement. Si le vecteur champ électrique reste constant en longueur, mais tourne en cercle, alors la polarisation est dite circulaire [7].

I.6 Les techniques d'alimentation

L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif [8].

Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories :

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne microruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

I.6.1 Alimentation directe par une ligne microruban

Dans ce type d'alimentation, une bande de conduite est reliée directement au bord du patch de microruban. La bande de conduite est plus petite dans la Largeur par rapport au patch. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'il peut être gravée sur la même face de l'antenne, elle est facile à fabriquer, et simple à adapter à la résonance. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite. On peut distinguer trois types [8]:

I.6.2 Alimentation par ligne microruban à travers un bord rayonnant

Dans ce cas la ligne d'alimentation entre en connexion directement sur le côté rayonnant du patch Figure I.2. Cette technique est l'une des méthodes les plus utilisées. Il existe une variation de l'impédance d'entrée car le point d'alimentation est déplacé le long de ce côté [8].

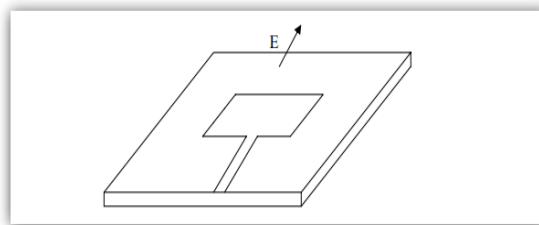


Figure I.2 : patch alimenté par une ligne microruban à travers un bord rayonnant [8].

I.6.3 Alimentation par ligne microruban à travers un bord non rayonnant

La ligne d'alimentation entre en contact avec le patch sur le bord non rayonnant Figure I.3, dans ce cas les calculs sont plus complexes, car les courants de la ligne d'alimentation, sont orthogonaux à ceux du patch [8].

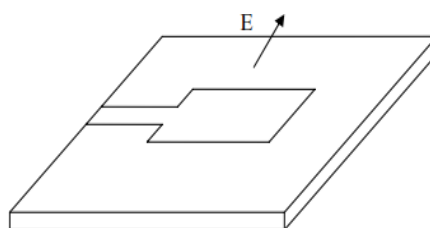


Figure I.3 : patch alimenté par une ligne microruban à travers un bord non rayonnant [8].

I.6.4 Antenne patch rectangulaire couplée capacitivement à une ligne microruban

Dans ce cas l'élément rayonnant est couplé capacitivement à la ligne microruban injectée dans le substrat Figure I.4. L'utilisation de substrats différents entre ligne d'excitation et antenne peut améliorer la largeur de la bande passante de l'antenne [8].

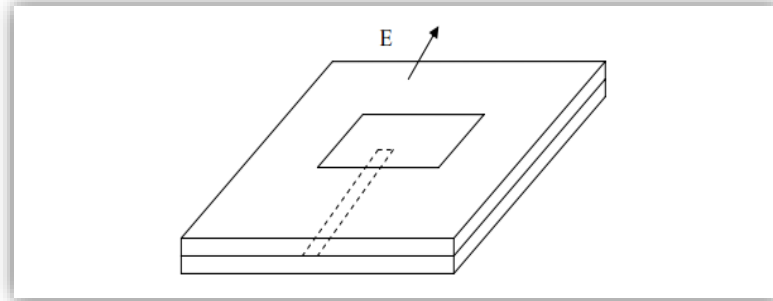


Figure I.4: Patch couplé capacitivement à une ligne microruban [8].

I.6.5 Alimentation coaxiale

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation des ondes est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans (Figure I.5). Dans ce cas le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, alors que le conducteur externe est relié au plan de masse. L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication. Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement [8].

De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué.

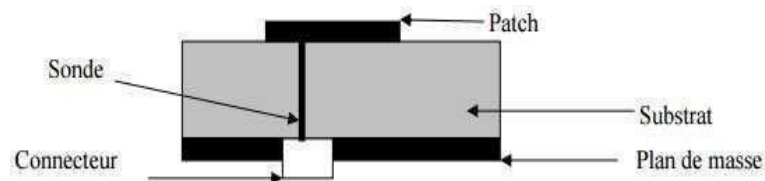


Figure I.4 : antenne microruban alimentée par sonde [8].

I.6.6 Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indiqué sur la Figure I.6. La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de

masse. Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectriques ont utilisés pour le Substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch. Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Ce pendant elle offre l'élargissement de la bande passante [8].

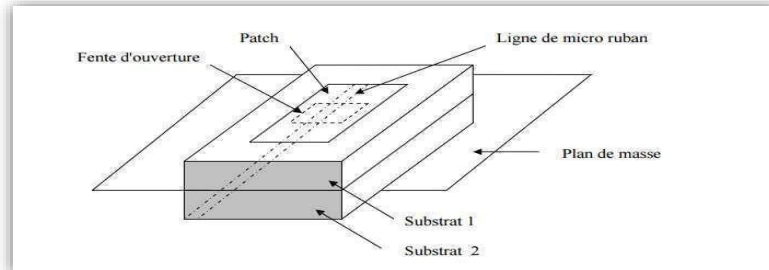


Figure I.6:Alimentation couplée par ouverture [8].

I.7 Méthodes d'analyses des antennes

Il existe plusieurs méthodes pour analyser les antennes imprimées, et elles peuvent être classées en deux méthodes, les méthodes analytiques et les méthodes numériques. Lorsque les antennes à analyser ont des formes géométriques simples, elles peuvent être facilement modélisées par des méthodes analytiques mais lorsque leur forme devient complexe et intuitif, alors il faut utiliser des méthodes numériques [9].

I.7.1 Les méthodes analytiques

I.7.1.1 Le modèle de la ligne de transmission

Il a été indiqué plus tôt que le modèle de ligne de transmission est le plus simple de tous, mais qu'il donne les résultats les moins précis et qu'il manque de polyvalence.

Une antenne micro ruban rectangulaire peut être représentée comme un réseau de deux ouvertures (fentes) étroites rayonnantes, chacune de largeur W et de hauteur h , séparées par une distance L fondamentalement le modèle de ligne de transmission représente l'antenne micro ruban par deux fentes. Séparés par une basse impédance Z , ligne de transmission de longueur L . Voir la Figure I.7 [10].

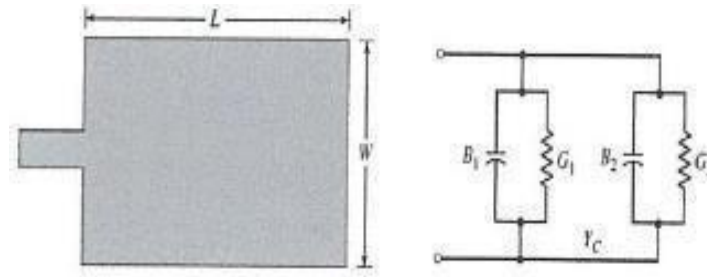


Figure I.7:Modèle de la ligne de transmission [10].

I.7.1.2 Modèle de la cavité

Bien que le modèle de ligne de transmission discuté dans la section précédente soit facile à utiliser, il présente certains inconvénients inhérents. Plus précisément, il est utile pour les patchs de conception rectangulaire et il ignore les variations de champ le long des bords rayonnants. Ces inconvénients peuvent être surmontés en utilisant le modèle de cavité. Un bref aperçu de ce modèle est donné ci-dessous (Figure I.8). Dans ce modèle, la région intérieure du substrat diélectrique est modélisée comme une cavité délimitée par des parois électriques en haut et en bas. La base de cette hypothèse est les observations suivantes pour les substrats minces $\lambda \ll h$ [11].

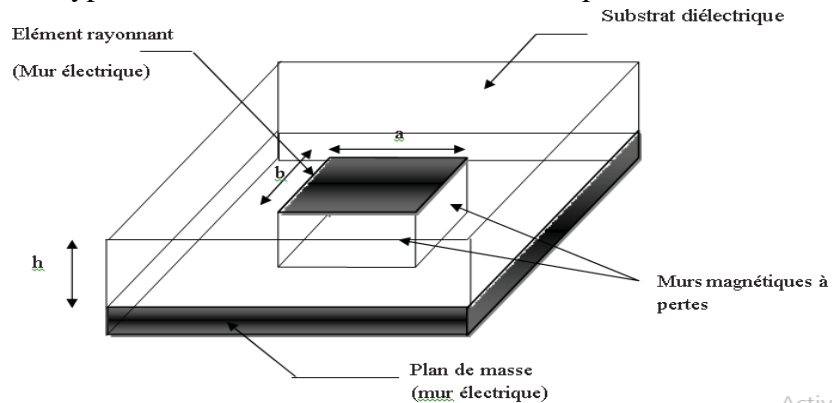


Figure I.8:Modèle de la cavité [12].

En alimentant l'antenne, une distribution de charge apparaît sur la surface supérieure et intérieure du Patch et sur la surface supérieure du plan de masse (Figure I.9). Cette distribution de charge est contrôlée par deux mécanismes : un mécanisme attractif entre les charges opposées sur le côté inférieur du Patch et le côté supérieur du plan de masse et un mécanisme répulsif entre les charges de même nature sur la surface inférieure du patch provoquant ainsi un déplacement de charges vers la surface supérieure du Patch. En raison de ce mouvement de charges, les courants circulent sur les deux faces du patch. L'hypothèse $L > h$ fait que le mécanisme attractif est le mécanisme dominant et par conséquent, moins de courant circulera sur la surface supérieure du Patch [12].

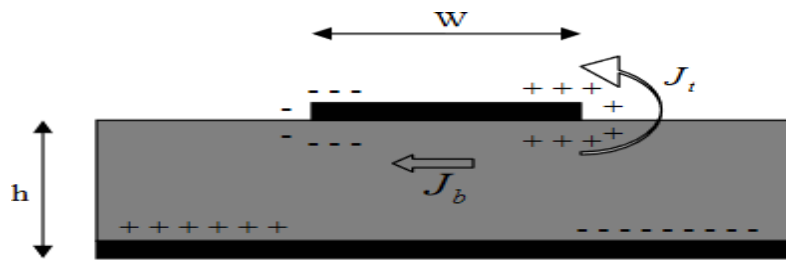


Figure I. 8 : distribution des charges et création de courant dans une antenne patch [11][10] .

I.7.2 Méthodes numériques exactes (full-wave)

I.7.2.1 La méthode des moments (MOM)

L'une des méthodes, qui fournit l'analyse pleine on de pour l'antenne patch microruban, est la méthode des moments. Dans cette méthode, les courants de surface sont utilisés pour modéliser le patch microruban et les courants de polarisation en volume sont utilisés pour modéliser les champs dans la dalle diélectrique. Il a été montré par Newman et Tulyathan comment une équation intégrale est obtenue pour ces courants inconnus et en utilisant la méthode des moments, ces équations intégrales de champ électrique sont converties en équations matricielles qui peuvent ensuite être résolues par diverses techniques d'algèbre pour fournir le résultat [11]. Malgré les avantages de cette méthode, elle souffre de quelques inconvénients tels que [13]:

- La précision exigée pour déterminer les éléments de la matrice impédance.
- Le temps de calcul qui est important.
- L'existence des solutions parasites.

I.7.2.2 Méthodes des différences finies

Dans la famille des méthodes aux différences finies, on trouve les FDTD (Finite Time Difference Domain) qui a pour point de départ, le discriminant direct des équations locales de Maxwell. Le développement de la puissance de calcul des ordinateurs a conduit à un regain d'intérêt pour ces méthodes aux différences finies. De plus, afin de réduire le volume de calcul, d'autres méthodes hybrides ont été développées. Parmi celles-ci, la Méthode de Ligne MoL (Method of Line) qui est une combinaison de la méthode des différences finies dans le domaine fréquentiel avec une méthode analytique [13]. L'avantage de cette méthode est la formulation relativement facile, la possibilité de simuler sur une large bande de fréquences, les calculs s'effectuant directement dans le domaine temporel. Cette méthode présente une grande capacité de diversité de calcul permettant ainsi de modéliser l'antenne requise [14].

I.7.2.3 Méthodes des éléments finis(FEM)

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation nodale par sous-domaine. La région de diffusion est divisée en un nombre fini, généralement un grand nombre de sous-domaines de forme triangulaire appelés éléments. Les fonctions approximatives de chaque élément doivent respecter les conditions de continuité entre les différents éléments du champ. En additionnant toutes les équations obtenues sur chaque élément, nous obtenons un système linéaire avec de nombreuses inconnues où il existe des équations qui sont résolues par des méthodes numériques appropriées, et la taille de la matrice correspond au nombre total de nœuds [15]. Cette méthode permet de calculer, en chaque point des éléments divisant l'espace, les champs électriques qui minimisent la fonction d'énergie, cette dernière s'écrit sous forme matricielle [16]:

$$[J] = [Y] \cdot [E] \quad (\text{Equ.1.5})$$

L'avantage de la méthode des éléments finis est lié au fait que la forme tétraédrique et le contraste des dimensions des cellules primaires caractérisant le volume divisé, donnent au réseau une grande souplesse. Cette méthode permet de simuler des structures géométriques complexes mais avec des ressources informatiques importantes [16].

I.7.2.4 La méthode de la matrice des lignes de transmissions(TLM)

La méthode de la matrice des lignes de transmission TLM permet de distinguer les champs et les courants de la structure étudiée en petits éléments, chacun de ces éléments est considéré comme un ensemble de ligne de transmission et les calculs s'effectuent directement dans le domaine temporel [16]. L'un des points forts de cette méthode est la formulation simple qui ne dépend pas beaucoup de la géométrie de la structure étudiée (ce qui n'est pas le cas pour la méthode spectrale). Elle est facile pour traiter des structures complexes composées de plusieurs matériaux, et particulièrement appropriée pour l'analyse des structures planaires multicouches [16].

