

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE 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'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de télécommunications

Par

- **Bouarissa Rabah**
- **Belamri Abdelali**

Intitulé

*Conception des antennes PIFA pour l'intégration sur les téléphones mobiles
par COMSOL Multiphysics*

Soutenu le : 04/07/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. M. Flissi Mustapha</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr.ADOUI Ibtissem</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Melizi Nora</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

*Nous tenons en premier lieu remercier **ALLAH** le tout puissant qui nous a donné le pouvoir,*

Le courage et la patience à l'élaboration de cette œuvre

*Un spécial remerciement à notre encadreur Dr. **Adoui Ibtissem** pour avoir accepté de diriger notre travail malgré leurs nombreuses occupations, leurs conseils et leurs remarques*

Si pertinentes nous ont guidés dans l'élaboration de ce travail.

Sans oublier nos familles, nos proches qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

En fin, nos remerciements les plus respectueux aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

DÉDICACE

AU rein de ma vie : mon adorable maman qui a souffert sans me laisser souffrir que n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse sa présence à mes cotes a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles

A mon cher père, 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 mes chers frères Pour leur soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mes chères sœurs pour leur soutien inconditionnel dans les moments difficiles leur encouragement et leur présence toujours à mes cotes

A mes chers amis d'autre Pour leur aide et support dans les moments difficiles.

A tous ceux que j'aime. MERCI

Rabah

DÉDICACE

Je souhaite dédier ce travail à des personnes très spéciales dans ma vie :

À ma maman, la reine de mon cœur, qui m'a soutenu et encouragé tout au long de mes années d'études.

À mon père, qui a fait de nombreux sacrifices pour me voir heureux.

À ma chère sœur Asma, ainsi qu'à mes frères Moncef et Walid, pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence à mes côtés.

À mes chers amis, qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite encore plus de succès.

À mes encadrants, qui ont été d'un soutien précieux tout au long de l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.

Et enfin, je tiens à remercier mon binôme Rabah pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce travail

Abdelali

Résumé

Ce mémoire présente l'utilisation courante de l'antenne PIFA comme un transducteur dans les applications mobiles, en prenant en compte les exigences structurelles, de taille, de coût de fabrication et de bande passante. La première partie de ce document présente une conception générale de l'antenne PIFA à l'aide du logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. La deuxième partie se concentre sur la conception de ces antennes dans les téléphones mobiles. L'objectif de cette étude est de calculer les caractéristiques électromagnétiques des antennes PIFA, telles que les coefficients de réflexion (S11) et de transmission (S21), le diagramme de rayonnement, le gain et la distribution du champ électrique.

Mots clé : Antenne PIFA, COMSOL Multiphysics, Le Coefficient de reflexion, La bande passante.

Abstract

This thesis presents the common use of the PIFA antenna as a transducer in mobile applications, taking into account the structural, size, manufacturing cost and bandwidth requirements. The first part of this document presents a general design of the PIFA antenna using the COMSOL Multiphysics simulation software. The second part focuses on the design of these antennas in mobile phones. The objective of this study is to calculate the electromagnetic characteristics of the PIFA antennas, such as the reflection (S11) and transmission (S21) coefficients, the radiation pattern, the gain and the distribution of the electric field.

Key words: PIFA antenna, COMSOL Multiphysics, Reflection coefficient, bandwidth.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة الاستخدام الشائع لهوائي PIFA كمحول طاقة في التطبيقات المتنقلة، مع مراعاة المتطلبات الهيكلية والحجم وتكلفة التصنيع وعرض النطاق الترددي. يقدم الجزء الأول من هذا المستند تصميمًا عامًا لهوائي PIFA باستخدام برنامج محاكاة COMSOL Multiphysics. الجزء الثاني يركز على تصميم هذه الهوائيات في الهواتف المحمولة. الهدف من هذه الدراسة هو حساب الخصائص الكهرومغناطيسية لهوائيات PIFA، مثل معاملات الانعكاس (S11) والإرسال (S21) ومخطط الإشعاع والكسب وتوزيع المجال الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: هوائي PIFA، COMSOL Multiphysics، معامل الانعكاس، عرض النطاق الترددي.

Table de matière

REMERCIEMENTS	ii
Dédicace	iii
Dédicace	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Liste des acronymes	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 :.....	1
Généralités sur les antennes	1
<i>1.1 Introduction</i>	<i>2</i>
<i>1.2 Les antennes</i>	<i>2</i>
<i>1.3 Les caractéristiques des antennes</i>	<i>3</i>
1.3.1 L'impédance d'entrée	3
1.3.2 Le diagramme de rayonnement	4
1.3.3 Angle d'ouverture	6
1.3.4 La polarisation	6
1.3.5 Taux d'onde stationnaire (TOS)	7
1.3.6 Directivité	7
1.3.7 Gain.....	8
1.3.8 Le coefficient de réflexion et la bande passante	8
1.3.9 Rendement	9
<i>1.4 Forme et dimensions</i>	<i>9</i>
<i>1.5 Différents types d'antenne</i>	<i>10</i>
1.5.1 Antenne dipolaire	10
1.5.2 Antenne à boucle magnétique	11
1.5.3 Antenne cornet.....	11
1.5.4 Antenne à réseau de fentes.....	12
1.5.5 Antenne à réflecteur parabolique	12
1.5.6 Antenne Imprimée.....	13
<i>1.5.7 Antenne PIFA</i>	<i>13</i>
<i>1.7 Conclusion</i>	<i>14</i>
Chapitre 2 :.....	2
Les antennes PIFA	2
<i>11.1 Introduction</i>	<i>15</i>

II.2 Définition des antennes PIFA.....	15
II.3 Les type des antennes PIFA.....	15
II.3.1 Antennes PIFA à bande unique.....	15
II.3.2 Antennes PIFA à double bande.....	15
II.3.3 Antennes PIFA à large bande.....	16
II.3.4 Antennes PIFA miniatures	16
II.4 Les caractéristiques principales d'une antenne PIFA.....	16
II.4.1 Compacte :.....	16
II.4.2 Bande passante étroite.....	16
II.4.3 Gain modéré	16
II.4.4 Faible impédance.....	16
II.4.5 Structure simple	16
II.5 Exemples d'antennes PIFA.....	17
II.6 Avantages et inconvénients.....	18
II.6.1 Les Avantages des antennes PIFA.....	18
II.7.2 Les Inconvénients des antennes PIFA.....	18
II.8 Les performances des antennes PIFA	18
II.9 La configuration typique d'une antenne PIFA :.....	19
II.10 Les variations de conception d'antenne PIFA.....	20
II.10.1 Antenne PIFA en forme de L.....	20
II.10.2 Antenne PIFA double bande	20
II.10.3 Antenne PIFA à double élément.....	20
II.11 La taille des antennes PIFA.....	20
II.12 Les techniques de conception d'antenne PIFA.....	21
II.13 Utilisation des antennes PIFA	22
II.14. Développement d'antenne PIFA	22
II.15. L'évolution des standards de communication	24
II.15.1 GSM	24
II.15.2 UMTS	24
II.15.3 GPRS	24
II.15.4 EDGE	24
II.15 Conclusion	25
Chapitre 03 :.....	15
La conception et l'optimisation des antennes PIFA	15
III.1 Introduction	25
III.2 COMSOL Multiphysics.....	25
III.2.1 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	25
III.2.2 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL	26
III.2.3 Les étapes du processus de modélisation	27
III.3 Simulation des antennes PIFA par COMSOL	27
III.3.1 Création du modèle de simulation	28
III.3.2 Paramètres	29
III.3.3 Construction de la géométrie	30
III.3.4 Définition des Matériaux	31

III.3.5 Définition des conditions aux limites (frontières) :	32
III.3.6 Maillage	33
III.3.7 Simulation	34
<i>III.4 Simulation des antennes PIFA à large bande par COMSOL v5.6</i>	<i>34</i>
III.4.1 Description de la structure	34
III.4.2 Les résultats de simulation	36
III.4.2.1 Les coefficients de Réflexion et de Transmission	36
III.4.2.2 Les diagrammes de rayonnement	39
a Les diagrammes de rayonnement 2D	39
b Les diagrammes de rayonnement en 3D	40
III. 4.2.3 Distribution du champ	41
III. 4.2.4 Le gain	43
III.4.3 Etude paramétrique	44
III.4.3.1 Influence de longueur S_x	44
III.4.3.3 Influence de longueur S_y	45
<i>III.5 Conclusion</i>	<i>46</i>
Conclusion Général	46
Références	25

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 une chaine de transmission [2]	3
Figure I.2 Représentation de l'impédance d'entrée de l'antenne [3].....	4
Figure I.3 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [4]	5
Figure I.4 Exemple diagramme de rayonnement d'une antenne (antenne log-périodique) [4].....	5
Figure I.5 Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture [4]	6
Figure I.6 les types de polarisation, linéaire (a), circulaire (b) et Elliptique (c) [6]	6
Figure I.7 Signification de la directivité [7]	7
Figure I.8 Exemple $ S_{11} $ d'une antenne en dB en fonction de la fréquence et représentation de la bande passante à -10dB [8].....	9
Figure I.9 Antenne dipolaire [12].....	10
Figure I.10 Boucle magnétique [12].....	11
Figure I.11 Antenne cornet [12]	12
Figure I.12 Réseau de fentes [12]	12
Figure I.13 Antenne à réflecteur parabolique [12].....	13
Figure I.14 Antenne Imprimée [12]	13
Figure II.1 Structure d'antenne PIFA.....	15
Figure II. 2 Les type des antennes PIFA	16
Figure II.3 Exemples d'antennes PIFA présentés dans des téléphones portables	17
Figure II.4 Configuration de l'antenne PIFA (pavé rayonnant suspendu dans l'air)	19
Figure II.5 Développement d'antenne PIFA	23
Figure III.1 Interface utilisateur de COMSOL 5.6	27
Figure III.2 Une simple antenne PIFA sur un circuit imprimé FR4 est enfermé dans un boîtier ABS.....	28
Figure III.3 La page principale de COMSOL 5.6	29
Figure III.4 Tableau des paramètres.....	30
Figure III.5 La Géométrie	31
Figure III.6 Définition des matériaux.....	32
Figure III.7 Les conditions aux limites	33
Figure III.8 Maillage.....	33
Figure III.9 Structure du PIFA à deux ports.....	35
Figure III.10 Plan de masse de PIFA a large bande.....	35
Figure III.11 PIFA à deux ports fabriqués pour des mesures	36
Figure III.12 Variation des coefficients de transmission et de réflexion en dB en fonction de la fréquence de fonctionnement (Port1)	37
Figure III.13 Variation des coefficients de transmission et de réflexion en dB en fonction de la fréquence de fonctionnement (port 2).....	38
Figure III.14 Les Coefficient de réflexion la PIFA à deux ports.	38
Figure III.15 Diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA (Plan E).....	39
Figure III.16 Diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA (Plan H)	40
Figure III.17 Les diagrammes de rayonnement 3D à 2.29 GHz (port 1).....	41
Figure III.18 Les diagrammes de rayonnement 3D à 2.405 GHz (port 2).....	41
Figure III.19 Norme de champ électrique.....	42
Figure III.20 Norme de densité de courant	42

Figure III.21 Gains de crête [dB] en fonction de la fréquence [GHz].....	43
Figure III.22 Coefficient de réflexion S_x en dB.....	44
Figure III.23 Coefficient de réflexion S_y en Db.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 résumé de l'évolution des standards de communication.	24
Tableau III.2 Paramètres géométrique de l'antenne PIFA mono-bande.....	36
Tableau III.3 les dimensions de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonance S_x .	45
Tableau III.4 les dimensions de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonance S_y ..	46

LISTE DES ACRONYMES

2D	2 Dimensions.
3D	3 Dimensions.
TOS	Taux d'onde stationnaire.
PIFA	Planar Inverted-F Antenna.
FEM	Méthode des éléments finis.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les antennes jouent un rôle crucial dans les systèmes de communication sans fil, permettant la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Au fil des années, de nombreuses avancées ont été réalisées dans le domaine de la conception d'antennes, visant à améliorer les performances, la compacité et l'efficacité des dispositifs de communication. Parmi les différentes catégories d'antennes, les antennes PIFA (Planar Inverted-F Antenna) ont suscité un intérêt croissant en raison de leurs caractéristiques uniques et de leur applicabilité dans de nombreux domaines.

Dans ce chapitre, nous allons examiner les généralités sur les antennes, en expliquant les concepts de base et les principes fondamentaux qui régissent leur fonctionnement. Nous aborderons ensuite plus en détail les antennes PIFA, en décrivant leur structure, leur principe de fonctionnement et leurs avantages par rapport à d'autres types d'antennes. Enfin, nous explorerons la conception et l'optimisation des antennes PIFA à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics, qui offre des fonctionnalités avancées pour modéliser, simuler et analyser les performances des antennes.

Au fur et à mesure de notre progression, nous découvrirons les éléments clés de la conception des antennes PIFA, tels que la géométrie, les matériaux et les paramètres électriques, et comment ils influencent les performances de l'antenne. Nous explorerons également les différentes étapes du processus de conception, en mettant l'accent sur l'optimisation des performances, notamment en termes de bande passante, de directivité et d'efficacité.

Enfin, nous aborderons l'utilisation du logiciel Comsol Multiphysics dans la conception et l'optimisation des antennes PIFA. Nous expliquerons comment ce logiciel permet aux ingénieurs et concepteurs d'antennes d'analyser les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne, de simuler son comportement dans des conditions réelles et d'optimiser ses performances avant la fabrication physique. Nous soulignerons les avantages de l'utilisation de Comsol Multiphysics, tels que la réduction des coûts et des délais de développement, ainsi que la possibilité d'explorer rapidement différentes configurations d'antennes.

À la fin, on termine ce travail par une conclusion générale sur les travaux présentés.

CHAPITRE 1 :

GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES

I.1 Introduction

Les antennes sont des dispositifs qui permettent la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines tels que les télécommunications, la radiodiffusion, la navigation, la surveillance, la météorologie et bien d'autres. Dans ce chapitre, nous allons présenter les antennes d'une manière générale tout en mettant le point sur les caractéristiques des antennes, forme et dimensions et les différents types d'antenne.

I.2 Les antennes

Une antenne est un dispositif électromagnétique conçu pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la communication, la télévision, la radio, la navigation, la surveillance, la science et la médecine. Elle fonctionne en transformant des signaux électriques en ondes électromagnétiques ou en transformant des ondes électromagnétiques en signaux électriques. Les antennes peuvent être utilisées pour recevoir ou émettre des signaux dans différentes gammes de fréquences, allant des ondes radio aux rayons gamma.

Les antennes peuvent avoir différentes formes et tailles, en fonction de leur application spécifique. Par exemple, les antennes utilisées pour la communication par satellite peuvent être de grandes paraboles, tandis que les antennes utilisées pour les communications mobiles peuvent être de petites antennes intégrées dans des téléphones portables [1]

En matière de télécommunications et de transmission de données, il existe deux types de transmissions principales :

- les transmissions guidées
- les transmissions en espace libre

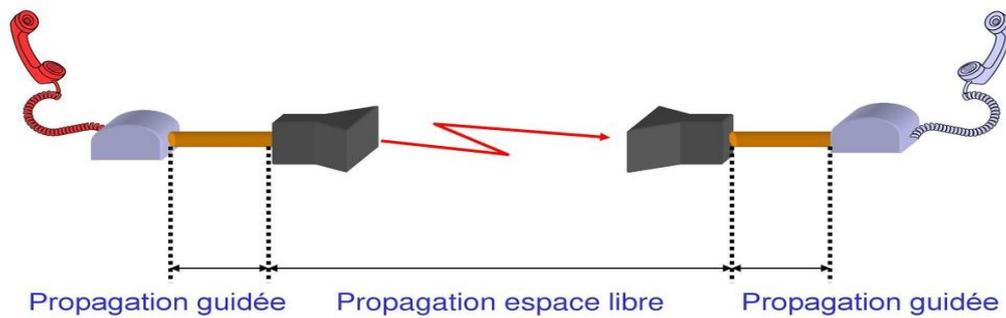


Figure I.1 une chaîne de transmission [2]

I.3 Les caractéristiques des antennes

La théorie des antennes est basée sur le rayonnement produit par des sources (charges, courants) à la surface d'un conducteur. Quand on veut décrire le fonctionnement d'une antenne particulière, certaines caractéristiques fondamentales, communes à tous les types d'antennes, sont utilisées et principalement :

- L'impédance d'entrée
- Diagramme de rayonnement
- Angle d'ouverture
- La polarisation
- Taux d'onde stationnaire (TOS)
- La directivité
- Le Gain
- Le coefficient de réflexion et la bande passante
- Rendement

I.3.1 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux terminaux de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne

Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_{ant} et une partie imaginaire X_{ant} et s'écrit comme suit :

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \dots\dots\dots 1$$

$$R_{ant} = R_{pertes} + R_{ray} \dots\dots\dots 2$$

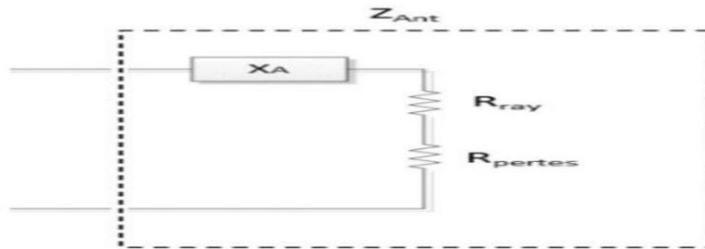


Figure I.2 Représentation de l'impédance d'entrée de l'antenne [3]

Pour s'assurer que la puissance a été transférée de l'alimentation vers l'antenne, il est nécessaire d'avoir une adaptation d'impédance. Le transfert maximal de puissance est obtenu lorsque l'impédance de l'alimentation est égale l'impédance conjuguée de l'antenne et comme est fonction de la fréquence alors varie aussi avec la fréquence. Cette impédance d'entrée en est donnée par la formule [3]

$$Z_{ant} = Z_c \frac{1+s_{11}}{1-s_{11}} \dots\dots\dots 3$$

I.3.2 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, ϕ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes comme montre dans la Figure I.3. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta=90^\circ$) et verticaux ($\phi=constante$), ou bien dans les plans E et H. [4]

$$r(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} \dots\dots\dots 4$$

Avec :

$P(\Theta, \Phi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\Theta, \Phi)$: Puissance rayonnée max.

