

REPUBLICUE 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'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

**FILIERE : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes de Télécommunications**

Présenter Par

➤ **Chouder Sabrina**

➤ **Benziane Amel**

Intitulé

**Etude et conception d'une antenne reconfigurable  
pour application wifi**

Évalué le : 28/06/2022

Par la commission d'évaluation composée de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
<b>M. BELAZZOUG Massinissa</b>	<b>MAB</b>	<b>Président</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>Mme. LAKHLEF Nora</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M.MESSAOUDENE Idris</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Univ-BBA</b>

Année Universitaire 2021/2022

## **Dédicace**

*Au nom d'ALLAH clément et miséricordieux c'est  
Avec un grand sentiment d'euphorie, que je dédie Ce modeste*

*labeur:*

*A mes parents qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études.*

*A mes chères sœurs khaoula et wafa*

*A nos deux grandes pères et mères.*

*A mes oncles et mes tantes. A mes cousins et cousines*

*.A tous mes amis et plus particulièrement noria, dhiaddine*

*Ainsi que toutes les personnes qui n'ont pas hésité à m'apporter leur  
soutien, à toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce*

*mémoire.*

***Chouder Sabrina***

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents : Pour l'amour et l'affection  
que ils m'ont offert, pour ces conseils fructueux qui m'ont été  
prodigués, grand merci.*

*A ma sœur et mes frères.*

*A tous les amis ...*

*A tous ceux qu'on aime ...*

*A tous ceux qui savent ...*

*A tous ceux qui m'ont soutenu dans ma carrière  
scolaire*

*Amel benziane*

## Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah pour la bénédiction de la connaissance et pour m'avoir donné la patience d'achever ce travail et d'atteindre ce niveau. Mes remerciements particuliers vont à mon encadreur, le **Dr.LaKhlef Nora**, pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail grâce à ses remarques constructifs, ses suggestions pertinentes et ses conseils dans la préparation de ce mémoire.*

*Un grand remerciement à **Dr. Belazzoug Massinissa** qui tout au long de ce travail et des difficultés rencontrées, s'est montré très disponible et serviable. Ses implications directes dans ce travail, sans oublier le **Dr.Hamache Boualem** et le **Dr. Bouzza Abdel moula**.*

*Je tiens à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.*

## Résumé

Dans ce travail, une antenne reconfigurable fonctionnant en trois fréquences différentes, 2,4 GHz, 5,8 GHz (application Wi-Fi) et la bande 27.3 GHz (applications 5G), a été simulée avec le HFSS. L'antenne est de 30 mm sur 26,5 mm, avec une épaisseur de 1,6 mm, et est imprimée sur un substrat FR-4 (avec une constante diélectrique de 4,4).

La simulation de l'antenne commutée avec du métal, l'étude paramétrique des différents paramètres et l'antenne commutée avec une diode PIN sont illustrées dans ce travail.

**Mots-clés :** Antenne Reconfigurable, Diode PIN, technologie 5G ; WI-FI ; HFSS.

## Abstract

In this work, a reconfigurable antenna working in three different frequencies, 2.4 GHz, 5.8 GHz (Wi-Fi application) and the 27.3 GHz band (5G applications), has been simulated with the HFSS. The antenna is 30 mm by 26.5 mm, with a thickness of 1.6 mm, and is printed on an FR-4 substrate (with a dielectric constant of 4.4).

The simulation of, the antenna which switched with metal, the parametric study of the different parameters and the antenna which switched with a PIN diode, are illustrated in this work.

**Keywords:** Reconfigurable antenna, PIN diode, 5G technology; WI-FI; HFSS.

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بمحاكاة هوائيات قابلة لإعادة التشكيل يعمل بترددات 2.4 جيجا هرتز و 5.8 جيجا هرتز في تطبيق Wi-Fi و 28 جيجا هرتز (تطبيق 5g) توفر الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل العديد من الوظائف. منها خفة حركتها، في تردد الرنين أو نمط الإشعاع أو الاستقطاب، إمكانيات تطبيق جديدة لنظم الاتصالات. من خلال الرغبة المتزايدة في دمج هذه التطبيقات في جهاز واحد بناءً على إدخال العناصر النشطة مثل صمامات PIN، تم تنفيذ عملية إعادة التشكيل. يتم الحصول على الشكل النهائي للهوائي المقترح بعد دراسة محورية صارمة، باستخدام HFSS بناءً على إدخال العناصر النشطة مثل صمامات PIN.

**الكلمات الرئيسية:** تقنية هوائي 5G قابلة لإعادة التشكيل؛ WIFI; HFSS.

## Sommaire

Dédicace.....	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	iv
ملخص.....	iv
Sommaire.....	v
Lise des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Listes des abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les Antennes Imprimées.....	2
I. Introduction.....	2
I.2 Description d'une antenne imprimée.....	2
I.3 Procédure de conception d'un patch rectangulaire.....	3
I.4 Types d'antennes imprimées [8] [9].....	4
I.4.1 Antennes microstrips.....	4
I.4.2 Antenne dipôle imprimé.....	4
I.4.3 Antenne monopole planaire.....	4
I.4.4 Antenne quasi-yagi imprimée.....	5
I.4.5 Antenne planaire en F inversé.....	5
I.4.6 Comparaison entre antennes planaires.....	6
I.5. Avantages et inconvénients [10] [11].....	6
I.6 L applications des antennes imprimées.....	7
I.7 Les caractéristiques des antennes imprimées.....	7
I.7.1 Diagramme de rayonnement.....	7
I.7.2 Directivité.....	8
I.7.3 Bande passante.....	8

I.7.4 Gain et Directivité .....	8
I.7.5 La polarisation.....	8
I.8 Techniques d'alimentations.....	9
I.8 .1 Alimentation par ligne microbande.....	9
I.8 .2 Alimentation par sonde coaxiale .....	9
I.8.3 Alimentation couplée de proximité .....	10
I.8 .4 Alimentation à ouverture couplée .....	10
I.9. Conclusion.....	11
Chapitre II : Les Antennes reconfigurables .....	12
II.1 Introduction.....	12
II.2 Historique et Définition.....	12
II.3 Les Techniques de reconfiguration [24].....	13
II.3.1. Diode vari cap.....	14
II.3.2. Diode PIN .....	14
II.3.3. Matériaux agiles [26] .....	15
II.3.4. Commutateur Système Micro électromécanique Radio Fréquence (RF MEMS) ..	16
II.3.5.Commutateurs Optiques [28].....	16
II.4. Classification des antennes reconfigurables.....	16
II.4.1. Antennes reconfigurables en fréquence .....	17
II.4.2.Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement .....	18
II.4.3.Antennes reconfigurables en polarisation .....	18
II.5.Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable [24].....	18
II.5. 1. Avantages.....	18
II.5. 2. Inconvénients.....	19
II.6.Conclusion.....	19
Chapitre III : Etude et simulation d'une antenne reconfigurable sous HFSS .....	20
III.1. Introduction.....	20
III.2. Présentation du logiciel HFSS .....	20
III.3.Structure de l'antenne patch rectangulaire.....	21
III.4. Résultats de simulations.....	23
III.4.1 Validation de l'article [36] .....	23
III.4.1.1. Coefficient de réflexion S11 .....	23

III.4.1.2. Rapport d'onde stationnaire (ROS) (VSWR).....	26
III.4.1.3. Directivité.....	28
III.4.1.4.Récapitulation de la validation.....	30
III.4.2. Etude paramétrique de la structure (a) (la gamme WiFi) .....	31
III.4.2. 1. Effet de la longueur du métal (x).....	31
III.4.2. 2. L'Effet de la largeur du métal (k).....	31
III.4.2.3 Effet de la distance entre les deux patchs d (sur la longueur) .....	32
III.4.2. 4. Effet de Longueur du patch (lp) .....	33
III.4.3. Optimisation de l'antenne (Gamme WiFi seulement) .....	33
III.4.4 Antenne reconfigurée par une diode PIN .....	35
III.4.4.1. Etat 1 : ON-ON (Gamme Wifi).....	36
III.4.4.1. 1. Coefficient de réflexion correspondant à l'état ON-ON.....	36
III.4.4. 1. 2. Rapport d'onde stationnaire à l'état ON-ON .....	37
III. 4.4. 1. 3. Directivité à l'état ON-ON.....	38
III.4.4. 2. Etat2: OFF-OFF (Gamme 5G) .....	39
III.4.4. 2.1.Coefficient de réflexion (Etat2: OFF-OFF) .....	40
III.4.4. 2.2.Rapport 'onde stationnaire (ROS) (VSWR) (Etat2: OFF-OFF) .....	41
III.4.4. 2.3.Parametre de radiation (Etat2: OFF-OFF) .....	42
III.4.4. 3. Etat 3 : ON-OFF (OFF-ON).....	42
III.4.4. 3.1. Coefficient de réflexion Etat 3 : ON-OFF .....	42
III.4.4. 3.2. Rapport d'onde stationnaire Etat 3 : ON-OFF .....	43
III.4.4. 3.3. Directivité Etat 3 : ON-OFF .....	45
III.4.4. 4. Récapitulation des trois cas (ON-ON, OFF-OFF et ON-OFF).....	46
III.5.Conclusion .....	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques .....	48

## Lise des figures

### Chapitre I : Généralité sur les antennes imprimées

Figure.I. 1. Structure d'une antenne patch [5].....	2
Figure.I. 2. Les formes usuelles de patch [6] .....	3
Figure.I. 3. Antenne planaire inversée-F [9].....	5
Figure.I. 4. Diagrammes de rayonnement.....	7
Figure.I. 5. Géométrie d'une antenne de raccordement à micro-déclenchement direct(a) vue de dessus et(b) vue de côté [14] .....	9
Figure.I. 6. Alimentation de la sonde coaxiale.....	9
Figure.I. 7. Géométrie d'une antenne de raccordement alimentée par une ligne de microstrip adjacente(a) vue de dessus (b) vue coté. ....	10
Figure.I. 8. Structure d'alimentation à ouverture couplée.....	10

### Chapitre II : Les antennes Reconfigurables

Figure. II. 1. Les techniques de reconfiguration .....	13
Figure. II. 2. Diode vari cap et le circuit équivalent d'une diode varicap.....	14
Figure. II. 3. Symbole diode pin et structure diode pin [24].....	14
Figure. II. 4. Le circuit équivalent d'une diode pin dans les états ON(a) et OFF(b). [23].....	15
Figure. II. 5. Modèle de la diode en HFSS.....	15
Figure. II. 6. Schéma des types d'antennes reconfigurables .....	17
Figure. II. 7. Antenne bi-bande reconfigurable en fréquence à l'aide d'un varactor [33].....	17

### Chapitre III : Etude et simulation d'antenne reconfigurable sous HFSS

Figure.III. 1. Structure d'une Antenne reconfigurable proposée [36].....	21
Figure.III. 2. Géométrie de l'antenne patch sous le logiciel HFSS. ....	22
Figure.III. 3. Structure d'une Antenne reconfigurable avec métal (a) et sans métal (b)[36] .....	23
Figure.III. 4. Coefficient de réflexion de la structure (a) .....	24
Figure.III. 5. Coefficient de réflexion de la structure (b).....	25
Figure.III. 6. Rapport d'onde stationnaire de la Structure (a).....	26
Figure.III. 7. Rapport d'onde stationnaire Structure (b) .....	27
Figure.III. 8. Directivité de la structure (a) .....	28
Figure.III. 9. Directivité de la structure (b).....	29

## Liste des figures

---

Figure.III. 10. Effet de la longueur (x) sur le coefficient de réflexion.....	31
Figure.III. 11. Effet de la largeur du métal (k) sur le coefficient de réflexion.....	32
Figure.III. 12. Effet de décalage (d) sur le coefficient de réflexion.....	32
Figure.III. 13. Effet de Longueur du patch .....	33
Figure.III. 14. Effet de la longueur (k) et la largeur du (x) sur le coefficient de réflexion .....	34
Figure.III. 15. Coefficient de réflexion correspondant à la meilleure valeur optimisée .....	34
Figure.III. 16. Rapport d'onde stationnaire correspondant aux meilleures valeurs optimisées .....	35
Figure.III. 17. Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN (a) et (b) et la structure de l'antenne commuté correspondante sous HFSS.....	36
Figure.III. 18. Coefficient de réflexion correspondant à l'état ON-ON.....	37
Figure.III. 19. Rapport d'onde stationnaire.....	38
Figure.III. 20. Directivité de l'antenne à l'état ON-ON (3D).....	39
Figure.III. 21. L'évolution du coefficient de réflexion correspondant à l'état OFF-OFF.....	40
Figure.III. 22. Rapport d'onde stationnaire.....	41
Figure.III. 23. Diagramme de rayonnement correspondant à la fréquence 27 GHz (3D).....	42
Figure.III. 24. Le coefficient de réflexion de l'antenne reconfigurable état ON-OFF .....	43
Figure.III. 25. Rapport d'onde stationnaire.....	44
Figure.III. 26. Directivité de l'état ON-OFF en (3D).....	45

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Généralité sur les antennes imprimées

Tableau. I. 1. comparaison entre les antennes planaire .....	6
--	---

### Chapitre III : Etude et simulation d'antenne reconfigurable sous HFSS

Tableau.III. 1. Valeurs des différents paramètres de l'antenne .....	22
Tableau.III. 2. Description comparative des antennes reconfigurables .....	30
Tableau.III. 3. Diode PIN Elément localisé [39].....	36
Tableau.III. 4. Les résultats des trois cas possibles.....	46

## Listes des abréviations

HFSS:	high frequency structure simulator
Wi-Fi :	wireless fidelity
5G:	five generation
VSWR:	voltage standing wave ratio
2d :	deux dimensions
3d :	trois dimensions
Pifa :	planer inverted f Antenna
Fnbw:	first null Beam width
hpBw:	half power Beam width
PCB:	printed circuit Board
BW:	band width
RF:	radio frequency
MEMS :	micro-electromechanical systèmes
Pin :	Positive intrinsèque négative
GSM:	Global system mobile
Gps:	Global positioning system
LTE:	Long term evolution
WLAN:	wireless local Area network
WIMAX:	word wide interoperability for microwave Access
UMTS:	Universal mobile télécommunication system
FEM:	Force électro-motrice
VLSI :	Very large scale integration

## Introduction générale

Le monde connaît un développement technologique rapide dans le domaine des télécommunications, en particulier dans le domaine des antennes. Ce développement important des antennes, nécessite des technologies modernes et nouvelles, en termes de qualité et de large couverture de la bande de fréquence.

En vue, des avantages d'antennes imprimées tels que, la facilité de fabrication, le faible coût de production, le faible poids, profil plat, la haute performance,...etc., elles sont utilisées dans de nombreuses applications. Une fonction importante fournie par cette technologie est la fonction de reconfiguration. Le terme d'antenne reconfigurable, d'abord est utilisé par Brown [1].

Les antennes reconfigurables sont très efficaces en termes des performances et de flexibilité car, elles fournissent plusieurs fonctions comme, les commutations, de fréquence, de diagramme de rayonnement et de polarisation. Elles sont classées en trois catégories : antennes reconfigurables en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation [2].

Ce mémoire est échelonné en trois chapitres :

Le premier chapitre traite : définition, types, domaines d'utilisation, avantages, inconvénients ainsi que les méthodes d'alimentation les plus répandues des antennes imprimées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit les antennes reconfigurables à savoir leur histoire, leur définition et leurs techniques de reconfiguration, telles que les diodes PIN et Varicap. Et aussi, il contient les caractéristiques, les inconvénients et la classification des antennes reconfigurables.

Dans le troisième chapitre, nous avons illustré la description, le dimensionnement et les résultats des simulations de l'antenne reconfigurable fonctionnant à 2.4 GHz et 5. GHz (application Wifi) et à 27.3 GHz (application 5G). Ce chapitre illustre aussi, les résultats de la simulation (coefficient de réflexion, rapport d'onde stationnaire, paramètres de radiation ...etc.) de l'antenne simulée commutée avec métal puis avec diode PIN et leurs discussions.

Le mémoire est clôturé par une conclusion, qui résume les principaux résultats présentés dans ce mémoire et quelques propositions à envisager dans les futurs travaux.

# **Chapitre I :**

## ***Généralités sur les Antennes Imprimées***

# Chapitre I : Généralités sur les Antennes Imprimées

## I. Introduction

Atteindre le sommet du développement technologique reste l'ambition de nombreux pays. La course à l'innovation a évolué rapidement au cours des dernières décennies, en particulier dans le domaine des technologies sans fil. Les antennes sont la clé des systèmes des communications sans fils. C'est pourquoi elle prend un grand intérêt en termes d'études et de développement et spécialement les antennes imprimées [2].

Le concept d'antennes imprimées est apparu pour la première fois en 1950 par Duchampaux Etats Unis d'Amérique. Mais il n'a pas été utilisé cette époque en raison de l'absence d'applications appropriées. En 1970, où elles ont été utilisées dans des applications militaires et elles ont commencée à se répandre. Après 1990, elles sont utilisées dans diverses industries et d'autres applications grâce à son grand développement et ces diverses caractéristiques telles que le poids léger et le faible coût [2] [3]. Aujourd'hui, elles sont le type, le plus privilégié et le plus exigeant en raison de leurs fonctions à haute performance (comme la propriété multi-bandes...).

Dans ce chapitre, nous allons introduire, la description, les types, les types d'alimentation, l'avantage et les inconvénients des antennes imprimées.

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

Une antenne imprimée est un dispositif qui assure le transfert de l'énergie électromagnétique entre un émetteur et l'espace libre, c'est un outil qui convertit le signal électrique en une onde électromagnétique radiée dans l'air en cas d'émission et l'inverse en cas de réception[4].

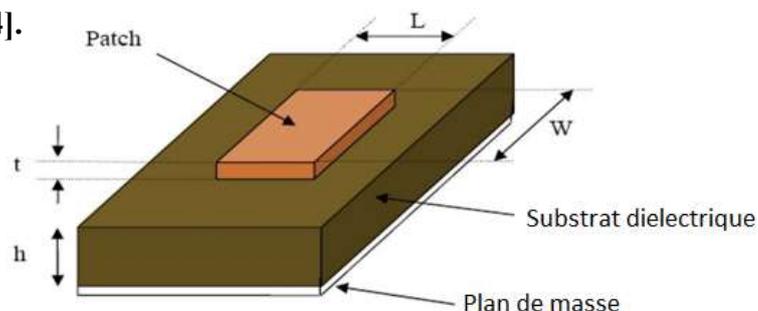


Figure.I. 1.Structure d'une antenne patch [5]

L'antenne imprimée dans sa forme simple, se compose de trois éléments importants, comme illustré dans la figure I.1, qui sont :

- ❖ **Patch** : il s'agit d'une surface métallique déposée sur la face supérieure du substrat et il prend plusieurs formes comme ; (circulaire, triangulaire, rectangulaire, dipôle, anneau).voire la figure I.2

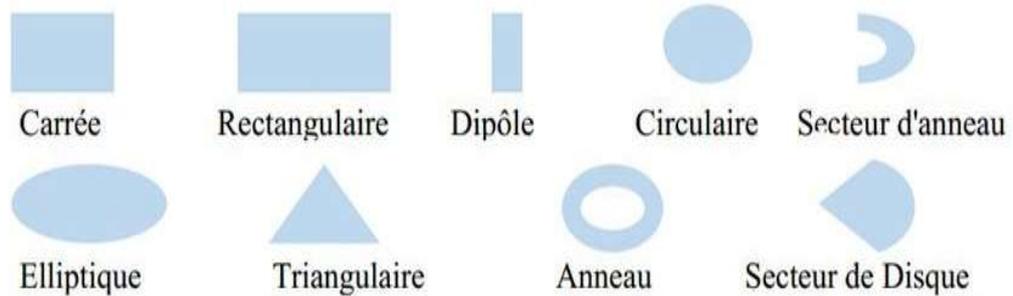


Figure.I. 2. Formes usuelles de patch [6]

- ❖ **Plan de masse** : c'est la surface métallique déposée sur la face inférieure de substrat.
- ❖ **Substrat** : c'est un matériau isolant existant entre le patch et plan de masse.