I.8 Avantages et limitations des antennes imprimées

Les antennes micro-rubans ont de nombreux avantages comparés aux antennes microondes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100 MHz à 50 GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on cite [17-18]:

- Faible poids, masse et épaisseur
- Encombrement réduit
- Conformations possibles
- Facilité de fabrication

- Rayonnement en polarisation linéaire et circulaire possibles
- Faible coût de fabrication
- Antennes multi bandes, multi polarisations
- Compatibilité avec les circuits hybrides
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne

Cependant, ces antennes ont aussi quelques inconvénients tels que :

- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances de fabrication Faible rendement.
- Facteur de qualité Q élevé.
- Généralement faible gain.
- Faible pureté de polarisation
- Supportent uniquement des faibles puissances (<100 W).
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces dans le substrat diélectrique

I.9 Les applications des antennes imprimées

Les antennes imprimées sont bien connues pour leurs performances et leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. Les avantages de cette antenne imprimée sont de surmonter leurs démerites telles que facile à concevoir, léger etc., les applications sont dans les différents domaines. Certaines de ces applications parmi lesquelles on peut citer [19]: GPS par satellite de positionnement mondial.

- Portable.
- Système de communication personnelle.
- Réseaux locaux sans fil.
- Direct large chat télévision DBS.
- Vidéo cellulaire.
- Diffusion directe par satellite.
- Perception automatique des péages.
- Radar d'évitement des collisions.
- Réseaux informatiques étendus.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu la description des antennes imprimées avec ses caractéristiques, les différentes techniques d'adaptation et d'alimentation. Nous avons cités les différents avantages et limitations des antennes imprimées ainsi que leurs domaines d'applications. En fin, nous avons donné un bref aperçu sur les réseaux d'antenne et leurs propres géométries existantes.

Chapitre II :

***Les antennes miniatures PIF A pour
applications biomédicales***

II.1 Introduction

Les antennes se trouvent maintenant dans les objets du quotidien de tout Tri. De nombreuses applications des télécommunications aux transports Ceux qui ont vu ou ont été causés par un médicament (comme un implant cochléaire). Avec la généralisation des systèmes de communication sans fil Les antennes deviennent de plus en plus petites pour permettre l'intégration dans des espaces plus petits.

Ce chapitre est introductif et montre clairement l'état de l'art sur les antennes miniatures. Après une brève introduction sur les antennes monopole, ensuite une définition sur les antennes ILA, IFA et l'antenne PIFA. Les types et les Caractéristiques radioélectriques des antennes PIF A ainsi que les performances de l'antenne PIFA. Nous aborderons aussi sur les technique de miniaturisation puis la communication sans fils a travers le corps humain dans le domaine médical. Et s'en termine par une petite conclusion.

II.2 Etat de l'art sur les antennes miniatures

Ces dernières années, les télécommunications sans fil connaissent un essor important dans les applications de la vie quotidienne. Avec le développement de la microélectronique et de ses différentes applications, l'antenne miniature est devenue un composant essentiel dans des applications comme les télécommunications (téléphone mobile, GPS), les moyens de transport (capteur de pression pour les pneus d'une voiture) ou encore la médecine (bio télémétrie à base de capsules miniatures implantées). En effet, la miniaturisation des composants électroniques a créé des contraintes sur les dispositifs hautes fréquences et les nouveaux challenges à relever concernent la diminution de l'encombrement, des coûts et surtout de la consommation énergétique, tout en conservant de bonnes performances électriques [20].

Nous pouvons parler d'une antenne miniature lorsque sa taille électrique devient inférieure à la demi-longueur d'onde de travail. Cette miniaturisation provoque une dégradation des performances antennaires et se traduit par une diminution de la bande passante de l'antenne, de son gain réalisé et donc de l'efficacité totale du dispositif antennaire. D'autre part, plus une antenne est miniature, plus elle est sensible à son environnement d'utilisation et sa fréquence de fonctionnement peut être décalée. La miniaturisation d'une antenne résulte donc d'un compromis entre ses dimensions et ses performances [20].

II.2.1 L'antenne monopole

Une antenne monopôle est essentiellement tout type d'antenne d'émission radio sous la forme d'une seule colonne. À première vue, ces types d'antennes ressemblent souvent à une seule pièce, ce qui peut les rendre plus simples, du moins dans leur construction, que les antennes dipôles plus standard, qui sont construites en deux moitiés distinctes. En fait, il y a deux composants importants dans une configuration unipolaire, mais seul le montant ou la tige verticale est visible dans la plupart des cas. Le deuxième composant, un plan de base, est généralement plat et est parfois utilisé pour monter des colonnes. Les monopoles sont généralement moins coûteux à construire et à installer, et bien qu'ils ne soient généralement pas aussi puissants que d'autres options en matière de transmission, ils peuvent être très utiles dans une variété de communications et de réceptions locales. Par exemple, les autoradios les utilisent presque exclusivement, tout comme de nombreux réseaux de téléphonie mobile, en particulier dans les pays en développement [21].

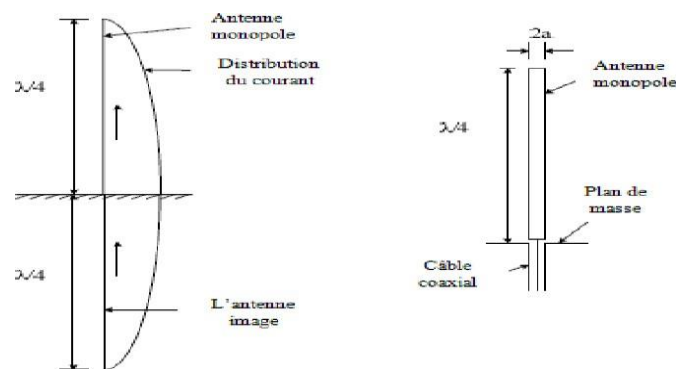


Figure II.1 : antenne monopôle[21].

Il existe deux types de base d'antennes monopôles : solide et planaire.

- Type solide : bien que plus coûteux à produire, il est connu pour avoir une bonne bande passante et est complètement omnidirectionnel.
- Type planaire : c'est le type le plus couramment utilisé et le moins cher qui a également une bonne bande passante, mais la distorsion à des fréquences plus élevées le rend non unidirectionnel. Une antenne plate en forme de croix a été conçue et mise en œuvre ces dernières années pour pallier cette distorsion de fréquence tout en conservant une bonne bande passante. Un monopôle en forme de croix à double fréquence a également été fabriqué et testé dans le but de minimiser davantage la distorsion de fréquence [21].

II.2.2 L'antenne ILA

Se compose d'un monopôle vertical court avec l'ajout d'un long bras horizontal au-dessus. La pulsation de la grotte est presque équivalente au monopôle court avec la résonance provoquée par le fil horizontal posé au-dessus de plans de masse.

La structure ILA est souvent modifiée en ajoutant un autre élément inverseur à l'extrémité du segment vertical pour prendre la forme de l'antenne IFA.

L'antenne PIFA à une variante plate appelée IFA pour l'antenne F inverseurs qui peut être réalisée sur des circuits imprimés.

Le principe reste le même que pour PIFA mais dans deux dimensions. Il y a une fibre rayonnée sous tension à laquelle un court-circuit est appliqué à l'une de ces extrémités.

L'antenne PIFA (Inverting F Antenna) apparaît comme un bon compromis entre l'antenne imprimée quart d'onde et l'antenne IFA. L'ajout d'un élément inverseur derrière l'alimentation crée l'impédance d'entrée d'une antenne, l'inconvénient d'une antenne IFA construite à partir de fils de menace est la plus faible longueur de la bande d'impédance. L'IFA est un élément simple avec une largeur de bande d'impédance inférieure à 2 % de la fréquence de résonance [22].

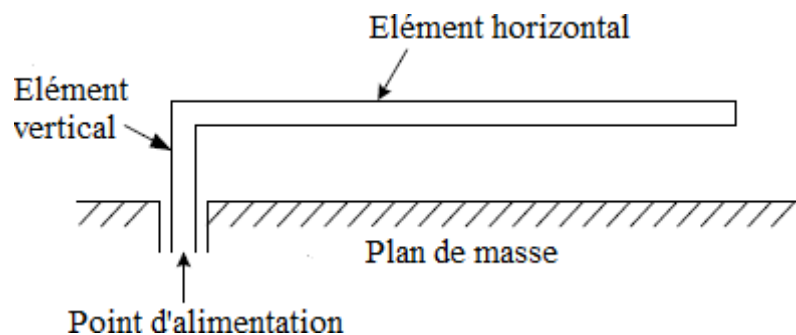


Figure II.2 : structure d'une antenne ILA [22].

II.2.3 L'antenne IFA

L'antenne inversée (antenne F inversée) est un type d'antenne utilisé dans les communications sans fil, en particulier dans les ultrasons et les fréquences micro-ondes. Il se compose d'une antenne unipolaire qui fonctionne en parallèle avec le sol et atterrit à une extrémité. L'antenne est alimentée à partir d'un point intermédiaire à une distance du sol. La conception présente deux avantages par rapport au simple poteau : l'antenne est plus courte et plus serrée, permettant de la contenir dans le cas de l'appareil portable, et peut être impédance

Identique au circuit d'alimentation par le concepteur, lui permettant de rayonner l'énergie efficacement, sans avoir besoin de composants d'appariement étrangers [23].

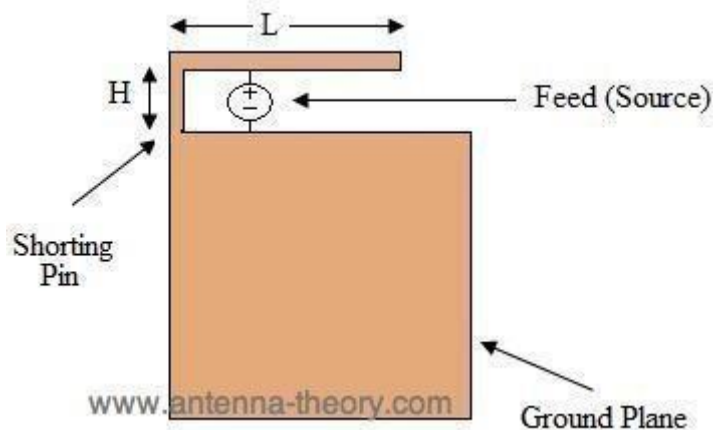


Figure II.3: géométrie de l'antenne F inversée (IFA) [23].

L'antenne F inversée a été conçue dans les années 1950 comme une antenne courbe. Cependant, son utilisation la plus répandue est une antenne de niveau inversé (PIFA) dans les appareils sans fil mobiles pour ses propriétés d'économie d'espace. Les PIFA peuvent être imprimés au format microstrip, une technique largement utilisée qui permet la fabrication de composants RF imprimés faisant partie de la même carte de circuit imprimé utilisée pour installer d'autres composants.

Les IFA sont des variantes d'antenne de patch. Il y a beaucoup de variantes de ceci, et d'autres formes de F inversé, qui mettent en œuvre des antennes à large ou multi-bande. Les techniques comprennent les résonances couplées et l'ajout d'ouvertures [23].

II.2.4 L'antenne PIFA

L'antenne PIFA est un type d'antenne en F inversé équipée d'une plaque supérieure au lieu d'un seul fil.

Les antennes patch et les antennes PIFA sont similaires en ce sens qu'elles ont une bande passante intrinsèquement étroite. Cependant, la combinaison de différentes techniques, telles que des éléments parasites mis à la terre et des découpes dans la plaque, peut étendre la bande passante de l'antenne PIFA. De plus, l'utilisation de ces techniques permet de modifier la taille de la plaque supérieure, permettant des antennes plus petites et réduisant l'encombrement de la carte [24].

L'antenne PIFA se compose d'une plaque rayonnante d'un quart de longueur d'onde, alimentée à une extrémité et connectée à un plan de masse et généralement un court-circuit (plan, languette ou fil).

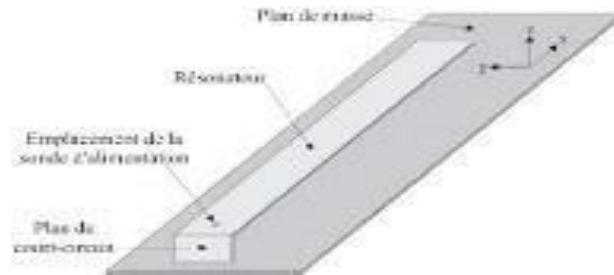


Figure II.4 : antenne PIFA [24].

Les principaux avantages de ces antennes sont leur compacité et leur faible coût de fabrication. Ils peuvent être réalisés en métal découpé, en métal moulé en matière plastique ou encore sur un circuit souple. De plus, leurs performances peuvent être améliorées grâce à l'ajout de charges judicieusement placées. Dans l'étude réalisée sur les téléphones portables, les antennes de type PIFA avaient une atténuation relativement élevée dans la main, mais à l'extrémité inférieure.

Ce type d'antenne est très courant dans l'industrie des terminaux mobiles, comme les systèmes GPS (1,575 GHz) ou les téléphones portables équipés de la technologie 3G (2,11 - 2,17 GHz), en L'antenne PIFA est très appréciée pour sa compacité et sa simplicité d'utilisation [25].