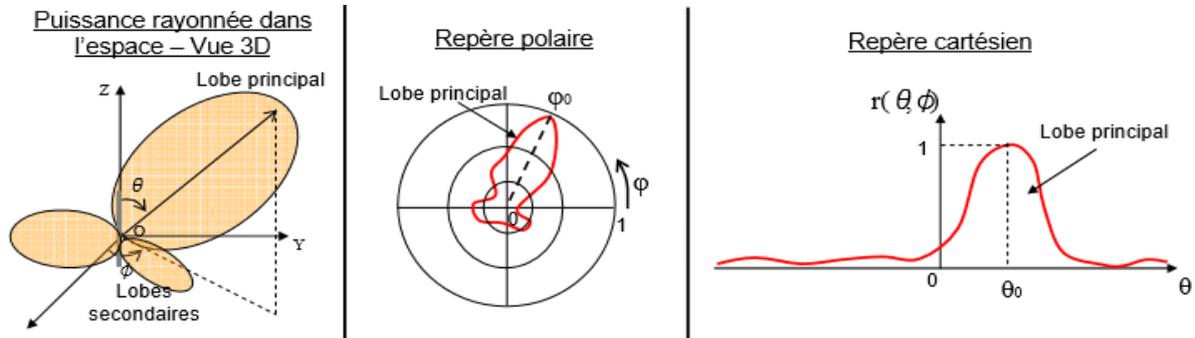


Figure I.3 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [4]

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement relié à sa géométrie mais peut aussi varier avec la fréquence. Les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer. Pour que les lobes secondaires ne soient pas considérés comme gênants, on admet en pratique que le niveau du premier lobe secondaire doit être au moins 20 dB inférieur au niveau du lobe principal. [4]

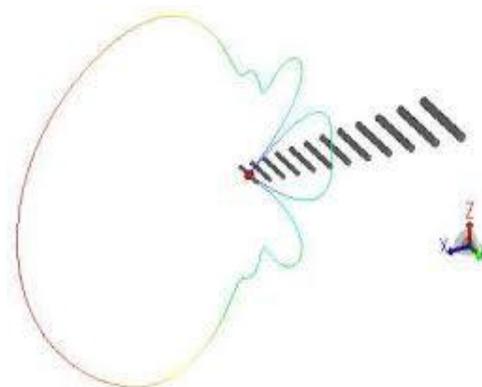


Figure I.4 Exemple diagramme de rayonnement d'une antenne (antenne log-périodique) [4]

I.3.3 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture BW (beam width) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à -3dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. [4]

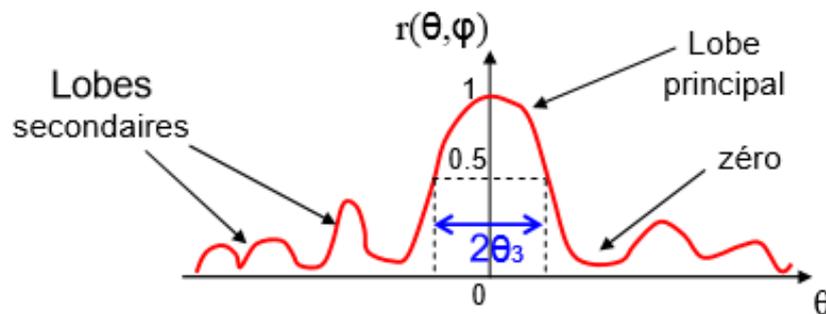


Figure I.5 Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture [4]

I.3.4 La polarisation

Il y a trois façons Fondamentales par lesquelles l'onde électromagnétique est rayonnée, c'est-à-dire linéairement (Verticalement ou horizontalement), circulairement et elliptiquement [5].

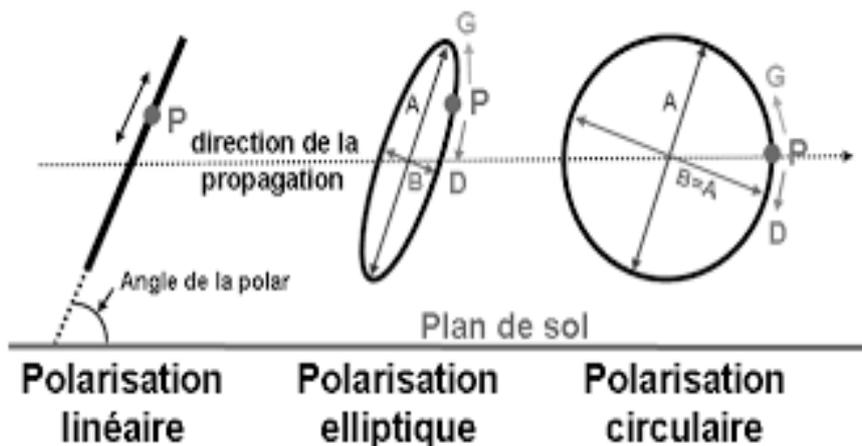


Figure I.6 les types de polarisation, linéaire (a), circulaire (b) et Elliptique (c) [6]

La polarisation de l'antenne est définie en conséquence avec la polarisation de l'onde Électromagnétique.

I.3.5 Taux d'onde stationnaire (TOS)

Généralement les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux directions. Quand la source, la ligne de transmission et la charge ont toutes la même impédance, l'onde électromagnétique se propage de la source à la charge sans aucune perte du signal. Par contre, si la source n'a pas la même impédance par rapport aux autres éléments de la chaîne de transmission, une partie de l'onde sera réfléchi lorsqu'elle atteint la charge et renvoyée vers la source. Dans ce cas, les ondes incidents et réfléchies se superposent et engendrent une onde stationnaire [5].

I.3.6 Directivité

La directivité est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie électromagnétique dans une direction particulière. Elle est exprimée en décibels (dB) et plus la directivité est élevée, plus l'antenne est directionnelle. La directivité indique les directions dans lesquelles la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope, elle est égale au rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, ϕ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle pour une même puissance totale rayonnée. [7]

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta P_a} \dots \dots \dots 5$$

$P(\theta, \phi)$: puissance rayonnée dans une direction quelconque .

P_a : la puissance d'alimentation.

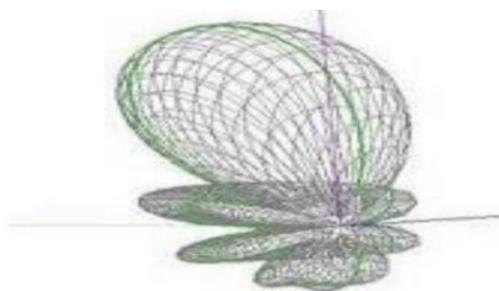


Figure I.7 Signification de la directivité [7]

I.3.7 Gain

D'une façon générale, une antenne rayonne une puissance qui varie en fonction de la direction considérée. On appelle gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) , le rapport de la puissance $P(\theta, \phi)$ dans cette direction à la puissance $P_0(\theta, \phi)$ que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation, il est donné par l'équation (I.6) [8]

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} \dots\dots\dots 6$$

D'où P_a : la puissance d'alimentation

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans perte, son gain vaut 1 ou 0 dB.

I.3.8 Le coefficient de réflexion et la bande passante

Le coefficient de réflexion d'une antenne représente le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies.

Pour une antenne d'impédance Z_{ant} , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_c le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \dots\dots\dots 7$$

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

$$|S_{11}| \text{ dB} = 20 \log(S_{11}) \dots\dots\dots 8$$

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

La largeur de bande ou bande passante en adaptation d'une antenne peut être définie comme une bande de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil donné. Elle peut être définie comme correspondant à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est supérieur à un seuil. On déduit souvent la bande passante d'une antenne à partir de la courbe de son coefficient de réflexion comme montre dans la figure I.8. [8]

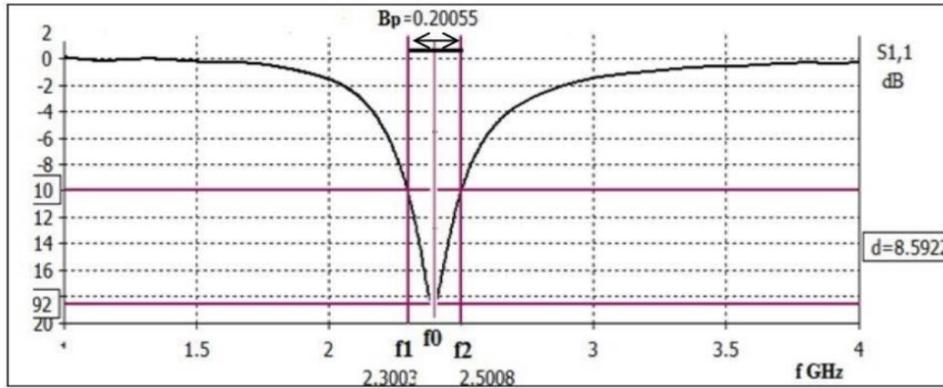


Figure I.8 Exemple |S11| d’une antenne en dB en fonction de la fréquence et représentation de la bande passante à -10dB [8]

On peut avoir la bande passante à partir critère typique de la représentation de coefficient de réflexion sur une droite inférieure à -10dB ou à -15dB. La figure ci-dessous montre le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence de fonctionnement et représentation de la bande passante [5].

$$BP = \Delta F = F1 - F2 \dots\dots\dots 9$$

I.3.9 Rendement

La puissance rayonnée P est généralement inférieure à la puissance d’alimentation Pa. Le rendement d’une antenne est alors défini comme étant le rapport de la puissance totale P qu’elle rayonne à sa puissance d’alimentation Pa on la note η [9]

$$\eta = \frac{P}{Pa} \dots\dots\dots 10$$

Et avec d’autre définition le rendement est le rapport entre l’énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l’alimentation. Elle est exprimée par [10]

$$\eta = \frac{Rr}{Rr + Rp} \dots\dots\dots 11$$

Avec :

R_r: Résistance liée à son rayonnement.

R_p: Résistance liée aux pertes de l’antenne.

I.4 Forme et dimensions

La forme et les dimensions d’une antenne sont extrêmement variables : celle d’un téléphone portable se limite à une petite excroissance sur le boîtier de l’appareil tandis que la

parabole du radiotélescope d'Arecibo dépasse 300 m de diamètre. Très grossièrement on peut dire que pour la même fréquence d'utilisation, les dimensions d'une antenne seront d'autant plus grandes que son gain sera élevé, à cause de l'utilisation d'éléments réflecteurs comme celui de l'antenne parabolique, par exemple. L'antenne demi-onde ou doublet, comme son nom l'indique, a une longueur presque égale à la moitié de la longueur d'onde pour laquelle elle a été fabriquée [11]

I.5 Différents types d'antenne

Nous allons présenter dans cette partie les différents types d'antenne qui existe. On aboutira à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique [12].

I.5.1 Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est l'une des antennes les plus simples et les plus courantes. Elle est constituée d'une paire de conducteurs parallèles de longueur égale à un quart de la longueur d'onde de fonctionnement. Les antennes dipôles peuvent être utilisées pour la transmission et la réception des ondes radioélectriques dans un large éventail de fréquences. Les antennes dipôles peuvent être orientées verticalement ou horizontalement, et leur gain dépend de la longueur du dipôle et de la fréquence de fonctionnement. [13]

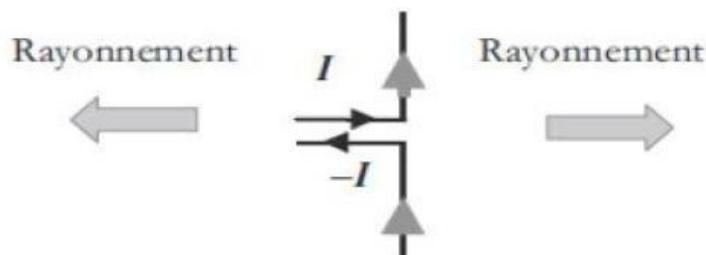


Figure I.9 Antenne dipolaire [12]

L'extrémité de chaque fil apparaît des charges de signes opposées dont l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant :

$$\mathbf{I} = \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots 12$$

D'autres antennes de même type sont obtenues avec des fils rayonnants plus longs. Ces antennes de type filaires ont de nombreuses applications. Citons rapidement les antennes pour récepteurs radio, les antennes des talkies-walkies, etc... [12]

I.5.2 Antenne à boucle magnétique

Antenne à boucle magnétique est une antenne qui utilise une boucle de conducteur pour capter les ondes électromagnétiques. Elle est souvent utilisée pour les communications à basse fréquence. L'antenne à boucle magnétique a un champ magnétique fort dans son plan, mais un champ électrique faible. Elle est donc très utile pour la réception des signaux faibles, mais moins adaptée à la transmission. [13].

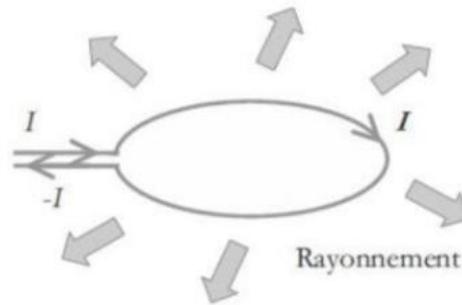


Figure I.10 Boucle magnétique [12]

I.5.3 Antenne cornet

L'antenne cornet est une antenne à ouverture qui est souvent utilisée pour les applications à large bande et à faible perte. Elle se compose d'une cavité conique avec une ouverture rectangulaire à une extrémité et un élément rayonnant à l'autre extrémité. L'antenne cornet peut être utilisée pour la transmission et la réception des ondes radioélectriques dans un large éventail de fréquences.

Les avantages de l'antenne cornet incluent sa grande bande passante, sa faible perte et sa directivité élevée. Elle est également assez facile à fabriquer et à utiliser, ce qui la rend populaire pour de nombreuses applications. L'antenne cornet est souvent utilisée dans les radars, les systèmes de télécommunications et les systèmes de surveillance.

Les inconvénients de l'antenne cornet incluent sa taille relativement grande et son poids. Elle est également plus coûteuse que certaines autres antennes, en raison de sa conception complexe et de son processus de fabrication. [13]

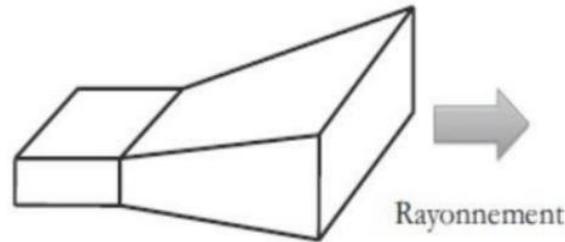


Figure I.11 Antenne cornet [12]

I.5.4 Antenne à réseau de fentes

Ce type de dispositif est utilisé lorsque le rayonnement doit être localisé. Par exemple, dans des tunnels, où la transmission des ondes s'effectue mal, on place un réseau de fentes rayonnantes. En général la ligne est en haut du tunnel avec émission vers le bas comme montre dans la Figure 12. [12]

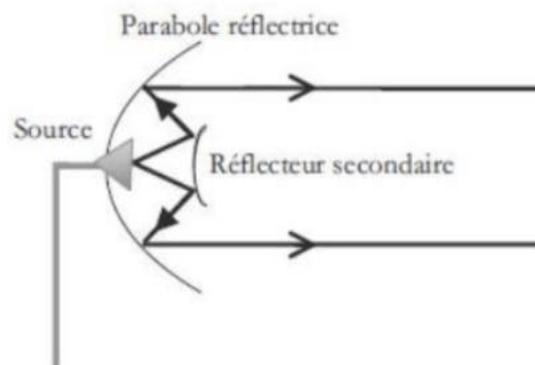


Figure I.12 Réseau de fentes [12]

I.5.5 Antenne à réflecteur parabolique

L'antenne à réflecteur est constituée de la source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique comme illustre dans la Figure 13. La source, placée au foyer de la parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Selon propriété bien connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement. Ce type d'antenne est utilisé pour viser dans une direction très précise, puisque tous les rayons passant par le foyer sortent parallèles. Par décalage de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur, peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole. [12]

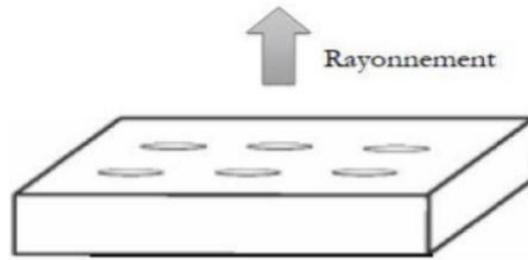


Figure I.13 Antenne à réflecteur parabolique [12]

I.5.6 Antenne Imprimée

Une antenne imprimée comme l'antenne micro ruban se compose d'une pièce métallique rayonnante (patch) sur un côté du substrat diélectrique, et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la Figure 14. Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or (à cause de leurs conductivités élevées) et il peut prendre n'importe quelle forme possible. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photogravés sur le substrat diélectrique.