### I.3 Procédure de conception d'un patch rectangulaire

Il existe plusieurs formules analytiques qui permettent le dimensionnement d'une antenne imprimée rectangulaire [7] :

#### 1. Détermination de la largeur du patch W :

$$W = \frac{C_0}{2f_{res}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (I.1)$$

#### 2. Détermination de la permittivité diélectrique effective $\epsilon_{reff}$ :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (I.2)$$

#### 3. Détermination de l'extension de longueur :

$$\Delta L = 0,412 \times h \times \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \times \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \times \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (I.3)$$

#### 4 Détermination de la longueur du patch L :

$$L = \frac{c}{2fr \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (I.4)$$

La longueur effective (dans la formule précédente) est utilisée intermédiairement dans le calcul:

$$L_{eff} = \frac{c_0}{2f_{res} \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (I.5)$$

### I.4 Types d'antennes imprimées [8] [9]

Il existe différents types d'antennes imprimées, chaque type possède des caractéristiques appropriées. Certains types sont illustrés dans ce qui suit :

#### I.4.1 Antennes microstrips

Les antennes microstrips ou microbandes sont les plus populaires. Leur description déjà cités avant, les patchs sont photogravés sur le substrat diélectrique. La constante diélectrique relative d'un substrat est généralement comprise entre  $2,2 < \epsilon_r < 12$ . Les substrats à faible  $\epsilon_r$  plus faible offrent une meilleure efficacité, et plus grande largeur de bande, des champs faiblement liés pour le rayonnement dans l'espace. En raison de sa géométrie simple, le patch rectangulaire demi-onde est l'antenne microbande la plus couramment utilisée.

#### I.4.2 Antenne dipôle imprimé

En général, c'est une antenne constituée de deux dipôles métalliques imprimés sur un substrat. Ce type d'antenne, est couramment utilisé dans les applications sans fil, comme, le WIMAX, Wifi et Bluetooth.

Elle peut être alimentée de nombreuses façons, mais les méthodes les plus utilisées sont les guides d'onde coplanaires.

#### I.4.3 Antenne monopole planaire

Les antennes monopoles imprimées sont constituées d'un seul élément résonnant (un brin planaire) alimenté directement par une ligne de transmission.

Certaines antennes monopoles (Une conception appropriée) peuvent offrir une bande passante plus large que les antennes dipôles.

#### I.4.4 Antenne quasi-yagi imprimée

Les antennes quasi-Yagi imprimées sont utilisées lorsqu'un diagramme de rayonnement directif est exigé. Leurs structures ressemblent aux antennes Yagi-Uda non plane, à la différence que les éléments constituant l'antenne, sont imprimés sur un substrat (les éléments directeur et parasites).

Les antennes quasi-Yagi planaires présentent plusieurs avantages par rapport aux antennes Yagi-Uda filaires, tels qu'une structure simple, un poids léger, profil bas, faible coût de fabrication, large bande passante, rayonnement unidirectionnel avec un gain élevé et la possibilité d'intégration dans des circuits micro-ondes.

#### I.4.5 Antenne planaire en F inversé

L'antenne planaire en F inversé (PIFA) est une antenne microbande. Les antennes PIFA sont constituées d'un patch rayonnant et d'un plan de masse large comme illustré dans la figure I.3. L'antenne PIFA peut utiliser l'air comme diélectrique.

Les antennes PIFA ont été largement utilisées dans les systèmes de communications mobiles comme les téléphones mobiles et les ordinateurs portables en raison de leur conception compacte et de leur capacité de comportement multi bande.

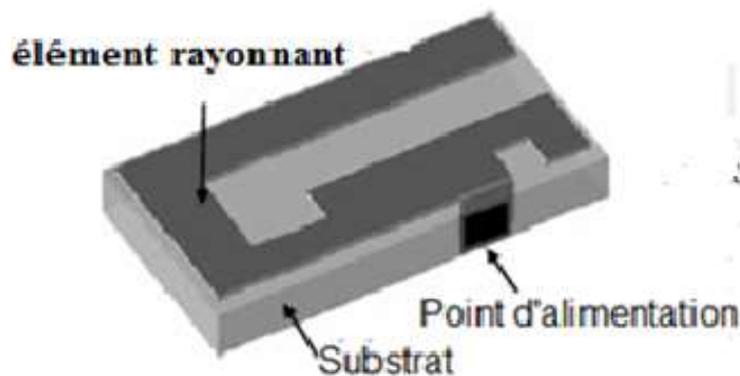


Figure.I. 3. Antenne planaire inversée-F [9]

### I.4.6 Comparaison entre antennes planaires

Le tableau I.1 présente une comparaison entre quelques antennes planaires (schéma, motif de radiation, directivité, et largeur de bande)[9].

Tableau. I. 1. Comparaison entre les antennes planaire

Type	Schéma	Motif de radiation	Directivité	Largeur de band
Antenne micro ruban		Bordée	Moyenne	Etroite
Antenne dipôle		Bordée	Bas	Moyenne
Antenne Quasi-Yagi		//	Elevé	Large
Antenne PIFA		Bordée	Moyen	Moyenne
Antenne Monopole		Bordée	Bas	Moyenne

### I.5. Avantages et inconvénients [10] [11]

Parmi les caractéristiques les plus importantes des antennes imprimées, sont :

- ❖ Le poids faible peut être utilisé dans les petits appareils facilement
- ❖ La possibilité d'intégrer une micro-onde dans des antennes
- ❖ Cout bon marché
- ❖ Nous pouvons facilement le fabriquer
- ❖ Possibilité d'imprimer sur des supports flexibles
- ❖ Résistant aux chocs et environnement
- ❖ Peut être conçu pour des opérations à double ou multifréquence
- ❖ sont bien compatible avec des antennes intégrées dans l'appareil sans fil portables

Malheureusement, malgré leurs nombreux avantages, elles présentent certains inconvénients, tels que:

- ❖ Faible gain
- ❖ Bande passante étroite (1 à 5%)

- ❖ Faible rendement
- ❖ Sensibilité à la température et l'humidité
- ❖ Excitation des ondes de surface

## I.6 L applications des antennes imprimées

Grace à ses nombreux avantages et sa compatibilité avec la technologie des circuits intégrés monolithiques hyperfréquences (MMIC), les antennes imprimées sont maintenant utilisées dans des nombreux domaines et applications importants tels que : [12] [13]

- ❖ Suivi des véhicules et des utilisations maritimes
- ❖ Navigation par satellite sans fil
- ❖ Energie biomédicale
- ❖ Communication mobile
- ❖ L appareilles intelligents

## I.7 Les caractéristiques des antennes imprimées

Les paramètres de radiation les plus importants sont :

### I.7.1 Diagramme de rayonnement

C'est la représentation graphique du rayonnement d'une antenne dans l'espace. Il peut être en champs électrique ou magnétique ou en puissance. Il est important, car il indique les directions de propagation de la puissance électromagnétique. Il peut être représenté, en trois dimensions ou en deux (dans un plan). La figure I.4 illustre un exemple d'un diagramme en deux dimensions [2].

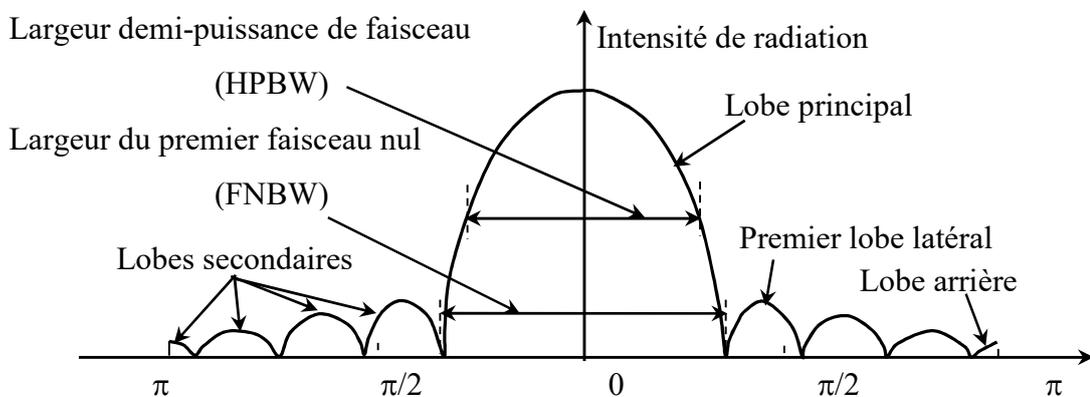


Figure.I. 4. Diagrammes de rayonnement

### I.7.2 Directivité

Elle montre la façon d'une antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction privilégiée. Si l'antenne rayonne dans toutes les directions, c'est une antenne omnidirectionnelle. Le cas, où elle rayonne dans une même direction, c'est antenne directive [2].

### I.7.3 Bande passante

La bande passante d'une antenne, c'est l'intervalle des fréquences collectées par cette antenne. C'est l'intervalle de fréquence pour laquelle, le coefficient de réflexion est inférieur à (-10 dB) [2].

### I.7.4 Gain et Directivité

Le gain de l'antenne,  $G$ , est défini comme le rapport de la puissance de rayonnement de l'antenne ( $P_e(\theta, \varphi)$ ) à une direction  $(\theta, \varphi)$  et la puissance totale d'émission ( $P_{em}$ ) (la puissance fournie à l'antenne) :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P_e(\theta, \varphi)}{P_{em}} \quad (I.6)$$

La directivité d'une antenne est donnée par :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{l'intensité de rayonnement}}{\frac{1}{4\pi} \text{puissance totale à l'entrée de l'antenne}} \quad (I.7)$$

L'intensité de rayonnement de l'antenne, c'est sa puissance rayonnée par unité de l'angle solide [2].

### I.7.5 La polarisation

La polarisation d'une antenne, c'est la polarisation de son onde radiée. C'est le comportement de la direction de propagation de champ électrique de l'onde émise ou captée par une antenne. La polarisation est dite linéaire, si le vecteur champ électrique ne change pas de direction lors de la propagation. Si le vecteur champ électrique tourne, la polarisation est circulaire (module du champ électrique reste constant) ou elliptique (module du champ électrique variable).

Dans le cas où le vecteur change de direction, la polarisation est elliptique, avec un cas particulier de la polarisation circulaire où ce vecteur dessine un cercle dans le plan d'onde perpendiculaire au sens de la propagation [2].

## I.8 Techniques d'alimentations

Il existe plusieurs méthodes d'alimenter l'élément rayonnant d'une antenne imprimée. On va citer dans ce qui suit quelques méthodes d'alimentations.

### I.8.1 Alimentation par ligne microbande

C'est une technique, qui permet de relier directement le patch au bord de l'antenne par une ligne microstrip comme, le montre la configuration 1.5. L'impédance est généralement bien supérieure à 50 ohms (par exemple 200 ohms). Pour éviter la désadaptation, des sections de transformateurs quart d'onde peuvent être utilisées [14].

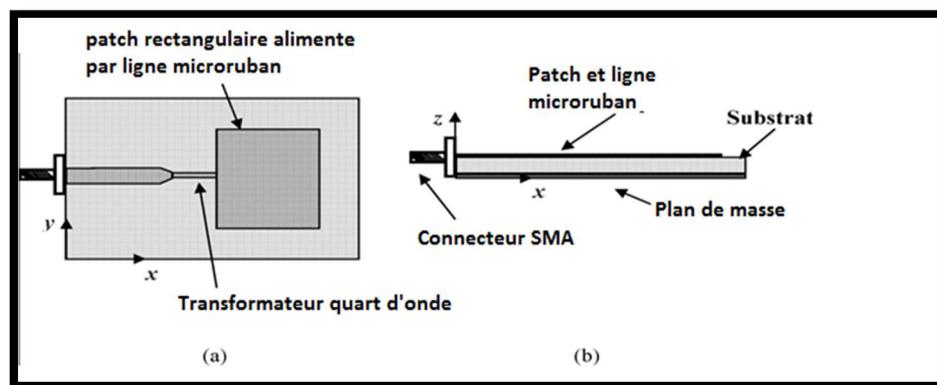


Figure.I. 5. Géométrie d'une antenne de raccordement à micro-déclenchement direct(a) vue de dessus et(b) vue de côté[14]

### I.8.2 Alimentation par sonde coaxiale

La géométrie est illustrée dans la figure I.6. L'emplacement de la sonde doit se trouver à un point de 50 ohms (75 ohms), afin de réaliser l'adaptation d'impédance. C'est peut-être la méthode d'alimentation la plus courante [15].

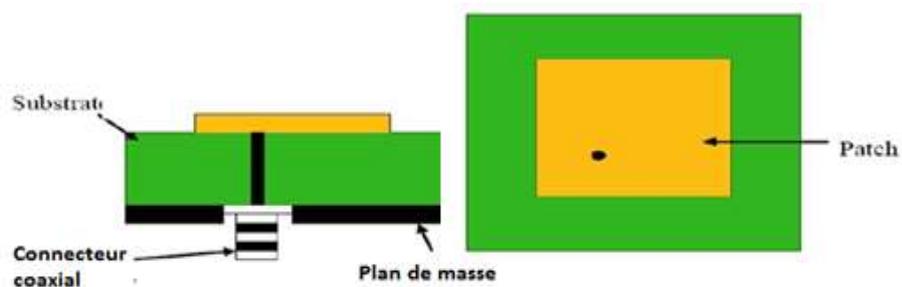


Figure.I. 6. Alimentation de la sonde coaxiale

### I.8.3 Alimentation couplée de proximité

Cette technologie utilise la ligne de microstrip à proximité d'un patch comme illustrée dans la figure I.7. Elle est caractérisée par un procédé technologique plus simple ; c'est la gravure de circuit d'alimentation sur la même face de l'antenne. Mais, elle présente l'inconvénient d'ajouter le rayonnement parasite du circuit de distribution à celui de l'antenne [14].

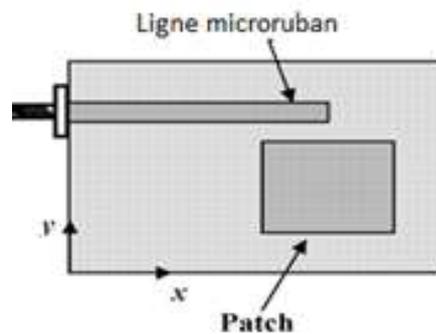


Figure.I. 7. Géométrie d'une antenne de raccordement alimentée par une ligne de microstrip adjacente(a) vue de dessus (b) vue coté.

### I.8.4 Alimentation à ouverture couplée

Le patch rayonnant et la ligne d'alimentation sont séparés (par les substrats et le plan de masse) comme c'est indiqué sur la figure I.10.

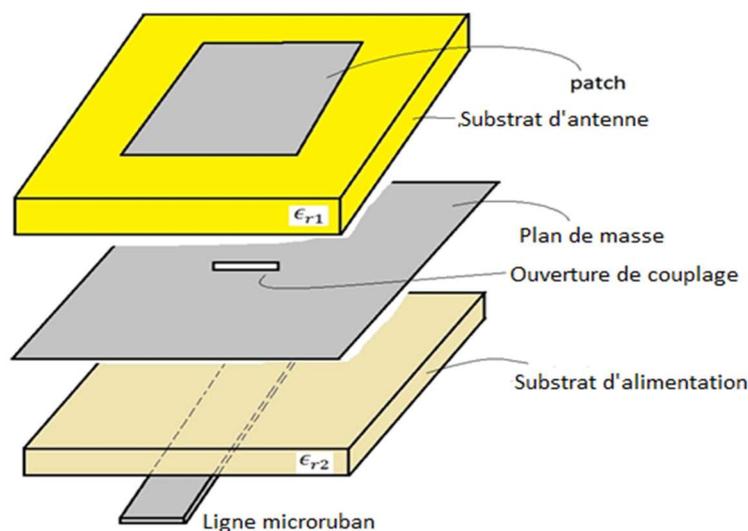


Figure.I. 8. Structure d'alimentation à ouverture couplée

La conjonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par des ouvertures ou des fentes dans le plan de masse et dans les substrats). Cette méthode nécessite un positionnement précis des fentes [16].

## **I.9. Conclusion**

Les antennes imprimées ont pu occuper une position fondamentale et importante dans la plupart des domaines de la vie. Elles sont utilisées dans, la médecine, la navigation, les appareils intelligents et dans de nombreux domaines. Nous avons discuté de certains de leurs types et des avantages et inconvénients de ces antennes et les méthodes d'alimentation les plus courantes.

## **Chapitre II:**

### ***Les Antennes reconfigurables***

## Chapitre II : Les Antennes reconfigurables

### II.1 Introduction

Les antennes reconfigurables ont récemment reçu beaucoup de considération en raison de leurs applications dans les communications sans fil et dans la reconnaissance électronique [17]. Les antennes reconfigurables ont plus d'avantages et de meilleures perspectives par rapport aux antennes conventionnelles, car elles présentent des caractéristiques intéressantes assurant diverses fonctions. Elles sont reconfigurables en fréquence, en diagrammes de rayonnement et en polarisation [18]. Ces caractéristiques peuvent être modifiées après leurs fabrications en utilisant des dispositifs de commutations telles que RF MEMS, les diodes PIN et Varactors. Contrairement aux antennes à large bande, les antennes accordables présentent des caractéristiques favorables tels que, la petite taille, profil de rayonnement comparatif pour toutes les bandes de fréquences multiples, utilisation productive de la plage électromagnétique et du discernement des fréquences sont utiles pour réduire les impacts antagonistes des interférences et des brouillages coésites[19].

Ce chapitre, comprend, la définition, types, techniques de reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation, avantages et inconvénients des antennes reconfigurables.

### II.2 Historique et Définition

L'idée d'antenne reconfigurable est apparue au début des années 1930[20]. En 1979, une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement a été conçue pour les communications par satellite [20].

Une antenne reconfigurable en diagramme et en multifaisceaux pour la communication par satellite a également été rapportée en 1986. En 2012, une antenne patch à ondes de fuite utilisant une diode PIN a été présentée [20].

De 1999 à nos jours, l'antenne microstrip est la plate-forme pour concevoir les antennes reconfigurables [20].

L'antenne reconfigurable, est définie comme un dispositif possédant des caractéristiques de fonctionnement modifiables (fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) après leur fabrication, c'est-à-dire

de changer une à plusieurs de ses caractéristiques fondamentales par un moyen électrique, mécanique ou autre, et cela en fonction des besoins de l'application en question [21].

### II.3 Les Techniques de reconfiguration [24]

L'antenne reconfigurable, est une antenne dans laquelle au moins l'une de ces caractéristiques est modifiable après sa fabrication (fréquence, polarisation et diagramme de rayonnement). Il existe plusieurs méthodes pour mettre en œuvre la reconfiguration. Le progrès de la technologie a permis d'obtenir des techniques de reconfiguration à travers de nouvelles approches plus efficaces et moins coûteuses. La reconfiguration peut se faire soit électriquement, optiquement, physiquement ou par un changement du matériel comme illustré dans la figure II.1.

Pour modifier les caractéristiques de l'antenne électriquement, on doit utiliser des composants actifs tels que, les RF-MEMS et les diodes PIN et Varactors. On doit utiliser des éléments de commutations optiques pour une reconfiguration optique. La reconfiguration qui se fait par une modification mécanique dans la structure de l'antenne, dite reconfiguration physique. Il y a une autre technique de reconfiguration qui utilise les matériaux intelligents tels que les ferrites et les liquides cristaux.

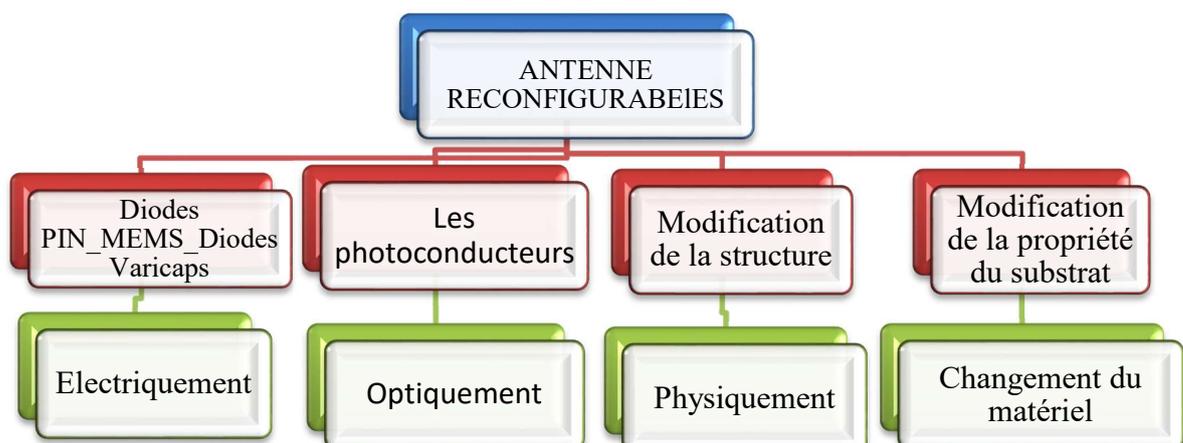


Figure. II. 1. Les techniques de reconfiguration [24]

### II.3.1. Diode vari cap

La diode varicap (appelée aussi diode varactor) est une diode qui se comporte comme un condensateur, dont la valeur de la capacité varie avec la tension inverse appliquée à ses bornes. La diode varicap, est un composant semi-conducteur à base d'une jonction PN et elle peut être modélisée par le circuit équivalent de la figure II.2.