II.2.4.1 Définition des antennes PIFA

L'antenne PIFA (Plane Inverted Antenna) est une structure potentielle pour réaliser des antennes multibandes. Par rapport à l'antenne demi-onde, l'antenne PIFA ou l'antenne quart d'onde est de taille réduite. L'antenne PIFA est obtenue en plaçant un court-circuit (de type plan, filaire ou lame) entre le résonateur demi-onde et le plan de masse, à l'endroit exact où le champ électrique s'annule pour le mode fondamental. Ainsi, cela permet de supprimer la moitié du résonateur et donc d'avoir une résonance en $\lambda/4$ [26].

L'antenne quart d'onde est de taille réduite par rapport à l'antenne demi-onde. La réduction de taille est obtenue par un court-circuit placé le long de la ligne où le champ électrique entre la masse rayonnée et la masse est nul pour le mode de base de l'antenne imprimée.

L'antenne PIFA est obtenue en réduisant la largeur du court-circuit plan de l'antenne d'un quart d'onde. Par conséquent, cette antenne est plus petite que la taille d'une antenne quart d'onde. La largeur du bloc de rayonnement permet d'ajuster la fréquence de résonance ainsi que la forme du diagramme de rayonnement.

Dans les applications telles que les systèmes mobiles, le plan de masse de ce type d'antenne est considérablement réduit ce qui pour effet de rendre le diagramme de rayonnement plus omnidirectionnel [26].

II.2.4.2 Les types d'antennes PIFA

Il existe deux types des antennes PIFA sont :

II.2.4.2.1 Les antennes PIFA Multi –Bande

Il s'agit d'une antenne qui fonctionne dans deux bandes de fréquences ou plus, ce qui fait que l'antenne est accordée pour toutes les fréquences. Cette adaptation est déterminée par une réflectance ou rapport de réflexion statique à l'entrée de l'antenne inférieure à une valeur fixée. La préoccupation de l'antenne PIFA MULTI-BANDE était l'utilisation d'éléments rayonnants indépendants pour chaque bande [27].

II.2.4.2.2 Les antennes PIFA bi –bande

C'est une antenne qui assure un fonctionnement précis à l'angle du plan, elles sont conçues dans le but de satisfaire les utilisateurs qui ont besoin d'une combinaison d'applications sur le même appareil [27].

II.2.4.3 Caractéristiques radioélectriques des antennes PIFA

II.2.4.3.1 Distribution du champ électrique

La composante dominante du champ électrique E_z est égale à zéro au plat de court-circuit tandis que l'intensité de ce champ au bord opposé de l'élément planaire est sensiblement grande. Pour les champs E_x et E_y l'élément pointue, qui correspond à la source d'alimentation. Signifie que la ligne électrique de la force est dirigée de la source d'alimentation vers le plan de masse. Pour les champs E_x et E_y l'élément pointue, qui correspond à la source d'alimentation. Signifie que la ligne électrique de la force est dirigée de la source d'alimentation vers le plan de masse. Ces champs limites sont la source de rayonnement dans PIFA [28].

II.2.4.3.2 Distribution du courant

PIFA a un très grand courant circulant sur la face inférieure de l'élément plat et le plan par rapport au champ sur la face supérieure de l'élément. En raison de ce comportement, l'antenne PIFA est le meilleur candidat en ce qui concerne l'influence des objets extérieurs sur les caractéristiques de l'antenne.

La répartition du courant de l'antenne PIFA varie avec différentes largeurs du plan de court-circuit ; il culmine près du court-circuit et diminue à mesure qu'il s'en éloigne [28].

II.2.4.4 Les performances des antennes PIFA

Ils sont exprimés en fonction des paramètres suivants : la forme géométrique de la plaque de rayonnement l et W , la hauteur de la plaque de rayonnement H , l'emplacement et la structure du système d'alimentation, l'emplacement et les dimensions du court-circuit. (w) et le matériau servant de support à l'élément rayonnant [29].

II.3 Les techniques de miniaturisation

Une antenne miniature peut être obtenue en utilisant diverses techniques, on voit que le but de la miniaturisation est de réduire la bande de fréquence[30]. Les techniques de miniaturisation utilisées par le concepteur d'antennes sont :

II.3.1 Modification de l'élément rayonnant

En peut les trouver en plusieurs formes :

- En forme triangulaire
- En forme de nœud-papillon
- Méandres verticaux ou repliement de la structure
- Méandres latéraux ou verticaux très étroits



Figure II.5: les méandres latéraux [30].

II.3.2 Ajout de court-circuit

Une des méthodes les plus utilisées dans le domaine des antennes imprimées consiste à introduire un ou plusieurs courts-circuits entre l'élément rayonnant et le plan de masse. En observant la distribution du champ électrique du premier mode résonant ou mode fondamental TM_{110} , dans la cavité virtuellement délimitée par des murs électriques et magnétiques [31].

La figure II.4 montre la cartographie du champ dans la cavité :

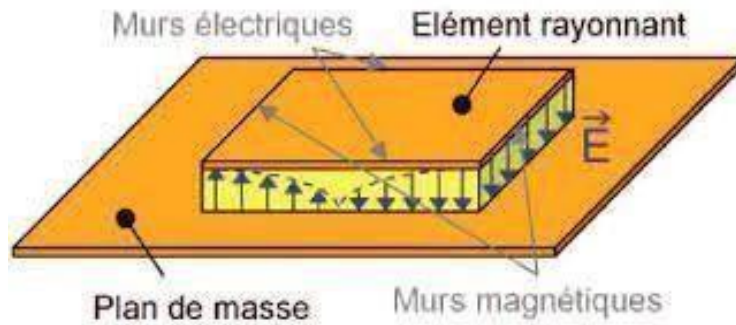


Figure II.6: cartographies du champ dans la cavité d'une antenne micro-ruban [31]. On voit que le champ électrique s'annule au milieu de la longueur de résonance. Cela signifie qu'en positionnant un mur électrique parfaite dans ce plan vertical, la répartition des lignes équipotentielles n'est pas affectée. Ainsi, les dimensions de la structure peuvent être réduites de moitié tout en gardant la fréquence de résonance inchangée.

En pratique, il est possible de court-circuiter l'antenne en son centre avec un mur métallique vertical qui le relie au plan de masse [31]. Il en résulte une antenne ayant une longueur physique $\lambda/4$ dite antenne quart d'onde (réduction de dimension de 50 %). Elle porte le nom de Planar Inverted-F Antenna ou PIFA [32]. Cette antenne a déjà fait l'objet de nombreuses études. Comme le montre la figure II.5 :

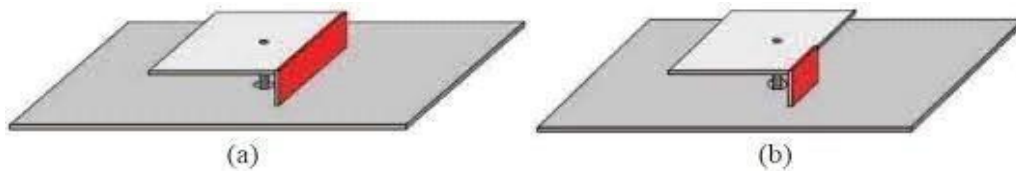


Figure II.7 : PIFA avec court-circuit [32].

II.3.3 L'insertion des fentes dans l'élément rayonnant

L'une des techniques mises en œuvre pour allonger le chemin électrique d'un courant électrique consiste à créer des fentes dans la structure rayonnante. Le principe utilisé n'est pas seulement de forcer le passage du courant à travers les fentes en série et ainsi d'allonger leur trajet [33].

- **Fente demi-onde (non débouchantes) et Fente quart d'onde (débouchantes):**

La fréquence de résonance d'une telle fente est donnée par :

$$f_r = \frac{c}{2l} \tag{Equ.II.1}$$

Avec : C : la vitesse de l'allumière.

L : la longueur de fente.

II.3.4 Repliement des éléments rayonnant.

Le repliement est également une technique pour apporter des modifications à la forme originale de l'antenne. Ceci ayant pour objectif de réduire son encombrement. Deux configurations sont [33]:

- le chargement capacitif avec ajout d'un élément vertical en bout d'élément rayonnant
- le chargement capacitif avec repliement de l'élément

Une fois encore, le principe de réduction consiste à perturber la trajectoire des courants réduisant ainsi les fréquences de résonance. Non seulement le repliement du plateau rayonnant réduit le volume de la structure mais il crée en plus un effet capacitif qui contribue aussi à la diminution des fréquences de résonance. Cet effet capacitif peut se contrôler en modifiant certains paramètres de l'antenne comme le stipule l'équation

$$c = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S}{h} \quad (\text{Equ.II.2})$$

Avec : • ϵ_r : est la permittivité relative.

- S : c'est l'aire des surfaces de métal en regard l'une de l'autre.
- h : la distance entre les deux plaques de métal.

Le fait d'augmenter la distance entre les deux plaques de métal et/ou d'augmenter la surface de métal en regard l'une de l'autre, augmentera en parallèle la valeur de la capacité et réduira ainsi la fréquence de résonance. Cependant, il faut rester prudent, en augmentant la capacité équivalente du circuit, la bande passante et l'efficacité risquent d'être dégradées [33].

II.4 Application biomédicale

II.4.1 Communications sans fils à travers le corps humain dans le domaine médical

La communication sans fil à travers le corps humain nécessite de minimiser la taille de l'antenne pour bien avoir une liaison sans fil efficace. L'antenne c'est la partie intégrée du circuit médical, la forme de l'antenne utilisée dépend de la forme du circuit qui prend sa forme à partir des organes du corps ou le lieu d'utilisation [34].

II.4.2 Modèle du corps humain.

Le corps humain est un ensemble complexe, parfaitement organisé, constitué de cellules spécialisées qui fonctionnent ensemble pour assurer les fonctions spécifiques nécessaires au maintien de la vie [34]. Afin de mieux apprécier les grandes différences entre les modèles du corps humain disponibles pour l'analyse numérique, il est utile de les classer

en fonction de : la géométrie, la composition, la dimension et l'emplacement de l'implant. Chacune de ces trois classes comprend plusieurs variations.

- **Géométrie**

Géométries canoniques : sont souvent utilisées lors de la conception d'antenne implantée. De manière tout à fait intéressante, un cylindre avec pertes a également été utilisé dans les premières validations expérimentales des études théoriques sur la propagation des ondes EM à travers un milieu avec pertes. Des géométries sphériques ont également été utilisées pour modéliser l'ensemble du corps, mais on trouve leur application principale dans des fantômes de tête équivalents. L'utilisation de telles géométries simplifiées est très courante car elles permettent de réduire le temps de simulation et d'utiliser des formules analytiques [34].

- **Composition**

Les géométries présentées sont considérées comme homogènes ou constituées de plusieurs tissus biologiques. Par exemple, les fantômes homogènes et multicouches sont généralement constitués de trois matériaux, à savoir, la peau, le muscle et l'os. Chaque couche possède ses propres caractéristiques qui sont : Perméabilité magnétique :

- **Dimension et positionnement de l'implant**

En plus de la géométrie et de la composition des fantômes, la dimension du modèle de corps sélectionné est une variable très importante. Par exemple, les modèles les plus détaillés sont différents par les hauteurs, la constitution physique et la masse. En outre, des méthodes pour développer des fantômes dépendants du patient sont récemment disponibles.

II.4.3 Bandes de fréquence pour application biomédicale.

On sait que Les antennes classiques fonctionnent dans l'espace sans limitations est sans conditions spéciales contrairement aux antennes implantables sur le corps humain qu'elle peut être soumise à plusieurs conditions comme la Réduction, la sécurité des patients, la durée de vie des circuits implantés et la Capacité de communication [35].

La réduction est l'une des exigences fondamentales pour les dispositifs biomédicaux, on peut construire des circuits implantables en utilisant CMOS grâce au développement de systèmes intégrés qui seront très petits et appropriés, Ces dispositifs seront également implantables et fonctionneront à basse fréquence.

Généralement pour l'implant médical la bande de service de communication est de (402-405 MHz) ou bande de service de radiocommunication pour appareils médicaux

(MedRadio, 401MHz-406MHz), Est dans ce cas la miniaturisation des antennes sera le défi le plus difficile.

On considère que le substrat diélectrique à haute permittivité est le bon moyen pour minimiser les dimensions d'antenne implantable. Est aussi considéré comme cause de minimise la longueur d'onde, est donc causer le passage de résonance a une fréquence plus bas [35].

Le service de radiocommunication des instruments médicaux (MedRadio) se trouve dans (401-406, 413-419, 426-432, 438).

Les spectres MedRadio est utilisé a des fins diagnostiques et thérapeutique dans les dispositifs portés sur un corps, par exemple les dispositifs MedRadio comprennent, stimulateur cardiaque est plusieurs organismes ainsi que le Médical Body Area Networks (MBANs) qui sont de faible puissance par rapport au compteur implanté sur le corps qui est contrôlé par un dispositif de moyeu fonctionnent dans la bande 2360-2400MHz.

La signification de la bande de fréquence de l'industrielle scientifique et médicale c'est l'ISM qui est appliquer dans les domaines de diathermie médicale est le processus de chauffage etc....