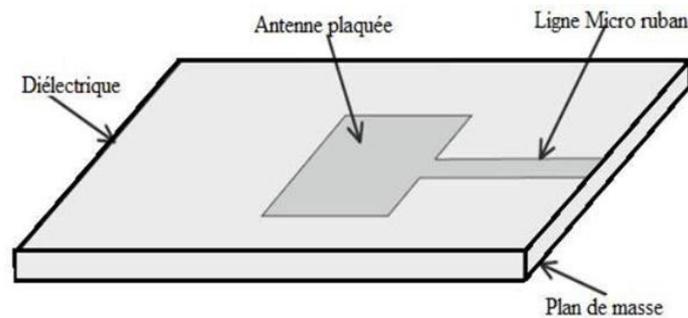


Figure I.14 Antenne Imprimée [12]

I.5.7 Antenne PIFA

Une antenne PIFA (Planar Inverted-F Antenna) est un type d'antenne utilisée principalement dans les applications sans fil, telles que les téléphones portables, les tablettes, les ordinateurs portables, les dispositifs IoT (Internet des objets) et d'autres appareils de communication. Elle est conçue pour fonctionner efficacement dans un espace restreint et présente plusieurs avantages par rapport aux autres types d'antennes.

I.7 Conclusion

Les antennes sont des dispositifs essentiels pour la communication sans fil. Elles sont utilisées pour la transmission et la réception des signaux électromagnétiques, tels que les ondes radio et les micro-ondes. Les antennes peuvent avoir différentes formes, tailles et caractéristiques, selon leur utilisation spécifique. Les antennes peuvent être classées en fonction de leur polarisation, de leur directivité, de leur gain et de leur bande passante.

Les antennes sont utilisées dans une variété d'applications, notamment les systèmes de communication sans fil, les radars, les systèmes de surveillance et les systèmes de navigation. Le choix de l'antenne dépendra de nombreux facteurs tels que la fréquence du signal, la distance de communication, la puissance du signal, la bande passante requise, la polarisation et la directivité.

La conception et l'utilisation efficaces des antennes sont essentielles pour assurer une communication sans fil fiable et efficace. Les ingénieurs en antennes travaillent constamment pour développer des antennes plus performantes et plus efficaces pour répondre aux besoins de communication sans fil de plus en plus exigeants.

CHAPITRE 2 :

LES ANTENNES PIFA

II.1 Introduction

Une antenne PIFA (Planar Inverted-F Antenna) est une antenne bidimensionnelle qui est souvent utilisée dans les applications sans fil. Elle est conçue pour être discrète et peu encombrante, tout en offrant une bonne performance de rayonnement. Elle est également adaptée aux applications où l'espace est limité, telles que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les tablettes.

Le but de ce chapitre est de présenter l'antenne PIFA. Nous allons définir en premier lieu un état de l'art sur les antennes PIFA et présenterons ses caractéristiques radioélectriques. Ensuite, les paramètres caractérisant les performances d'antenne sont définis.

II.2 Définition des antennes PIFA

Une antenne PIFA est une antenne plate composée d'un plan de masse sur lequel est fixé un élément rayonnant constitué d'un patch conducteur. Cette conception simplifiée de l'antenne monopôle en forme de L, utilise un plan de masse vertical en forme de L pour générer le champ magnétique nécessaire au rayonnement. Le patch conducteur est habituellement connecté à un câble coaxial pour être relié à un circuit électronique. [14]

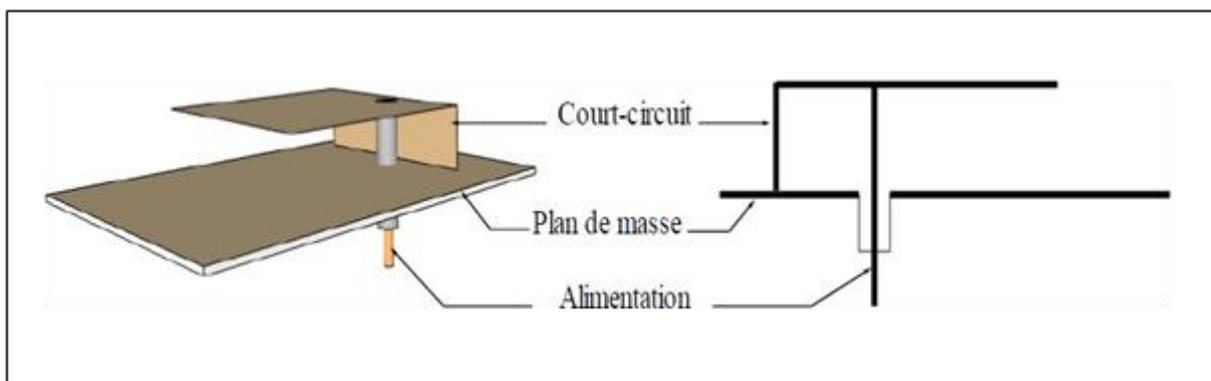


Figure II.1 Structure d'antenne PIFA

II.3 Les type des antennes PIFA

II.3.1 Antennes PIFA à bande unique : Ces antennes sont conçues pour fonctionner à une seule fréquence. Elles sont souvent utilisées dans les applications sans fil qui nécessitent une transmission à une fréquence spécifique. [15]

II.3.2 Antennes PIFA à double bande : Ces antennes sont conçues pour fonctionner à deux fréquences différentes. Elles sont souvent utilisées dans les applications sans fil qui nécessitent une transmission à deux fréquences différentes. [16]

II.3.3 Antennes PIFA à large bande : Ces antennes sont conçues pour fonctionner sur une large plage de fréquences. Elles sont souvent utilisées dans les applications sans fil qui permettent une transmission sur une plage de fréquences plus grande que celle des antennes à bande unique ou double bande. [17]

II.3.4 Antennes PIFA miniatures : Ces antennes sont conçues pour être très petites et compactes. Elles sont souvent utilisées dans les applications sans fil qui nécessitent une petite taille d'antenne. [18]



Figure II. 2 Les type des antennes PIFA

II.4 Les caractéristiques principales d'une antenne PIFA

II.4.1 Compacte :

L'antenne PIFA est très compacte et peut être facilement intégrée dans des dispositifs électroniques de petite taille.

II.4.2 Bande passante étroite

L'antenne PIFA a une bande passante relativement étroite, ce qui signifie qu'elle est optimisée pour une fréquence de fonctionnement spécifique.

II.4.3 Gain modéré

L'antenne PIFA a un gain modéré, ce qui signifie qu'elle peut recevoir et transmettre des signaux sans fil à une distance raisonnable.

II.4.4 Faible impédance

L'antenne PIFA a une impédance relativement faible, ce qui facilite son intégration avec d'autres composants électroniques.

II.4.5 Structure simple

L'antenne PIFA a une structure simple, ce qui facilite sa fabrication et sa conception. [19]

II.5 Exemples d'antennes PIFA

Les antennes PIFA sont largement utilisées dans les téléphones portables et couvrant les normes GSM, DCS, PCS et UMTS est présentée en raison de leur faible encombrement et de leur efficacité de transmission. Voici quelques exemples des téléphonies Mobile a base des antennes PIFA:

iPhone X : L'iPhone X d'Apple utilise une antenne PIFA pour la transmission des signaux sans fil, qui est intégrée dans le cadre en acier inoxydable autour du téléphone.[20]

Samsung Galaxy S7 : Le Samsung Galaxy S7 utilise également une antenne PIFA pour la transmission des signaux sans fil, qui est intégrée dans la partie supérieure et inférieure du cadre en métal autour du téléphone [21].

Google Pixel 3 : Le Google Pixel 3 utilise une antenne PIFA pour la transmission des signaux sans fil, qui est intégrée dans la partie supérieure du cadre en métal autour du téléphone.[22]

Huawei P10 : Le Huawei P10 utilise également une antenne PIFA pour la transmission des signaux sans fil, qui est intégrée dans la partie supérieure du cadre en métal autour du téléphone [23].

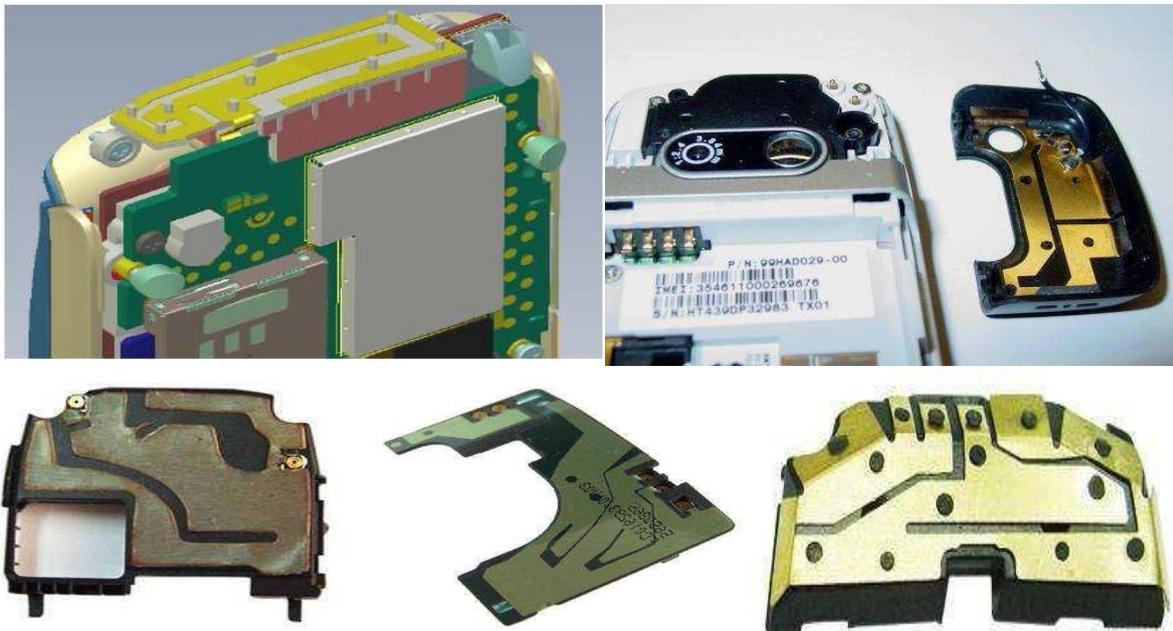


Figure II.3 Exemples d'antennes PIFA présentés dans des téléphones portables

II.6 Avantages et inconvénients

Les antennes PIFA présentent plusieurs avantages et inconvénients, qui dépendent de leur conception et de leur utilisation. Voici quelques-uns des principaux avantages et inconvénients des antennes PIFA :

II.6.1 Les Avantages des antennes PIFA

- **Faible encombrement** : Les antennes PIFA sont relativement petites et plates, ce qui les rend faciles à intégrer dans des dispositifs sans fil tels que des téléphones portables, des tablettes et des ordinateurs portables.
- **Bonne efficacité de transmission** : Les antennes PIFA peuvent avoir une efficacité de transmission élevée, ce qui signifie qu'elles sont capables de transmettre des signaux sans fil avec peu de pertes.
- **Miniature (compacte)** [24]

II.7.2 Les Inconvénients des antennes PIFA

- **Sensibilité aux variations de l'environnement** : Les antennes PIFA peuvent être sensibles aux variations de l'environnement, telles que la présence de corps humains ou d'autres objets métalliques à proximité.
- **Perturbation des performances par les objets métalliques** : Les antennes PIFA peuvent être perturbées par la présence d'objets métalliques à proximité, ce qui peut entraîner une dégradation de leurs performances de transmission.
- **Réduction de l'efficacité à basse fréquence** : Les antennes PIFA peuvent avoir une efficacité de transmission réduite à basse fréquence, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications sans fil [25].
- **Faible bande passante**
- Fabrication relativement difficile et coûteuse
- Nombre de bande à couvrir limité

II.8 Les performances des antennes PIFA

L'antenne PIFA est une antenne compacte et efficace pour les applications sans fil. Ses performances dépendent de nombreux facteurs, tels que la bande passante, la directivité, la polarisation et les interférences électromagnétiques. Les concepteurs doivent prendre en compte ces facteurs pour optimiser les performances de l'antenne dans leur application spécifique.

- **Directivité** : La directivité de l'antenne PIFA dépend de sa taille et de sa forme, ainsi que de la fréquence de fonctionnement. En général, elle a une directivité modérée, ce qui signifie qu'elle émet et reçoit des signaux dans une direction plutôt que dans toutes les directions [26].
- **Polarisation** : L'antenne PIFA peut avoir une polarisation linéaire ou circulaire, en fonction de sa conception. La polarisation linéaire est plus courante dans les applications sans fil, tandis que la polarisation circulaire est utilisée dans les applications de communication par satellite [27].
- **Interférences** : Les performances de l'antenne PIFA peuvent être affectées négativement par les interférences électromagnétiques externes, telles que les signaux provenant d'autres appareils électroniques. Les concepteurs doivent prendre en compte ces interférences pour optimiser les performances de l'antenne [28].

II.9 La configuration typique d'une antenne PIFA :

- Une plaque conductrice carrée ou rectangulaire, généralement en cuivre, qui sert de radiateur principal.
- Un plan de masse situé en dessous de la plaque conductrice. Le plan de masse est souvent la carte de circuit imprimé (PCB) elle-même, mais il peut également s'agir d'une plaque métallique séparée.
- Une alimentation coaxiale, qui est connectée à la plaque conductrice à travers un point de connexion.
- Un ou plusieurs éléments de couplage, tels que des bandes métalliques ou des fils de cuivre, qui relient la plaque conductrice au plan de masse.

La configuration de l'antenne PIFA est conçue pour générer un champ électromagnétique dans la région située au-dessus de la plaque conductrice, ce qui permet de couvrir efficacement la zone de réception. La conception de l'antenne PIFA peut varier en fonction des besoins spécifiques de l'application, mais la plupart des antennes PIFA utilisent une configuration similaire [29].

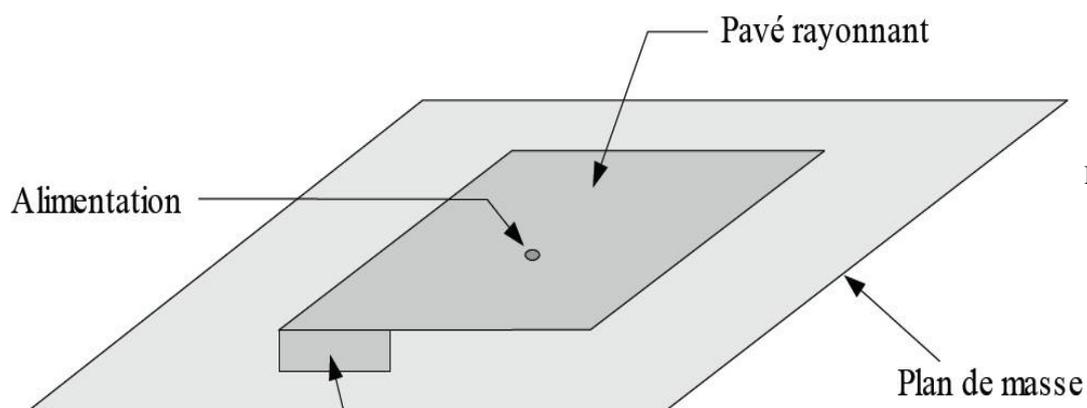


Figure II.4

Figure II.4 Configuration de l'antenne PIFA (pavé rayonnant suspendu dans l'air)

II.10 Les variations de conception d'antenne PIFA

Il existe de nombreuses variations de conception d'antennes PIFA pour les téléphones mobiles, qui peuvent varier en fonction de la forme, de la taille, de l'emplacement et des matériaux utilisés. Voici quelques exemples :

II.10.1 Antenne PIFA en forme de L : Cette conception utilise une plaque conductrice en forme de L pour le radiateur principal, avec un plan de masse situé en dessous. Les éléments de couplage peuvent être des bandes métalliques ou des fils de cuivre.

II.10.2 Antenne PIFA double bande : Cette conception utilise deux plaques conductrices pour les radiateurs principaux, chacun fonctionnant dans une bande de fréquences différente. Les plaques conductrices sont souvent disposées perpendiculairement les unes aux autres, avec un plan de masse situé en dessous.

II.10.3 Antenne PIFA à double élément : Cette conception utilise deux éléments radiateurs qui sont connectés à la plaque conductrice principale et fonctionnent ensemble pour améliorer les performances de l'antenne. Les éléments de couplage peuvent être des bandes métalliques ou des fils de cuivre.

Ces exemples ne sont pas exhaustifs, mais ils montrent la variété de conceptions d'antennes PIFA qui peuvent être utilisées dans les téléphones mobiles. Les conceptions peuvent également varier en fonction des exigences spécifiques de la bande de fréquence, de la polarisation, de la directionnalité, de la sensibilité aux interférences et de la compatibilité avec d'autres composants du téléphone [29] [30].

II.11 La taille des antennes PIFA

La taille des antennes PIFA pour les téléphones mobiles peut varier considérablement en fonction des exigences de l'application, de la bande de fréquence, des performances requises et des contraintes d'emplacement. Cependant, les antennes PIFA sont généralement conçues pour être compactes et discrètes afin de s'intégrer facilement dans un téléphone mobile.

En général, la taille des antennes PIFA pour les téléphones mobiles peut être comprise entre quelques millimètres à plusieurs centimètres en fonction de la bande de fréquence et des performances requises. Par exemple, pour les bandes de fréquences de 800 MHz à 1,8 GHz utilisées dans les réseaux de téléphonie mobiles, la longueur de l'antenne PIFA peut être de

l'ordre de 60 mm à 70 mm. Pour les bandes de fréquences plus élevées, telles que les bandes LTE à 2,6 GHz et les bandes Wi-Fi à 5 GHz, la longueur de l'antenne peut être réduite à environ 10 mm à 20 mm.

Il est important de noter que la taille de l'antenne PIFA peut également être influencée par d'autres facteurs tels que la sensibilité aux interférences, la directivité, la bande passante et la compatibilité avec d'autres composants du téléphone [31].