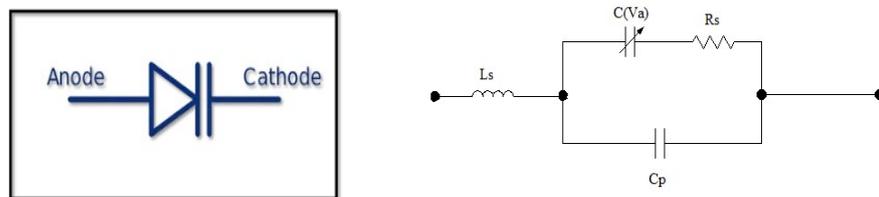


Figure. II. 2. Diode vari cap et le circuit équivalent d'une diode varicap

Les diodes varicap permettent une modification instantanée des caractéristiques de l'antenne en fonction de la tension de commande. L'un des avantages des diodes varicap, est leur faible consommation. Les pertes introduites par ce composant sont parfois importantes et les tensions de polarisation peuvent atteindre 30V. De plus, la complexité du circuit de polarisation augmente avec le nombre de diodes varicap nécessaires pour rendre l'antenne reconfigurable [22].

### II.3.2. Diode PIN

La diode PIN est un dispositif semi-conducteur dont la résistance série peut varier en fonction de la tension appliquée entre ces électrodes (cathode et anode). La diode PIN possède une région centrale, nommée zone intrinsèque (voir la figure II.4), où le champ électrique est constant. La diode est à l'état "ON", lorsqu'elle est polarisée en directe et à l'état "OFF", lorsque elle est polarisée en inverse [23].

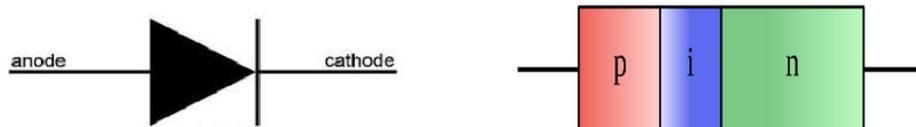


Figure. II. 3. Symbole diode pin et structure diode pin [24]

Les diodes PIN sont économiques et faciles à être intégrées. En ce qui concerne le temps de commutation, la diode PIN est capable de basculer en très peu de temps. Les principaux inconvénients de ce dispositif, sont sa consommation d'énergie à l'état "on" (La perte de son insertion dans le circuit) et l'énergie que la diode peut supporter. [25]. Les circuits électriques équivalents aux états "ON" et "OFF" sont illustrés dans la figure II.4.

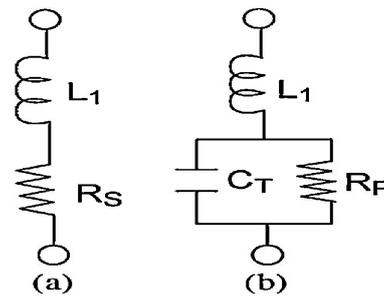


Figure. II. 4. Le circuit équivalent d'une diode pin dans les états ON(a) et OFF(b). [23]

La diode PIN est souvent employée pour obtenir les trois types de reconfiguration (polarisation, diagramme de rayonnement ou fréquence). La Figure II.5 représente, le modèle de la diode sous HFSS.

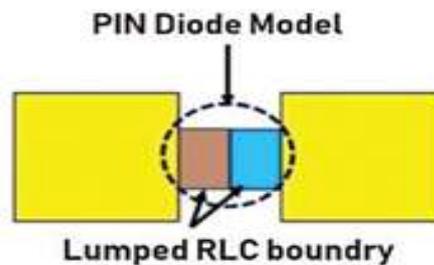


Figure. II. 5. Modèle de la diode en HFSS

### II.3.3. Matériaux agiles [26]

Les matériaux, dits "agiles" et même "intelligents", sont les plus souvent utilisés comme des substrats. La permittivité relative de ces matériaux et les champs magnétiques statiques peuvent être modifiés par un champ électromagnétique appliqué, assurant ainsi ce qui dites, des antennes agiles.

### II.3.4. Commutateur Système Micro électromécanique Radio Fréquence (RF MEMS)

Les RF-MEMS sont des commutateurs radios fréquences, ils ont été développés au début des années 1970, et leur première commercialisation remonte aux années 1980. Depuis cette année, les RF MEMS ont connus un important développement et restent encore en plein essor [27]. Un commutateur RF MEMS est un système de commutation mécanique standard à semi-conducteurs basé sur la technologie de fabrication de circuits VLSI. Fondamentalement, le commutateur implique un mouvement micro électromécanique contrôlé par des composants électroniques pour fournir la fonction de commutation aux fréquences radio [22].

### II.3.5. Commutateurs Optiques [28]

L'antenne peut être reconfigurée par des commutateurs optoélectroniques peut être, en utilisant des fibres optiques. Le commutateur optoélectronique présente des avantages tels que de faibles pertes, un poids léger, l'immunité au bruit, et l'isolation des circuits RF.

## II.4. Classification des antennes reconfigurables

En se basant sur les propriétés opérationnelles dynamiquement ajusté, comme, fréquence de fonctionnement, diagramme de rayonnement, polarisation ou une combinaison de ces propriétés, il existe plusieurs critères pour classer les antennes reconfigurables. On distingue généralement trois types :

- ✓ Antennes reconfigurables en fréquence
- ✓ Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement
- ✓ Antennes reconfigurables en polarisation

Les différents types de reconfiguration sont résumés d'une manière schématique dans la Figure II.6.

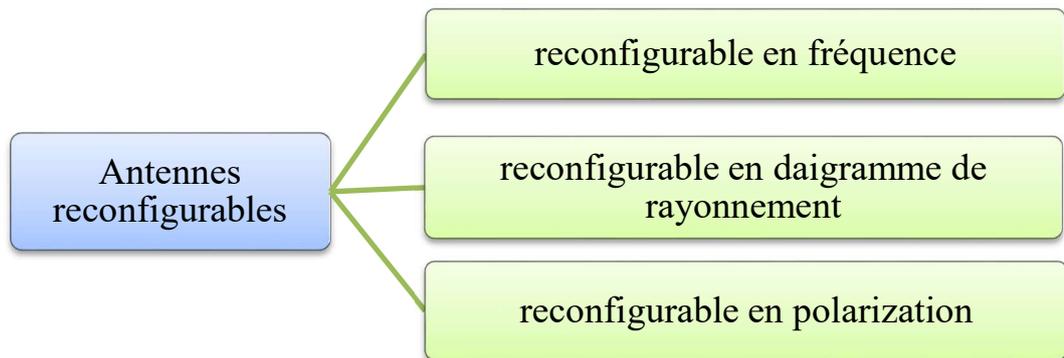


Figure. II. 6. Schéma des types d'antennes reconfigurables

#### II.4.1. Antennes reconfigurables en fréquence

En raison de l'évolution considérable et continue des normes utilisées par chaque système de télécommunications et de leurs exigences en termes de qualité et de nombre d'utilisateurs, la reconfiguration en fréquences est une caractéristique très exigeante qui suscite un intérêt croissant pour l'environnement universitaire et industriel. En effet, d'avoir une antenne qui peut fonctionner à plusieurs standards tels que, GSM, GPS, UMTS, ISM, LTE, Radio FM, Bluetooth, Wifi, WLAN, Wi MAX , est un véritable défi.

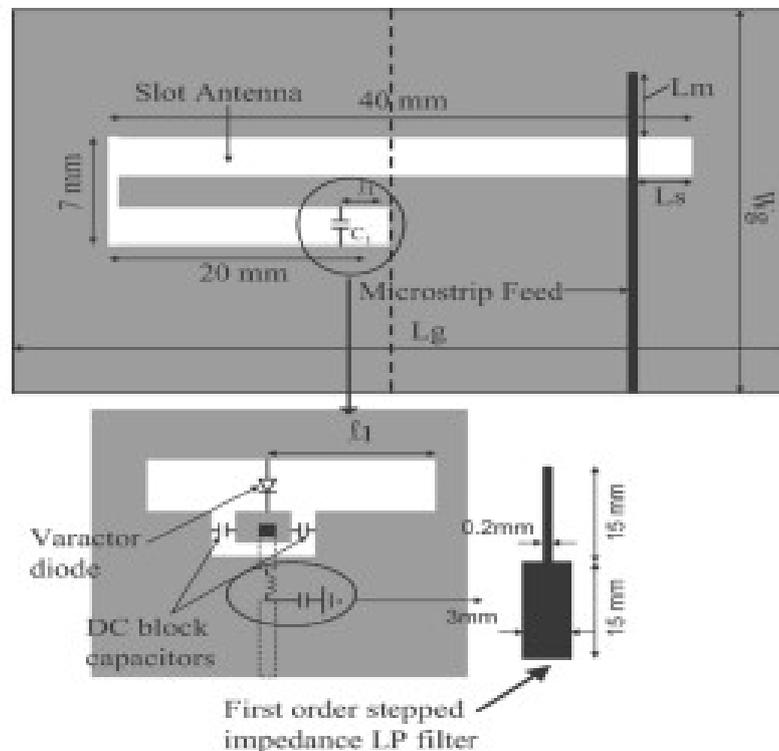


Figure. II. 7. Antenne bi-bande reconfigurable en fréquence à l'aide d'un varactor [33]

La reconfiguration en fréquence, peut se faire par, diodes PIN, diodes varactors, ou à l'aide des matériaux agiles [29].

Un exemple des antennes agiles est présentée dans la référence [30]. Et pour la commutation par diodes PIN, voir les références [31, 32]. montre un exemple d'une antenne reconfigurable en fréquence à l'aide des diodes PIN [32]. Et un autre exemple, d'une antenne bi-bande reconfigurable en fréquence à l'aide d'une diode varactor [33] est illustré dans la figure II.7.

### **II.4.2. Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement**

Par définition, la reconfiguration en diagramme de rayonnement, c'est la modification de, forme, direction et gain du diagramme de rayonnement afin de prendre en charge ou non certaines orientations. Ce type de reconfiguration, un est candidat prometteur pour améliorer le signal dans la direction souhaitée ou éviter les signaux provenant de directions indésirables Il existe plusieurs concepts de reconfiguration de diagramme rayonnement, parmi ces techniques, on trouve l'utilisation de diode PIN et de MEMS [34].

### **II.4.3. Antennes reconfigurables en polarisation**

La reconfiguration en polarisation permet de changer la polarisation de l'antenne (horizontale/verticale, circulaire à gauche ou à droite, etc.). Ce type de configuration peut améliorer la fiabilité et la robustesse de la communication (immunité aux interférences) ainsi que de fournir des degrés de liberté supplémentaires (diversité). Afin de conserver les autres caractéristiques (fréquence), il faut modifier la polarisation de l'antenne en agissant sur la phase et le sens du courant d'alimentation. La polarisation de l'antenne peut être changée en modifiant la direction vectorielle du champ E (la fréquence de résonance et la forme du diagramme de rayonnement ne seront pas changées) [35].

## **II.5. Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable [24]**

Une antenne reconfigurable, comme tous les autres types d'antennes classiques, a des avantages et des inconvénients.

### **II.5. 1. Avantages**

- ❖ La réallocation et la gestion dynamiques du spectre de fréquence.

- ❖ Réduction du nombre d'antennes dans le système, ce qui réduit la taille et le coût de l'appareil.
- ❖ Une bonne isolation entre les différentes normes sans fil et les bandes.
- ❖ La reconfiguration de rayonnement permet la diversité de l'espace.
- ❖ La reconfiguration de fréquence peut être utilisée pour prendre en charge de nombreuses applications sans fil.
- ❖ Reconfiguration en polarisation permet de réduire divers problèmes tels que, sensibilité à l'atténuation du signal due à la propagation par les trajets multiples émetteur-récepteur de signal pour l'orientation et la sécurité de l'antenne, etc.

### **II.5. 2. Inconvénients**

- ❖ Plus chers que les antennes classiques (introduire des composants actifs)
- ❖ Consommation énergétique élevée (composants actifs à alimenter en continu)
- ❖ Difficultés de conception et de simulation à cause de l'intégration des composants actifs dans l'antenne(le besoin d'utiliser des packages, circuit de polarisation)
- ❖ Une efficacité réduite

### **II.6.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes reconfigurables. Qui sont en plein essor en raison des nouvelles fonctionnalités qu'elles proposent. De même, on a cité les différents types et techniques de reconfiguration. Les composants employés pour la reconfiguration restent limités (PIN ou Varicap, des MEMS ...). Puis, nous avons illustré les avantages et inconvénients de ces antennes reconfigurables. Pour avoir la reconfiguration, on doit ajouter des composants actifs (diode PIN), ce qui exige de les voir en détail dans le chapitre suivant.

## **Chapitre III:**

***Etude et simulation d'une antenne  
reconfigurable sous HFSS***

# Chapitre III : Etude et simulation d'une antenne reconfigurable sous HFSS

## III.1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la conception et la simulation d'une antenne reconfigurable qui fonctionne en trois fréquences différentes selon l'état du commutateur (une diode PIN), 2,4 GHz, 5.8 GHz (application Wi-Fi) et 28 GHz (applications 5G). Les paramètres de conception sont pris de l'article [36] (dimensions géométrique type du substrat).

La première partie est consacrée à la validation de l'article [36] en utilisant le simulateur électromagnétique HFSS (le simulateur CST est utilisé dans l'article), pour déterminer les caractéristiques de l'antenne (S11, VSWR et directivité...).

Dans un second lieu, des études paramétriques ont été faites pour voir les effets de différents paramètres (dimensions, substrat, etc.), afin d'améliorer les caractéristiques de l'antenne (fréquence de fonctionnement, diagramme de rayonnement et bande passante...).

En troisième stade l'antenne reconfigurable avec une diode PIN est simulée pour déterminer ces caractéristiques (S11, VSWR et directivité...).

## III.2. Présentation du logiciel HFSS

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), est un simulateur électromagnétique (EM) pleine d'onde à haute performance, désigné à la modélisation volumétrique 3D des dispositifs électromagnétiques. Il a été développé à l'origine par le professeur Zoltan Cendes et ses étudiants à l'Université Carnegie Mellon. Le Professeur Cendes et son frère Nicholas Cendes ont fondé l'entreprise Ansoft, et ont vendu le HFSS autonome dans le cadre d'une relation marketing en 1989 avec l'entreprise Hewlett-Packard [37].

Ce logiciel intègre la simulation, la visualisation, la modélisation solide et l'automatisation dans un environnement facile à apprendre où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision [38]. Il utilise la méthode des éléments finis (FEM), un maillage adaptatif et des graphiques brillants pour offrir des performances et une vision inégale de tous les problèmes EM 3D. Il peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, la fréquence de résonance et les champs...etc.

### III.3. Structure de l'antenne patch rectangulaire

La structure de l'antenne reconfigurable simulée est illustrée dans la figure III.1 [36]. Sa conception sous HFSS, est illustrée dans la figure III.2. Les dimensions de l'antenne sont données dans le tableau III.1 [36]. D'après la figure III.1, l'élément rayonnant est constitué d'un patch extérieur en forme de U inversé et un autre intérieure en forme rectangulaire. Les deux patches sont liés par deux petits rectangles (chaque rectangle dit métal).

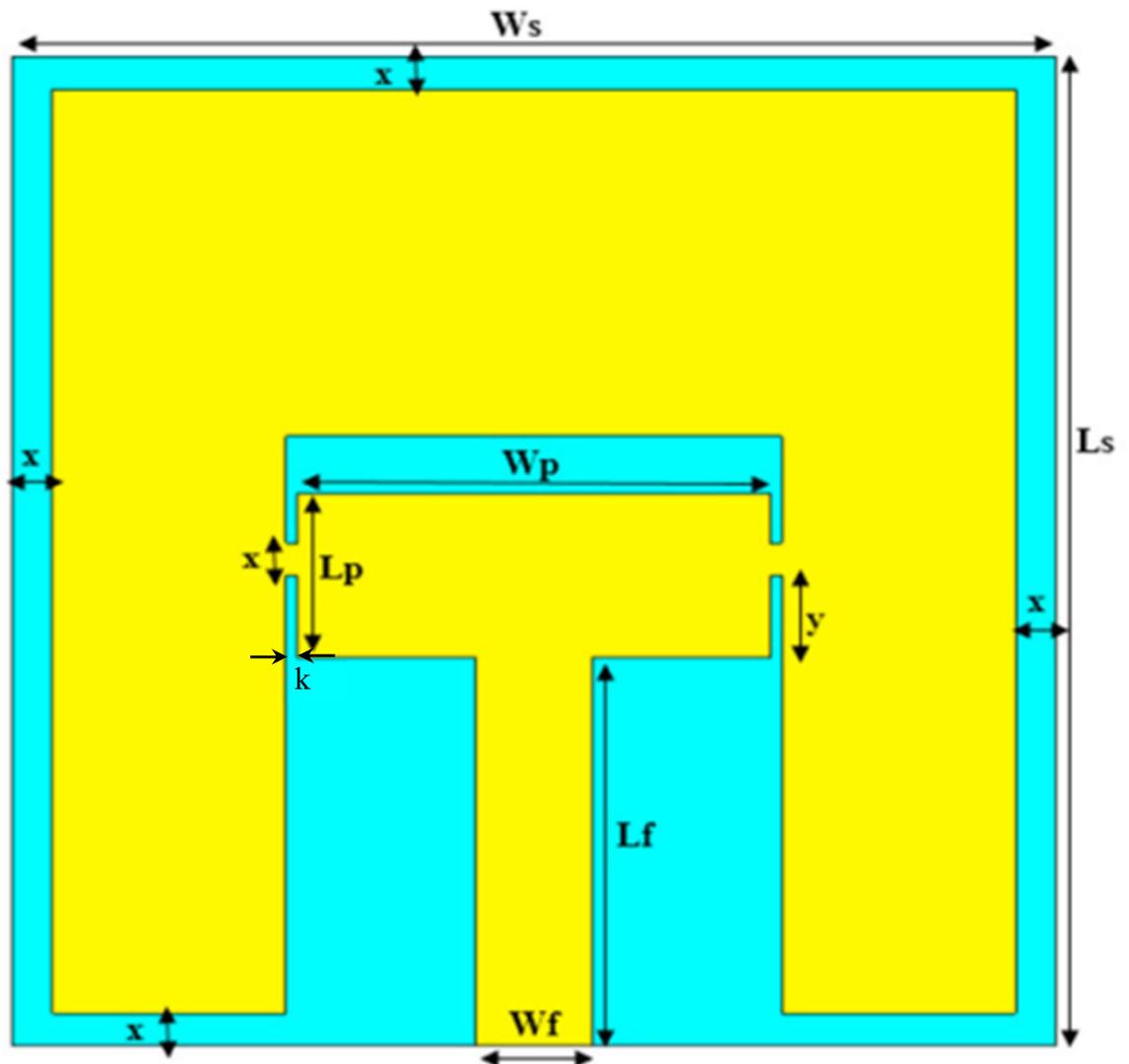


Figure.III. 1. Structure d'une Antenne reconfigurable proposée [36].

Comme montre la figure III.1, l'alimentation est une bande conductrice connectée directement au bord du patch micro ruban, c'est une alimentation axiale, c'est-à-dire, la ligne se trouve sur l'axe de symétrie. Le processus de sa fabrication est le plus facile. Le

matériau du substrat utilisé, est le FR4 possédant un constant diélectrique de 4.4. L'épaisseur du substrat est 1.6 mm.