L'absence de protection pour l'ISM oblige l'équipement de communication qui marche avec ISM de tolérer toute les interférences entre eux [35].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux antennes PIFA, qui représentent un type unique aux antennes miniatures et adapté à une variété d'applications En communication sans fil, nous avons fait une présentation sur les antennes PIFA. Définition et son type. Également avec des propriétés sans fil, diverses technologies pour leur miniaturisation. Ce chapitre a également introduit la technologie de pointe. Expliquer l'application des antennes PIFA dans le domaine de la biomédecine utilisant le corps L'humain comme milieu reproducteur à travers sa modélisation et ses propriétés.

Chapitre III :

Simulation d'antennes bio-implantables

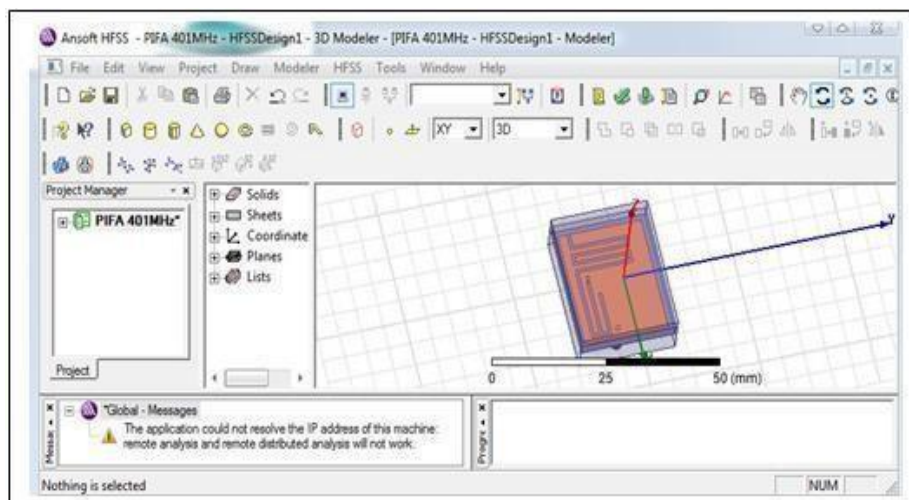
PIFA

III.1 Introduction

Après l'étude théorique des antennes planaires PIFAs qui a fait l'objet du chapitre précédent de ce mémoire ,on s'est consacré dans le présent chapitre à la conception et l'étude de trois structures antennes PIFAs , l'une est une antenne PIFA mono-bande qui fonctionne dans la bande Med Radio avec une fréquence de résonance de 401MHz et la deuxième est une antenne PIFA bi-bandes travaillant dans les deux bandes MedRadio et ISM avec les deux fréquences de résonances 401MHz et 915MHz respectivement et la dernière est une antenne PIFA tri-bandes travaillant dans les trois bandes MedRadio et ISM avec les trois fréquences de résonances 401MHz et 915MHz et 2400 MHz respectivement. Le but de cette étude est de calculer les caractéristiques électromagnétiques d'antennes en termes de coefficient de réflexion (S_{11}),et diagramme de rayonnement. L'analyse de ces trois structures d'antennes est effectuée en utilisant le logiciel commercial de modélisation électromagnétique Ansoft HFSS respectivement.

III.2 Présentation du logiciel Ansoft HFSS

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulation) v13.0 d'Ansoft Corporation est un logiciel commercial qui calcule des champs électromagnétiques dans le domaine fréquentiel en résolvant localement les équations de Maxwell. Pour cela, il faut construire des objets en trois dimensions et leur assigner des caractéristiques (type de matériau, taille, épaisseur, Il est également nécessaire de spécifier les sources électromagnétiques. Il est possible de paramétrer le système et de faire varier ces paramètres lors de la simulation. L'un des intérêts de HFSS est sa capacité de donner directement les paramètres S, Y, Z en fonction de la fréquence. La(FigureIII.1) représente l'interface graphique de ce simulateur HFSS.



FigureIII.1: interface graphique du simulateur HFSS

III.3 Antenne PIFA Mono bande

Les antennes implantables sont conçues pour fonctionner dans des bandes de fréquences spécifiques, à partir de ce point, nous avons conçu et simulé une antenne planaires en F inversé (PIFA) mono-bande avec des géométries miniaturisées, qui a été spécifiquement proposé pour fonctionner dans la bande de fréquences de service de radiocommunications pour dispositifs médicaux "Med Radio" de 401 MHz à 406 MHz.

III.3.1 Description de la structure

La structure proposée de l'antenne PIFA mono-bande simulée est présentée par la figure (III.2). Elle est composée d'un plan de masse, d'un patch et d'une alimentation coaxiale qui sont à base de cuivre (Copper) et d'un substrat en Rogers RT/duroid O6010/6010 ($\epsilon_r=10.2$, $\tan\delta=0.0023$) d'épaisseur de 2.5 mm. Le patch est placé à une hauteur de 1.6 mm du plan de masse et les deux sont connectés avec une broche de court-circuit qui aide à réduire la taille de l'antenne. Douze slots sont également découpés du patch afin d'avoir une fréquence qui fonctionne dans la bande Med-Radio (401 MHz-406 MHz). Le câble coaxial est normalisé à une impédance de 50 Ω . Le tableau (III.1) regroupe les dimensions des différentes fentes.

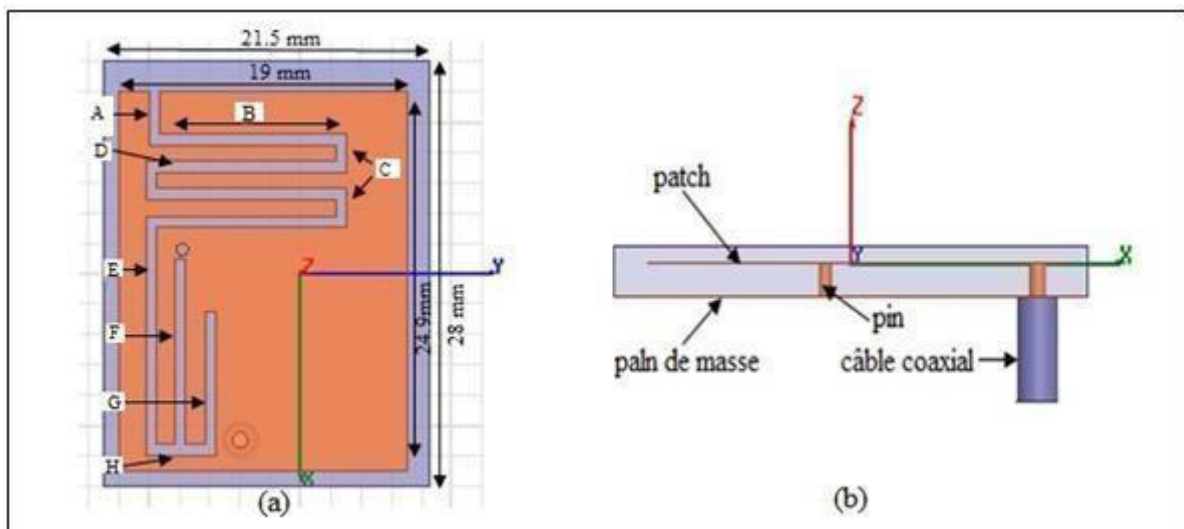


Figure III.2 : géométrie de l'antenne PIFA mono-bande, (a) ; vue de Dessus, (b) ; vue de cote

Les grandeurs	La longueur (mm)
A	3.5
B	13
C	1.8
D	13.2
E	14.4
F	12.2
G	8.8
H	4.6

Tableau III.1: Paramètres géométrique de l'antenne PIFA mono-bande

III.3.2 Résultats de simulation

III.3.2.1 Coefficient de réflexion

La figure (III.3) représente le coefficient de réflexion, à la fréquence de 401MHz, la valeur de ce coefficient égale à -17.48 dB ($< -10\text{dB}$), donc il présente une bonne adaptation.

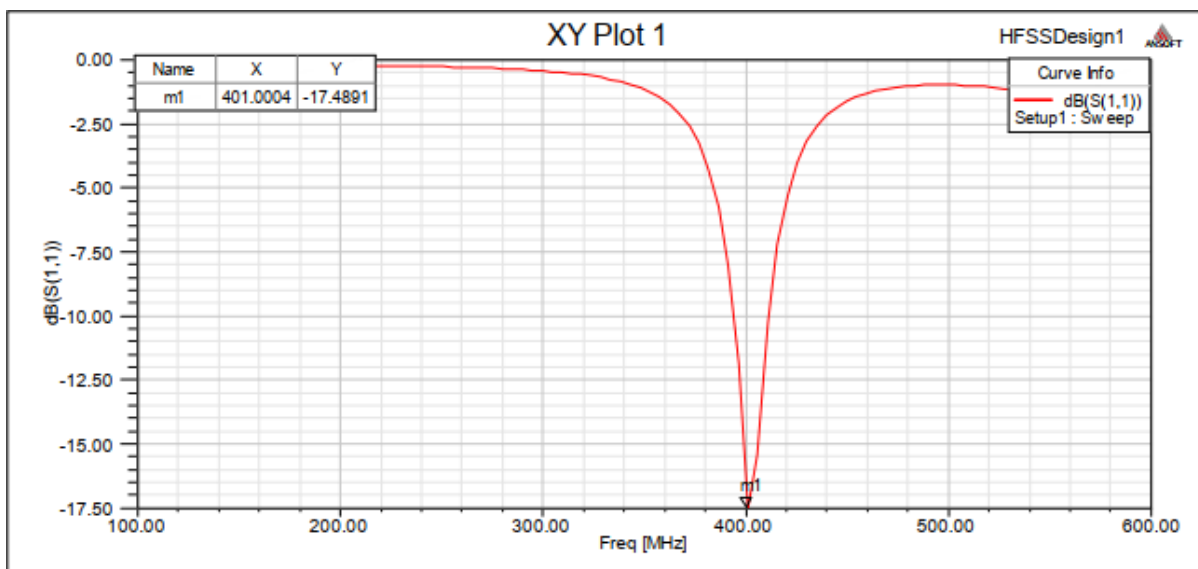


Figure III .3 : coefficient de réflexion (s11) de l'antenne PIFA mono-bande à la fréquence 401 MHz

III.3.2.2 Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement de l'antenne sont simulés dans les plans du champ électromagnétique (y-z) à la fréquence 401 MHz comme le montre la figure (III.4), On peut observer que l'antenne a un diagramme de rayonnement bidirectionnel dans les deux plans ($\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$).

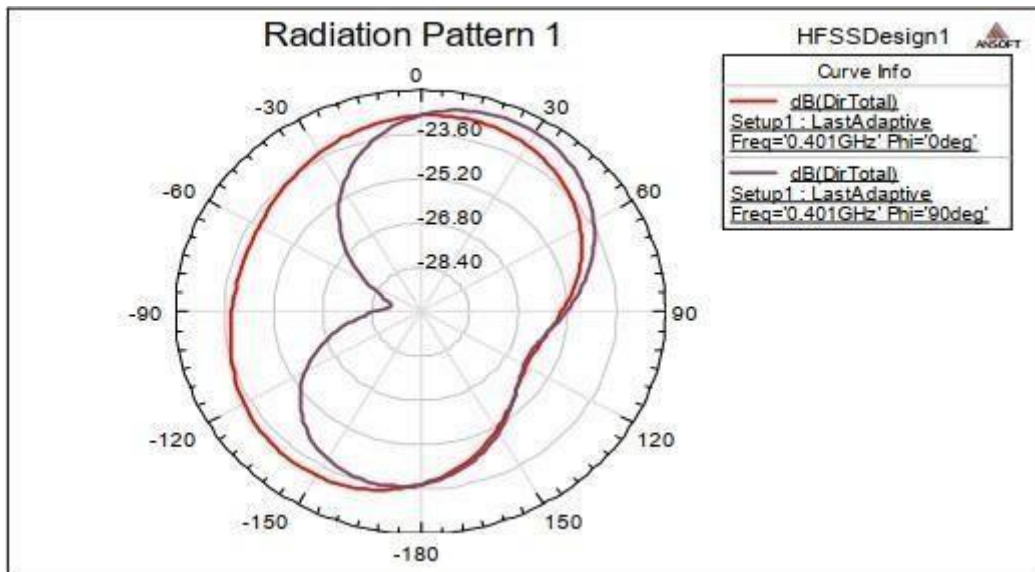


Figure III.4: diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA mono-bande en 2D pour
Pour $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$.

Le diagramme de gain total simulé de l'antenne implantable PIFA mono-bande à la fréquence de 401 MHz est présenté sur la figure (III.5). Ce gain atteint une valeur maximale de -28 dB dans la bande MedRadio (401MHz-406MHz).

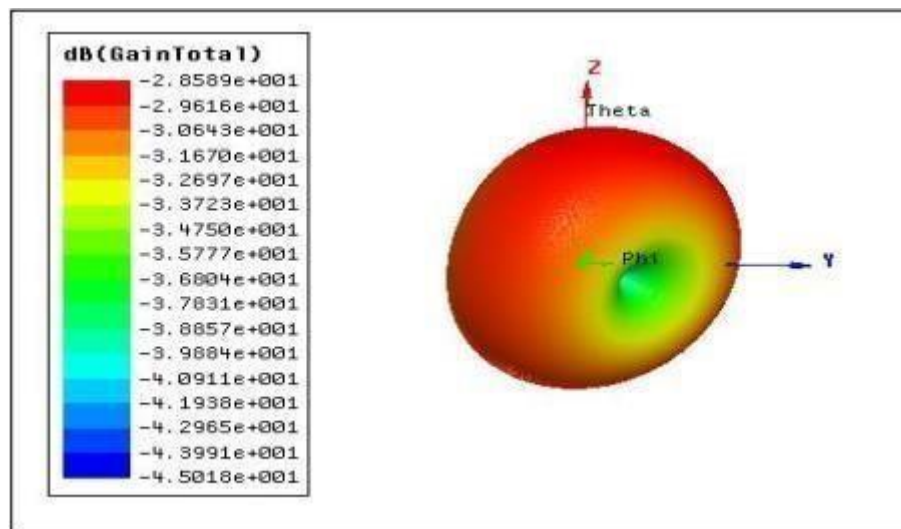


Figure III.5: gain total de l'antenne PIFA mono-bande en 3D.