II.12 Les techniques de conception d'antenne PIFA

Il existe plusieurs techniques de conception d'antennes PIFA pour les téléphones mobiles, qui peuvent être utilisées pour améliorer les performances de l'antenne et réduire les interférences. Voici quelques exemples de techniques utilisées pour les antennes PIFA :

- **Réduction de la taille de l'antenne** : Une technique courante pour réduire la taille de l'antenne PIFA est de plier la plaque conductrice en forme de L ou de U. Cette technique permet de réduire la longueur de l'antenne tout en maintenant des performances de rayonnement satisfaisantes.
- **Utilisation de matériaux diélectriques** : L'utilisation de matériaux diélectriques dans la conception de l'antenne PIFA peut améliorer les performances de l'antenne en augmentant le taux de charge de surface et en réduisant les pertes par rayonnement.
- **Utilisation de structures multi-bandes** : Les structures multi-bandes peuvent être utilisées pour augmenter la bande passante de l'antenne PIFA. Les techniques courantes comprennent l'utilisation de fentes, de coupures ou de perçages sur la plaque conductrice principale.
- **Utilisation de structures fractales** : Les structures fractales peuvent être utilisées pour améliorer les performances de l'antenne PIFA en augmentant la longueur du chemin de rayonnement et en réduisant les pertes par rayonnement.
- **Conception d'antennes multi-éléments** : Les antennes PIFA multi-éléments utilisent plusieurs radiateurs pour améliorer les performances de l'antenne. Les radiateurs peuvent être connectés en série ou en parallèle pour augmenter la bande passante et réduire les pertes par rayonnement.

Ces techniques ne sont pas exhaustives, mais elles montrent la variété de techniques qui peuvent être utilisées pour améliorer les performances de l'antenne PIFA pour les téléphones mobiles [30] [31].

II.13 Utilisation des antennes PIFA

Les antennes PIFA sont souvent utilisées dans les téléphones portables, les ordinateurs portables, les tablettes et autres appareils électroniques. Voici quelques exemples d'utilisation des antennes PIFA, avec des sources pour approfondir le sujet:

- **Téléphones portables** : Les antennes PIFA sont largement utilisées dans les téléphones portables pour leur compacité et leur efficacité. Elles peuvent être intégrées à l'intérieur du boîtier du téléphone pour minimiser l'espace occupé [31].
- **Ordinateurs portables** : Les antennes PIFA sont également utilisées dans les ordinateurs portables pour offrir une connectivité Wi-Fi et Bluetooth fiable. Elles peuvent être intégrées dans la carte mère de l'ordinateur portable ou dans l'écran pour minimiser l'espace occupé [32].
- **Systèmes de navigation** : Les antennes PIFA peuvent également être utilisées dans les systèmes de navigation par satellite pour recevoir des signaux GPS, GLONASS et d'autres systèmes de positionnement par satellite [33].
- **Équipements médicaux** : Les antennes PIFA peuvent être utilisées dans les équipements médicaux pour la transmission de données sans fil à partir de capteurs et d'autres dispositifs [34].

Les antennes PIFA sont largement utilisées dans de nombreux appareils électroniques pour offrir une connectivité sans fil fiable et efficace. Elles sont également utilisées dans d'autres applications, telles que les systèmes de navigation et les équipements médicaux. Les concepteurs doivent prendre en compte les spécifications de l'application pour optimiser les performances de l'antenne dans leur produit.

II.14. Développement d'antenne PIFA

Une antenne PIFA est une antenne plate bidimensionnelle qui est souvent utilisée dans les applications sans fil, telles que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les tablettes. Elle est conçue pour être discrète et peu encombrante, tout en offrant une bonne performance de rayonnement.

Le développement d'une antenne PIFA peut être divisé en plusieurs étapes, notamment la conception, la modélisation, la simulation et la fabrication. Voici une brève présentation de chacune de ces étapes :

- **Conception** : La conception d'une antenne PIFA commence par la définition des spécifications de performance, telles que la bande passante, le gain et la polarisation. Ensuite, la géométrie de l'antenne est déterminée, en tenant compte des contraintes d'espace et de la compatibilité avec le circuit imprimé.
- **Modélisation** : Une fois la géométrie de l'antenne définie, il est nécessaire de la modéliser à l'aide d'un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). La modélisation permet de déterminer les dimensions et les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne, telles que la résistance, la capacité et l'inductance.
- **Simulation** : La modélisation est suivie d'une simulation électromagnétique pour évaluer la performance de l'antenne. La simulation permet de déterminer les paramètres de rayonnement de l'antenne, tels que la directivité, l'efficacité et la réflexion.
- **Fabrication** : Une fois la conception et la simulation terminées, l'antenne est fabriquée sur un circuit imprimé en utilisant des techniques de fabrication de précision. Les antennes PIFA sont souvent fabriquées en utilisant des matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'argent [35].

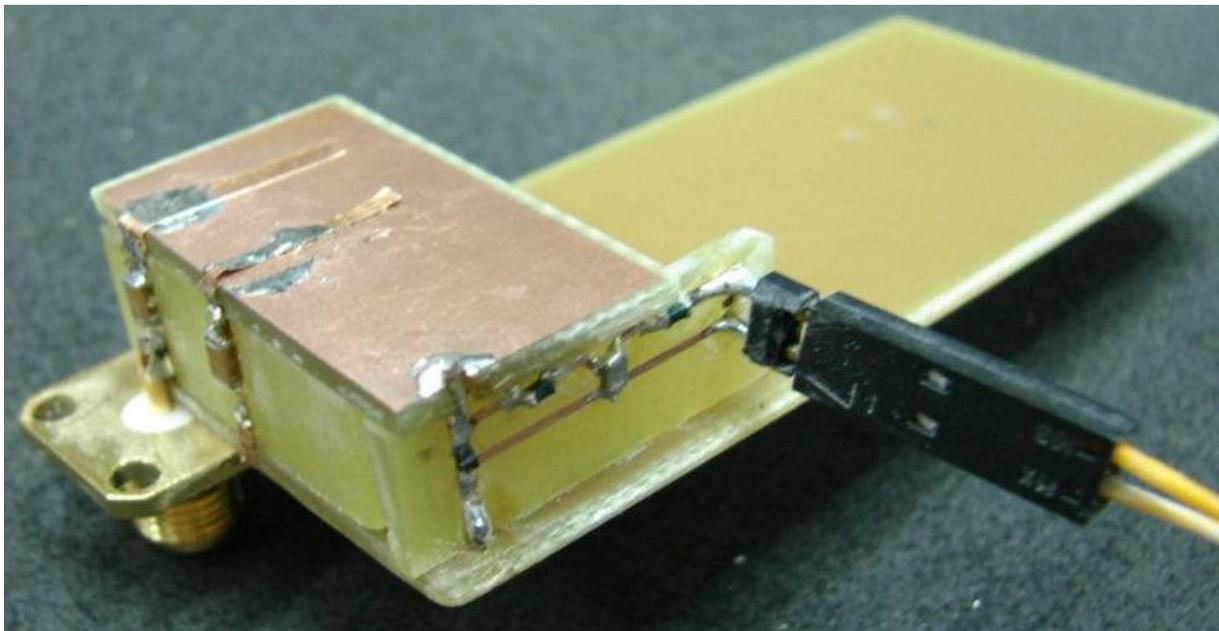


Figure II.5 Développement d'antenne PIFA

II.15. L'évolution des standards de communication

L'évolution des standards de communication (GSM, GPRS, EDGE, ETACS) est leurs caractéristiques sont résumé dans le tableau suivant :

Tableau II.1 résumé de l'évolution des standards de communication.

Génération	Norme européenne	Caractéristiques
1G	ETACS	Analogique. Premier Téléphone sans fil, voix unique
2G	GSM	Permet le transfère de voix ou de données numérique de faible volume
2.5G	GPRS	Permet le transfère de voix ou de données numérique de volume modéré
2.75G	EDGE	Permet le transfère simulation de voix et de données numérique

II.15.1 GSM

Le GSM est une base sur une norme élaborée en 1982, il appartient à la seconde génération de la téléphonie mobile et leur fonctionnement en deux bandes, la bande de fréquence autour de 900MHz et 1800 MHz appelé DCS.

II.15.2 UMTS

L'UMTS est un système cellulaire de la troisième génération qui a été conçue pour une transmission simultanée de la voix et des données avec des débits beaucoup plus importants que ceux des générations précédant allant à 384 kbit/s pour un utilisateur mobile et de 2 Mbit/s pour un utilisateur fixe. La bande de fréquence allouée à L'UMTS est différente à celle du GSM, s'étalant de 1900MHz à 2200MHz.

II.15.3 GPRS

Le GPRS Ne constitue qu'une couche supplémentaire rajoutée au réseau GSM, il fait partit de la deuxième génération. Il permet de transfert des données par paquet avec débit théorique de 171.2 Kbit/s et le transport de GSM.

Le GPRS utilise les bandes de fréquence attribuées au GSM : 900MHz à 1900 MHz.

II.15.4 EDGE

L'EDGE est une norme améliorée par rapport à celle du GSM, qui ne demande pas l'investissement lourd dans l'infrastructure mais qui offre aux utilisateurs la possibilité de transmettre des vidéos, les photos, des sons avec un débit théorique de 473Kbit/s. Son avantage majeur est qu'elle peut être intégrer à la norme GSM très facilement puisqu'elle occupe la même bande des fréquences celle du 900 MHz. [36]

II.15 Conclusion

Les antennes PIFA sont des antennes intégrées couramment utilisées dans les téléphones portables. Elles offrent une conception compacte, une bonne performance et une configuration typique en forme de plaque. Cependant, elles peuvent présenter des variations de conception et leur taille est limitée. Les techniques de conception des antennes PIFA sont utilisées pour optimiser leurs performances et leur développement continu.

CHAPITRE 03 :

LA CONCEPTION ET L'OPTIMISATION

DES ANTENNES PIFA

III.1 Introduction

La conception et l'optimisation des antennes PIFA mobiles nécessitent une compréhension approfondie de leur comportement électromagnétique dans des environnements réels. Cependant, la réalisation d'expériences physiques pour chaque configuration d'antenne envisagée peut être coûteuse et chronophage. C'est là que les simulations numériques deviennent extrêmement utiles.

Dans ce chapitre, nous explorons l'utilisation du logiciel COMSOL pour la simulation des antennes PIFA mobiles. COMSOL est un puissant outil de simulation électromagnétique qui permet de modéliser et de résoudre numériquement les équations de Maxwell pour étudier le comportement des antennes.

Nous commencerons par une brève présentation du logiciel COMSOL Multiphysics. Ensuite, nous aborderons les principaux aspects de la modélisation des antennes PIFA mobiles avec COMSOL, en mettant l'accent sur les paramètres importants à prendre en compte et les étapes de simulation. Nous discuterons également des différentes analyses que l'on peut réaliser avec COMSOL pour évaluer les performances des antennes PIFA mobiles, telles que la réponse en fréquence, le rayonnement électromagnétique, l'efficacité de l'antenne, etc.

Enfin, nous présenterons quelques exemples pratiques de simulation des antennes PIFA mobiles avec COMSOL, en montrant comment optimiser les performances de l'antenne en modifiant certains paramètres de conception.

III.2 COMSOL Multiphysics

III.2.1 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des divers des recherches scientifiques, utiliser pour simuler les conceptions, les dispositifs et les procédés dans les différentes domaines, basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Le COMSOL se caractérise par le fait qu'il contient un grand nombre d'équations physiques qui permettent une simulation et un traitement précis de divers problèmes et erreurs, il n'est donc pas nécessaire pour l'utilisateur de ce logiciel d'avoir des connaissances préalables en mathématiques et en analyse numérique. [37]

La modélisation d'un modèle physique par COMSOL se fait à travers des étapes nécessaires pour atteindre l'interface principale de ce logiciel.

➤ **Choisir les dimensions graphiques :**

1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D

➤ **Choisir le domaine physique :**

Tel que l'électromagnétisme, le transfert de chaleur, l'acoustique, la mécanique des fluides, l'électricité ou la mécanique des structures, (on a la possibilité de combiner les phénomènes physiques de ces domaines dans un seul modèle.)

➤ **Choisir le domaine d'analyse :**

Après avoir sélectionné le domaine physique approprié, tel que "Électromagnétisme", ensuite on choisit le mode d'analyse spécifique qui convient à votre problème, tel que l'analyse en "Fréquence" ou en "Temporel".

III.2.2 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL

L'interface de COMSOL 5.6 peut être séparée en quatre fenêtres et sont présentées à la Figure III.1

À gauche, on trouve le **Model Builder** ① dans lequel est défini le problème à étudier. Dans le détail, le menu Global Définitions regroupe notamment les variables et paramètres du problème. Dans le menu Component 1 sont définis le système de coordonnées (Définitions) par défaut le système cartésien, la géométrie (Geometry), les matériaux (Materials), la ou les physique(s) appliquées au problème et le maillage (Mesh). Le menu suivant Study 1 permet de définir les paramètres de résolution, stationnaire ou instationnaire, ainsi que les options du solveur. Finalement, le menu Resultats regroupe l'ensemble des options de post-traitement des données.

La colonne directement à droite **Settings** ② permet d'entrer les données relatives aux options sélectionnées dans le Model Builder. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans Geometry. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, l'interface d'affichage graphique **Graphics** ③ permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se trouvent les options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, cacher certains éléments, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi en haut de cette fenêtre. Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, une fenêtre ④ permet de visualiser les éventuels

messages d'erreur, la progression des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

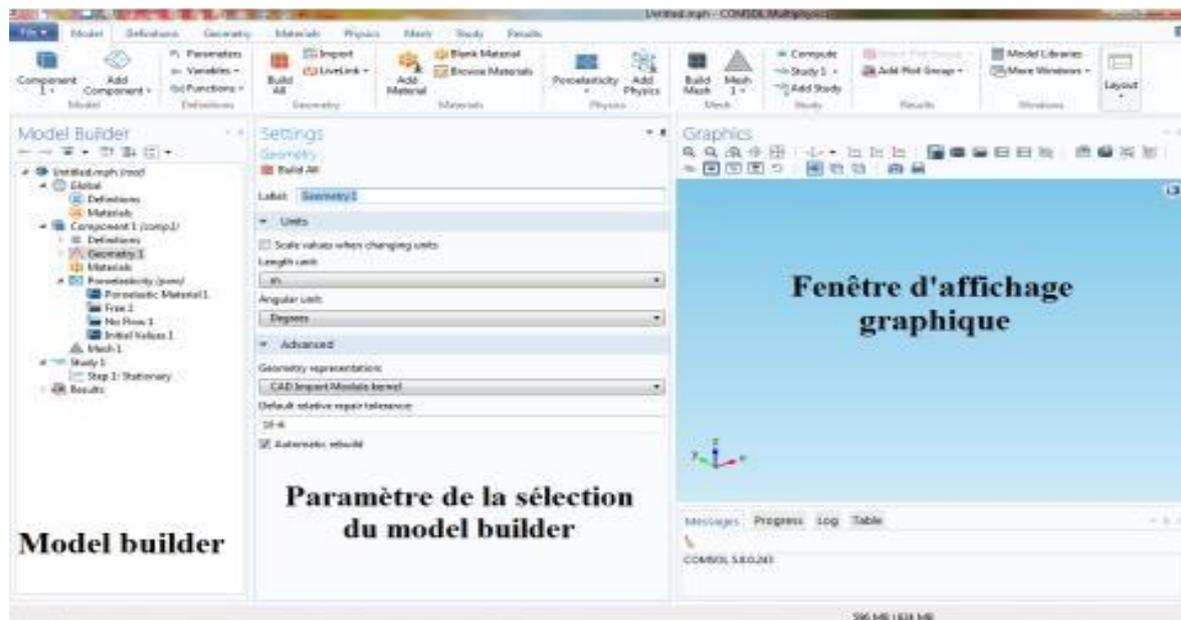


Figure III.1 Interface utilisateur de COMSOL 5.6

III.2.3 Les étapes du processus de modélisation

La modélisation et simulation numérique sous COMSOL Multiphysics se fait selon plusieurs étapes qui sont :

- Choix du modèle
- Géométrie de la structure
- Définition des matériaux
- Physique du modèle (condition aux limites)
- Maillage
- Simulation
- Visualisation des résultats

III.3 Simulation des antennes PIFA par COMSOL

L'objectif de notre travail de modélisation est de pouvoir simuler le fonctionnement de l'antenne PIFA à partir de modèles multiphysiques, afin de prédire ses performances en termes des paramètres S, la bande passante et le diagramme de rayonnement. Dans cette

section nous allons décrire la modélisation des antennes PIFA par COMSOL Multiphysics version 5.6 en vue d'avoir un modèle de conception (Figure III.2 présente une antenne PIFA intégré dans un MOBILE).

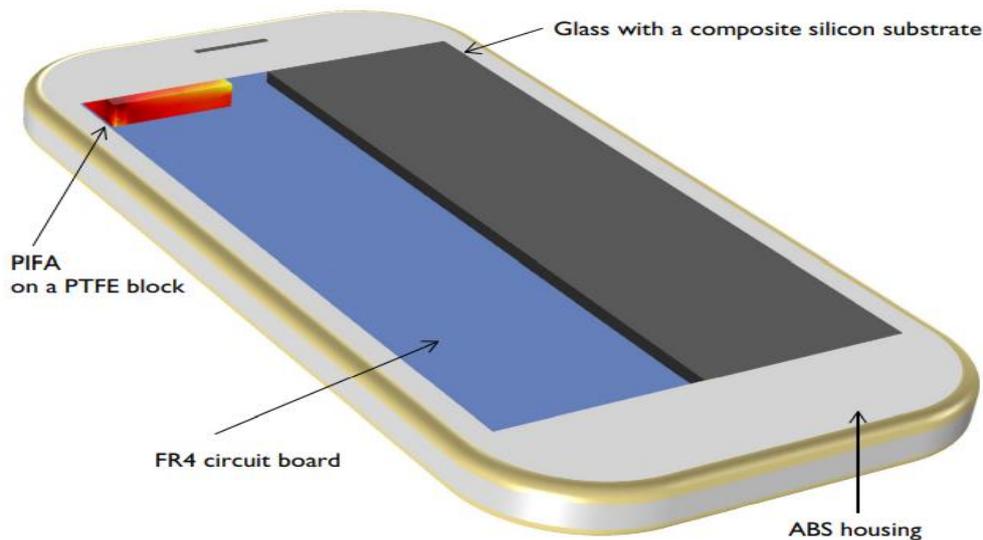


Figure III.2 Une simple antenne PIFA sur un circuit imprimé FR4 est enfermée dans un boîtier ABS.