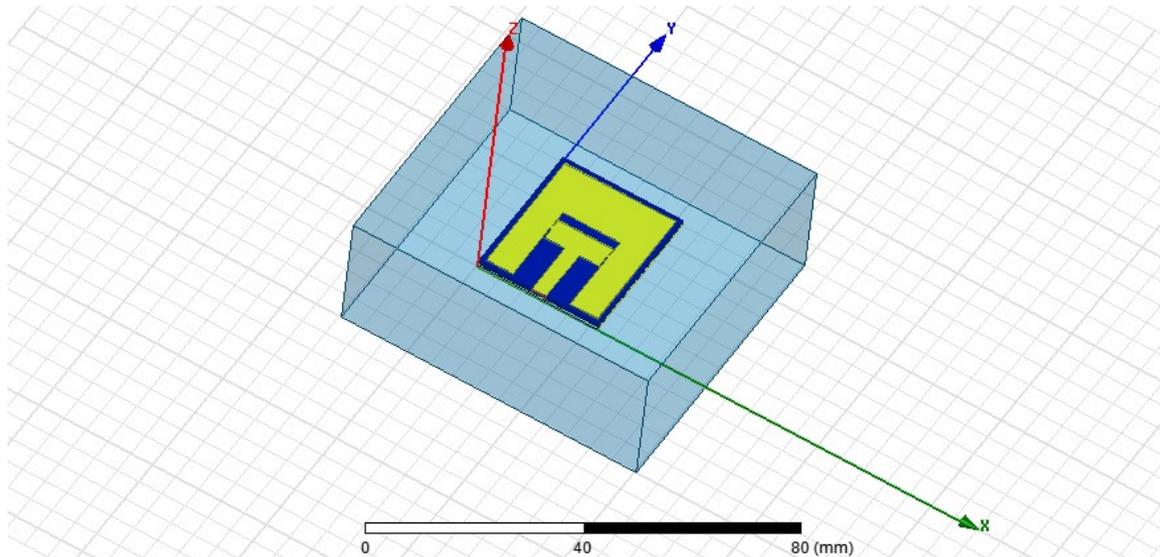


Figure.III. 2. Géométrie de l'antenne patch sous le logiciel HFSS.

Tableau.III. 1. Valeurs des différents paramètres de l'antenne

Paramètre	Valeur (mm)	Description
<b>Ws</b>	<b>26.5</b>	Largeur du plan de masse / substrat
<b>Ls</b>	<b>30</b>	Longueur du plan de masse / substrat
<b>Wp</b>	<b>12</b>	Largeur du patch
<b>Lp</b>	<b>5</b>	Longueur du patch
<b>Wf</b>	<b>3</b>	Largeur de la ligne d'alimentation
<b>Lf</b>	<b>11.75</b>	Longueur de la ligne d'alimentation
<b>X</b>	<b>1</b>	Longueur du métal
<b>Y</b>	<b>2.5</b>	La distance entre le métal et la ligne d'alimentation
<b>D</b>	<b>2</b>	Le décalage entre les deux patchs (sur la longueur)
<b>K</b>	<b>0.3</b>	Largeur du métal

### III.4. Résultats de simulations

#### III.4.1 Validation de l'article [36]

La figure III.3, représente la structure de l'antenne étudiée (ou simulée), l'antenne (a), les deux patches sont liés à l'aide d'un métal est destinée à la bande Wifi et l'autre (b) est destinée à la bande 5G (au voisinage de 28 GHz).

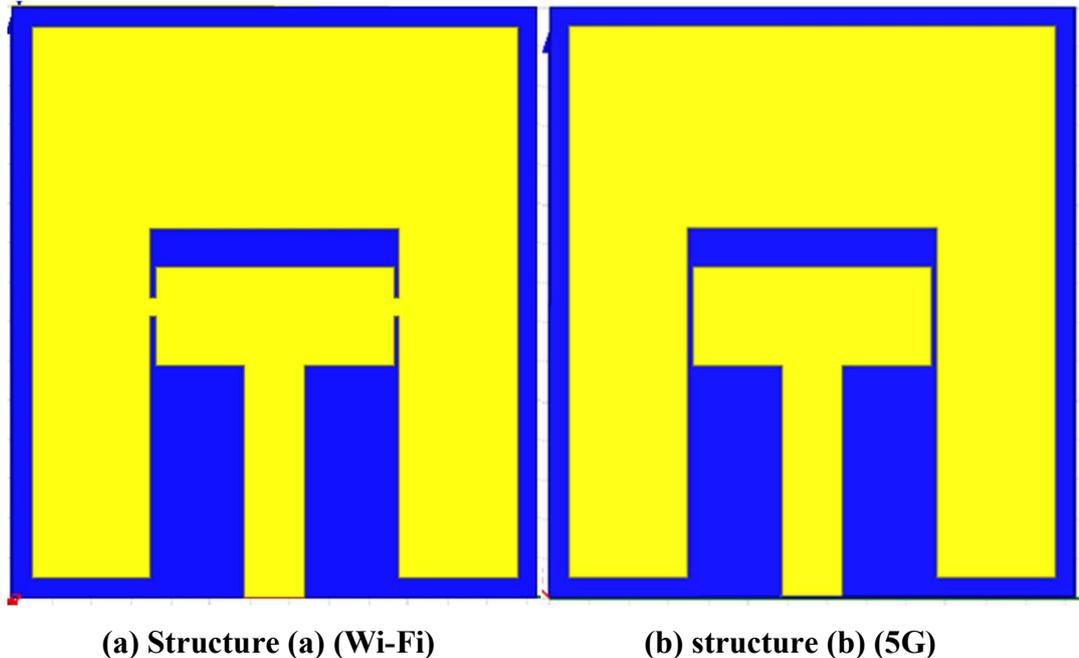


Figure.III. 3. Structure d'une Antenne reconfigurable avec métal (a) et sans métal (b)[36]

##### III.4.1.1. Coefficient de réflexion S11

###### A. La structure (a)(destinée au Wifi)

La structure (a), les deux patches sont liés comme illustré dans la figure III.3(a). Cette antenne est destinée à la bande Wifi. Le coefficient de réflexion correspondant, est illustré dans la figure III.4. Cette dernière montre que l'antenne possède cinq fréquences de résonance :

**La première fréquence de résonance** est :  $f = 2.4220$  GHz (valeur de  $S_{11} = -15.5653$  dB), et la bande passante est au voisinage de 445 MHz ( $f_2 = 2.4015$  GHz et  $f_1 = 2.4460$  GHz).

**La deuxième fréquence de résonance** est  $f = 5.7495$  GHz (valeur de  $S_{11} = -30.1475$  dB), et la bande passante est au voisinage de 995 MHz ( $f_2 = 5.7015$  GHz et  $f_1 = 5.810$  GHz).

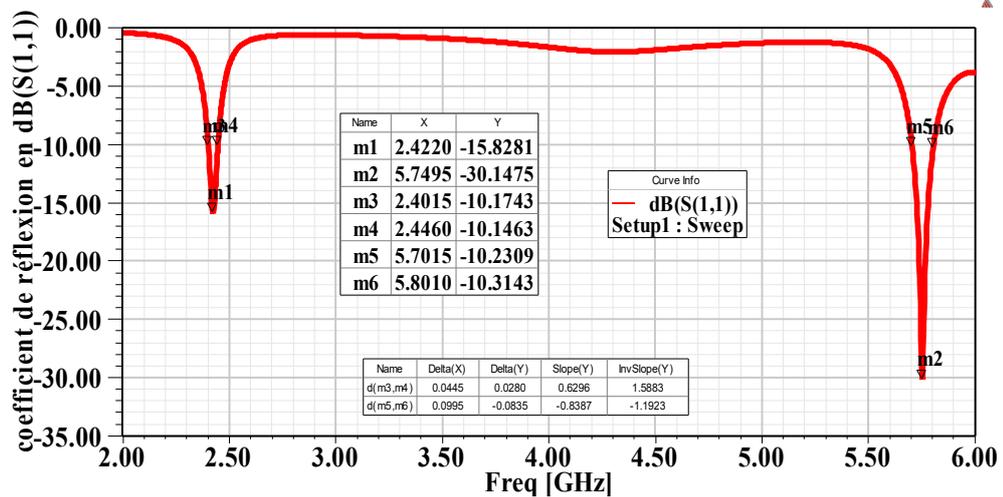
Pour la gamme (5G) :

La troisième fréquence de résonance est :  $f_3 = 26.76\text{GHz}$  (valeur de  $S_{11} = -28.59\text{dB}$ )

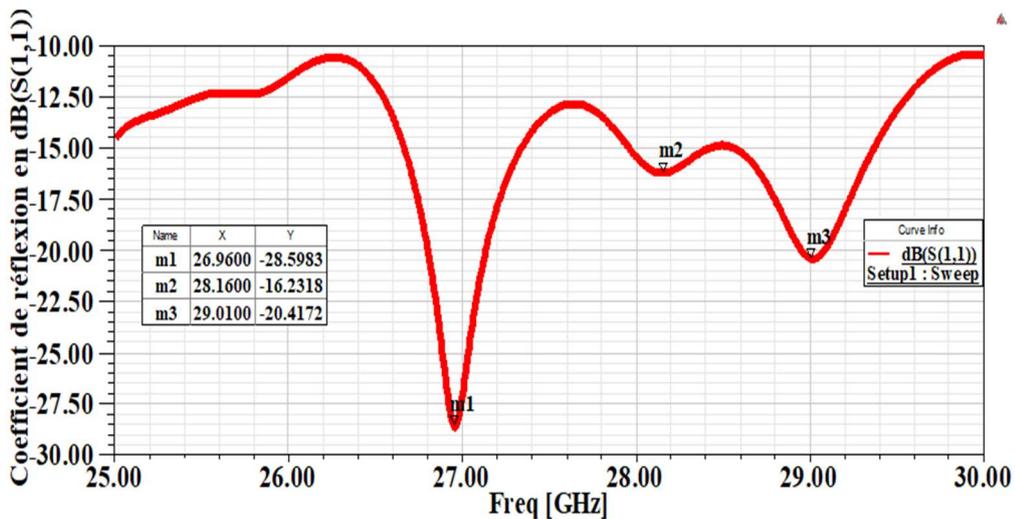
La quatrième fréquence de résonance est :  $f_4 = 28.16\text{GHz}$  (valeur de  $S_{11} = -16.23\text{dB}$ )

La cinquième fréquence de résonance est :  $f_5 = 29.01\text{GHz}$  (valeur de  $S_{11} = -20.41\text{dB}$ )

Pour la trois dernières fréquence (gamme 5G), la bande passante est toute la gamme de 25 à 30 GHz.



(a) gamme Wi-Fi



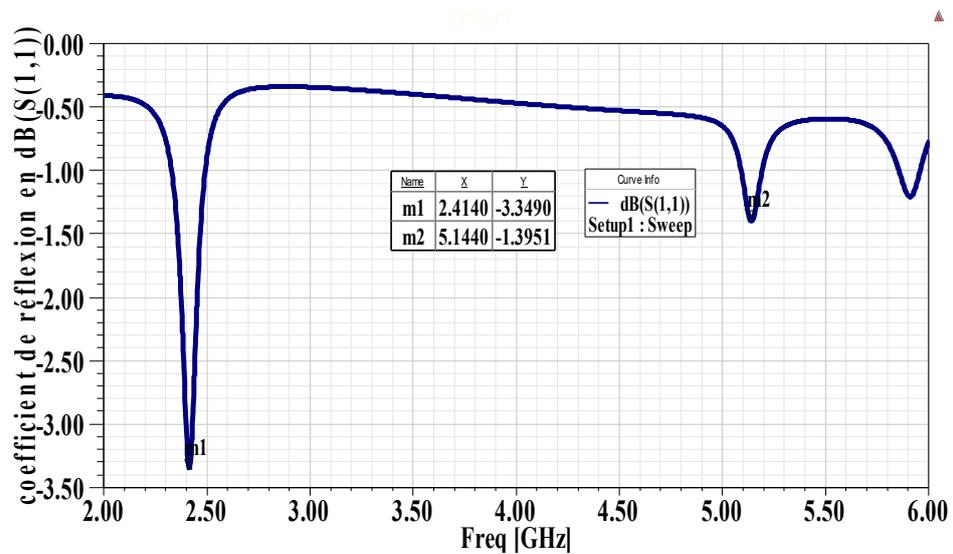
(b) gamme 5G

Figure. III. 4. Coefficient de réflexion de la structure (a)

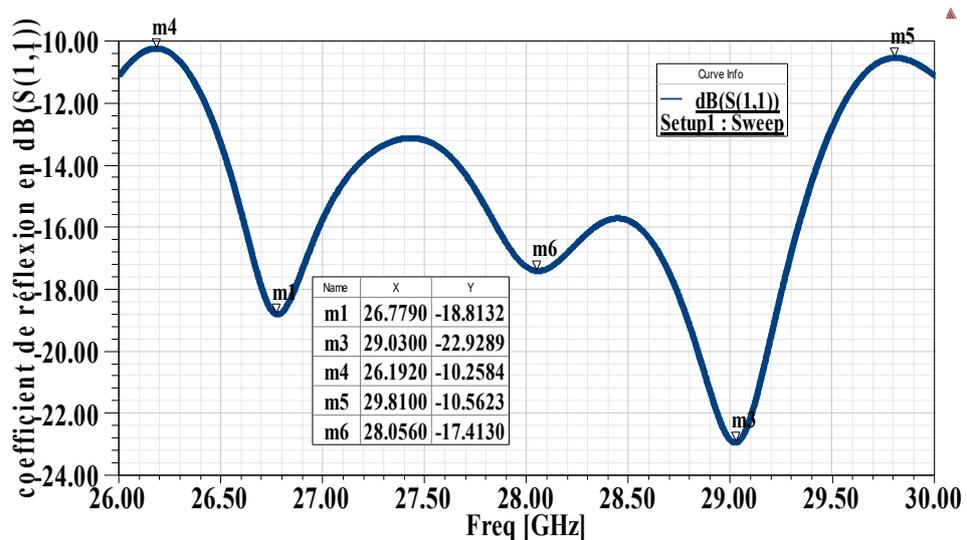
### B. La structure (b) (Destinée à la 5G)

La structure (b), les deux patches ne sont pas liés comme illustré dans la figure III.4(b). Cette antenne est destinée à la bande 5G. Le coefficient de réflexion correspondant, est illustré dans la figure III.5. D'après cette dernière, pour la gamme Wifi [2-6 GHz], on

remarque que le coefficient de réflexion est très supérieure à  $-10$  dB. Donc l'antenne ne fonctionne pas dans cette gamme. Et c'est tout à fait normale car les deux patches ne sont pas liés. Pour la gamme 5G, on remarque que l'antenne possède trois fréquences de résonance : **La première fréquence de résonance** est :  $f_1 = 26.7790$  GHz (valeur de  $S_{11} = -18.8132$  dB), **La deuxième fréquence de résonance** est  $f_2 = 28.0560$  GHz (valeur de  $S_{11} = -17.4130$  dB), **La troisième fréquence de résonance** est :  $f_3 = 29.03$  GHz (valeur de  $S_{11} = -22.9289$  dB) Pour les trois fréquences, la bande passante est toute la gamme : de 25 à 30 GHz.



(a) Plage Wi-Fi



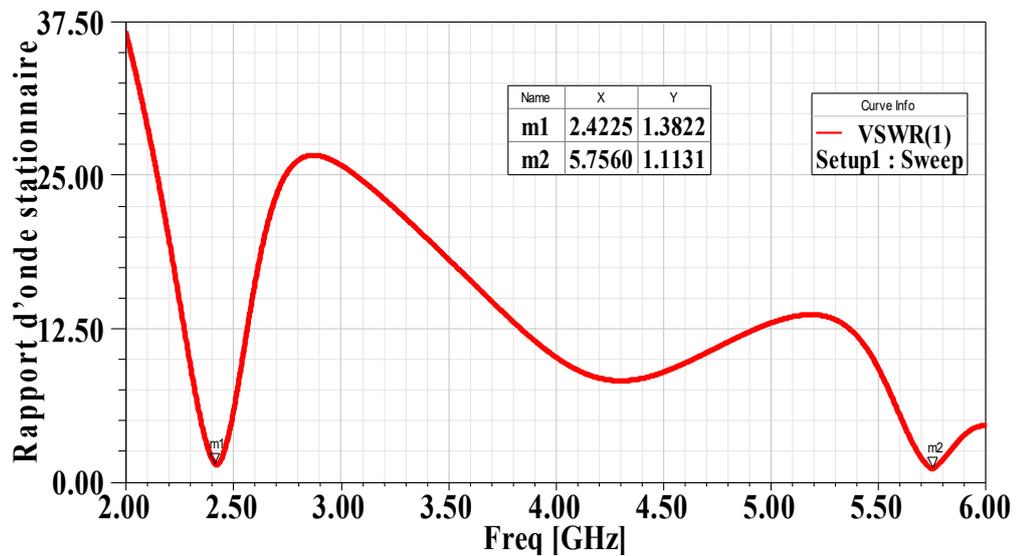
(a) Plage 5G

Figure. III. 5. Coefficient de réflexion de la structure (b)

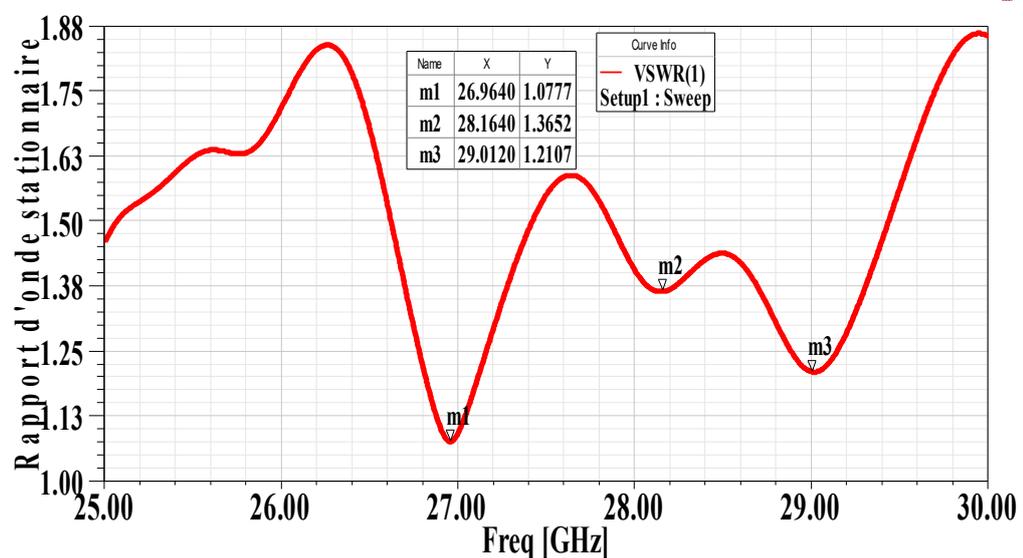
### III.4.1.2. Rapport d'onde stationnaire (ROS) (VSWR)

#### A. La structure (a) (Destinée au Wifi)

Le rapport d'onde stationnaire VSWR, en fonction de la fréquence est présenté dans la figure.III.6 (a) plage Wi-Fi et (b) plage 5G.



(a) Plage Wi-Fi



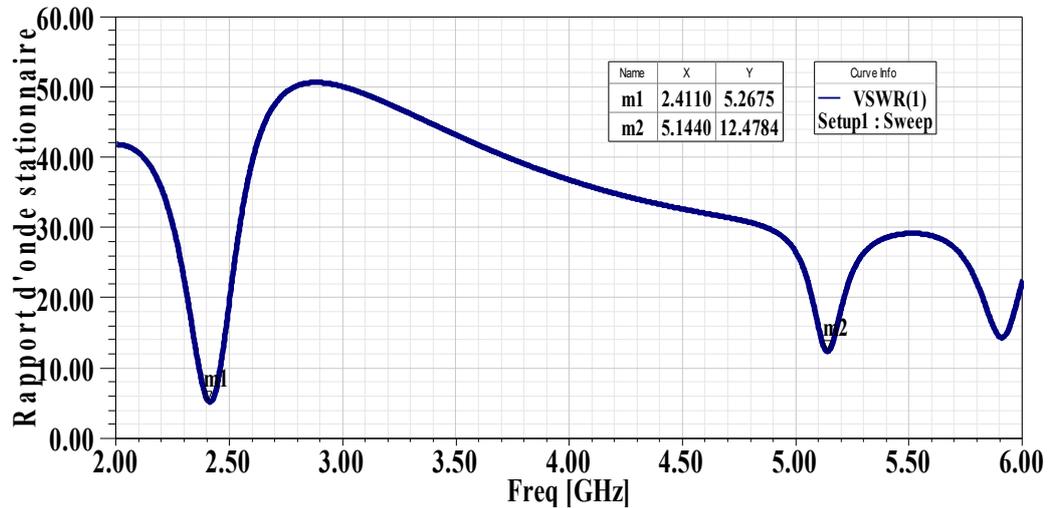
(b) Plage 5G

Figure. III. 6. Rapport d'onde stationnaire de la Structure (a)

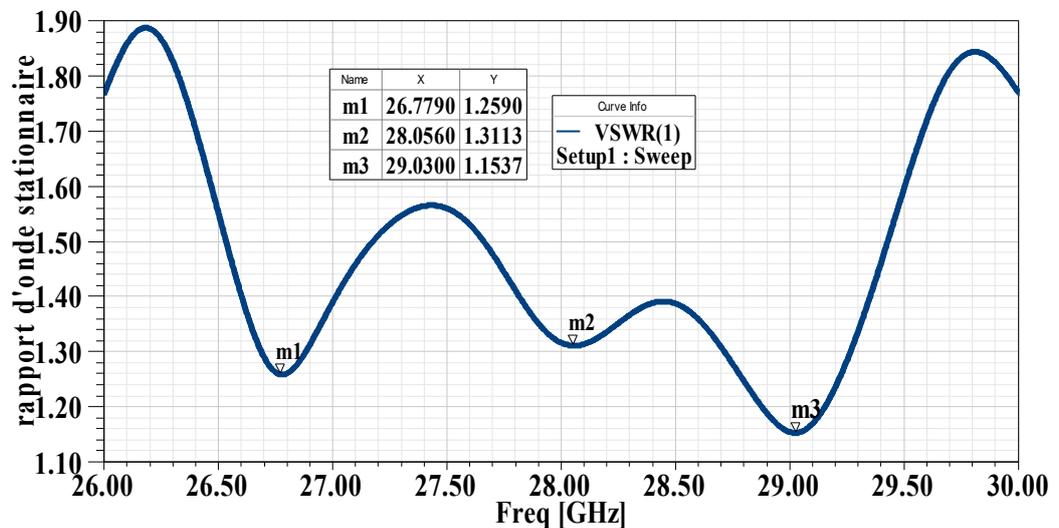
La valeur de rapport d'onde stationnaire (structure a) à la fréquence 2.4225 GHz (fréquence de résonance) est d'ordre de 1.3822 ; et pour la fréquence 5.7560 GHz est égal

1.1131. Pour la gamme 5G, le rapport d'onde stationnaire de la structure (a) est inférieur à un sur toute la gamme donc l'antenne est adaptée sur toute la gamme en particulier aux fréquences :  $f = 26.96$  GHz est de l'ordre de 1.07.