III.3.2.3 Distribution du courant

La distribution du champ électrique de l'antenne proposée à 401 MHz est illustrée par la figure (III.6). Selon cette figure on remarque que le courant sur le patch a une amplitude maximale près des fentes supérieures et de pin du court-circuit. Alors, on peut conclure que les fentes supérieures jouent un rôle critique sur l'occurrence des performances de l'antenne dans la bande Med Radio.

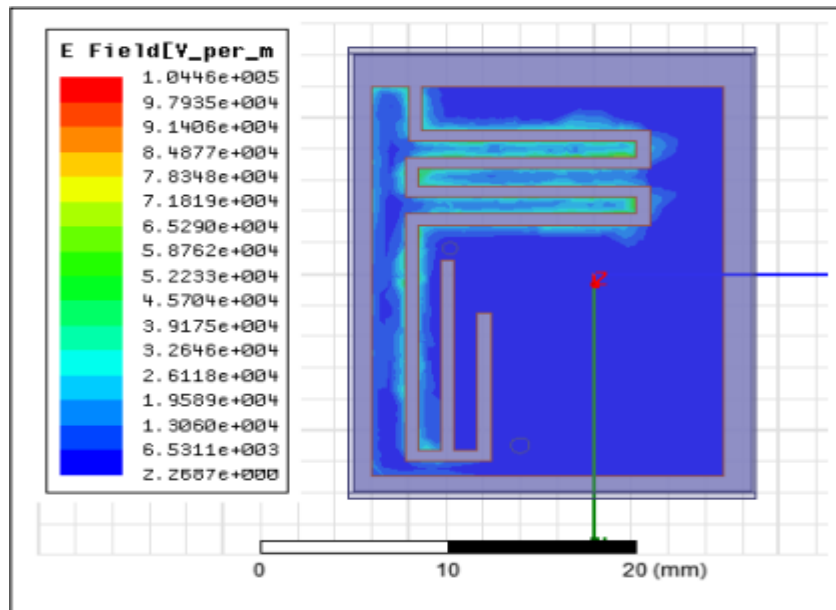


Figure III.6: distribution du champ pour l'antenne PIFA mono-bande à $F=401\text{MHz}$

III.3.2.4 Impédance d'entrée

La figure (III.7) montre la partie réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée simulée de l'antenne PIFA mono-bande dans la bande (Med Radio). Nous pouvons observer à partir de ces courbes que pour la fréquence 401MHz , l'impédance d'entrée est $48,46\ \Omega$.

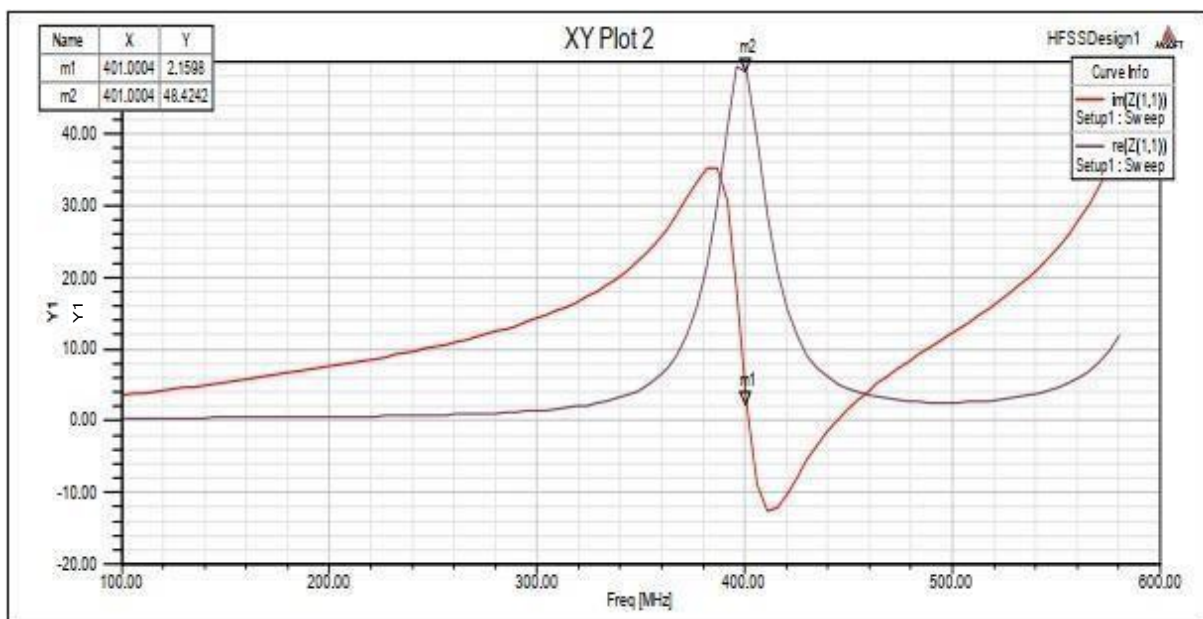


Figure III.7 : impédance d'entrée d'antenne PIFA mono-bande.

III.4 Antenne PIFA bi-bande

L'antenne planaires en F inversé "PIFA" bi-bande présentée dans cette partie prend en charge à la fois la communication d'informations sans fil et la transmission d'énergie sans fil sur la bande de radiocommunication des dispositifs médicaux (MedRadio, 401-406 MHz) et les bandes industrielles, scientifiques et médicales (ISM, 902-928 MHz).

III.4.1 Description de la conception

Nous avons conçu cette antenne à partir d'antenne PIFA mono-bande simulée précédemment, dans le but d'un fonctionnement bi-bande. Elle a été conçue et optimisée sous le logiciel HFSS. Sa structure et sa géométrie sont présentées sur la figure (III.8) ((a)-(b)). L'antenne est réalisée sur un substrat de type Rogers RT/duroid O6010/6010, LM (10tm) de constante diélectrique égale à 10,2 et d'épaisseur de 2.5 mm. Elle est alimentée par un câble coaxial.

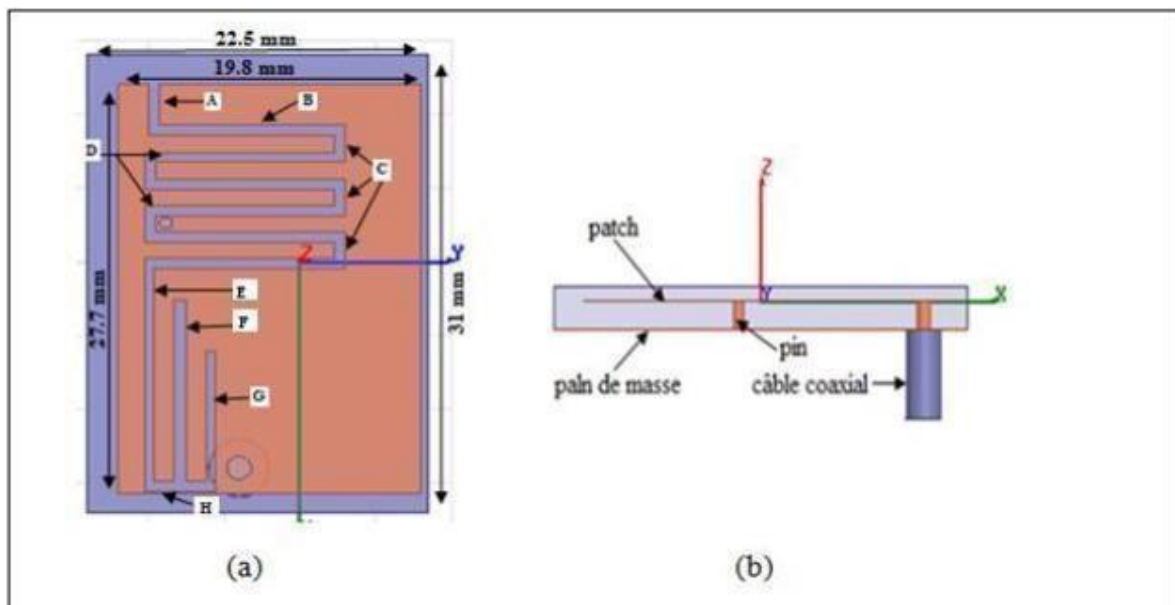


Figure III .8: géométrie de l'antenne PIFA bi-bande,(a).Vue de dessus,(b).Vue de côté

Les grandeurs	La longueur (mm)	La largeur (mm)
A	3.5	0.7
B	13	0.7
C	1.8	0.7
D	13.2	0.7
E	14.4	0.6
F	12.2	0.862
G	8.8	0.7
H	4.6	0.7

Tableau III.2: paramètres géométriques de l'antenne PIFA-bi bande.

III.4.2 Résultats de simulation

III.4.2.1 Coefficient de réflexion

Les résultats des paramètres S_{11} de l'antenne PIFA bi-bande sont illustrés sur la figure III.13 dans une gamme de fréquence [0.3 -2.2 GHz]. D'après cette figure (III.9), le pic correspond à la fréquence de résonance $f = 401$ MHz est de l'ordre de -22.96 dB, et celui qui correspond à la fréquence de résonance $f = 915$ MHz est de l'ordre de -21.083 dB. Ceci confirme les bons résultats obtenus en termes d'adaptation.

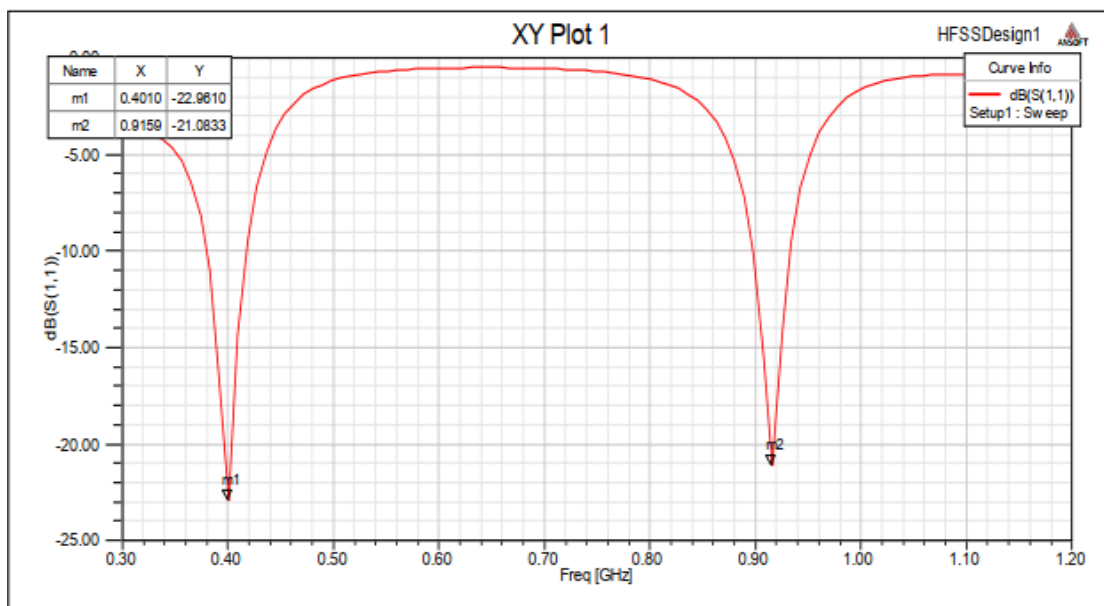


Figure III.9 : coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne PIFA bi-bande.

III.4.2.2 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement de l'antenne tracé à la fréquence de 401MHz est représenté par la figure (III.10). On remarque que le diagramme de rayonnement à la fréquence de 401 MHz est bidirectionnel dans les deux plans $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$.

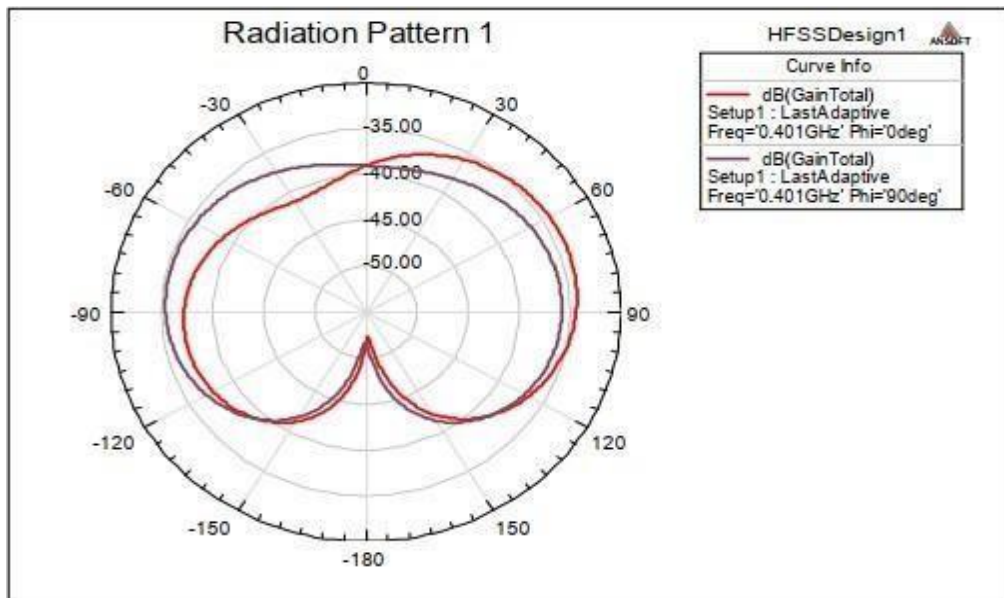


Figure III.10: diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne PIFA bi-bande à la fréquence de résonance 401MHz (a) $\phi=90^\circ$, (b) $\phi=0^\circ$
 Le diagramme de rayonnement en 3D pour la fréquence 401 MHz est représenté sur la figure (III.11). Nous constatons que l'antenne a un gain indirectif pour les différentes fréquences choisies.