III.3.1 Création du modèle de simulation

Au démarrage du logiciel, le navigateur Assistant de modélisation apparaît pour définir le modèle physique utilisé et choisir l'espace dimensionnel. Pour les antenne PIFA, un espace de coordonnées 3D est défini et une étude dans le modèle Radio fréquence (ondes électromagnétiques, domaine fréquentiel) est générée. Enfin, une étude dans le domaine fréquentiel est définie. Une fois que le modèle physique a été choisi, la fenêtre principale du COMSOL apparaît tel qu'illustré par la figure (III.3).

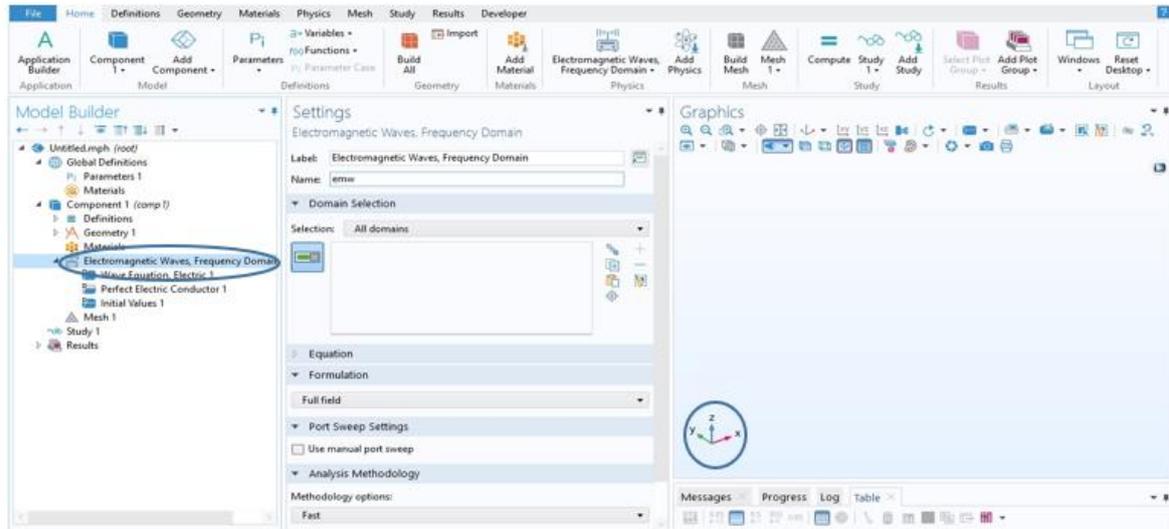


Figure III.3 La page principale de COMSOL 5.6

III.3.2 Paramètres

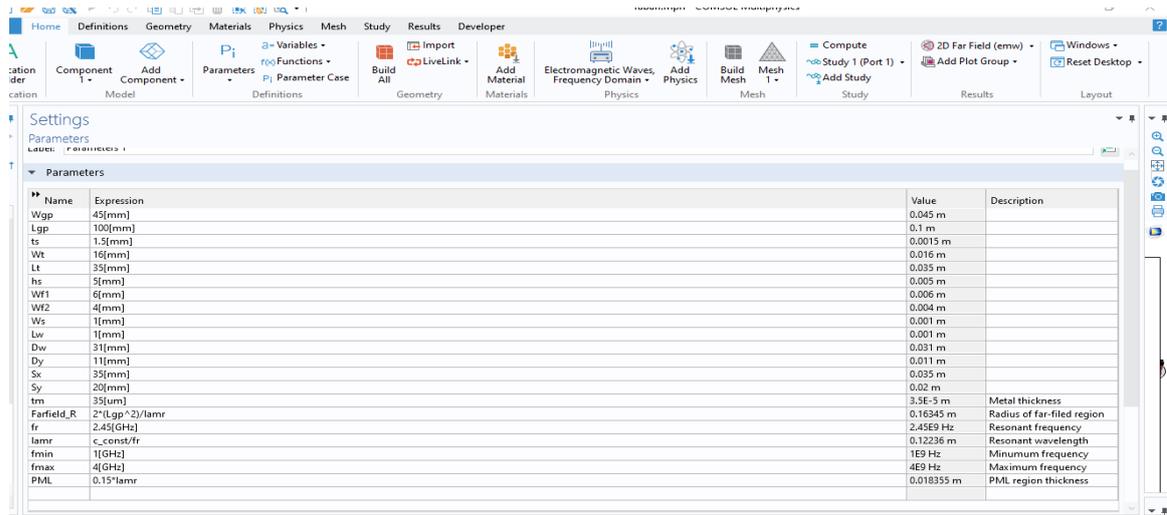
Les paramètres globaux sont des scalaires constants définis par l'utilisateur et qui sont utilisables dans tout le modèle tels que les différentes dimensions de la structure

Longueur : C'est la dimension horizontale de l'antenne PIFA.

Largeur : C'est la dimension verticale de l'antenne PIFA.

Hauteur : C'est la dimension perpendiculaire au plan de sol de l'antenne.

Et la plage de fréquence de fonctionnement(f_{max} , f_{min} , f_{pas}) et autres ...



Name	Expression	Value	Description
Wgp	45[mm]	0.045 m	
Lgp	100[mm]	0.1 m	
ts	1.5[mm]	0.0015 m	
Wt	16[mm]	0.016 m	
Lt	35[mm]	0.035 m	
hs	5[mm]	0.005 m	
Wf1	6[mm]	0.006 m	
Wf2	4[mm]	0.004 m	
Ws	1[mm]	0.001 m	
Lw	1[mm]	0.001 m	
Dw	31[mm]	0.031 m	
Dy	11[mm]	0.011 m	
Sx	35[mm]	0.035 m	
Sy	20[mm]	0.02 m	
tm	35[um]	3.5E-5 m	Metal thickness
Farfield_R	$2 * Lgp^2 / lamr$	0.16345 m	Radius of far-field region
fr	2.45[GHz]	2.45E9 Hz	Resonant frequency
lamr	c_const / fr	0.12236 m	Resonant wavelength
fmin	1[GHz]	1E9 Hz	Minimum frequency
fmax	4[GHz]	4E9 Hz	Maximum frequency
PML	$0.15 * lamr$	0.018355 m	PML region thickness

Figure III.4 Tableau des paramètres.

III.3.3 Construction de la géométrie

Après l'ajout des tableaux des paramètres, la géométrie de l'antenne est dessinée. On commence par dessiner la géométrie de l'antenne PIFA, puis on fait l'importation du fichier qui contient la géométrie du Mobile comme indiqué dans la figure III.5

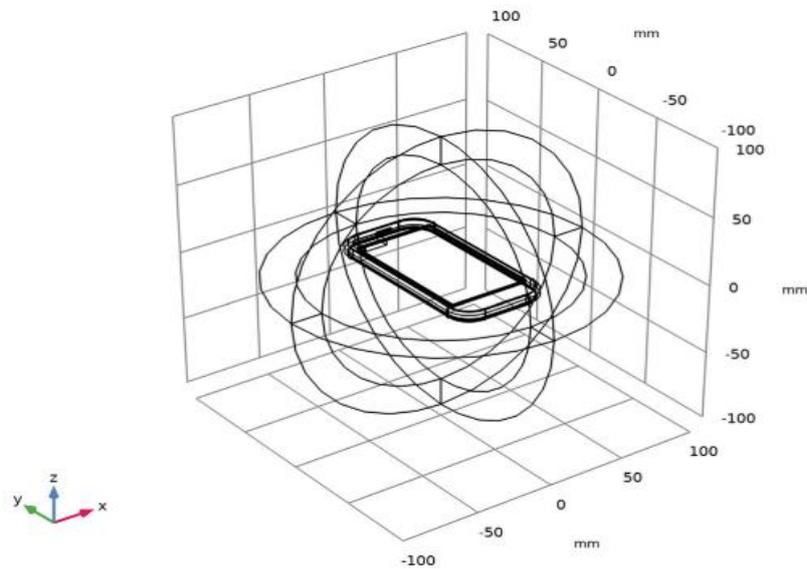
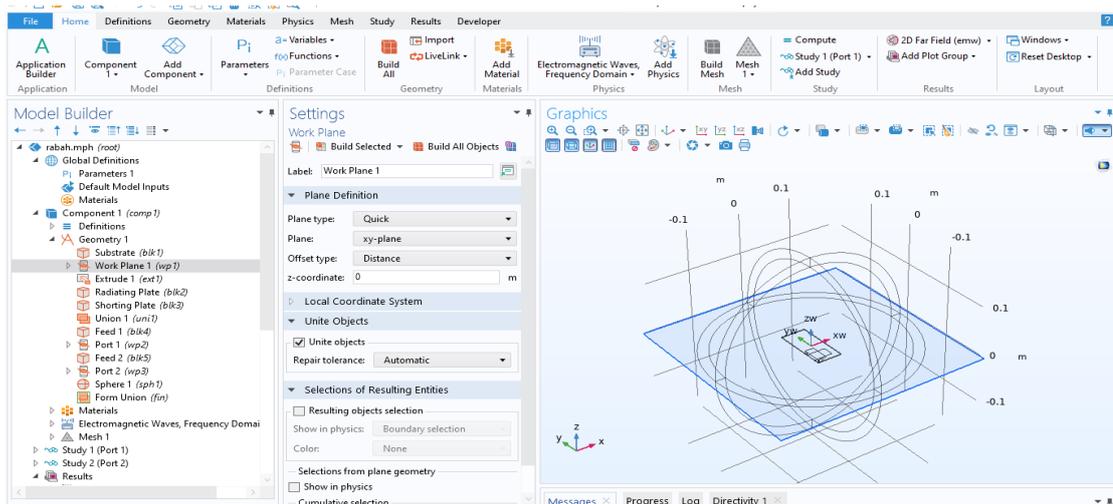


Figure III.5 La Géométrie

III.3.4 Définition des Matériaux

Divers matériaux sont obtenus à partir de la bibliothèque du logiciel, qui contient toutes les constantes physiques des matériaux, et des matériaux spéciaux peuvent être créés à travers eux, mais en ajoutant les constantes physiques manuellement.

Dans cet exemple, il existe trois types de matériaux " l'Air, Fibre de Glass (FR4 pour le substrat) et Copper (pour le patch métallique et la masse)".

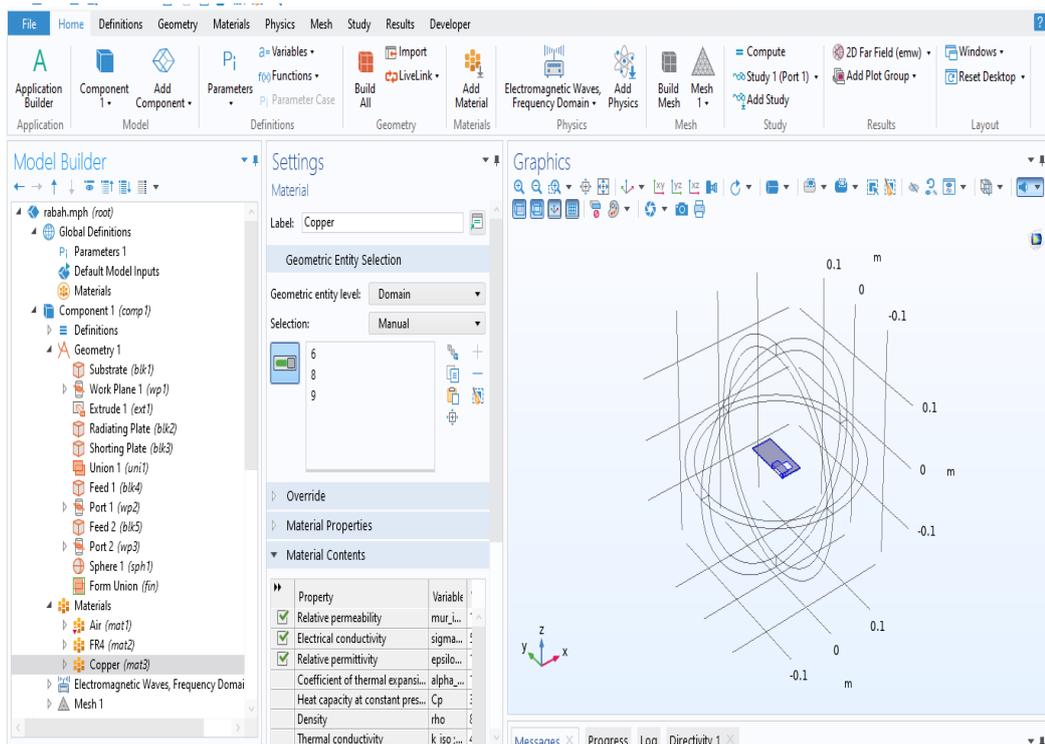


Figure III.6 Définition des matériaux

III.3.5 Définition des conditions aux limites (frontières) :

La modélisation électromagnétique haute fréquence, nécessite de nombreuses conditions aux limites utilisées pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, qui peuvent représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécanique, thermodynamique, acoustique, etc..). [41]

➤ Les paramètres des conditions aux limites sont :

- Perfect electric conductor (PEC)
- Far-Field Domain
- Lumped-Ports.

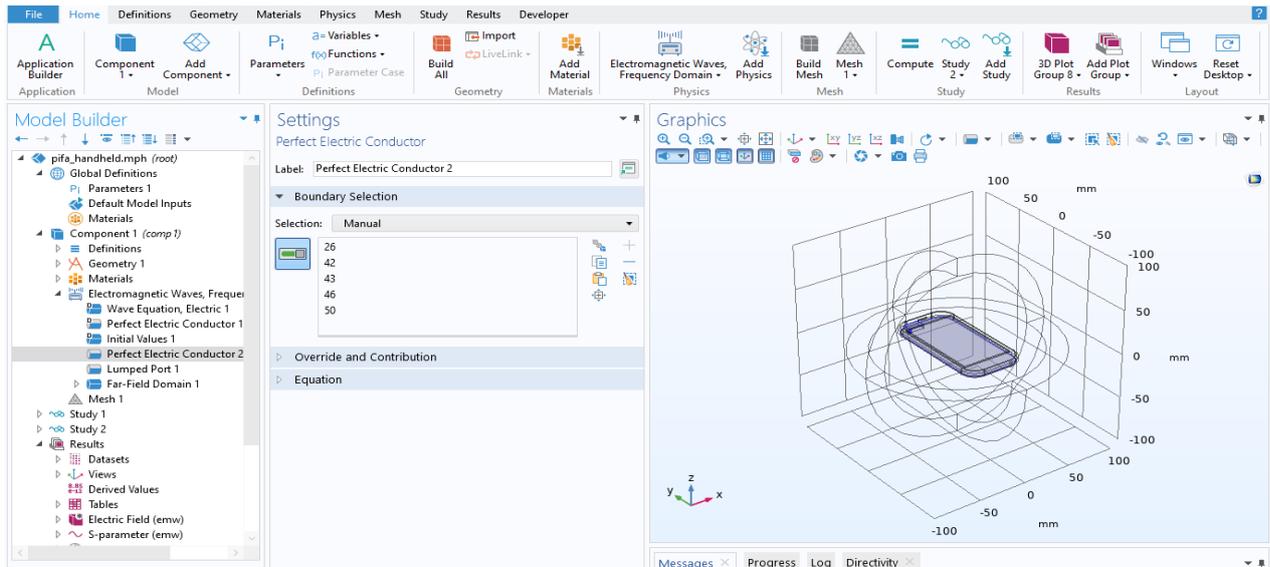


Figure III.7 Les conditions aux limites

III.3.6 Maillage

Les paramètres de maillage et de solveur sont gérés automatiquement par le logiciel, avec des options d'édition manuelle. Lors de la simulation des antennes, le logiciel COMSOL Multiphysics réalise un maillage adaptatif de la structure. C'est un maillage constitué d'éléments tétraédriques et triangulaires.

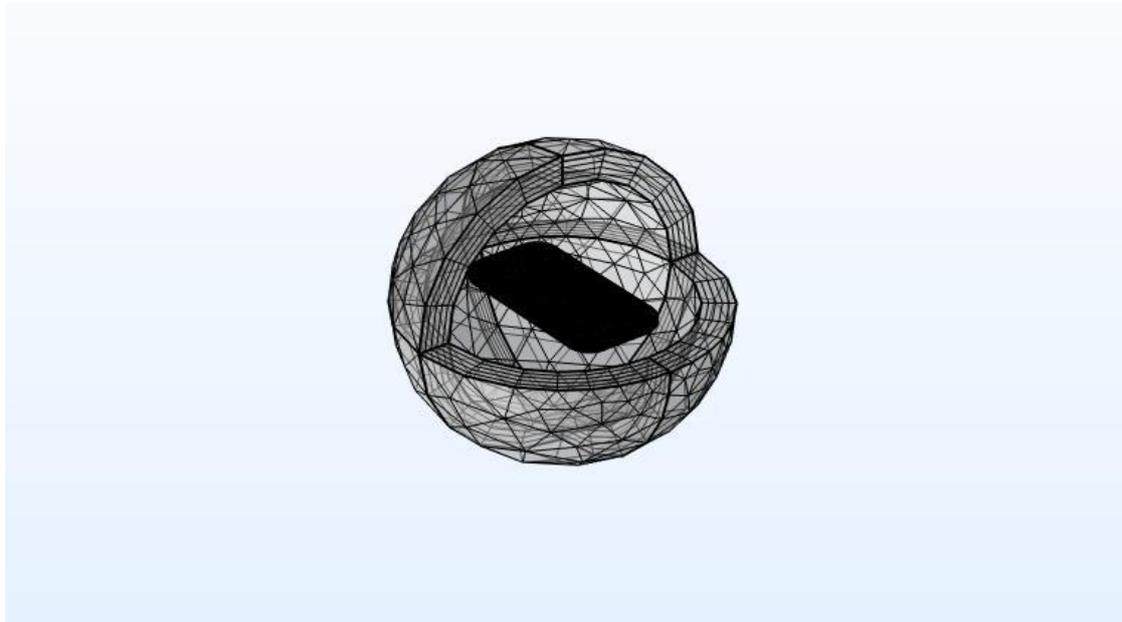


Figure III.8 Maillage

III.3.7 Simulation

Pour la simulation on a déjà défini dans la première étape l'étude dans le domaine fréquentiel. Il reste à choisir seulement la plage fréquentielle et le pas utilisé. Au final et comme dernière étape, la simulation correspondant au modèle sélectionné est lancée.