### B. La structure (b) (Destinée à la 5G)



(a) Plage wifi



(b) Plage 5G

Figure. III. 7. Rapport d'onde stationnaire Structure (b)

La valeur de rapport d'onde stationnaire (structure b) à la fréquence 26.77 GHz (fréquence de résonance) est d'ordre de 1.259 ; et pour la fréquence 28.05 GHz est égal 1.311 et pour la fréquence  $f = 29.03$  GHz est de l'ordre de 1.1537. Pour les trois fréquences, le rapport d'onde stationnaire est inférieur à 2.

## III.4.1.3. Directivité

## A. La structure (a) (Destinée au Wifi)

La directivité de la structure (a) (les deux patches sont liés par métal qui est destinée à la gamme Wifi), est illustrée dans la figure III.8.

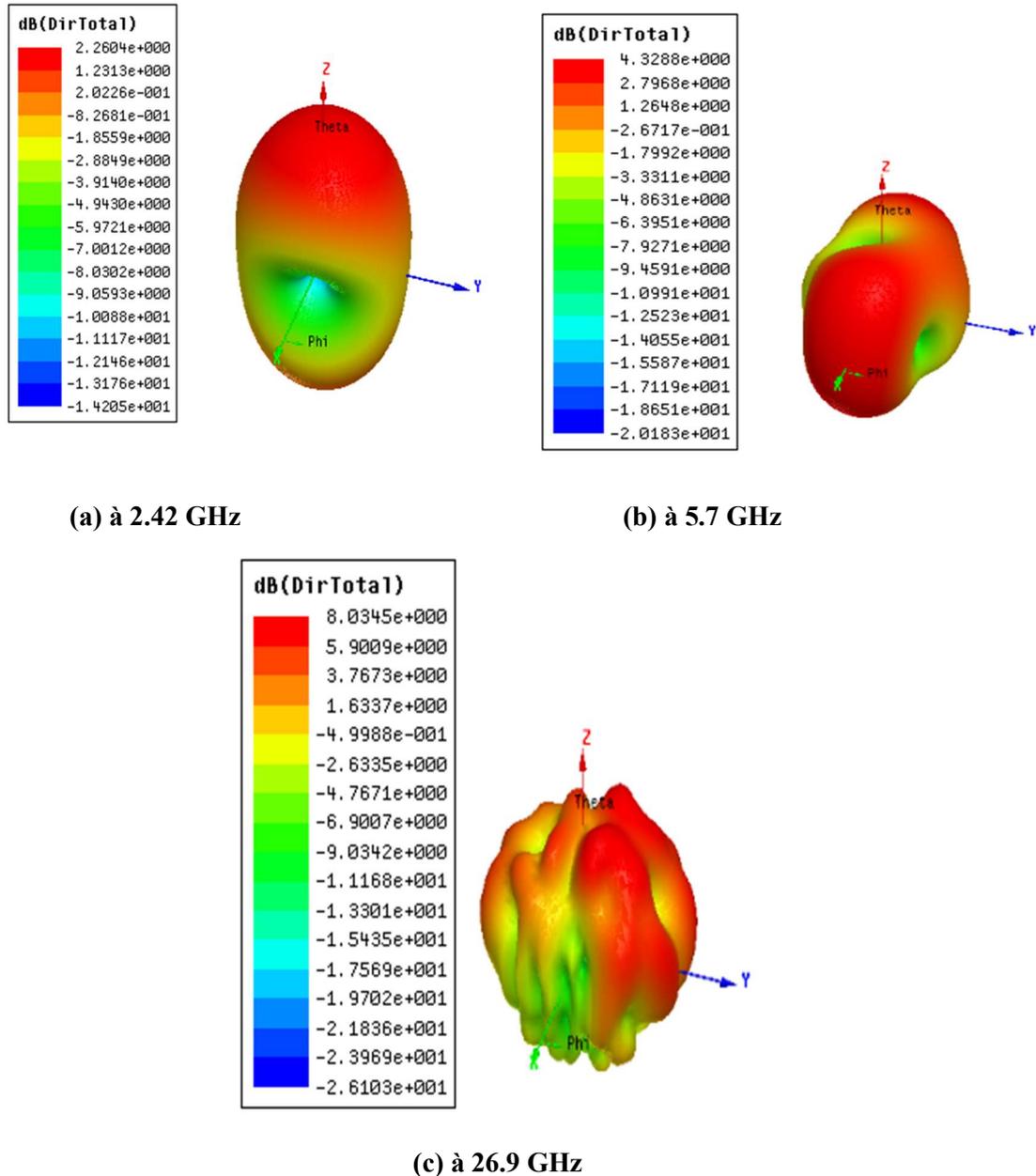
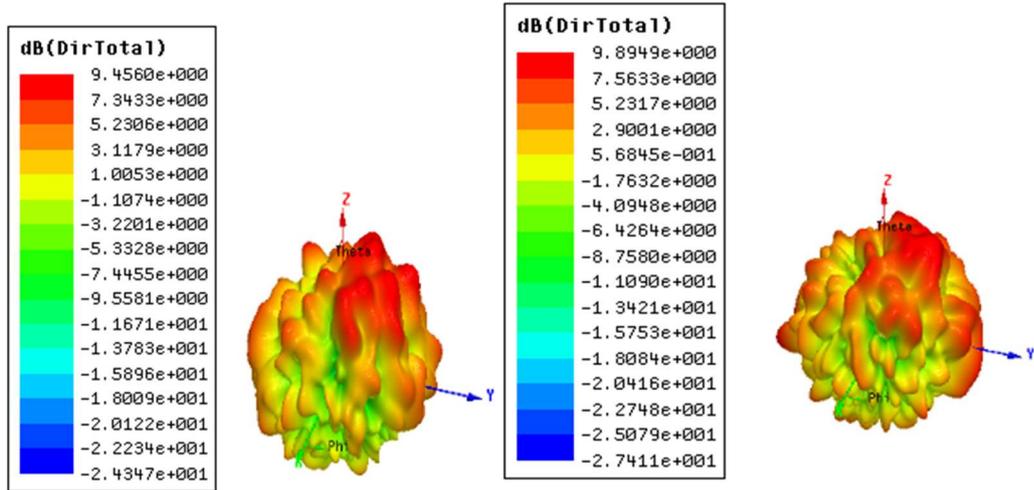


Figure. III. 8. Directivité de la structure (a)

D'après la figure III.8. La valeur maximale de la directivité à la fréquence 2.42 GHz est de l'ordre 2.2 dB, 4.32 dB à la fréquence 5.7 GHz et 8.03 dB à la fréquence 26.9 GHz.

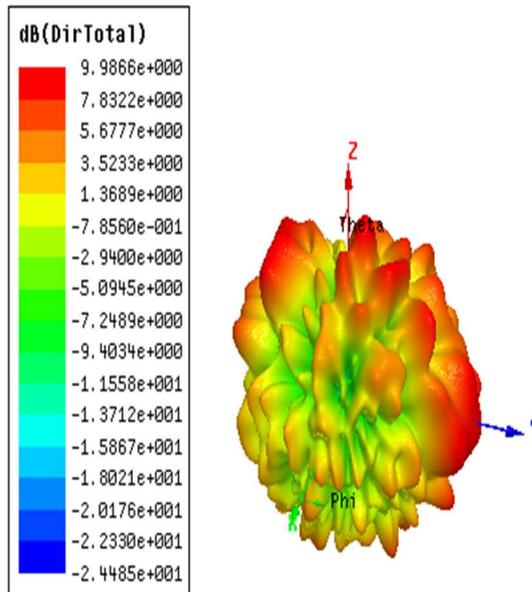
**B. La structure (b) (Destinée à la 5G)**

La directivité de la structure (b) (les deux patches ne sont liés par métal qui est destinée à la gamme 5g), est illustrée dans la figure III.9.



(a) à 26.7 gamme (5G)

(b) à 28.05 gamme (5G)



(c) à 29.81 gamme (5G)

Figure. III. 9. Directivité de la structure (b)

D'après la figure III.9(b), D'après cette dernière la valeur maximale de la directivité à la fréquence 26.7 GHz est de l'ordre 9.45 dB, 9.89 dB à la fréquence 28.08 GHz et 9.98 dB à la fréquence 29.81 GHz.

## III.4.1.4. Récapitulation de la validation

Vous trouverez ci-dessous un tableau récapitulatif comparatif des travaux relatifs aux antennes reconfigurables :

Tableau.III. 2. Description comparative des antennes reconfigurables

Paramètre	Nos résultats		Résultats [36]	
	Structure (a)	structure (b)	Structure (a)	Structure (b)
<b>Fréquence de résonance (GHz)</b>	f1=2.422 f2=5.749 f3=26.96 f4=28.16 f5=29.01	f1=26.7790 f2=28.0560 f3=29.03	f=2.392	F1=25.4 F2=27.1 F3=28.02
<b>Bande passante(GHz)</b>	0.044 (f1) 0.0995 (f2) 5 (f3, f4, f5)	5 (f1) 5 (f2) 5 (f2)	32.5MHz (f)	2.57 (F3)
<b>Coefficient de réflexion (dB)</b>	-15.5653 (f1) -30.1475 (f2) -28.59 (f3) -16.23 (f4) -20.41 (f5)	-18.8 (f1) -17.41 (f2) -22.9289 (f3)	-22.39 (f)	-14.4 (F1) -18.6 (F2) -22.15 (F3)
<b>Directivité (dB)</b>	2.26 (f1) 4.32 (f2) 8.03 (f3)	9.45 (f1) 9.89 (f2) 9.98 (f3)	4.34 (f)	8.57 (F3)
<b>ROS</b>	1.38 (f1) 1.11 (f2) 1.07 (f3) 1.36 (f4) 1.21 (f5)	1.25 (f1) 1.31 (f2) 1.15 (f3)	1.16 (f)	1.16 (F3)

### III.4.2. Etude paramétrique de la structure (a) (la gamme WiFi)

Dans le point précédent, les fréquences de résonances trouvées ne coïncident pas exactement avec les valeurs désirées. Donc on procède à une étude paramétrique.

#### III.4.2. 1. Effet de la longueur du métal (x)

Dans cette partie, on fixe la valeur de  $x = 1$  mm, puis, on varie la longueur de  $x$  de 1 mm, jusqu'à 1.2 mm, par un pas de 0.02 mm, les autres paramètres sont fixes utilisées dans le point précédent. La figure III.10. Représente le coefficient de réflexion. (Étude paramétrique de  $x$ ). Le meilleur résultat est pour  $x = 1.12$ . Les fréquences de résonance correspondantes sont : 2.44 GHz (coefficient de réflexion égale à -17.19 dB) et 5.8 GHz (coefficient de réflexion correspondant égal -30.15 dB).

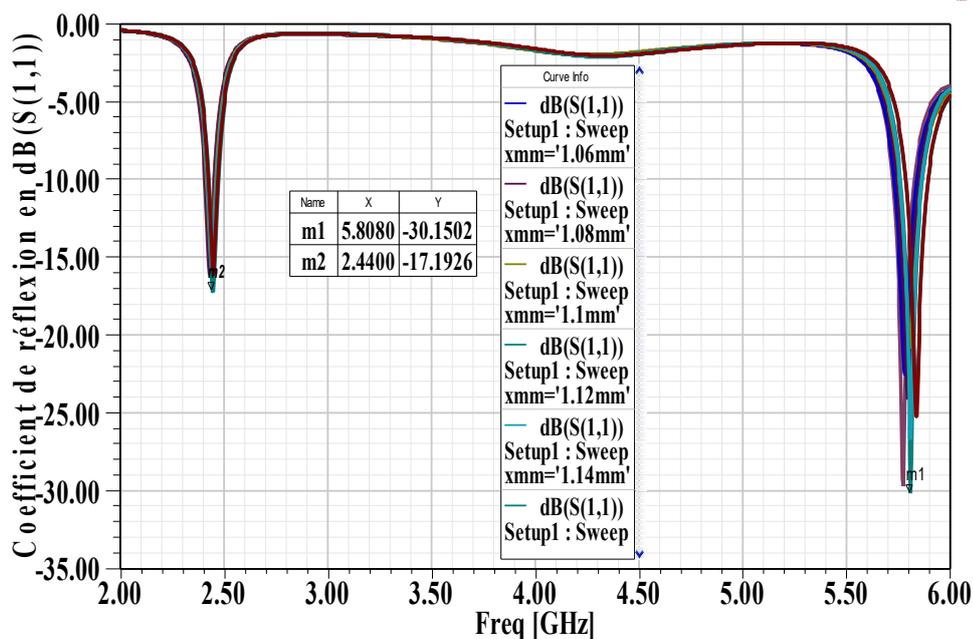


Figure. III. 10. Effet de la longueur (x) sur le coefficient de réflexion

#### III.4.2. 2. L'Effet de la largeur du métal (k)

Dans cette étude, on suppose que la largeur  $x$  est fixée à 0.3 mm, alors que la longueur de (k) sera variée de 0.3 mm jusqu'à 0.8 mm par un pas de 0.1 mm. Dans la Figure III.11, les résultats de simulation sont présentés en termes de coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la fréquence. En remarqué les meilleurs résultats  $k=0.8$

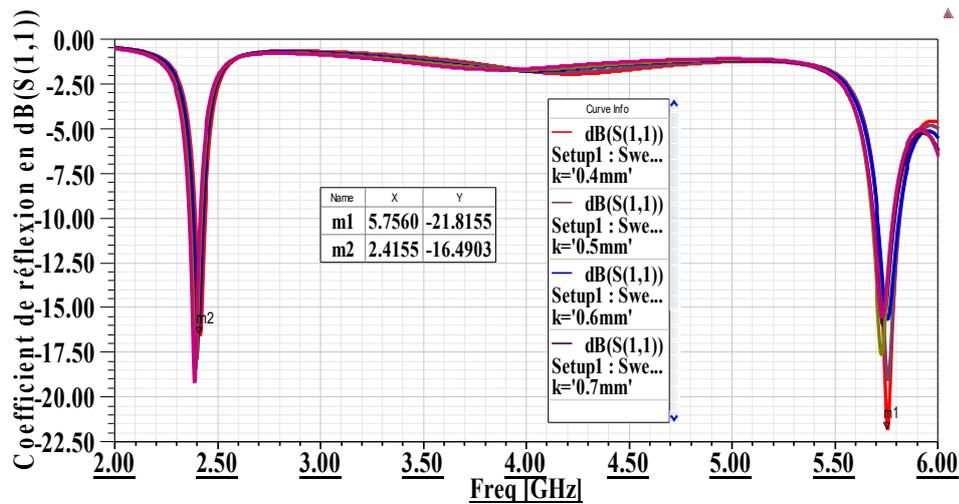


Figure.III. 11. Effet de la largeur du métal (k) sur le coefficient de réflexion

### III.4.2.3 Effet de la distance entre les deux patches d (sur la longueur)

Pour étudier l'effet de la distance entre les deux patches d (la longueur), on a pris l'intervalle étalant de 2 mm à 2.4 mm, avec un pas de 0.2 mm (la longueur du d est fixée à 2 mm).

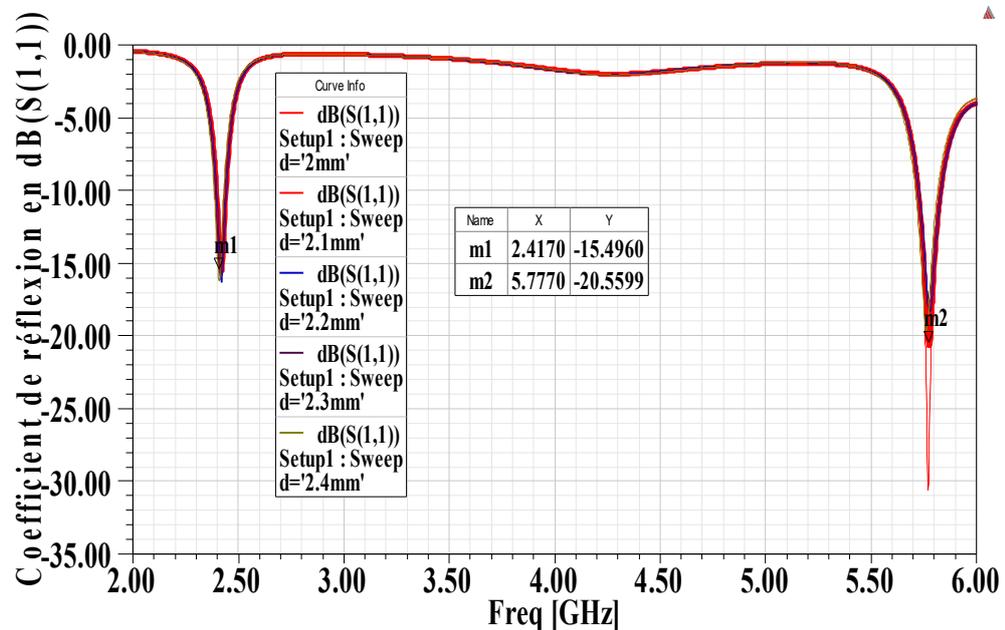


Figure. III. 12. Effet de décalage (d) sur le coefficient de réflexion

La figure III.12 illustre les coefficients de réflexion correspondants (étude l'effet de d). Cette dernière montre que le meilleur résultat est d=2.1mm. Les fréquences de résonances

correspondantes sont : 2.41 GHz (coefficient égale à -15.49 dB) et 5.77GHz (coefficient égale à -20.55).

D'après la figure III.12, on remarque que la distance entre les deux patches possède un effet léger sur la valeur de la fréquence de résonance, mais joue un rôle significatif sur le coefficient de réflexion.

#### III.4.2. 4. Effet de Longueur du patch ( $l_p$ )

Pour voir l'effet de la longueur du patch, on a pris l'intervalle de 2 mm à 4 mm avec un pas de 1 mm (la largeur du patch est fixée à 5 mm).c'est la meilleur adaptation

Les coefficients de réflexion correspondants sont illustrés dans la figure III.13. D'après cette dernière, on remarque que la longueur du patch joue un rôle important sur la valeur de la fréquence de résonance ainsi sur le coefficient de réflexion correspondant.