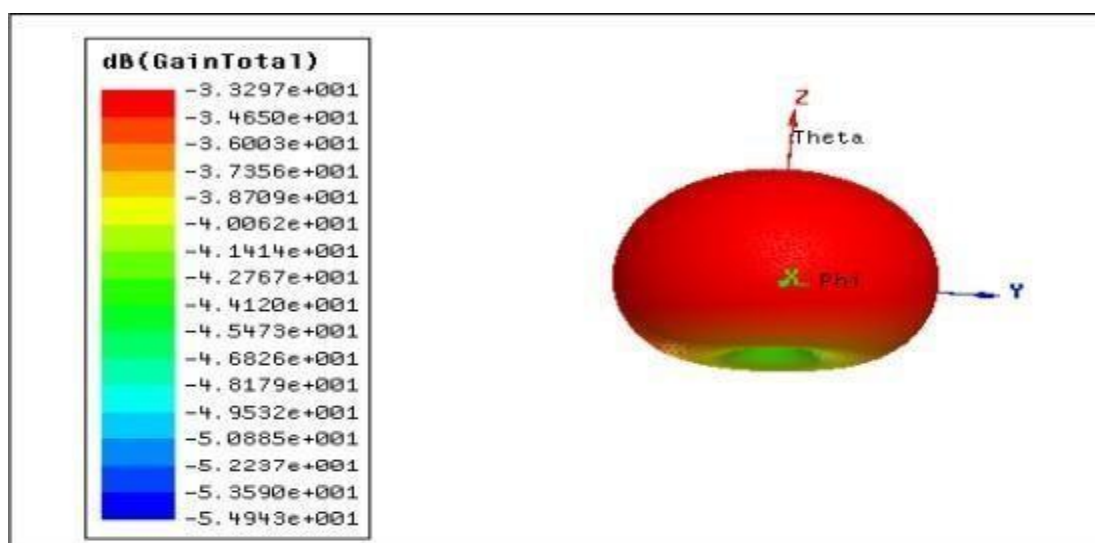


Figure III.11 : gain total de l'antenne PIFA bi-bande à $f=401$ MHz en 3D

Le diagramme de rayonnement de l'antenne tracé à la fréquence 915MHz est représenté par la figure (III.12).

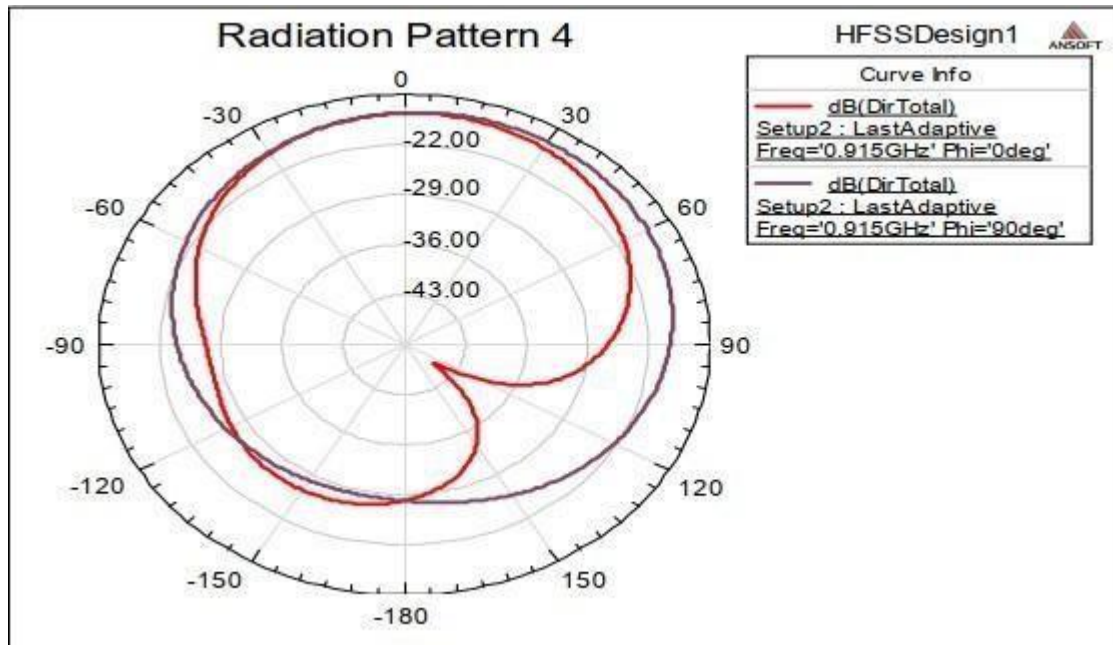


Figure III.12 : diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne PIFA bi-bande à la fréquence de résonance 915 MHz (a) $\phi=90^\circ$, (b) $\phi=0^\circ$

Selon cette figure, on voit clairement que les diagrammes de rayonnement du plan ($\phi=0^\circ$) présentent des caractéristiques presque omnidirectionnelles et que les diagrammes de rayonnement du plan ($\phi=90^\circ$) sont bidirectionnels.

Le diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 915 MHz est illustré sur la figure (III.13).

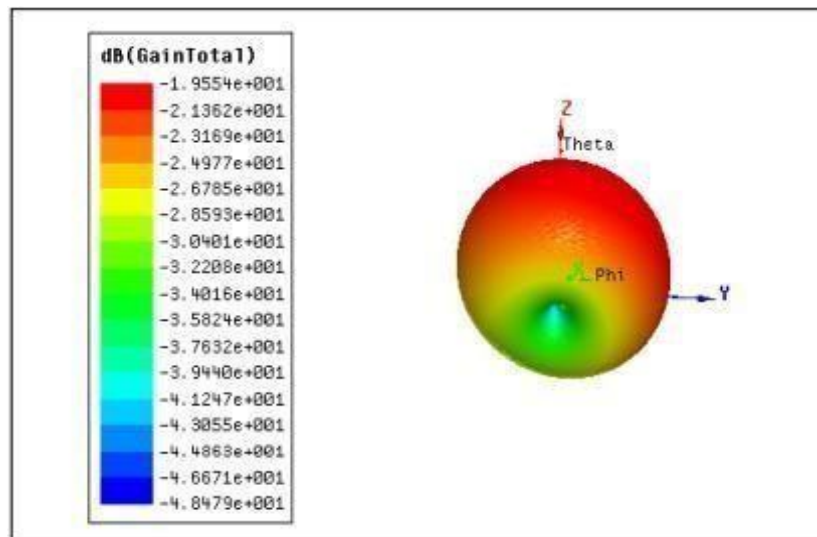


Figure III.13: gain total de l'antenne PIFA bi-bande à $f=915$ MHz en 3D

III.4.2.3 Distribution du courant

Le résultat de simulation concernant la distribution du courant sur le patch à la fréquence de résonance (401MHz) est également présenté dans la figure (III.14). Ainsi, on remarque que le courant sur le patch a une amplitude maximale près des fentes et du pin.

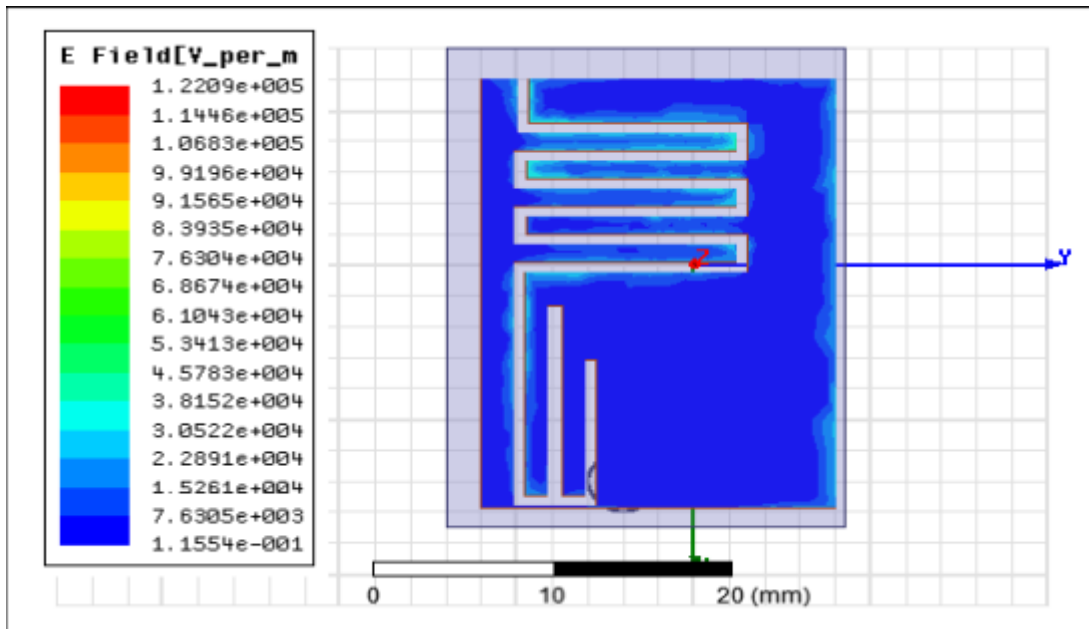


Figure III .14: distribution du champ pour l'antenne bi-bande à $f=401$ MHz

La distribution du courant sur le patch à la fréquence de résonance (915MHz) est également présentée dans la figure (III.15). On peut voir que le courant sur le patch a une amplitude maximale près des fentes et du pin et aussi près du point d'alimentation.

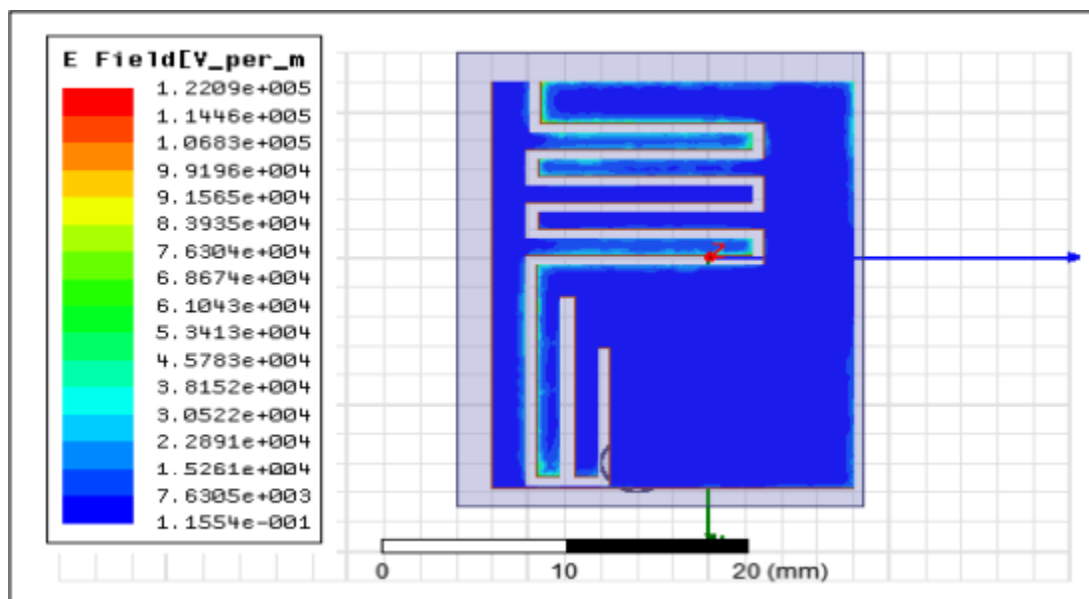


Figure III.15: distribution du champ pour l'antenne bi-bande à $f=915$ MHz

III.4.2.4 Impédance d'entrée

La figure (III.16) présente les deux impédances d'entrée de l'antenne avec ses parties réelles et imaginaires pour les deux fréquences de résonance 401MHz et 915MHz. Nous observons que la partie réelle est proche de 50Ω et la partie imaginaire est proche de 0Ω dans la gamme de fonctionnement de l'antenne.