III.4 Simulation des antennes PIFA à large bande par COMSOL v5.6

L'évolution des standards de communication sans fil à un impact direct sur les antennes. Le téléphone mobile "mono-bande" qui utilise seulement la bande GSM est rapidement remplacé par le téléphone (GSM-DCS) "bi-bande" avec la popularité de la 2G. Une nouvelle bande DCS est allouée à cause du manque de capacité en GSM900.

Dans ces nouvelles applications de télécommunications, l'antenne PIFA doit répondre à plusieurs standards de télécommunications (GSM, DCS, PCS, WIFI ...etc.).

En plus pour mettre en valeur le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics, nous avons comparés les résultats de la littérature des structures d'antenne PIFA et les résultats obtenus avec le logiciel COMSOL.

Dans ce travail on va essayer de simuler l'antenne PIFA a large bande passante et a deux ports très simple et compacte. Cette antenne PIFA a un seul élément et a une hauteur de 5mm, ce qui le rend adapte aux applications dans les réseaux Locaux sans fil la bande Bluetooth/WLAN (2.45GHz) et la bande LTE/WiMAX (2,5–2,7 GHz) et peut être utilisée comme antenne terminale 4G pour la diversité et les applications a entrées et sorties multiples MIMO dans les mobiles et les ordinateurs tablettes comme antenne MIMO.

III.4.1 Description de la structure

Le PIFA à deux ports illustrés dans la figure III.8 comporte un plan de masse rectangulaire de dimensions $W_{gp} \times L_{gp}$ et une plaque rayonnante supérieure avec les dimensions $W_t \times L_t$. Le substrat utilisé est un Fibre de Glasse (FR4) caractérisé par une épaisseur de $t=1.5\text{mm}$ et d'une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$. Les dimensions de la plaque de court-circuit sont les suivantes $W_s \times (h+t)$, alors que les plaques d'alimentation 1 et 2 ont des dimensions de $(W_{f1} \times h)$ et $(W_{f2} \times h)$ respectivement, où h est la hauteur de l'antenne.

Le port 1 est placé sur le bord supérieur du plan de masse, et le port 2 est placé sur le bord latéral du plan de masse sous la plaque supérieure. La distance entre la plaque d'alimentation 1 et le court-circuit est de L_w et la distance verticale de la plaque d'alimentation 2 par rapport au bord supérieur du plan de masse est de D_w . La vue de dessous du plan de masse modifié est illustrée à la figure III. 9. Les dimensions de l'encoche placées sur le plan de masse sont $S_x \times S_y$. Le tableau (III.1) regroupe les différentes dimensions de l'antenne PIFA à simuler.

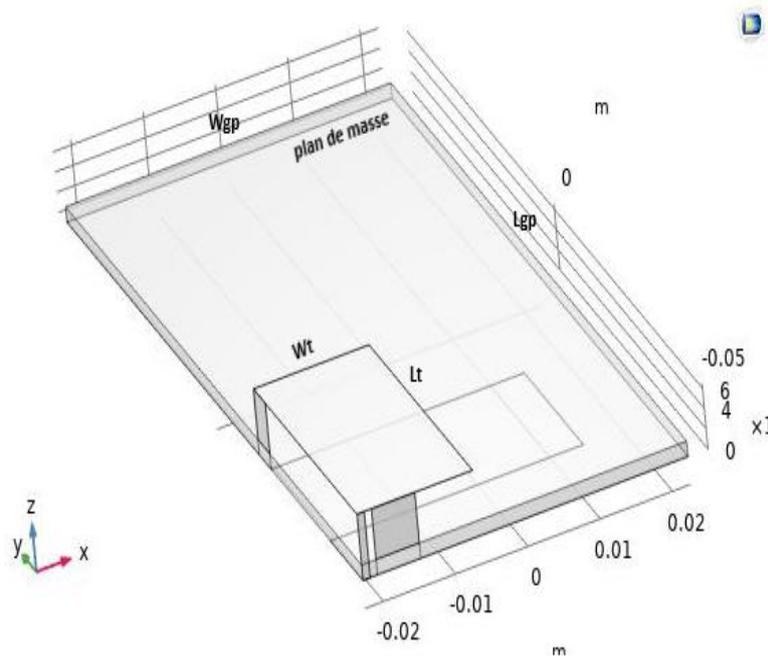


Figure III.9 Structure du PIFA à deux ports

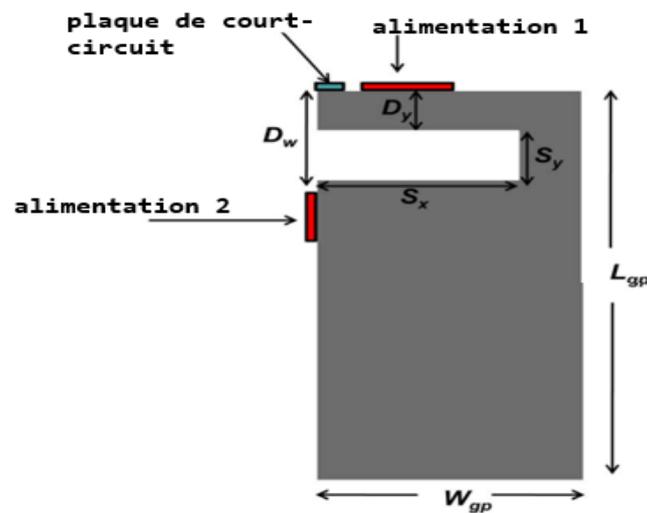
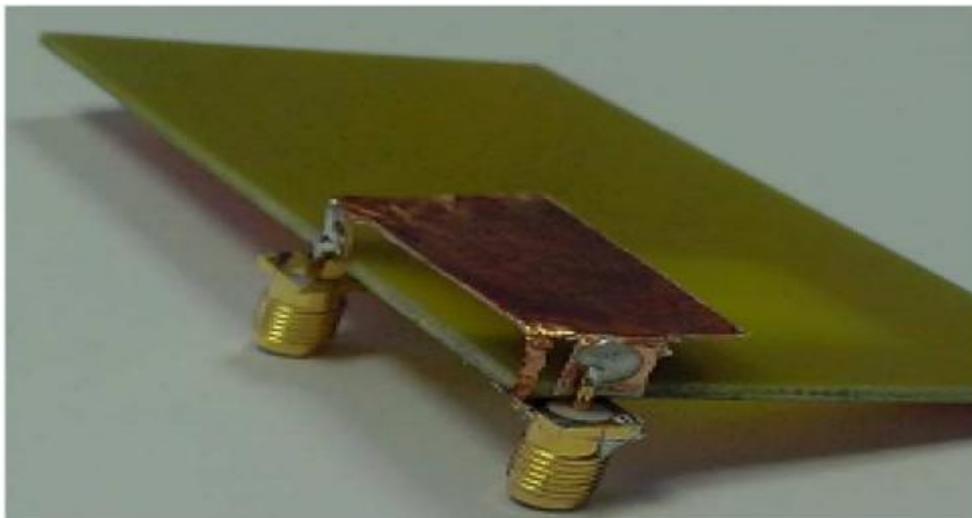


Figure III.10 Plan de masse de PIFA à large bande

Tableau III.2 Paramètres géométrique de l'antenne PIFA à large bande

paramètres	valeurs	paramètres	valeurs
Wgp	45 mm	Wf1	6 mm
Lgp	100 mm	Wf2	4 mm
ts	1.5 mm	Ws	1 mm
Wt	16 mm	Lw	1 mm
Lt	33 mm	Dw	27 mm
hs	5 mm	Sx	35 mm
Sy	20 mm	Dy	11 mm

La PIFA à deux ports fabriqués pour les mesures est illustré dans la Figure III.29

**Figure III.11** PIFA à deux ports fabriqués pour des mesures

III.4.2 Les résultats de simulation

III.4.2.1 Les coefficients de Réflexion et de Transmission

Les figures (III.5-III.6) montrent les coefficients de de réflexion S11 et de Transmission en fonction de la fréquence de fonctionnement (1GHz a 4GHz), pour les deux ports de l'antenne

PIFA de la figure III.29, obtenu par le logiciel COMSOL Multiphysics. Pour le port 1, le coefficient de réflexion de l'antenne qui indique une résonance à environ 2,2911 GHz (-30,856 dB) avec une largeur de bande de 0,815 GHz à -10 dB. Dans le cas où l'antenne est excitée dans le port 2 une seule fréquence de résonance d'environ 2.4051GHz (38 dB) a été observée avec une bande passante de 1.14GHz.

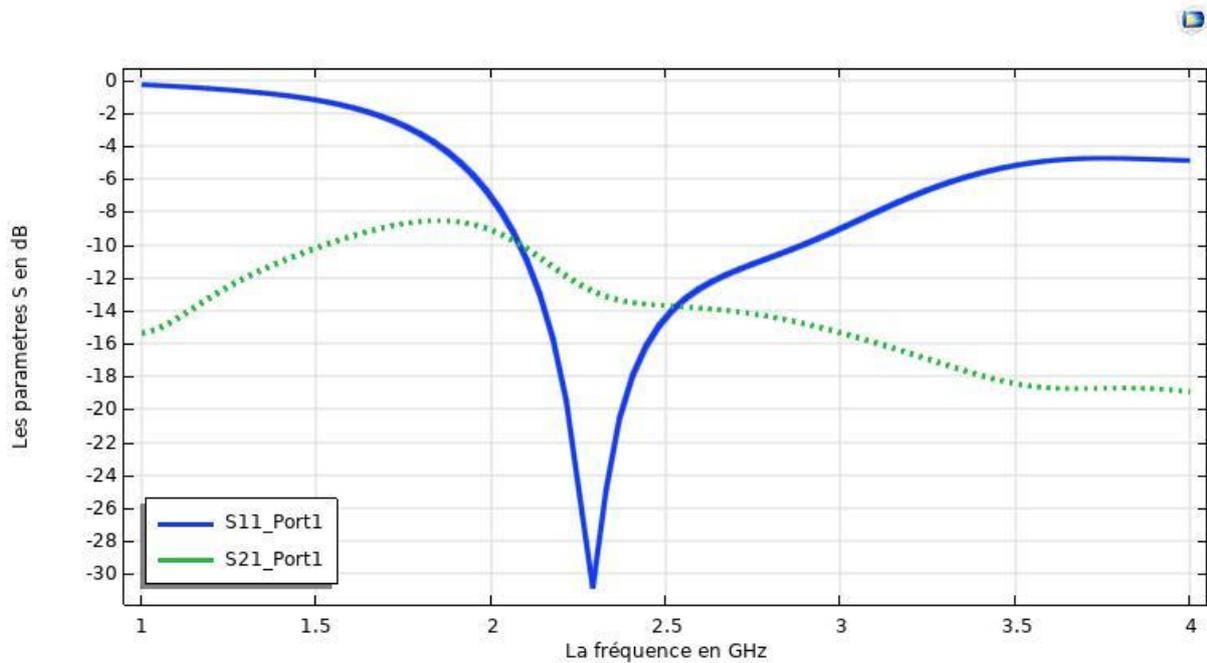


Figure III.12 Variation des coefficients de transmission et de réflexion en dB en fonction de la fréquence de fonctionnement (Port1)

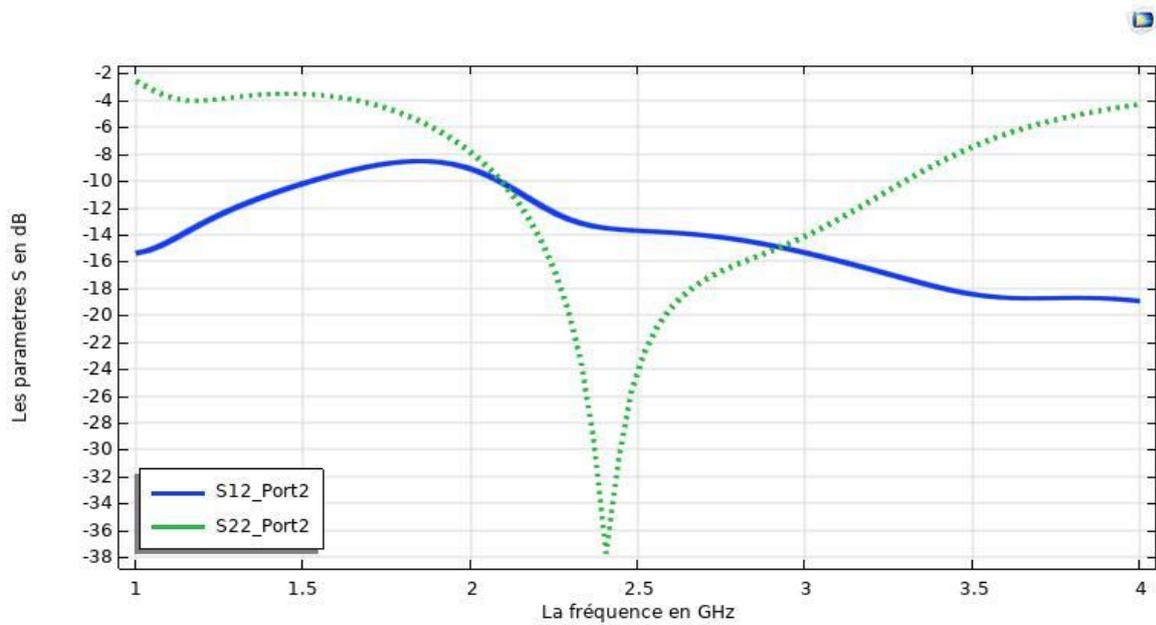


Figure III.13 Variation des coefficients de transmission et de réflexion en dB en fonction de la fréquence de fonctionnement (port 2)

La comparaison entre les différents résultats trouve sont présentés dans la figure III.14.

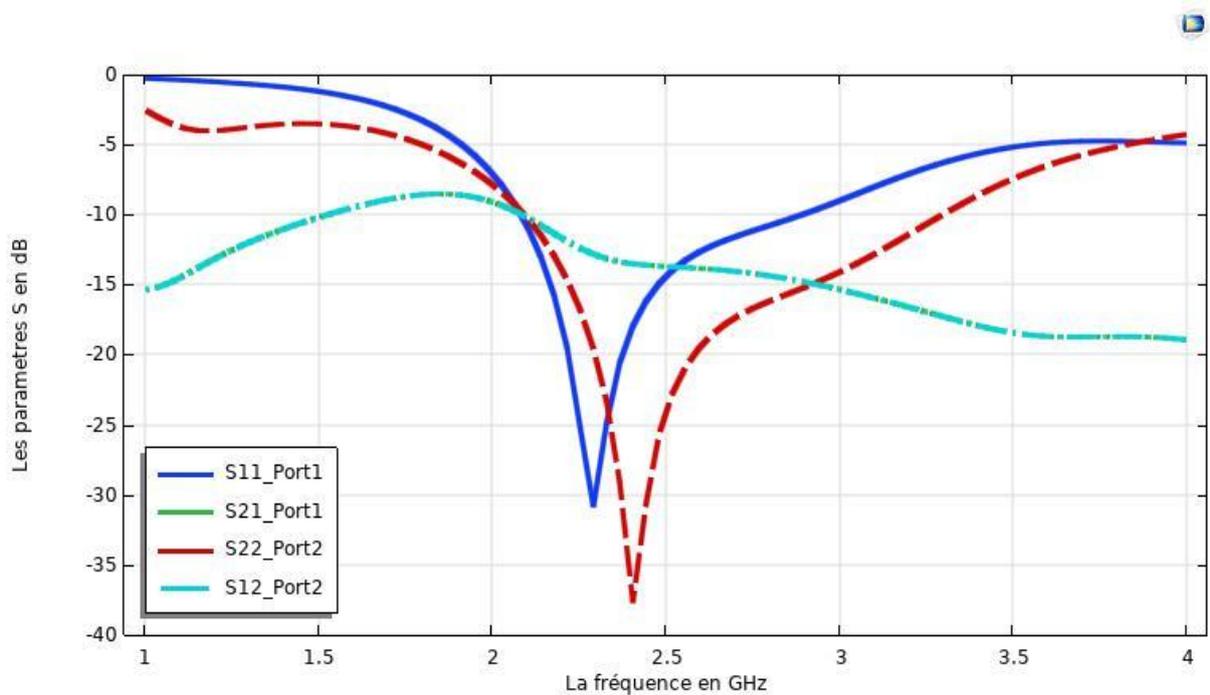


Figure III.14 Les Coefficient de réflexion la PIFA à deux ports.

D’après la figure III.32 il est évident que la largeur de la bande passante atteinte par les deux ports est supérieur à 800 MHz d’environ 2,1 GHz à 2,9 GHz pour $S_{11} < -10$ dB.

Le niveau minimum d'isolation obtenu entre les deux ports est d'environ -14 dB et moins dans la région d'intérêt, ce qui est une valeur d'isolation acceptable, étant donné qu'il s'agit d'une antenne à deux ports à un seul élément.