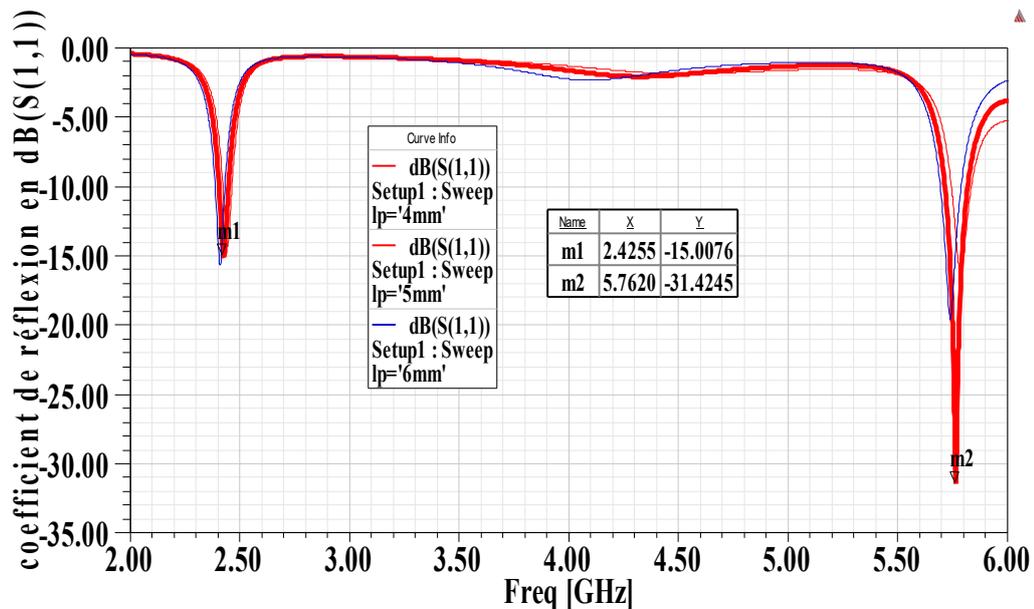


Figure.III. 13. Effet de Longueur du patch

#### III.4.3. Optimisation de l'antenne (Gamme WiFi seulement)

L'optimisation de l'antenne dans cette étude, est de chercher le meilleur couple ( $k$ ,  $x$ ) ( $x$  : la longueur du métal et  $k$  : la largeur du métal) qui rend exactement la fréquence de résonance 2.4 GHz et 5.8 GHz ( $S_{11}$  inférieur -10 dB). Donc on a joué sur les deux paramètres. Pour la longueur du métal ( $k$ ) l'intervalle, s'étale de 0.3 mm à 0.9 mm avec un pas 0.1 et pour la largeur de métal ( $x$ ), l'intervalle varier de 1mm à 1.19 mm, avec un pas de 0.01mm. Les coefficients de réflexion correspondants sont illustrés dans la figure III.14.

La figure III.15 présente la variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour le couple ( $k=0.8$  mm et  $x = 1.2$  mm). On remarque que le coefficient de réflexion aux fréquences de résonance, sont au voisinage de 2.41 GHz (coefficient de réflexion -20.69 dB) et de 5.8 GHz ( $S_{11} = -17.17$  dB).

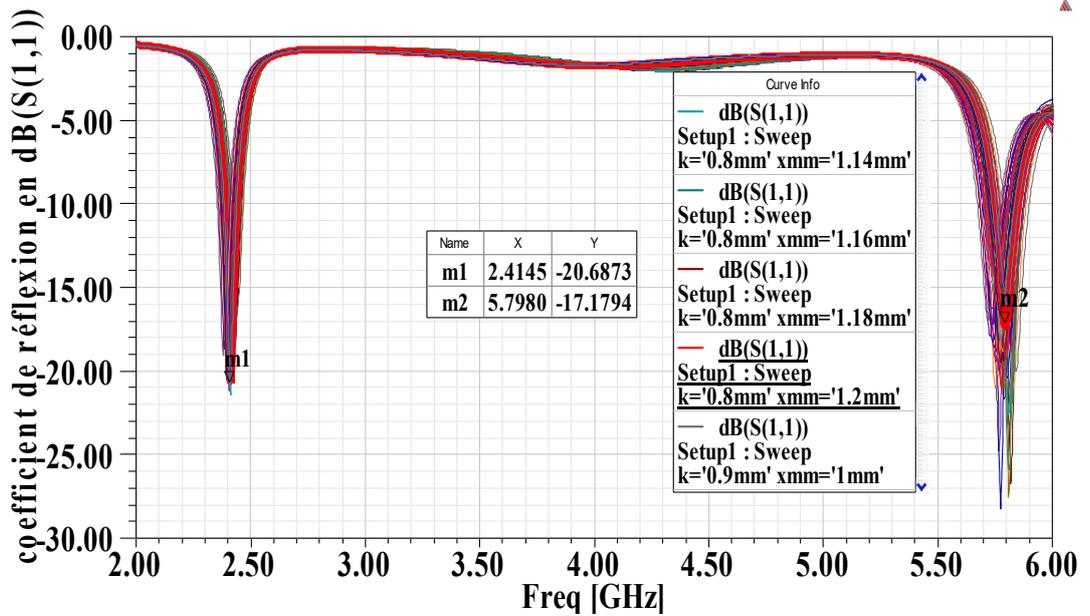


Figure.III. 14. Effet de la longueur ( $k$ ) et la largeur du ( $x$ ) sur le coefficient de réflexion

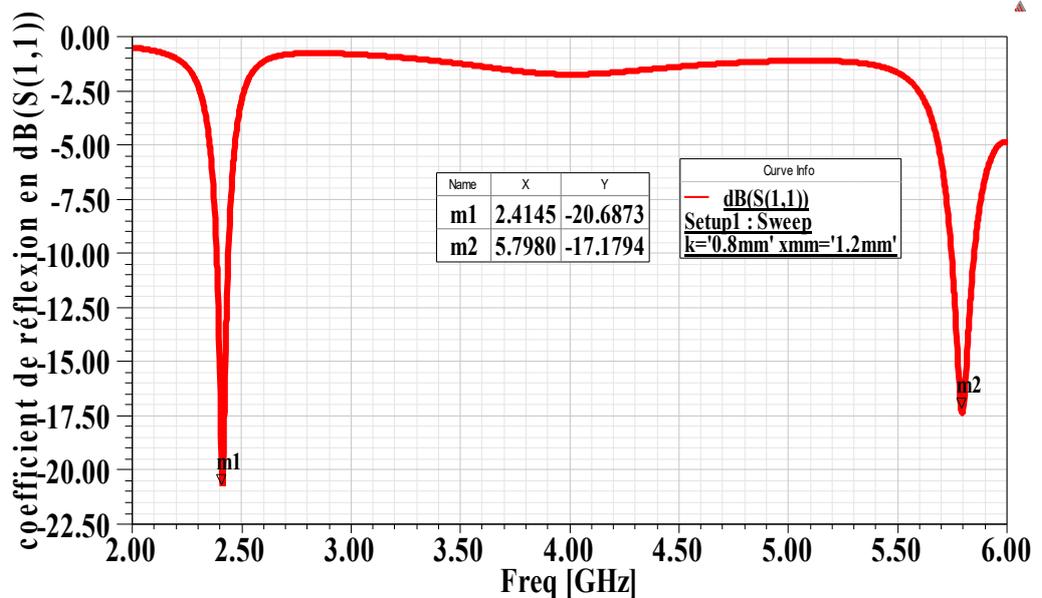


Figure.III. 15. Coefficient de réflexion correspondant à la meilleure valeur optimisée

Le rapport d'onde stationnaire de la géométrie optimisée est présenté dans la figure III.16.

D'après la figure III.16, on remarque que la valeur de ROS =1.26 à la fréquence 2.41GHz et 1.27 à la fréquence 5.79 GHz, les valeurs sont acceptables (inférieur à 2).

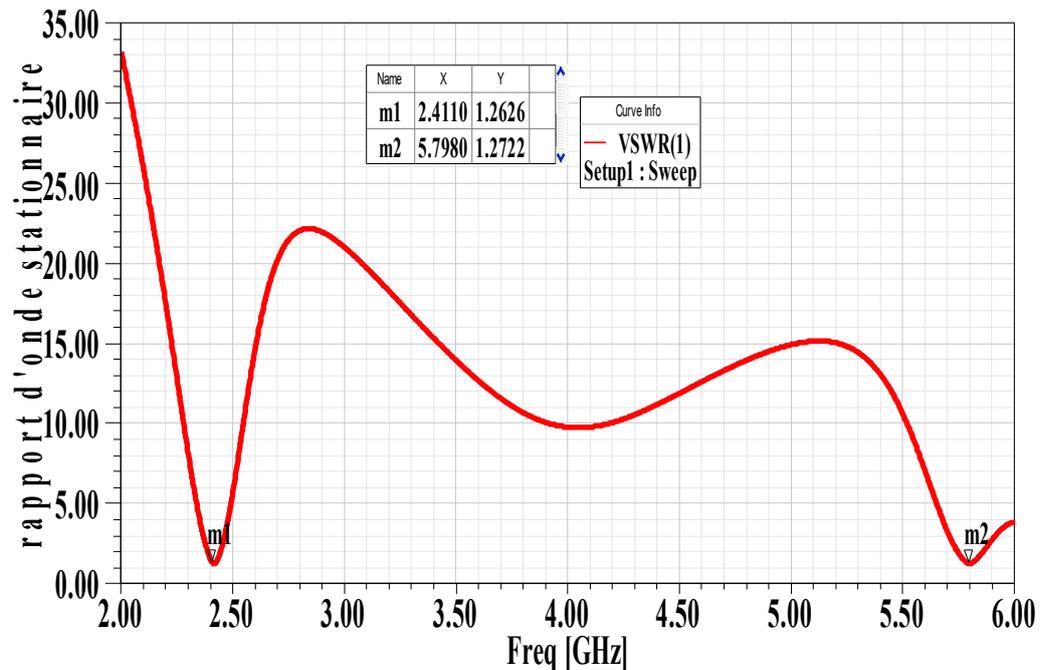


Figure.III. 16. Rapport d'onde stationnaire correspondant aux meilleures valeurs optimisées

#### III.4.4 Antenne reconfigurée par une diode PIN

La diode PIN sous HFSS, se remplace par des bandes comme illustré dans la figure III.17(c) qui présentent un circuit RLC équivalent simplifié qui est illustré dans la figure III.17 (a et b) [39]. Le fonctionnement de la diode PIN présente deux états, l'état passant, dit ON, qui se modélise par un circuit RL série (leurs valeurs sont données dans le tableau III.3) et l'état bloquant, dit OFF, qui se modélise par une bobine L en série avec un circuit RC parallèle [39] (leurs valeurs sont données dans le tableau III.3).

L'antenne est munie de deux diodes PIN, pour commuter entre les deux bandes (WIFI & 5G). D'après les états des diodes, on distingue quatre états possibles (ON-ON, OFF-OFF, ON-OFF, OFF-ON). Les deux états ON-OFF et OFF-ON, est identiques, car la structure est symétrique.

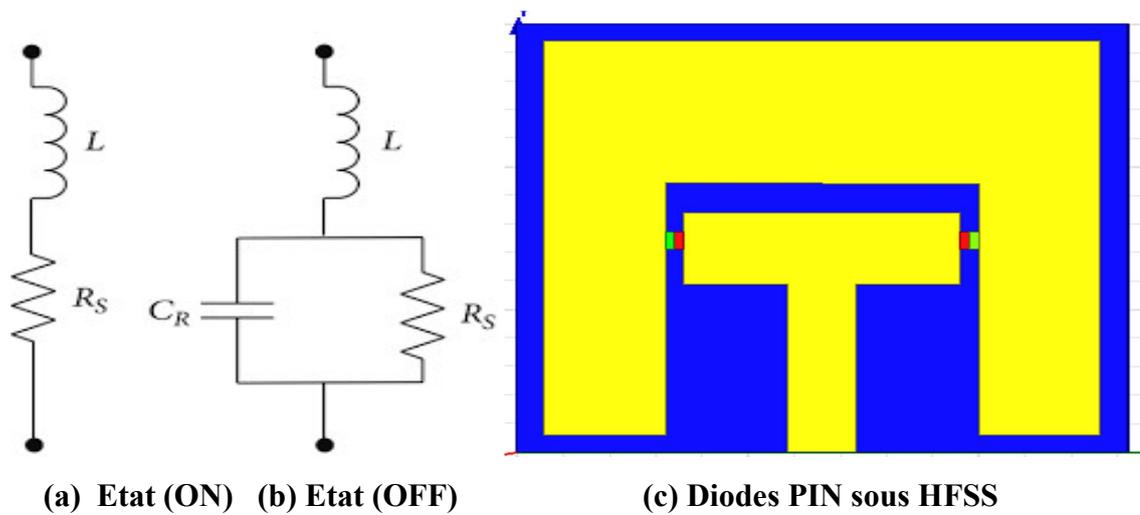


Figure.III. 17. Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN (a) et (b) et la structure de l'antenne commuté correspondante sous HFSS

Tableau.III. 3. Diode PIN Elément localisé [39]

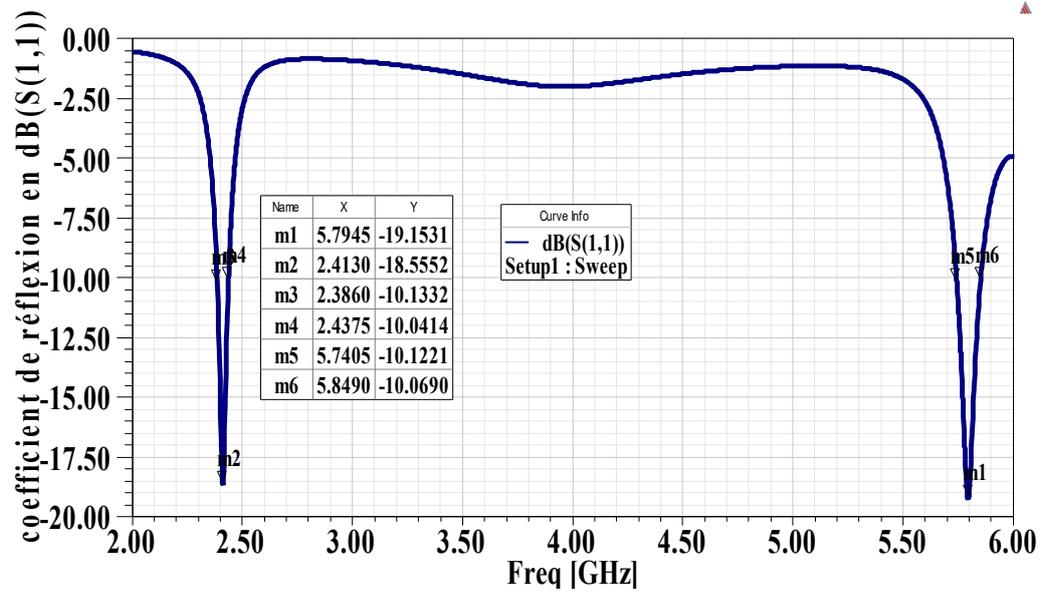
Paramètre	R	L	C
Diode state ON	0.1 $\Omega$	0.45 pH	//
Diode state OFF	30 K $\Omega$	0.45 pH	0.1 pF

#### III.4.4.1. Etat 1 : ON-ON (Gamme Wifi)

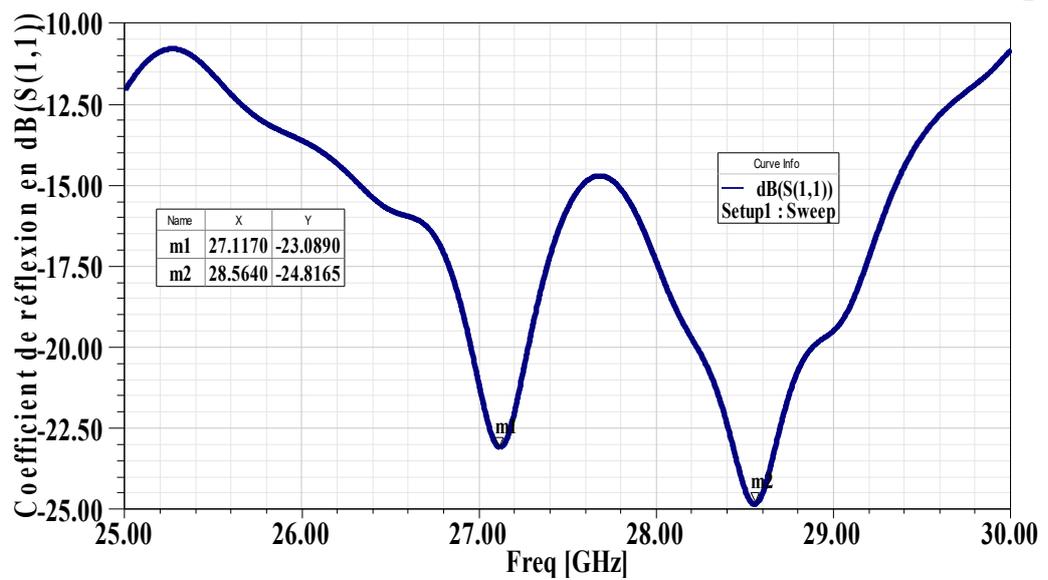
Les deux diodes PIN sont passantes, donc on est à l'état ON-ON. Dans ce cas (ON-ON), la simulation est faite juste pour la gamme Wi-Fi.

##### III.4.4.1. 1. Coefficient de réflexion correspondant à l'état ON-ON

La figure III.18 montre, le coefficient de réflexion de l'antenne reconfigurable en mode de fonctionnement ON-ON. D'après cette figure, les fréquences de résonances correspondantes sont :  $f_1=2.4130$  GHz (coefficient de réflexion -18.5552dB), avec une bande passante : 0.0515 GHz et la fréquence  $f_2= 5.7945$  (coefficient de réflexion-19.1531dB), avec une bande passante : 0.1085 GHz. Et  $f_3=27.11$  GHz ( $S_{11}= -23.08$ dB) et  $f_4=28.06$  GHz ( $S_{11}=-24.81$  dB).



(a) Wifi (ON-ON)

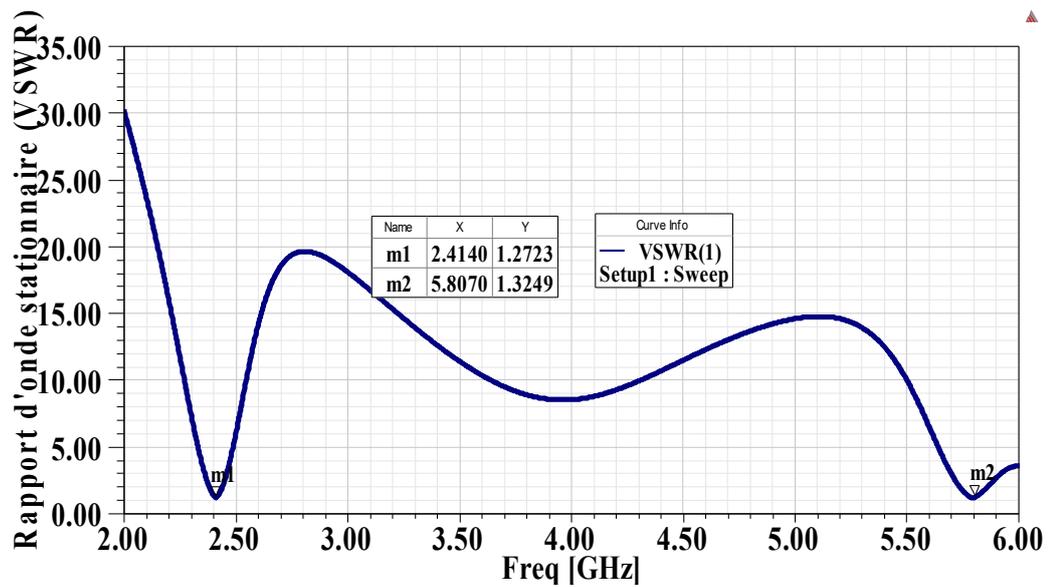


(b) 5G (ON-ON)

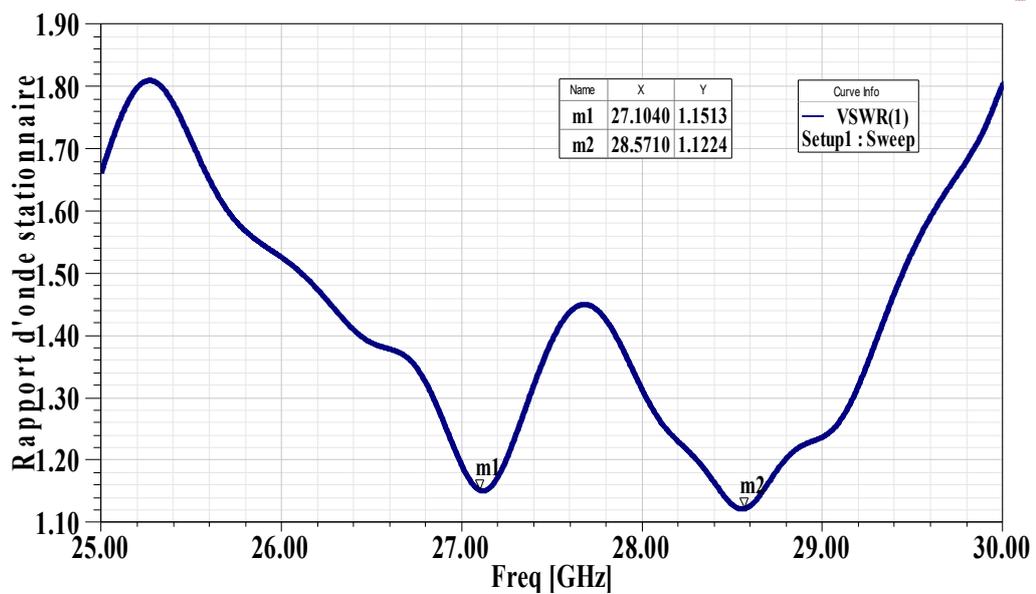
Figure.III. 18. Coefficient de réflexion correspondant à l'état ON-ON

### III.4.4. 1. 2. Rapport d'onde stationnaire à l'état ON-ON

Le rapport d'onde stationnaire à l'état ON-ON, est illustré dans la figure III.19. D'après cette dernière, on remarque que les valeurs de rapport d'onde stationnaire aux fréquences de résonnances correspondantes sont acceptables (inférieure à 2).