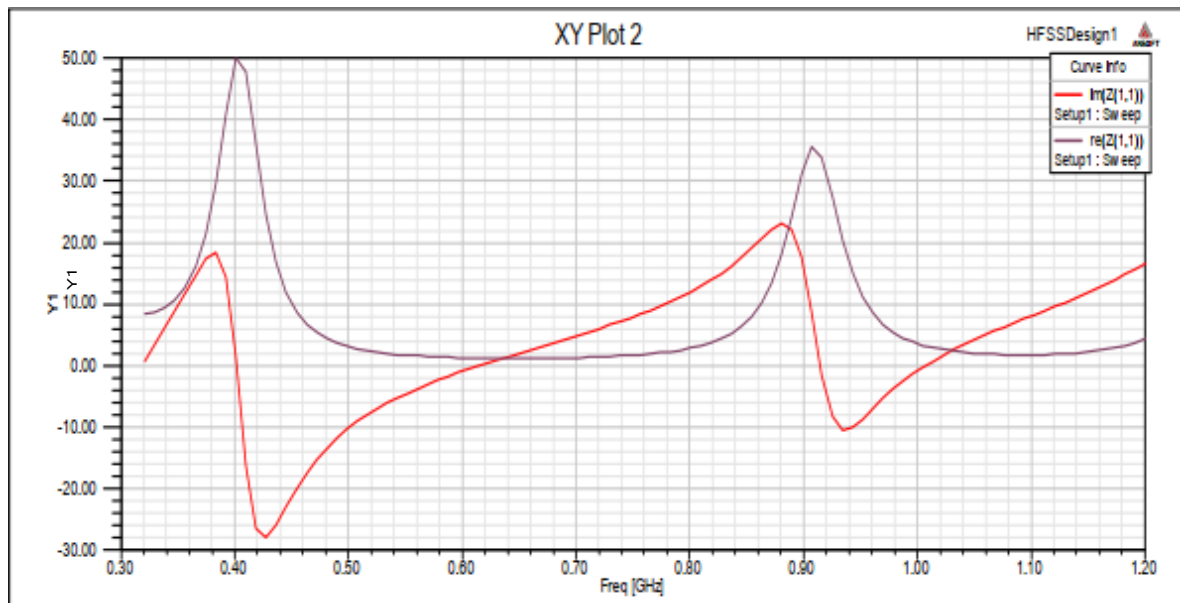


Figure III.16: impédance d'entrée d'antenne PIFA bi-bande

III.5 Antennes PIFA tri-bande

L'antenne planaires en F inversé "PIFA" tri-bande présentée dans cette partie prend en charge à la fois la communication d'informations sans fil et la transmission d'énergie sans fil sur la bande de radiocommunication des dispositifs médicaux (MedRadio, 401-406 MHz) et les bandes industrielles, scientifiques et médicales (ISM, 902-928 MHz), (ISM, 2400-2500 MHz).

III.5.1 Description de la conception

Nous avons conçu cette antenne à partir d'antenne PIFA mono-bande simulée précédemment, et l'antenne PIFA bi-bande dans le but d'un fonctionnement tri-bande. Elle a été conçue et optimisée sous le logiciel HFSS. Sa structure et sa géométrie sont présentées sur la figure(III.17)((a)-(b)). L'antenne est réalisée sur un substrat de type Rogers RT/duroid O6010/6010, LM (10mm) de constante diélectrique égale à 10,2 et d'épaisseur de 2.5 mm. Elle est alimentée par un câble coaxial.

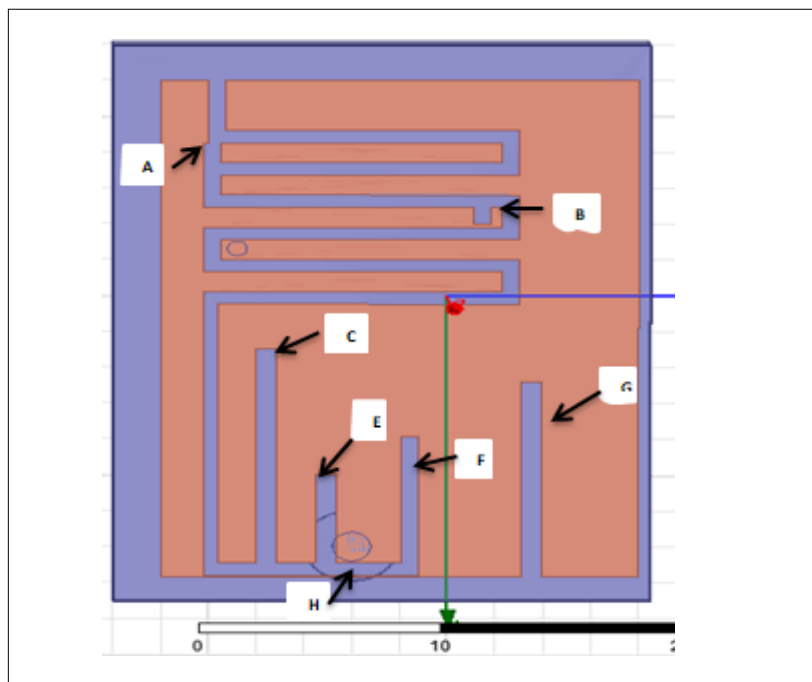


Figure III.17 : géométrie de l'antenne PIFA tri-bande.

Les grandeurs	La longueur (mm)	La largeur (mm)
A	1.3	0.7
B	1	0.7
C	12	0.862
D	3.5	0.7
E	-7	-0.7
F	5	0.862
G	12	0.862
H	14.4	0.6

Tableau III.3 : paramètres géométriques de l'antenne PIFA-tri bande.

III.5.2 Résultats de simulation

III.5.2.1 Coefficient de réflexion.

Les résultats des paramètres S11 de l'antenne PIFA bi-bande sont illustrés sur la figure III.18 dans une gamme de fréquence [0.25 -2.50 GHz]. D'après cette figure (III.18), le pic correspond à la fréquence de résonance $f = 401$ MHz est de l'ordre de -14.44 dB, et celui qui correspond à la fréquence de résonance $f = 915$ MHz est de l'ordre de -22.137 dB, et celui qui correspond à la fréquence de résonance $f = 2400$ MHz est de l'ordre de -19.97 . Ceci confirme les bons résultats obtenus en termes d'adaptation.

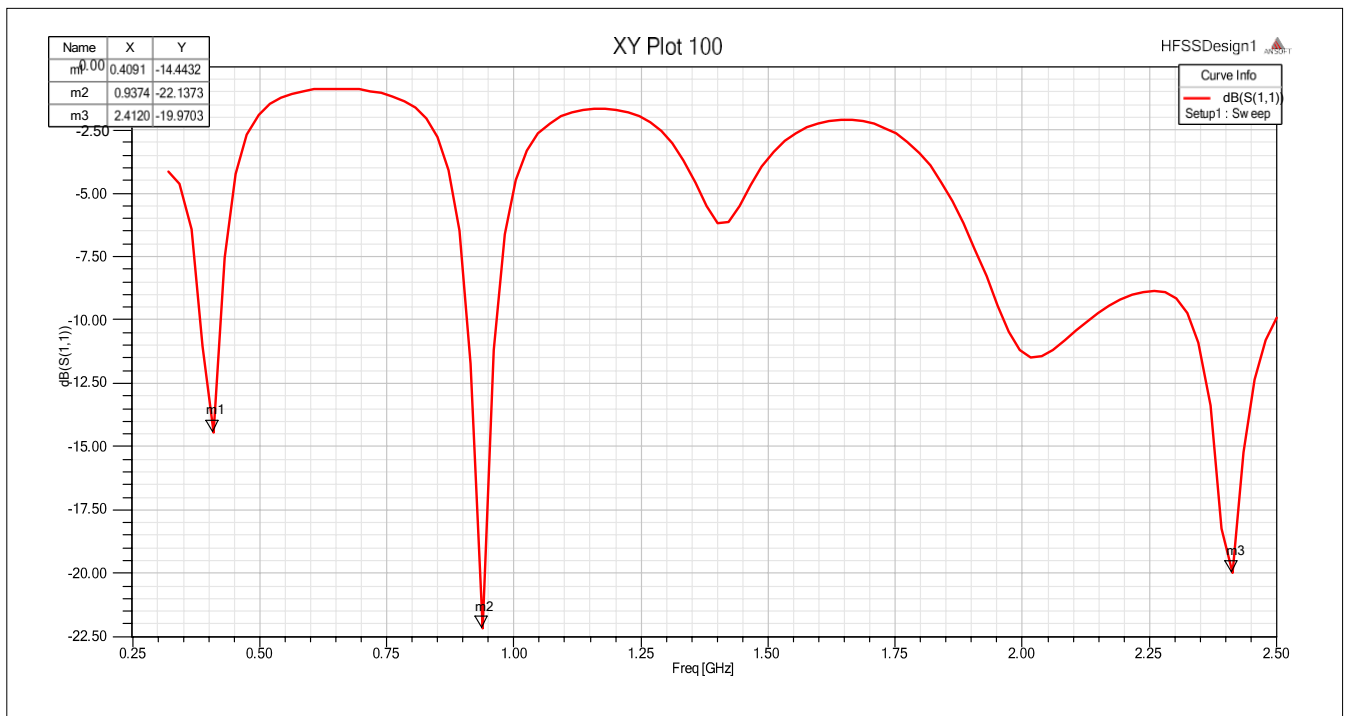


Figure III.18 : coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA tri-bande.

III.5.2.2 Diagramme de rayonnement.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne tracé à la fréquence de 2400 MHz est représenté par la figure (III.19). On remarque que le diagramme de rayonnement à la fréquence de 2400 MHz est bidirectionnel dans les deux plans $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$.

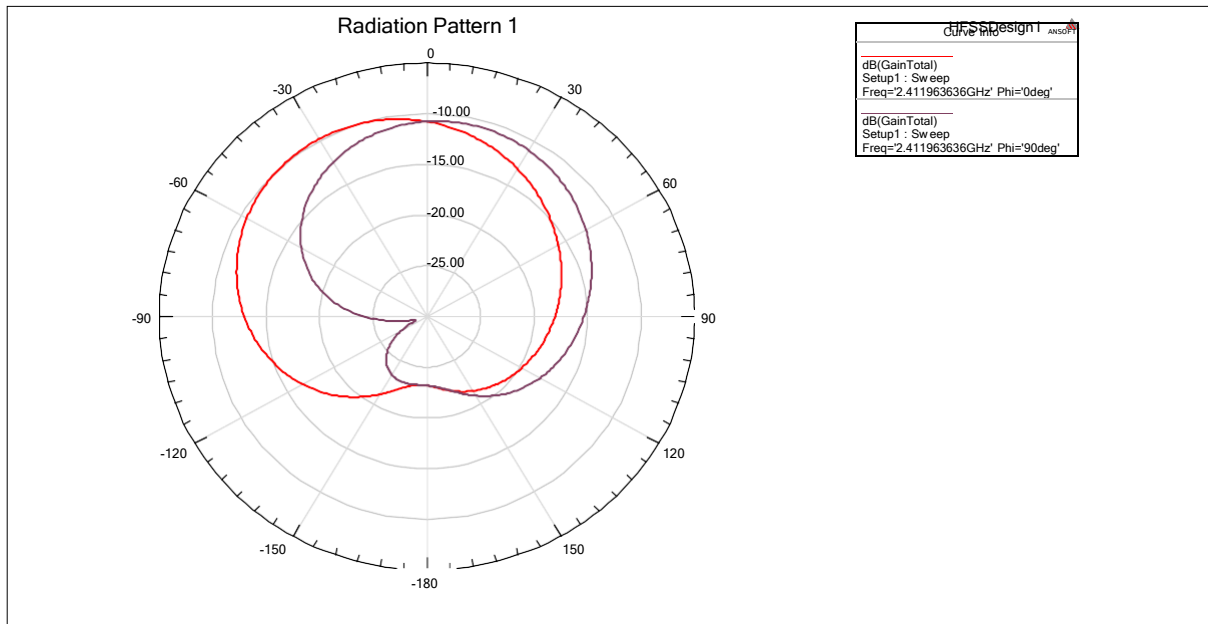


Figure III.19 : diagramme de rayonnement en 2D de l’antenne PIFA tri-bande à la fréquence de résonance 2400MHz(a)phi=90°,(b)phi=0°.

Le diagramme de rayonnement en 3D pour la fréquence 2400 MHz est représenté sur la figure(III.20).Nous constatons que l’antenne a un gain directif pour les différentes fréquences choisies.

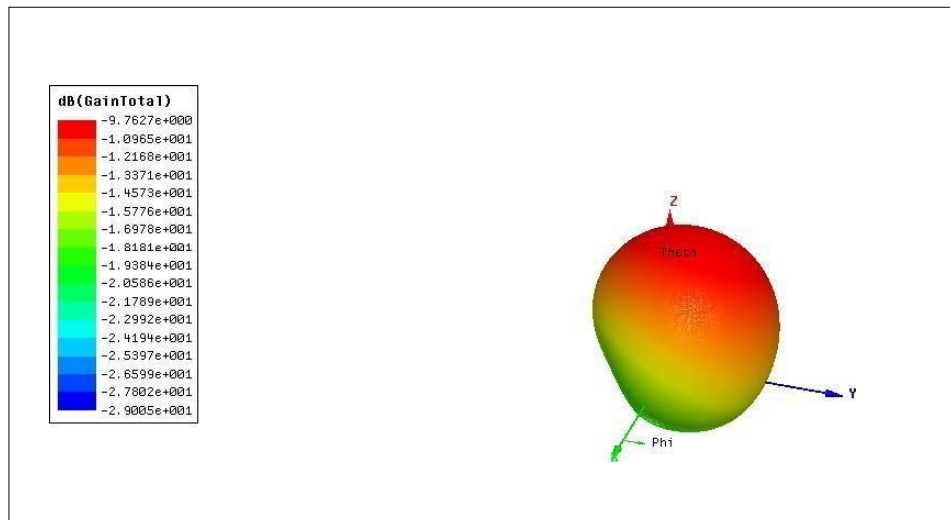


Figure III.20 : gain total de l’antenne PIFA tri-bande à f=2400MHz en 3D.