III.4.2.2 Les diagrammes de rayonnement

Le diagramme du rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes dans deux ou trois dimensions, dans le plan horizontal ($\phi=0^\circ$) ou dans le plan verticale ($\phi=90^\circ$) incluant le lobe le plus important.

a Les diagrammes de rayonnement 2D

Les diagrammes de rayonnement de l'antenne sont simulés dans les plans du champ électromagnétique (y-z) à la fréquence 2.4051 GHz comme le montre la figure (III.14) Et à la fréquence 2.2911 GHz tel que présenté dans la figure (III.15), On peut observer que l'antenne a un diagramme de rayonnement bidirectionnel dans les deux plans ($\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

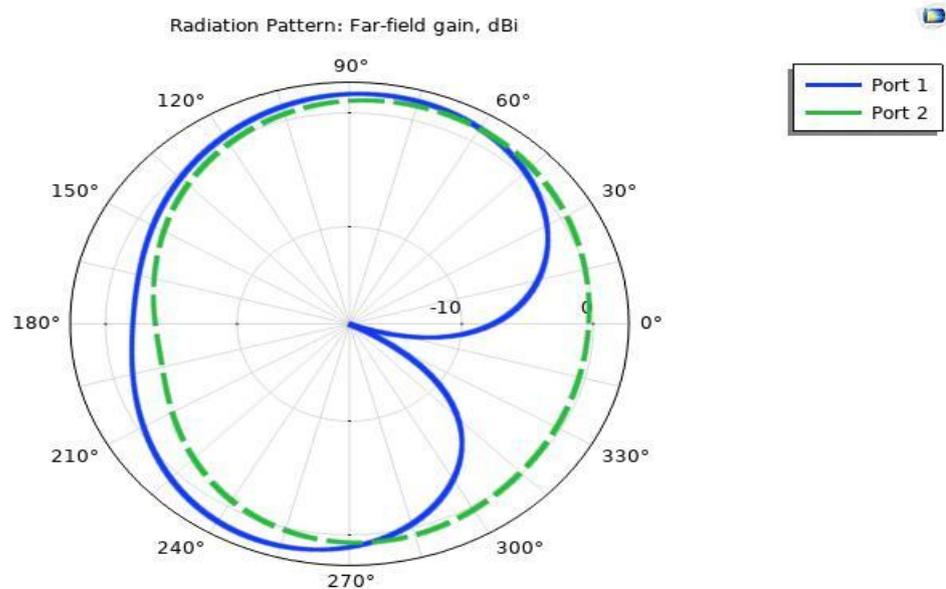


Figure III.15 Diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA (Plan E)

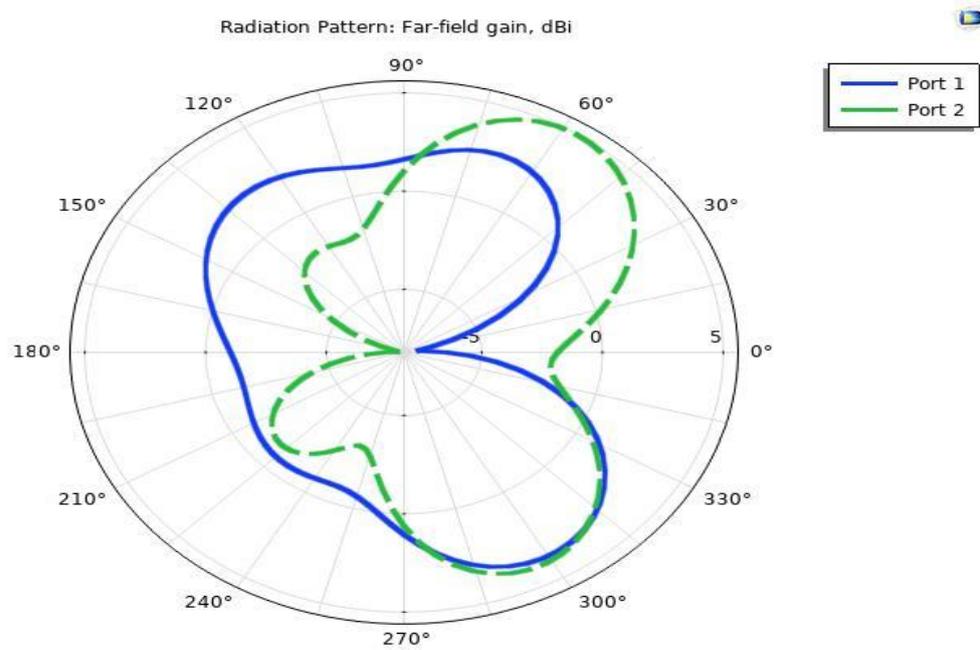


Figure III.16 Diagrammes de rayonnement de l'antenne PIFA (Plan H)

D'après les figures (III.15 et III.16), ces diagrammes indiquent que les deux ports ont des diagrammes de rayonnement différents, ce qui montre l'exploitation de la diversité des diagrammes pour obtenir un gain de diversité.

On a montré une comparaison des diagrammes de rayonnement simulés et mesurés en champ lointain dans les deux principaux plans ; E et H. On remarque un bon accord entre les deux diagrammes.

b Les diagrammes de rayonnement en 3D

Les diagrammes de rayonnement en 3D pour les deux fréquences 2.2911 GHz et 2.4501 GHz sont représentés sur la figure (III.16) et la figure (III.17) respectivement. Nous constatons que l'antenne a un gain directif pour les différentes fréquences choisies.

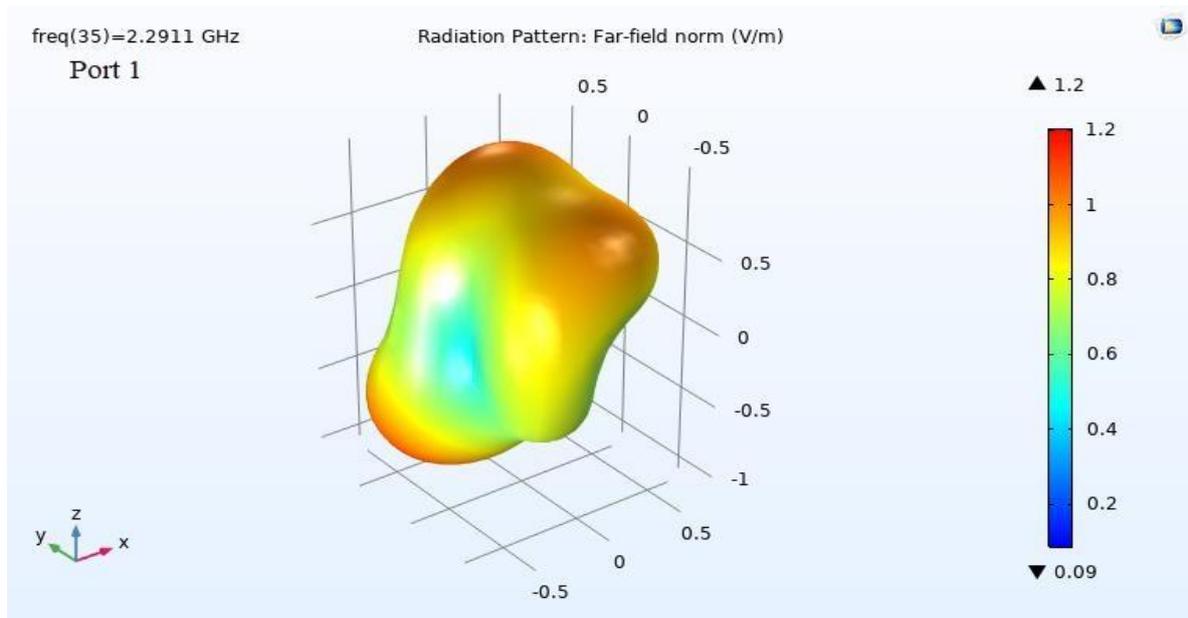


Figure III.17 Les diagrammes de rayonnement 3D à 2.29 GHz (port 1)

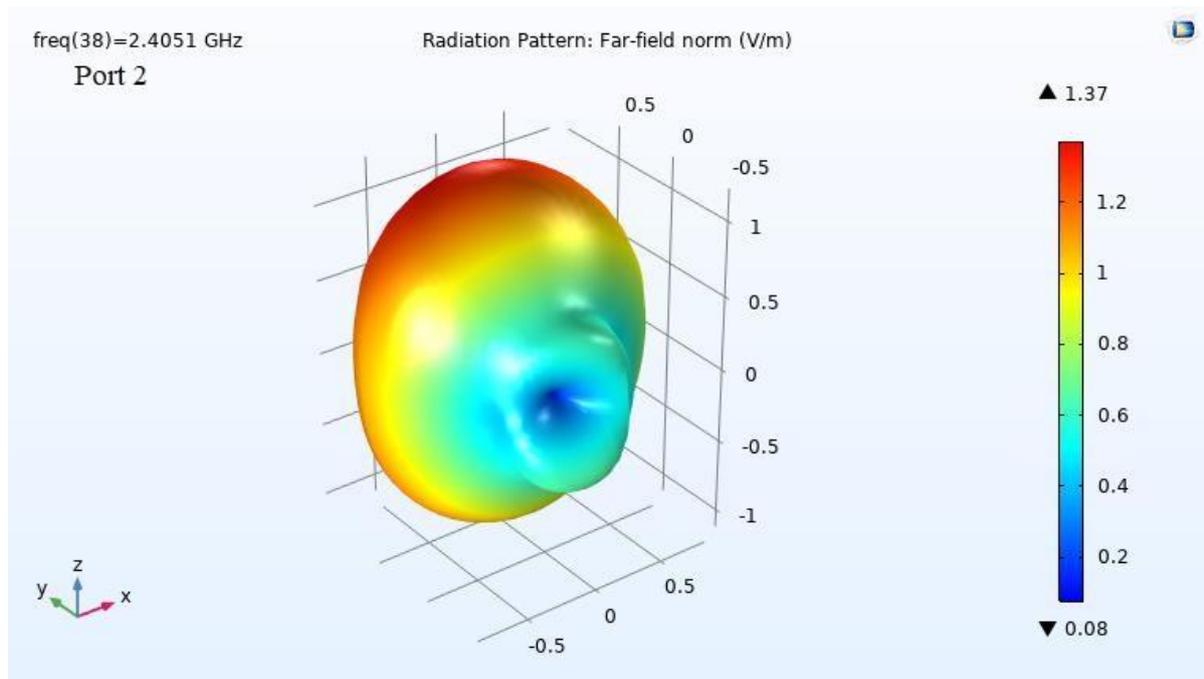


Figure III.18 Les diagrammes de rayonnement 3D à 2.405 GHz (port 2)

III. 4.2.3 Distribution du champ

Les figures III.20 et III.21 présentent la norme du champ E par défaut sur le plan xy, où la hauteur du plan a été ajustée afin de visualiser le tracé sur la surface supérieure de la PIFA.

La représentation graphique de la distribution du champ indique une importance du champ électrique sur l'une des surfaces métalliques supérieures, très proche du point d'alimentation.

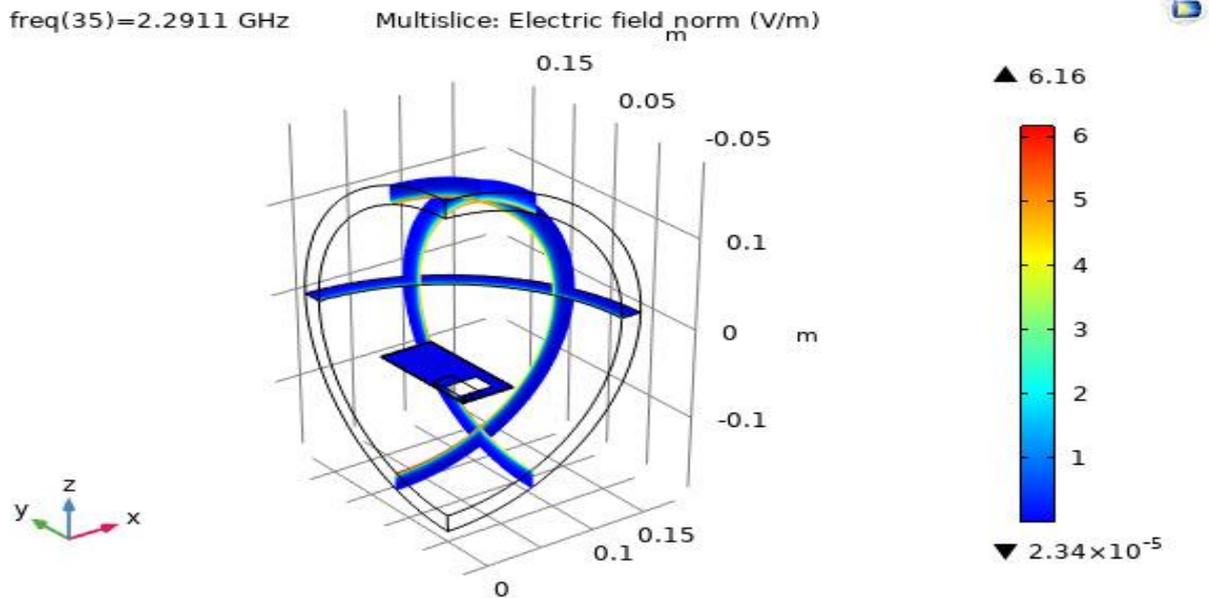


Figure III.19 Norme de champ électrique

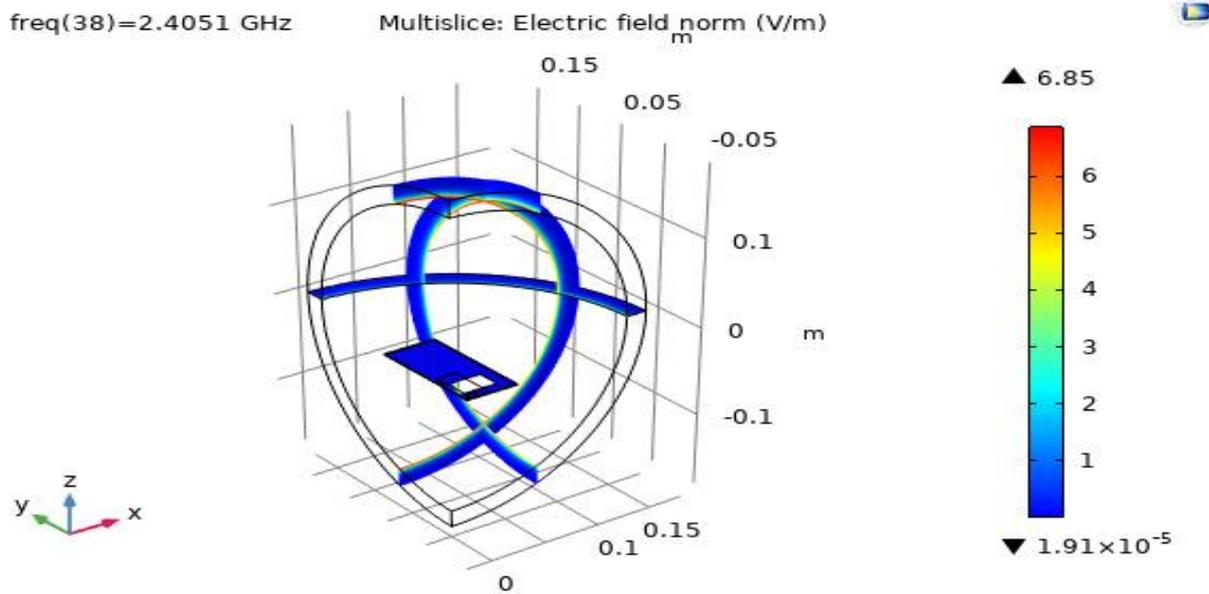


Figure III.20 Norme de densité de courant

III. 4.2.4 Le gain

Les gains maximaux réalisés par les ports 1 et 2 dans la bande de fréquences de 2 à 4 GHz sont présentés dans la figure III.21.

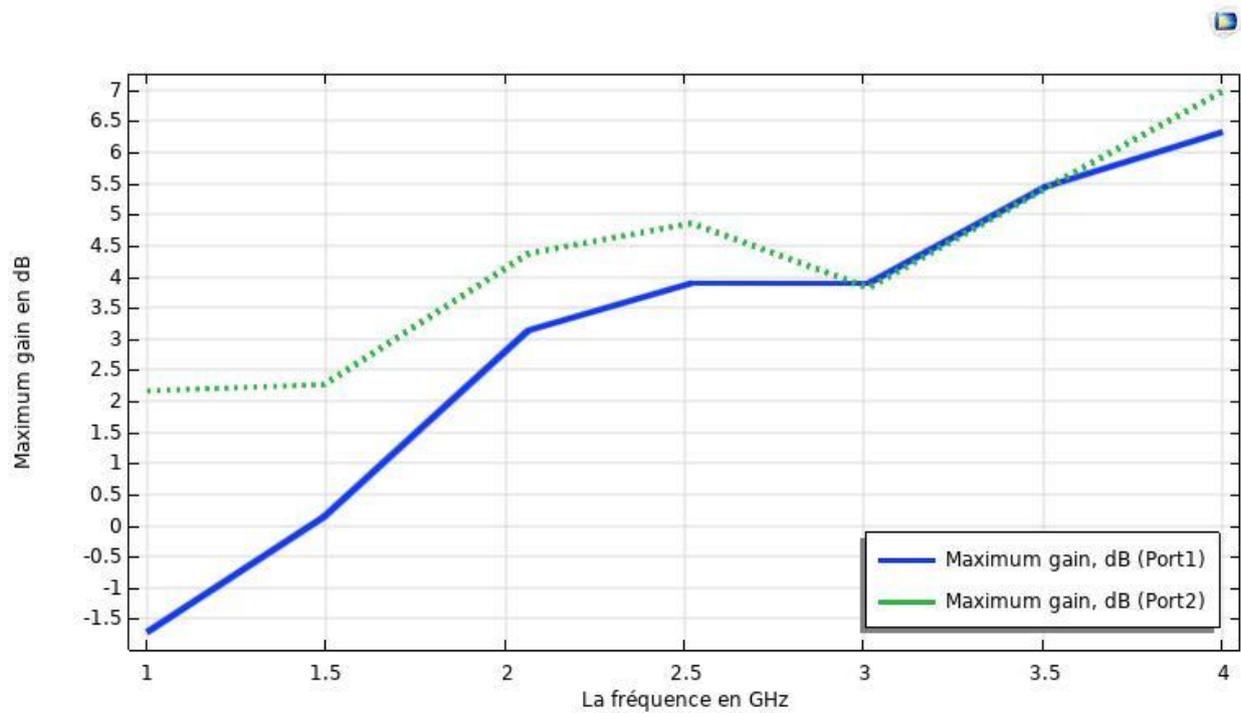


Figure III.21 Gains de crête [dB] en fonction de la fréquence [GHz]

III.4.3 Etude paramétrique

L'étude de l'influence des paramètres de l'antenne sur son comportement électromagnétique implique la variation de ces paramètres afin d'exploiter les caractéristiques du rayonnement et de découvrir une antenne performante.