(a) plage Wifi



(b) plage 5G

Figure.III. 19. Rapport d'onde stationnaire

### III. 4.4. 1. 3. Directivité à l'état ON-ON

La directivité de l'antenne à l'état ON-ON aux quatre fréquences de résonance 2.41, 5.7, 27.1, et 28.57 GHz, est illustrée dans la figure III.20. Leurs valeurs maximales respectivement sont 2.45, 4.56, 7.67 et 8.27 dB.

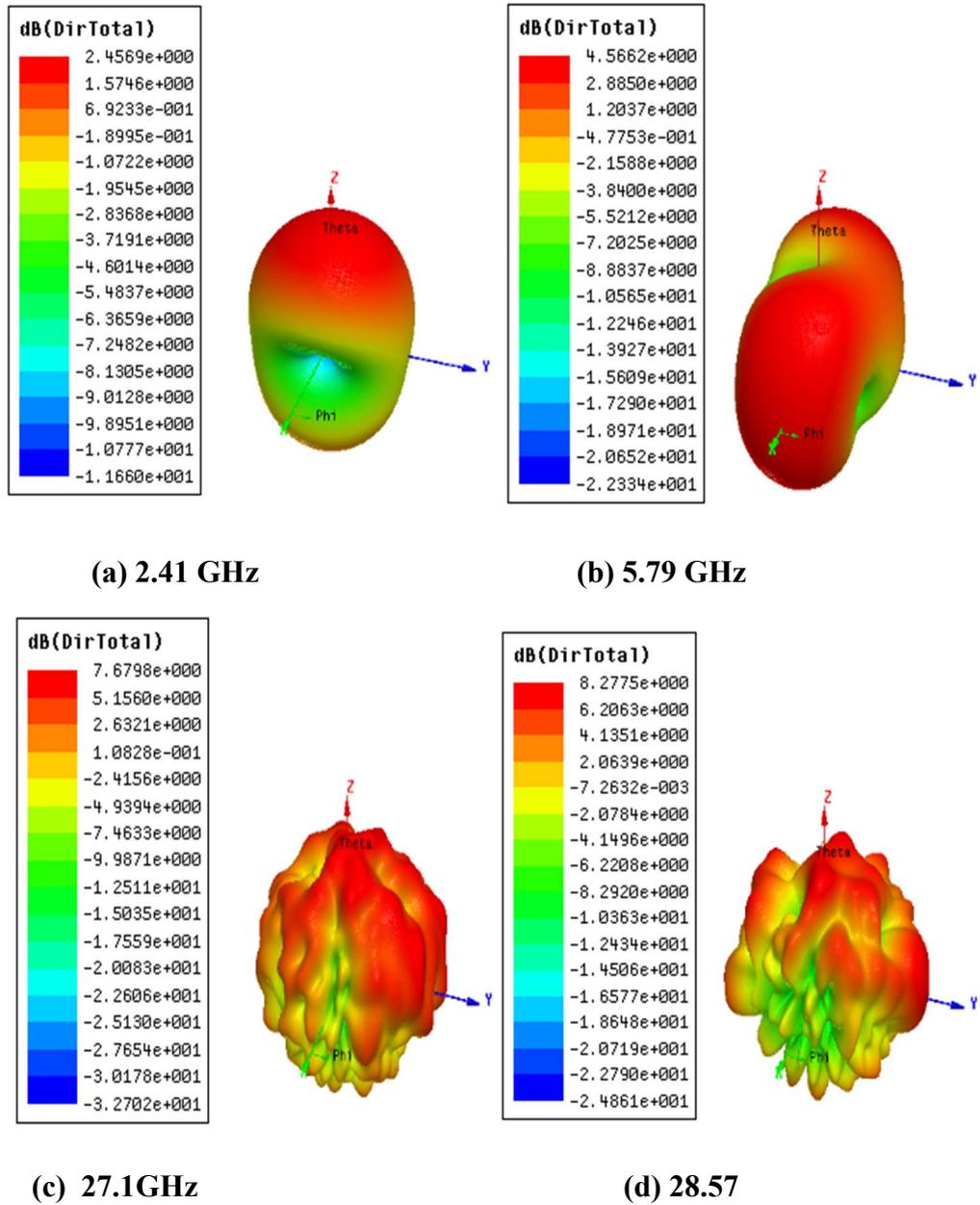


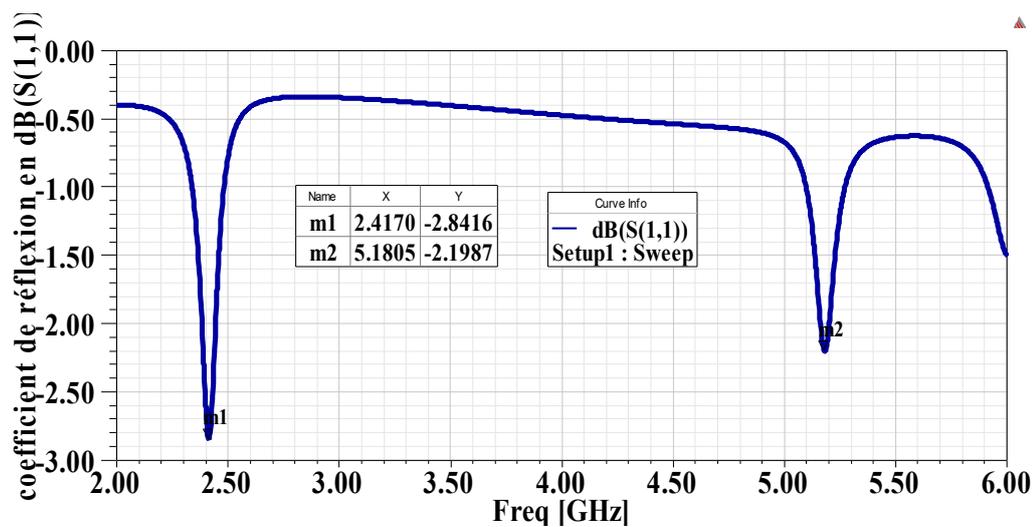
Figure.III. 20. Directivité de l'antenne à l'état ON-ON (3D)

III.4.4. 2. Etat2: OFF-OFF (Gamme 5G)

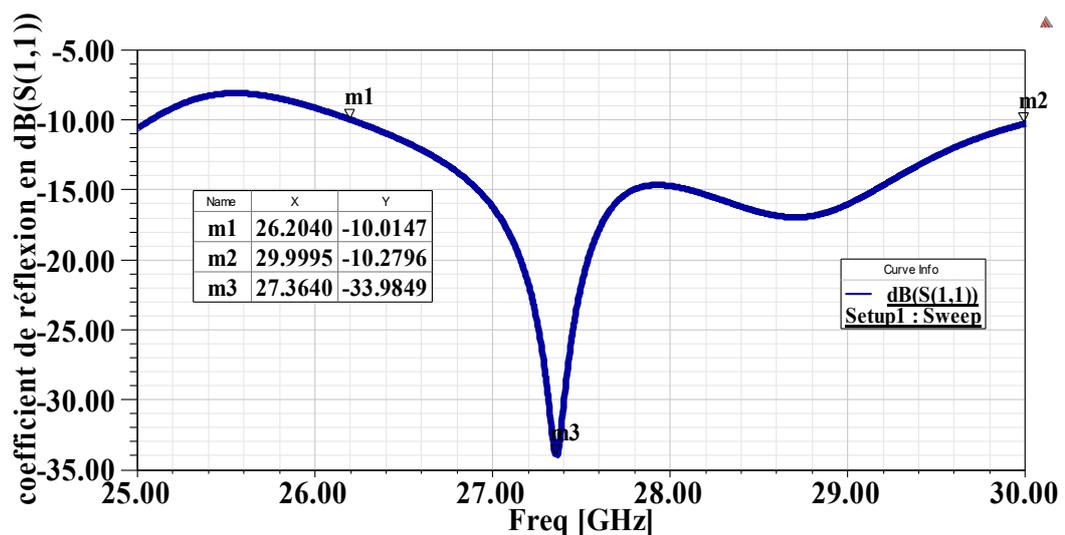
Dans ce cas, les deux diodes PIN sont bloquantes, donc on est à l'état OFF-OFF. Donc en HFSS, chaque diode est remplacée par un circuit équivalent L en série avec un circuit RC parallèle (état OFF, OFF) comme le montre la figure III.17 et avec les valeurs correspondantes dans le tableau III.3. Dans ce cas (OFF-OFF), la simulation est faite juste pour la gamme Wi-Fi.

### III.4.4. 2.1. Coefficient de réflexion (Etat2: OFF-OFF)

D'après la figure III.21, les fréquences de résonances (à l'état OFF-OFF) sont : 2.41 GHz ( $S_{11}$  autour de -2.8dB), 5.1 GHz ( $S_{11}$  = -2.1 dB). D'après ces dernières valeurs, on remarque l'antenne rejette les fréquences Wi-Fi (l'antenne travail en 5G seulement). La fréquence de résonance (à l'état OFF-OFF) dans la plage 5G est 27.36 GHz ( $S_{11}$  autour de -33.98 dB ) avec une bande passante allant de 26.20GHz à 29.99 GHz.



(a) Gamme Wi-Fi



(b) Gamme 5 G

Figure.III. 21. L'évolution du coefficient de réflexion correspondant à l'état OFF-OFF

III.4.4. 2.2.Rapport 'onde stationnaire (ROS) (VSWR) (Etat2: OFF-OFF)

Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence est présenté dans la figure III.22. D'après cette dernière, le ROS vaut 1.0013 à la fréquence de (27.2665 GHz), cette valeur est acceptable.

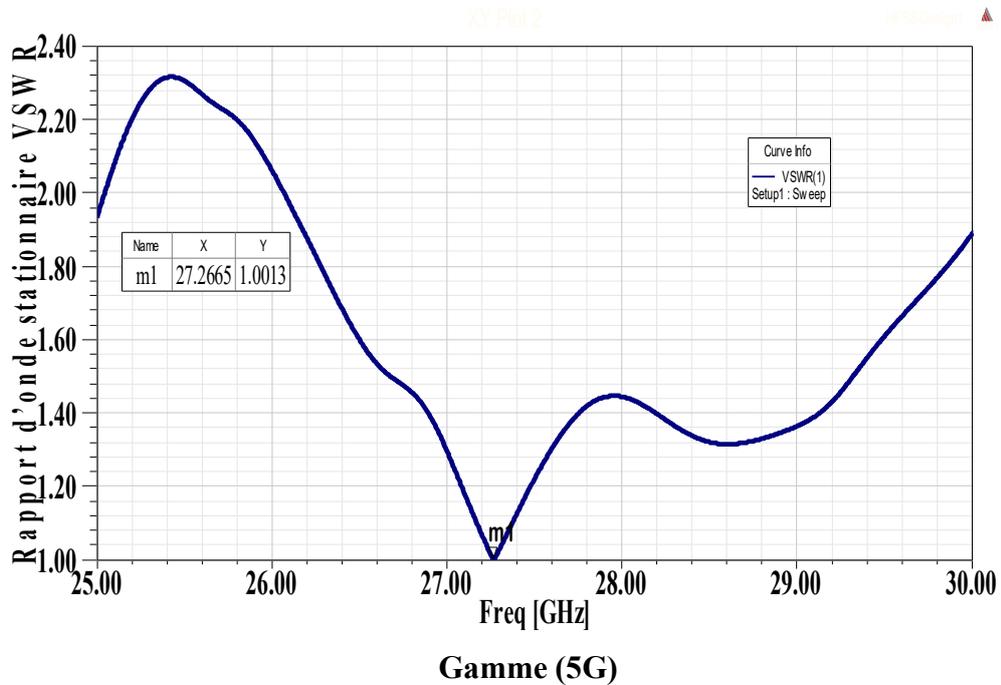
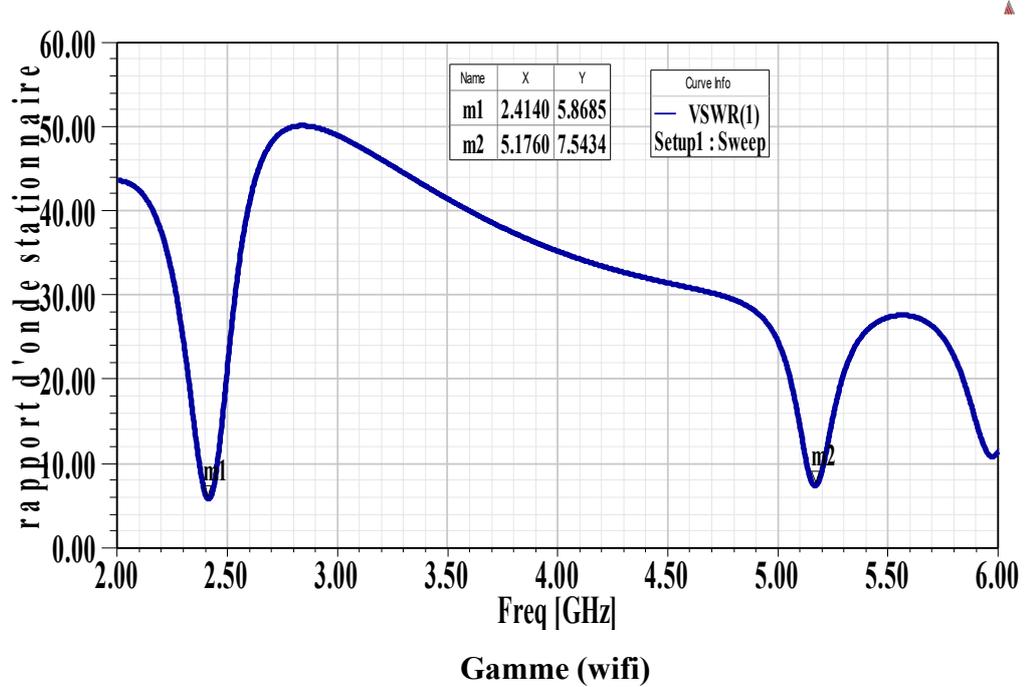


Figure.III. 22. Rapport d'onde stationnaire

### III.4.4. 2.3. Parametre de radiation (Etat2: OFF-OFF)

Le gain et la directivité la fréquence  $f=27$  GHz, sont illustrés dans la figure III.23. Leurs valeurs maximales respectivement sont 4.0921 dB et 6.8933 dB.

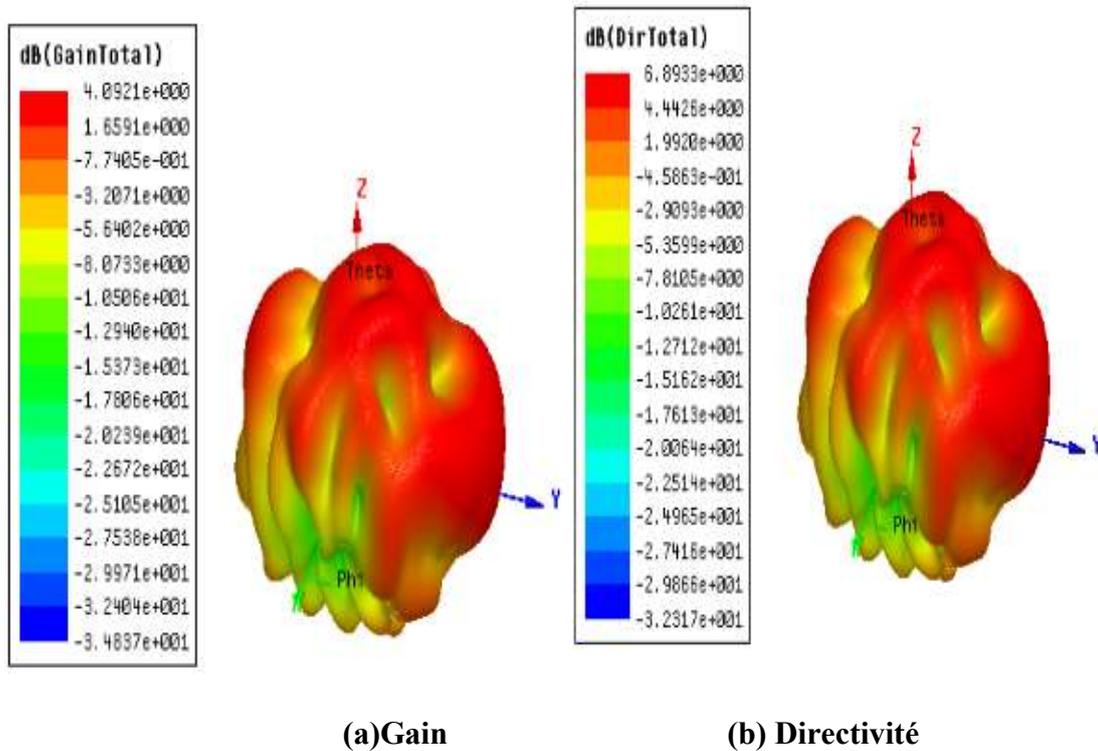


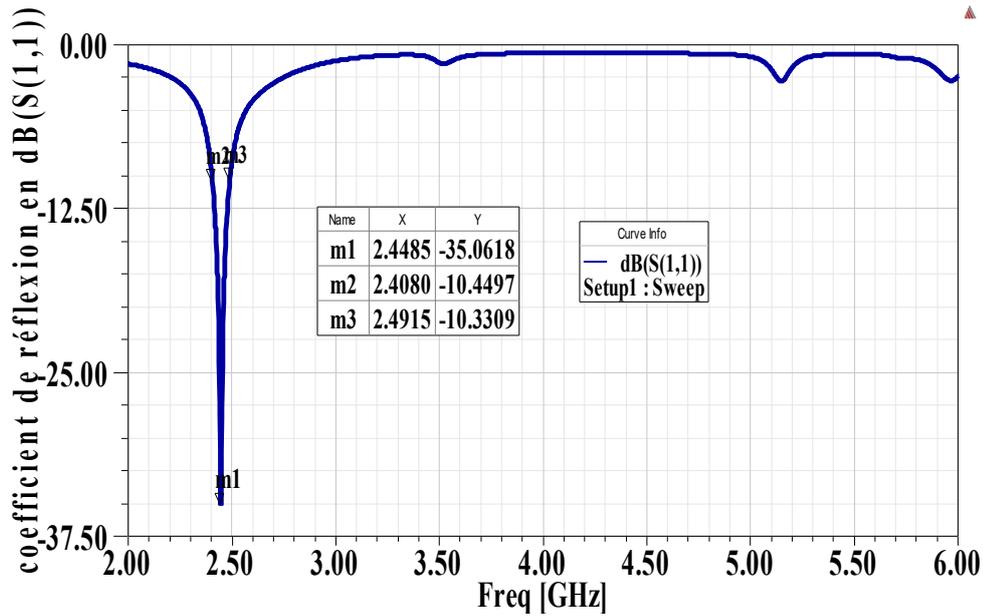
Figure.III. 23. Diagramme de rayonnement correspondant à la fréquence 27 GHz (3D)

### III.4.4. 3. Etat 3 : ON-OFF (OFF-ON)

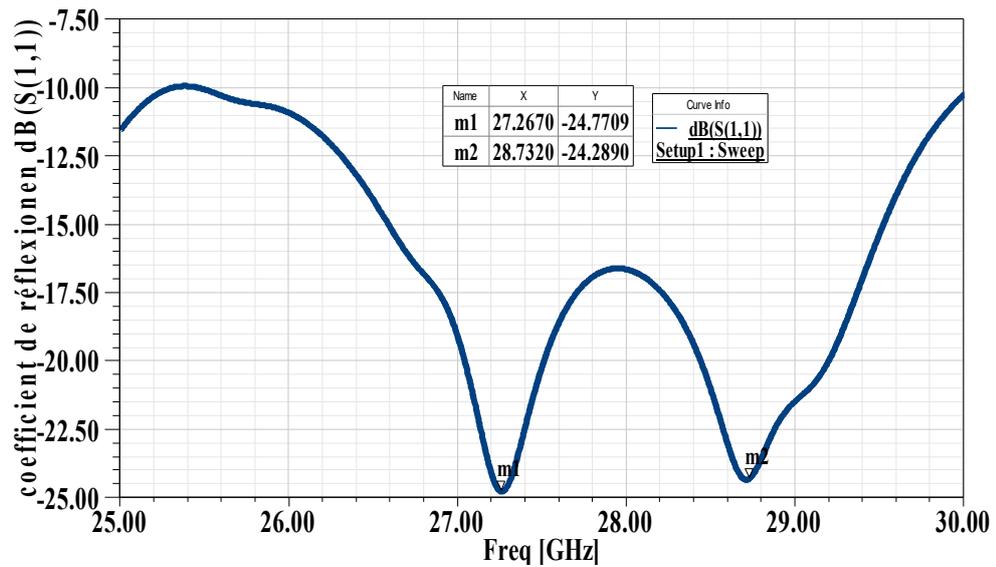
On rappelle, que les deux états ON-OFF et OFF-ON, présente le même état à cause de la symétrie de la structure. Dans ce cas, une diode est passante et l'autre bloquante, donc en HFSS, une diode est remplacée par un circuit équivalent RLC série (état ON) et l'autre diode est remplacée par un circuit équivalent L en série avec un circuit RC parallèle (état OFF) comme le montre la figure III.17 (a et b) et avec les valeurs correspondantes dans le tableau III.3.