III.5.2.3 Distribution du courant.

Le résultat de simulation concernant la distribution du courant sur le patch à la fréquence de résonance (2400MHz) est également présenté dans la figure (III.21). Ainsi, on remarque que le courant sur le patch a une amplitude maximale près des fentes et du pin.

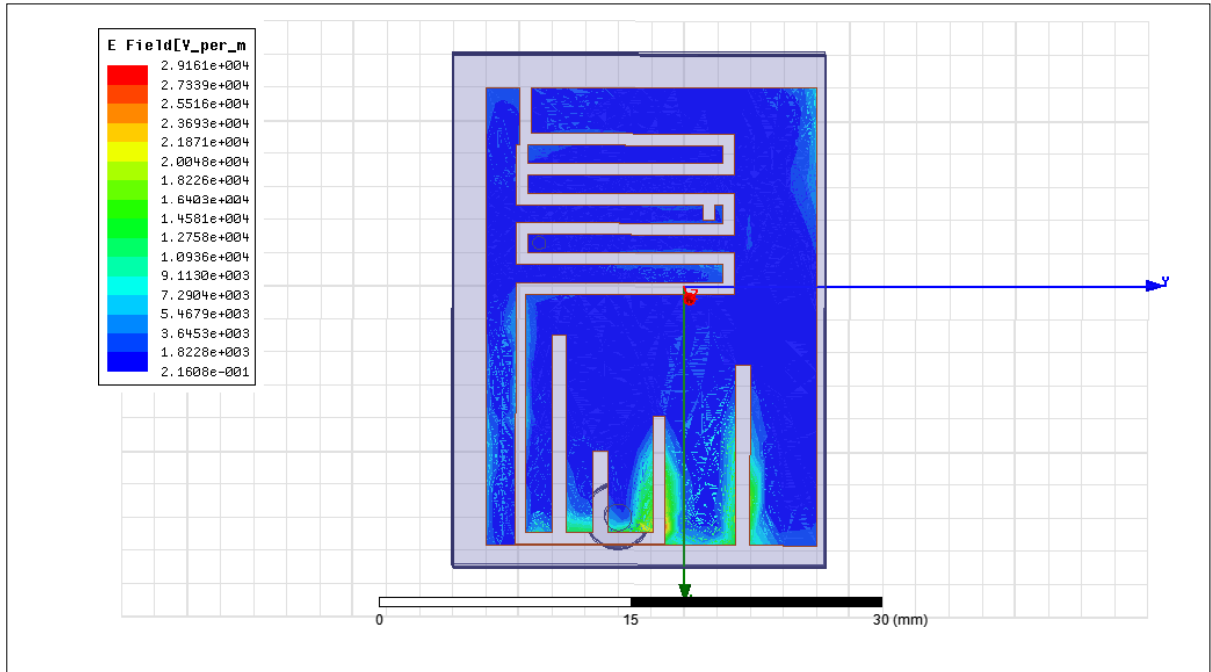


Figure III.21 : distribution du champ pour l'antenne tri-bande à $f=2400$ MHz.

III.5.2.4 Impédance d'entrée

La figure (III.22) présente les deux impédances d'entrée de l'antenne avec ses parties réelles et imaginaires pour les deux fréquences de résonance 401MHz et 915MHz. Nous observons que la partie réelle est proche de 50Ω et la partie imaginaire est proche de 0Ω dans la gamme de fonctionnement de l'antenne.

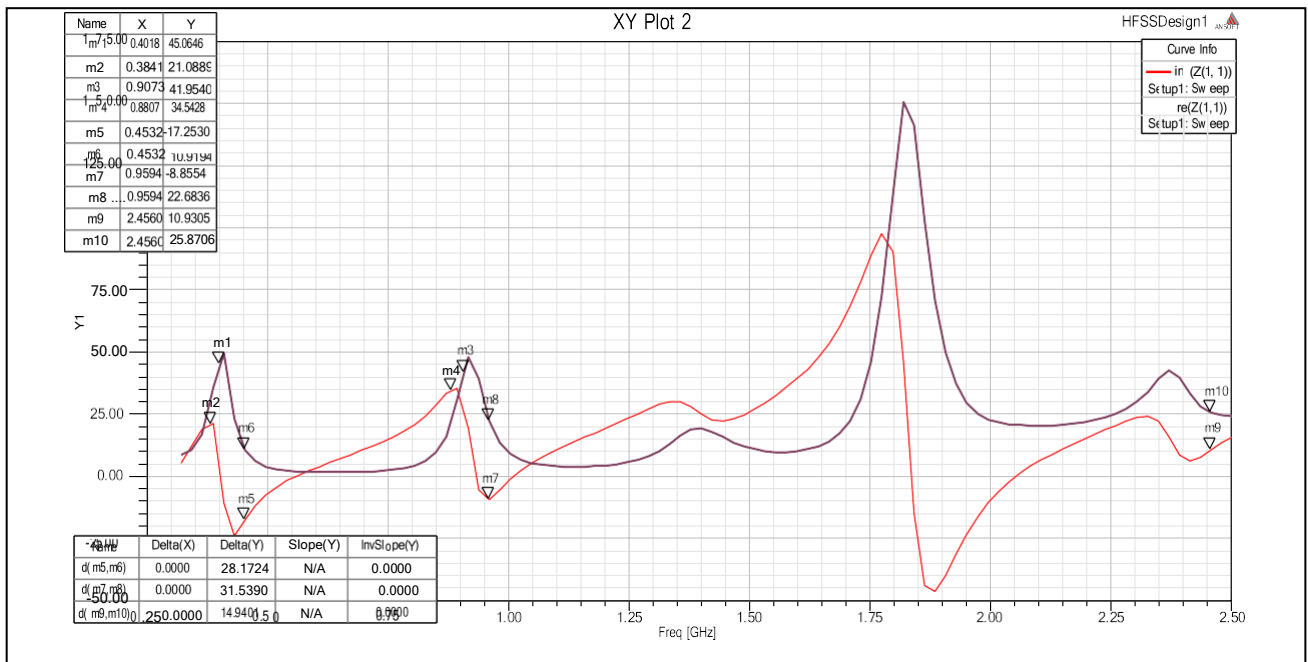


Figure III.22 : impédance d'entrée d'antenne PIFA bi-bande.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier lieu la simulation d'une antenne PIFA mono-bande et bi-bande qui était une structure de base pour concevoir une antenne tri-bande. En second lieu, différentes études ont été menées sur la largeur des fentes, le choix du matériau du substrat ainsi que le rayon du câble coaxiale en vue d'adapter nos structures aux bandes de fréquences souhaitées et de mieux comprendre l'influence des différents paramètres géométriques sur les performances de ces d'antennes en calculant à chaque fois les coefficients de réflexions S_{11} des antennes en utilisant le logiciel commercial de modélisation électromagnétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La tendance des dispositifs implantables a commencé dans les années 1960 sous la forme de stimulateurs cardiaques et de pilules avec capacité de détection et émerge avec de nouveaux défis dans les applications biomédicales. Ces dispositifs implantés collectent les informations du patient et fournissent une communication sans fil à la station de base. Le composant de base de ces appareils est une antenne qui fonctionne à bande de fréquence biomédicale. La structure PIFA est un type d'antenne courant pour la conception d'antennes implantables.

Ce travail a pour objectif de caractériser, deux types d'antennes PIFAs, l'une est une antenne PIFA mono-bande et l'autre est une antenne PIFA bi-bande adaptées à des applications biomédicales dans les deux bandes MedRadio (401 - 406) MHz et ISM (902 - 928) MHz par le simulateur HFSS.

Le premier chapitre a présenté, après une brève introduction sur la médecine sans fils, quelques dispositifs médicaux implantables pour la télémétrie médicale et en dernier une caractérisation du model du corps humain.

Le deuxième chapitre est consacré à une présentation de l'antenne PIFA. Après avoir donné sa structure, ses caractéristiques ainsi que ses avantages permettant une large utilisation dans les communications sans fils biomédicales, on a détaillé les techniques de miniaturisation permettant l'intégration de ces antennes sur des dispositifs implantables.

Dans le dernier chapitre on a présenté les résultats de simulations des paramètres des antennes PIFAs mono-bande et bi-bande sous le logiciel HFSS

Bibliographie

- 1- VAUDON Patrick, « XII - Les antennes imprimées », Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM – Université de Limoges.
- 2- Salima Azzaz Rahmani et Noureddine Boukli Hacene, "Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques: Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multibandes", avril 2012.
- 3- O. Barkat, "Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrice dans la bande millimétrique" Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- 4- Laure FREYTAG « Conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour stations de base des réseaux de télécommunication sans fil », Doctorat, Faculté des sciences et techniques, Université de LIMOGES, limoges, France, 2004.
- 5- Cyril LUXEY, Robert STARAJ et all Antennes imprimées « Bases et principes », Laboratoire d'Électronique, Antennes et Télécommunications, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2008.
- 6- Agnès DUVAL « Nouveau concept d'antenne B.I.E. agile développée pour une application spatiale de « TéléMesure Image » (T.M.I.) », doctorat, école Doctorale Science – Technologie-Santé, Université DE LIMOGES, France, 2009.
- 7- Barkat.Ouarda, « Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supra conductrices dans la Bande Millimétrique », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantin, 2009.
- 8- rapport de fin de cycle ingénieur sur < les antennes patch > 2015 école nationale des sciences appliquée de Khouribga
- 9- Allat. Nabil, Mohamed Oussaid Noureddine « études ses antennes imprimées application aux signaux radiocommunications » mémoire de master, Université 08 mai 1945 Guelma, 2011
- 10- C.A. Balanis, « Antenna theory analysis and design », 2ème édition John Wiley and Sons, 1997.
- 11- Punit.S.NA, « Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for Use in Wireless Cellular Devices », Mémoire de Master, University of Florida, 2004
- 12- Tebache.Sofiane « Méthodes de caractérisation hyperfréquences des antennes imprimées » Mémoire de Magister En Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013
- 13- Soltane.Samia « Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra large bande » Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- 14- Michaël Diblanc « Développement du concept de l'antenne à résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire », Université de Limoges. Thèse de doctorat 20 mars 2006.

- 15- ZemaMm .Youssef et Foukia. Aimad Eddine<<Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs>>, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-Telemcen, 2017 .
- 16- Chouti. Leila << Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multibandes tenant compte de l'effet de couplage>>, Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 2009.
- 17- BEN BRAHEM, SEYF EL ISLAM. Etude et simulation d'une antenne imprimée rectangulaire mise en réseau. Université Saad Dahleb Blida : s.n., 2009.
- 18- KADRI, BOUFELDJA. Modélisation des Synthèse de Réseaux Périodiques et non périodiques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou. 2011.
- 19- Indrasen Singh, Dr. V.S. Tripathi, «Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey», Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad, Indrasen Singh et al, Int. J. Comp. Tech. Appl., Vol2 (5), p. 1597-1598.
- 20- L. J. Chu. Physical limitations of omni-directional antennas. Journal of Applied Physics, 19 :1163–1175, 1948.
- 21- <https://spiegato.com/>
- 22- François Grange. «Matériaux composites pour antenne miniature intégrée» Thèse Doctorat l'université rennes 1, novembre 2010.
- 23- Hall, Peter S.; Lee, E.; Song, C. T. P., "Planar inverted-F antennas", pp. 197–227, in Waterhouse, Rod (ed), *Printed Antennas for Wireless Communications*, John Wiley & Sons, 2008 ISBN 0470512253.
- 24- Note technique ProAnt 23/08/2016 – Antennes planes en F inversé (PIFA)
- 25- <https://www.hyper-rf.com/>
- 26- Docteur de L'Université de Grenoble délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble. Spécialité : «Optique et Radiofréquence» préparée au laboratoire FranceTélécom R&D et LCIS/INPG dans le cadre de l'Ecole Doctorale «Electronique, Electrotechnique, Automatique, télécommunications, Signal»
- 27- Laure Huitema «Conception d'antennes miniatures à base de matériaux innovants pour systèmes de communications mobiles» : Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2011.
- 28- F. DI GALLO, « WiFi l'essentiel qu'il faut savoir »... 2003.
- 29- douyère , alexandre , et al . "Etude du couplage et analyse des performances d'une rectenna PIFA faibles niveaux de puissance." 2017 AG GDR Ondes (2017).
- 30- Samir, L., & Ahcene, O. (2013). Etude des antennes filaires et leurs techniques de miniaturisation (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- 31- R. Chair, K. F. Lee, et L. K. M., "Bandwidth and cross-polarization characteristics of quarter-

waveshorted patch antennas,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 22, pp. 101–103, 1999.

32- M.-C. Huynh et W. Stutzman, “Ground plane effects on planar inverted-f antenna (pifa) performance,” *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings-*, vol.150, no. 4, pp. 209–213, Aug. 2003

33- Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l’Université de Limoges Discipline: « Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes » Présentée et soutenue par Adrien Godard le 27 octobre 2009

34- H, Schwan. Interaction of microwave and radio frequency radiation with biological . *IEEE Trans, Microw. Theory Tech.* [Online]

35- Maissa, B. (2021). Etude et Conception des antennes PIFAs bi-bandes pour applications biomédicales (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).