III.4.3.1 Influence de longueur S_x

Quand changer la longueur de cette antenne la fréquence de résonance est changer et varier c'est-à-dire la fréquence de résonance est diminuer.

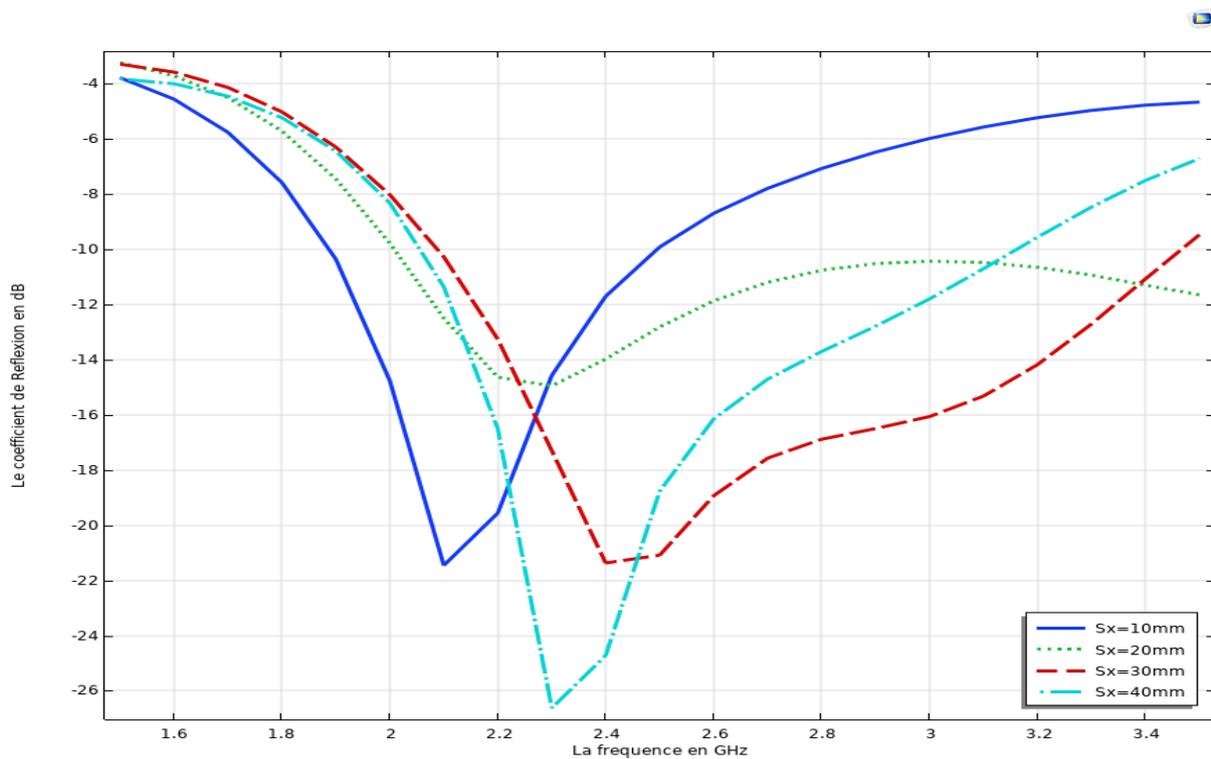


Figure III.22 Coefficient de réflexion S_x en dB

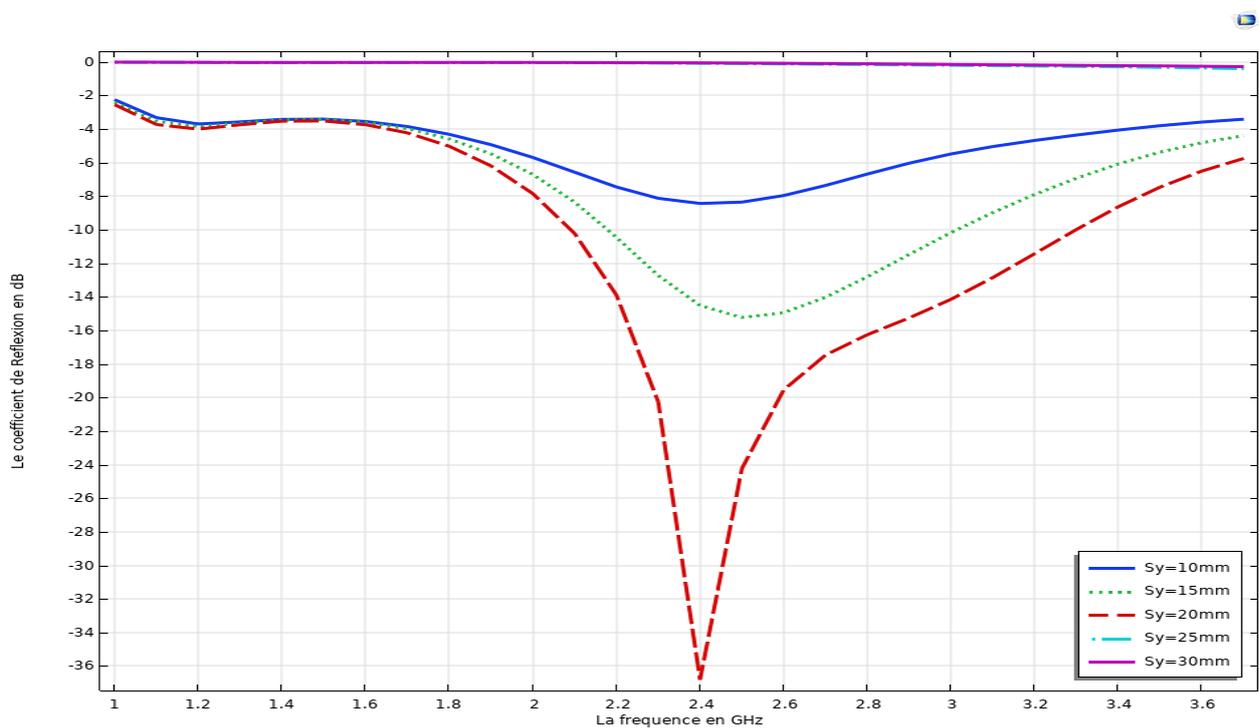
Le Tableau suivant montre les valeurs de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonanec pourquelque différentes valeurs de S_x

Tableau III.3 les dimensions de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonance S_x .

S_x (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion S_{11} (dB)	Bande passante (GHz)
10	2.1	-22	0.9
20	2.25	-15	0.8
30	2.4	-21.3	1.37
40	2.7	-26.55	1.11

III.4.3.3 Influence de longueur S_y

Lorsque la longueur de cette antenne est modifiée, la fréquence de résonance varie, c'est-à-dire qu'elle diminue.

**Figure III.23** Coefficient de réflexion S_y en Db

Le Tableau suivant montre les valeurs de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonance pour quelque différentes valeurs de S_y .

Tableau III.4 les dimensions de fréquence de résonance et de bande passante et fréquence résonance S_y

S_y (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion S_{11} (dB)	Bande passante (GHz)
10	2.5	-8.1	
15	2.5	-36.8	0.7
20	2.4	-15.2	1.3

III.5 Conclusion

La simulation des antennes PIFA dans le logiciel COMSOL permet d'évaluer et d'optimiser les performances de ces antennes dans les téléphones portables. Les simulations permettent de prendre en compte divers paramètres tels que la géométrie de l'antenne, les matériaux utilisés et l'environnement de fonctionnement. Grâce à ces simulations, il est possible de prédire les caractéristiques de rayonnement, l'efficacité et la bande passante de l'antenne, ce qui facilite la conception et l'optimisation des antennes PIFA.

La simulation dans COMSOL offre une approche rentable et efficace pour le développement d'antennes PIFA, permettant ainsi d'obtenir des performances optimales dans les téléphones portables et autres applications sans fil.

La simulation des antennes PIFA mobiles avec le logiciel COMSOL offre un moyen efficace et économique de comprendre et d'optimiser le comportement de ces antennes dans des conditions réelles. Elle permet aux concepteurs d'antennes de réduire les cycles de conception, d'améliorer les performances et de minimiser les coûts de développement

CONCLUSION GÉNÉRAL

En conclusion, les antennes jouent un rôle essentiel dans les systèmes de communication sans fil en permettant la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Elles se présentent sous différentes formes et tailles en fonction des applications spécifiques, mais toutes ont pour objectif commun de fournir une performance optimale en termes de portée, de directivité et de qualité du signal.

Les antennes PIFA (Planar Inverted-F Antenna) sont un type spécifique d'antennes largement utilisées dans les dispositifs électroniques compacts tels que les téléphones portables, les tablettes et les ordinateurs portables. Elles se caractérisent par leur structure plane et compacte, ce qui les rend idéales pour une intégration facile dans des espaces restreints.

La conception et l'optimisation des antennes PIFA peuvent être réalisées à l'aide de logiciels de simulation électromagnétique Comsol Multiphysics. Ce logiciel permet aux ingénieurs de modéliser avec précision le comportement électromagnétique des antennes PIFA, d'analyser leur performance et d'effectuer des ajustements pour atteindre les objectifs de conception spécifiques. Ils peuvent optimiser des paramètres tels que les dimensions géométriques, les matériaux utilisés, les positions des composants et les fréquences de fonctionnement pour maximiser l'efficacité de l'antenne.

L'utilisation de logiciels de simulation comme Comsol Multiphysics permet d'accélérer le processus de conception des antennes PIFA, de réduire les coûts de développement et d'améliorer les performances globales des systèmes de communication sans fil. Cela permet aux fabricants d'optimiser leurs produits en termes de portée, de débit de données, de qualité du signal et de consommation d'énergie.

En résumé, les antennes en général, et en particulier les antennes PIFA, sont des éléments clés des systèmes de communication sans fil. Leur conception et leur optimisation à l'aide de logiciels de simulation comme Comsol Multiphysics permettent d'améliorer leur performance, leur intégration et leur efficacité, contribuant ainsi à des communications sans fil plus fiables et performantes dans une variété d'applications.

Conclusion générale

RÉFÉRENCES

1. <https://www.antenna-theory.com/> [1]
2. Propagation et lignes de transmission Guillaume VILLEMAUD Laboratoire CITI – cours de propagation et lignes [2]
3. Belainine Fayçal Abderahmen, Salmi Mohamed Arezki; " Etude de la miniaturisation des antennes par repliement – Application pour la conception d'une antenne 2.4 GHZ "; Mémoire de Master en Système Télécommunications, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013-2014. [3]
4. "ANTENNES «, SUPPORT DE COURS .ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES Alexandre Boyer. [4]
5. Kraus, J.D., [1950], "Antennas," New York-Toronto-London Mc Graw-Hill Book company, Electrical and Electronic Engineering Series, Frederick Emmons Terman, Consulting Editor; W.W Harman and J.G Truxal, Associate Consulting Editors; ISBN 07-035410-3; pp 465. [5]
6. <https://blog.f6krk.org/wp-content/uploads/2012/02/Polarisation1.pdf> [6]
7. Abderrahmane Agouzoul; " Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHZ pour les applications souterraines "; Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magister en ingénierie, Université du Québec, Aout 2013. [7]
8. "ANTENNES " ,SUPPORT DE COURS . ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES Alexandre Boyer. [8]
9. Abderrahmane Agouzoul; " Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHZ pour les applications souterraines "; Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magister en ingénierie, Université du Québec, Aout 2013. [9]
10. Hafedh Ben Ibrahim Gaha; " Analyse et conception des antennes fractales – Application aux télécommunications large bande "; Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (France) et de Docteur de l'Ecole National d'Ingénieurs de Tunis de l'Université Tunis EL-MANAR, Juillet 2007. [10]

Références Bibliographiques

11. <https://www.techno-science.net/definition/3255.html> [11]
12. Odile Picon et coll; " Les antennes Théorie, conception et applications "; DUNOD, Paris, 2009,ISBN 978-2-10-054245-1.[12]
13. J. D. Kraus, R. J. Marhefka, and A. S. Khan, Antennas for All Applications, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.[13]
14. review. IEEE Antennas an"Planar Inverted F Antenna (PIFA) Design" Radio-Electronics.com, <https://www.radio-electronics.com/info/antennas/pifa/planar-inverted-f-antenna-pifa-design.php>.[14]
16. "Planar Inverted-F Antenna (PIFA)" de Wiley Online Library[19]
17. "Planar Inverted-F Antenna (PIFA)" de Antenna Theory[19]
18. Wang, H., Yang, F., & Chen, Z. (2017). Compact Dual-Band PIFA Antenna with Dual-Resonance Feed for Wireless Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65(6), 2998-3005.[15]
19. [19] Zhang, G., & Hu, J. (2016). Dual-Band PIFA Antenna for WLAN/WiMAX Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 15, 79-82.[16]
20. [20]. Zhang, W., & Liu, Z. (2019). Wideband PIFA Antenna with Dual-Resonance Feed for WLAN/WiMAX Applications. IEEE Access, 7, 78277-78283.[17]
21. [21] Chen, X., Liu, J., & Gong, S. (2018). A Compact Planar Inverted-F Antenna for WLAN/WiMAX Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17(2), 216-219.[18]
22. [22]. US Patent No. 10,295,430, "Antenna for Electronic Devices with Conductive Housing Structures", Apple Inc.[20]
23. [23]. US Patent No. 9,996,921, "Mobile terminal and method of controlling the same", Samsung Electronics Co., Ltd.[21]
24. US Patent No. 10,035,476, "Wireless Communications Device Having an Integrated Antenna", Google LLC.[22]
25. US Patent No. 9,970,450, "Mobile Communication Terminal and Antenna Structure Thereof", Huawei Technologies Co., Ltd.[23]
26. Chaimool, S., & Akkaraekthalin, P. (2013). Design and Analysis of PIFA Antenna for Wireless Applications. International Journal of Antennas and Propagation, 2013.[24]
27. Kannan, M., Kumar, R. A., & Ramalingam, V. (2015). Comparative Study of Different Types of Antennas in Wireless Applications. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 4(1), 441-448.[25]

Références Bibliographiques

28. [29]. "Design of a Planar Inverted F Antenna (PIFA) for Wi-Fi Application", publié dans le journal de recherche en ingénierie et technologie.[26]
29. "Circularly Polarized Planar Inverted F Antenna for Wireless Applications", publié dans le journal international de la recherche en génie électrique et électronique.[27]
30. "Investigation of Electromagnetic Interference on Planar Inverted F Antenna (PIFA) for GSM Mobile Phone Application", publié dans le journal international de la recherche en génie électrique et électronique.[28]
31. Wong, K. L. (2003). Compact and broadband microstrip antennas. John Wiley & Sons.[29]
32. Sharawi, M. S., & Balamurali, P. (2015). Planar inverted F-antenna (PIFA) design for wireless applications: A comprehensive review. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 57(5), 48-68.[30]
33. "Compact Wideband PIFA Antenna for Mobile Phones", publié dans le journal international de la recherche en génie électrique et électronique.[31]
34. "PIFA Antenna with Parasitic Element for Wi-Fi and Bluetooth Applications in Laptops", publié dans le journal international de la recherche en génie électrique et électronique.[32]
35. "Design of Planar Inverted-F Antenna for GPS Navigation Applications", publié dans le journal international de l'ingénierie électronique et de la technologie informatique.[33]
36. "Planar Inverted F Antenna for Wireless Medical Sensor Networks", publié dans le journal international de la recherche en génie électrique et électronique.[34]
37. "Planar Inverted-F Antenna (PIFA) Design for WLAN Application" (IEEE Xplore) : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1590474>. [35]
38. BELGACEL Nassima "conception des antenne PIFA mono-bande et MULTI-BANDES GSM,DCS ,PCS ,UMTS et WIFI mémoire université de Telmcen"
39. **Adoui ibtissem**, «Modélisation des filtres à cavité rectangulaire comportant des structures planaires à plusieurs niveaux de métallisation et à substrats multicouches homogènes et inhomogènes, " Thèse Doctrat Univ. MOHAMED ELBACHIR EL IBRAHIMI, bordj bou arreridj.2016_2017. [37]
40. <https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics>. Cours de Modélisation Numérique GCH2535 Tutoriel COMSOL Multiphysics 5.2, École Polytechnique de Montréal.[38]

Références Bibliographiques

41. Cours de Modélisation Numérique GCH2535 Tutoriel COMSOL Multiphysics 5.2, École Polytechnique de Montréal. [39]
42. Nisrine Mhaguen, Thèse maîtrise en ingénierie " développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournerent des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis ", université du québec, janvier 2011. [40]
43. RF Module – COMSOL, " <https://www.comsol.com/rf-module#cta-section>" [41]
44. RAJAABELISON Tiana Nirina Herilala,"Modélisation multiphysique et simulation numérique de la jonction de ramification d'un puits multilatéral", Mémoire master en ingenierie petroliere, universite d'antananarivo ecole superieure polytechnique, 2015.[42]
45. H. T. Chattha, Y. Huang, X. Zhu, and Y. Lu, "A dual feed PIFA diversity antenna for MIMO systems," in Proc. IEEE Int. Workshop Antenna Technol., 2010, pp. 1–4.[43]