#### III.4.4. 3.1. Coefficient de réflexion Etat 3 : ON-OFF

Le coefficient de réflexion est illustré dans la figure III.24. La fréquence de résonance est exactement 2.44 GHz.



(a) Gamme (wifi)



(b) Gamme (5G)

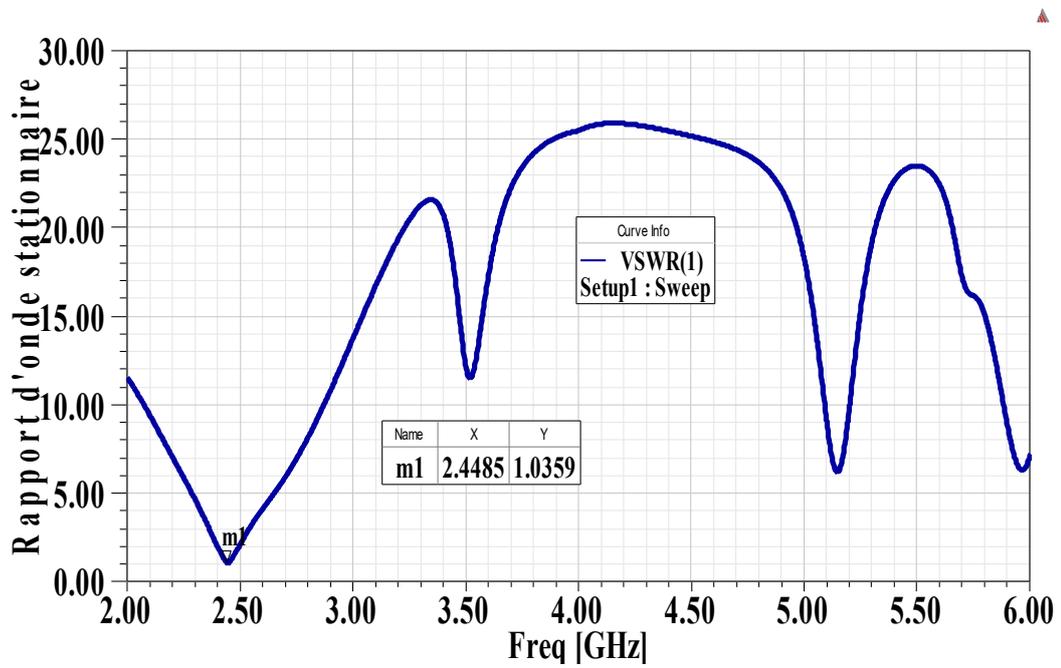
Figure.III. 24. Le coefficient de réflexion de l'antenne reconfigurable état ON-OFF

### III.4.4. 3.2. Rapport d'onde stationnaire Etat 3 : ON-OFF

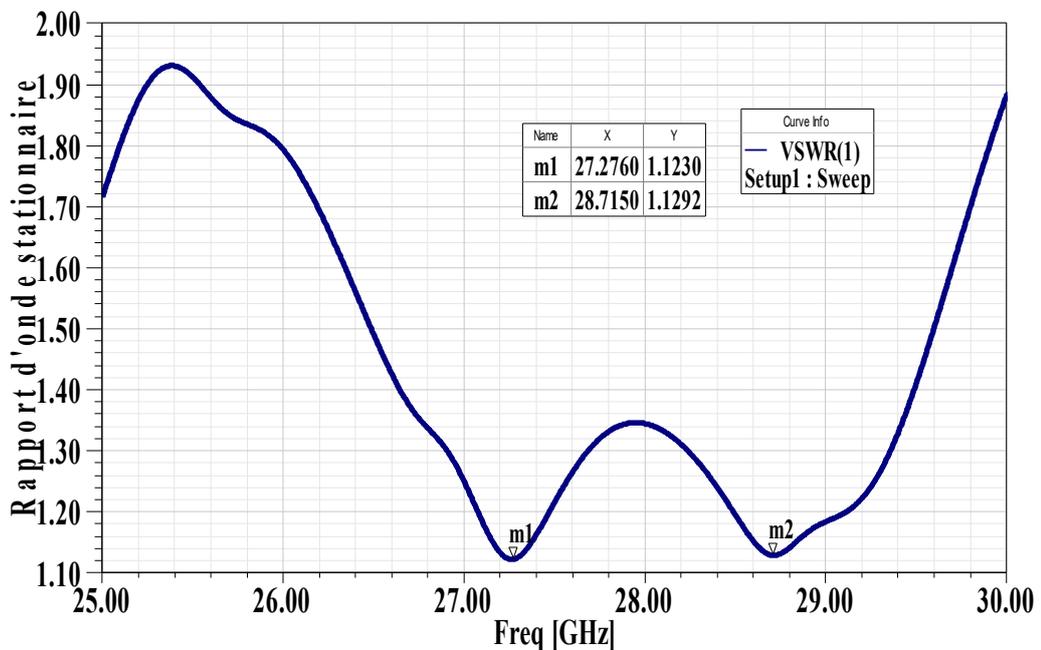
Le rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence est présenté dans la figure III.25.

D'après la figure III.25, le ROS vaut 1.0359 à la fréquence 2.44 GHz et au voisinage 1.12 pour les deux fréquences 27.27 GHz et 28.71 le ROS. Les valeurs sont acceptable

(.inférieur à 2). Ceci indique le bon fonctionnement de l'antenne avec son système d'alimentation, donc l'antenne peut être liée à un récepteur ou émetteur sans aucun risque.



(a) Gamme (wifi)



(b) Gamme (5G)

Figure.III. 25. Rapport d'onde stationnaire

III.4.4. 3.3. Directivité Etat 3 : ON-OFF

La directivité de l'état 3 (ON-OFF) aux fréquences de résonances, illustré dans la figure III.26. La valeur maximale de la directivité la fréquence  $f = 2.44$  GHz est 2.78 dB, 7.53 à la fréquence 27.27 GHz et 8.42 à la fréquence 28.71 GHz.

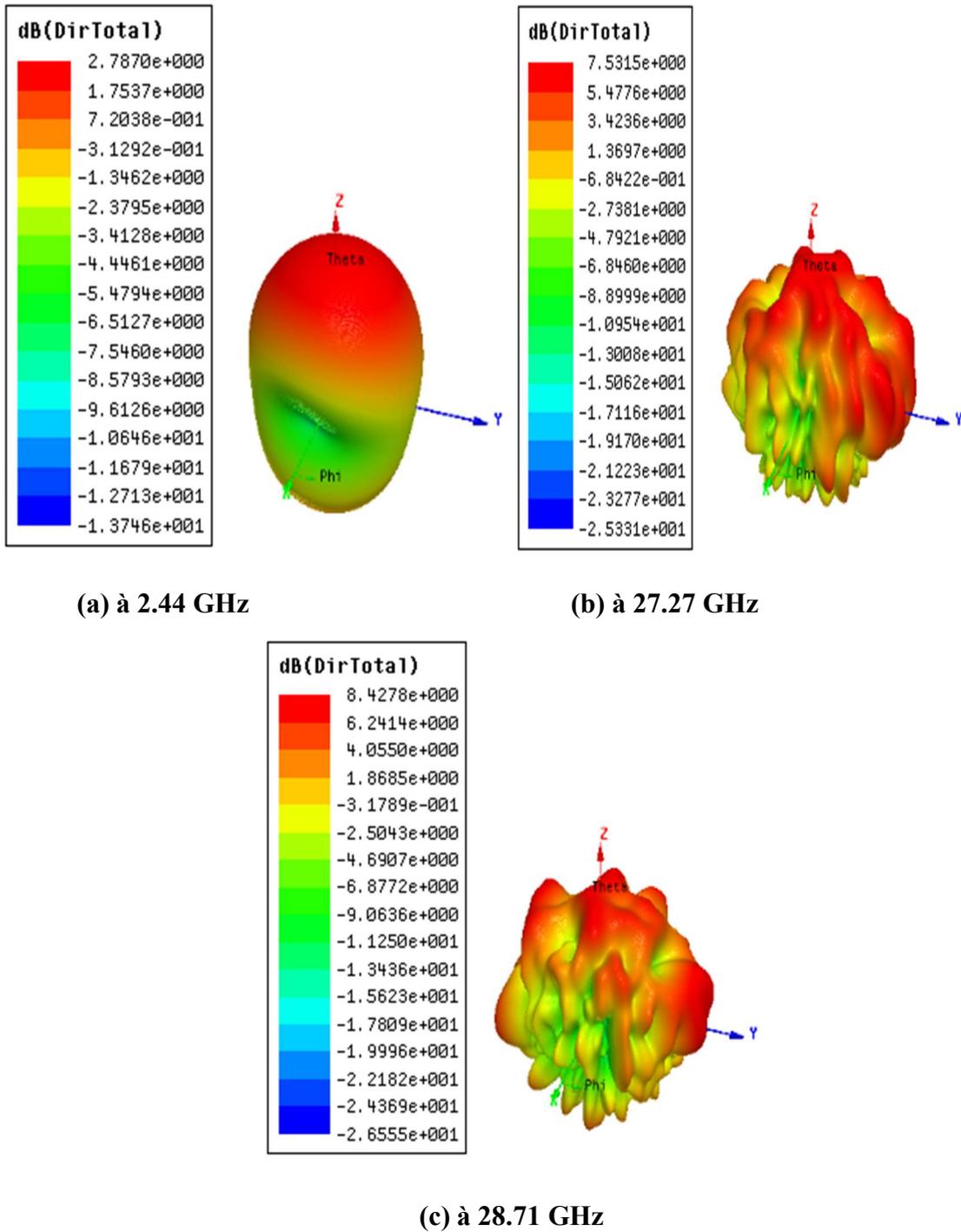


Figure.III. 26. Directivité état ON-OFF en (3D)

#### III.4.4. 4. Récapitulation des trois cas (ON-ON, OFF-OFF et ON-OFF)

Le tableau III. 4. regroupe les fréquences de résonnances, les niveaux des puissances des coefficients de réflexion et les bandes passantes des trois cas possibles des deux diodes.

*Tableau.III. 4. Les résultats des trois cas possibles*

Etat	Résonance (GHz)	Réflexion (dB)	Bande passante (GHz)
<b>ON-ON</b>	2.41, 5.79	-18.55, -19.15	[2.39-2.44],[5.74-5.85]
<b>OFF-OFF</b>	[27.36]	[ -33.98 ]	[26.20 - 30 ]
<b>ON -OFF</b>	[2.44 ]	[ -35.06 ]	[2.40 - 2.49]

### III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la conception et la simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence à l'aide d'une diode PIN. L'antenne fonction en deux gammes de fréquences (Wi-Fi et 5 G).

Dans un premier lieu, la partie de simulation est consacré à la validation de l'article [36]. D'après les résultats correspondants, on remarque une légère différence entre nos résultats et ceux de l'article.

Dans second lieu une étude paramétrique des paramètres géométrique (dimensions) est faite et suivie par l'optimisation de la structure (a) (destinée au Wifi) dans la gamme Wifi.

En fin, la troisième partie est consacrée à la reconfiguration de l'antenne par de deux diodes PIN. L'antenne présente trois fonctionnement (ON-ON, OFF-OFF et ON-ON, ON-OFF) selon le cas des deux diodes (passante ou bloquante). L'état ON-ON qui est équivalente à la structure (a) (avec) métal et OFF-OFF qui est équivalente à la structure (b) (sans métal).

## Conclusion générale

Le thème des travaux présentés dans cette mémoire couvre le domaine des antennes reconfigurables utilisées intensivement dans les différentes applications des communications sans fils. Le grand intérêt de ce genre d'antennes réside dans leurs capacités de répondre pertinemment aux nouvelles exigences imposées par les systèmes de télécommunication modernes.

Dans le premier chapitre nous avons présenté une généralité sur les antennes imprimées. En parlant de, la structure, alimentations, caractéristiques, domaines d'application, avantages et inconvénients des antennes imprimées.

Le deuxième chapitre traite les antennes reconfigurables, qui ont beaucoup de considération en raison de leurs applications dans les communications sans fil.

Dans le troisième chapitre, nous avons illustré la description, le dimensionnement et les résultats des simulations, de la validation de l'article [36], d'étude paramétrique et l'optimisation de l'antenne reconfigurable fonctionnant en WiFi et en 5G, et en fin de l'antenne reconfigurée en fréquence par deux diodes PIN.

D'après les résultats, on peut conclure que la validation, étude paramétrique, optimisation et la reconfiguration par deux diodes PIN sont faites avec succès.

La commutation en fréquence peut se faire de plusieurs façons. Dans ce mémoire, la commutation en fréquence est faite deux manières. Une à l'aide du métal et l'autre à l'aide d'une diode PIN. La commutation en fréquence est aboutée dans les deux cas (objectif de ce travail)). Mais ce qui concerne la différence entre les deux méthodes, reste à prouver dans d'autres travaux. Car les résultats des manières sont proches en terme de qualités des caractéristiques de l'antenne (coefficient de réflexion, rapport d'onde stationnaire, directivité et gain) avec un léger avantage aux ceux de la commutation par diode PIN.

Ce demain des antennes reconfigurables, est très vaste. Donc comme perspectives de ce travail, on envisage, d'améliorer le gain de l'antenne (le gain dans la gamme Wifi est inférieur à un et qui est n'est représenté à cause de l'excès des résultats), d'utiliser d'autre, formes de patch, matériaux et d'utiliser d'autres types de reconfiguration.

## Références bibliographiques

- [1] N. Lakhlef, "Etude et optimisation des Réseaux d'antennes imprimées", thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf – M'silla, 29- 11-2021.
- [2] prof .Binod, K. kumar , Dr. surendra Gupta Dr .j. kishor ,and Dr.DeepakGangwar, Printed antennas Theory and Design,2021
- [3] R. A. Sainati, "CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications", Artech House, 1996.
- [4] D. M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line" Elect Letters, vol. 21, Jan.1985.
- [5] Garg et al. « Microstrip antenna design handbook », Artech House, 2001.
- [6] A.Malak, B. Hajar and E.Yousra, I.Sara, memoir master, 2011
- [7] C. Luxey, S .Robert, and Georges kossiavas, albert papiernink, "antennes imprimées-techniques d'aplication" newsletters, 2007.
- [8] Ryu, E. Kim, and J. -M. Woo, "Miniaturization of Printed Inverted-F Antenna Using Chip Coupler for Bluetooth Applications", Electronics Letters, Vol. 46, No. 13, 2010.
- [9] A. Pandey, "Practical Micro strip and Printed Antenna Design", Artech House Antennas and Electromagnetics Analysis Library, 2019.
- [10] N.GASMI, Contribution à l'étude d'un réseau d'antennes imprimées pour les télécommunications sans fil, Biskra : Université Mohamed Khi de Biskra, 2013.
- [11] Daout, S. Jacquet, X. Durocher, G. Holtzmer " Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz" J3ea, Vol 8, 2009
- [12] R. Mishra, "An Overview of Microstrip Antenna", International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR), vol. 21, no. 2, August 2016.
- [13] A. Pandey, "Practical Microstrip and Printed Antenna Design", Artech House Antennas and Electromagnetics Analysis Library, 2019.
- [14] F. Lee M. Luck, Micro strip Patch Antennas, Imperial College Press, 2011.
- [15] A .Kumar, J. Kaur, and R. Singh, "Performance Analysis of Different Feeding Techniques" IJETAE, Vol. 3, P 884-890.2013

- [16] F. Ahmed, Design and analysis of micro strip patch antenna arrays'', these doctorate, 2011.
- [17] Farid GHANEM, Reconfigurable Antennas artucl, 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE) 8 - 10 December, 2014 - Johor Bahru, Johor, Malaysia
- [18] Hüseyin Altun, Erdal Korkmaz, Bahattin Türetken, <Study of Fractal Tree Antenna for Multiband Applications> Department of Electrical and Electronics Engineering, Fatih University, Istanbul, Turkey .The National Research Institute of Electronics and Cryptology (UEKAE), TUBITAK, Gebze, Turkey.
- [19] Amjad Iqbal1, 'and Omar A. Saraereh2 « A Compact Frequency Reconfigurable Monopole Antenna for Wi-Fi/WLAN Application 'progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 68, 79–84, 201
- [20] Huda A. Majid, Mohamad K. A. Rahim , Mohamad R. Hamid, and Muhammad F. Ismail "Frequency Reconfigurable Microstrip Patch-Slot Antenna with Directional Radiation Pattern " Progress In Electromagnetics Research, Vol. 144, 319–328, 2014
- [21] C. G. Christodoulou, et al., "Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, Jul. 2012.
- [22] Siti. Nailah, Mastura Zainarry<Reconfigurable Antennas Based on Varactor-Loaded Stubs>, these doctorate Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in School of Electrical & Electronic Engineering Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences The University of Adelaide, 2019.
- [23] L. Huang and P. Russer, "Tunable Antenna Design Procedure and Harmonics Suppression Methods of the Tunable DVB-H Antenna for Mobile Applications," 37th European Microwave Conference EMC 2007, Munich, Germany, October, 2007.
- [24] M. BrahamChaouche Youcef, « Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables our Opération Large Bande et Multi-Bande », Thèse Doctorat, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2013\_2014
- [25] E. Nasrabadi and P. Rezaei, "A novel design of reconfigurable monopole antenna with switchable triple band-rejection for UWB applications," International Journal of Microwave and Wi reless Technologies, vol. 8, no. 08, pp. 1223–1229, Apr. 2015.

- [26] Imen ben trad, » Antennes Agiles pour les Télécommunications Multistandards » THESE Faculté des Sciences de Tunis, Thèse soutenue publiquement le 29.10.2014
- [27] Elliott R. Brown, "RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits," IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, issue 11, pp. 1868-1880, 1998.
- [28] Le-Huy Trinh. Reconfigurable antennas for mobile phone and WSN applications. Other. Université Nice Sophia Antipolis, 2015.
- [29] Harish Chandra Mohanta<sup>1, 2,\*</sup>, Abbas Z. Kouzani<sup>1</sup>, Sushanta K. Mandal "Reconfigurable Antennas and Their Applications" Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 6(4): 239-258, 2019
- [30] Jing, L. and H.Y.D. Yang, "Microstrip Patch Antennas on Tunable Electromagnetic BandGap Substrates," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, issue 6, pp. 1612-1617, 2009.
- [31] Pei-Yuan, Q., et al., "Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, issue 8, pp. 2742-2747, 2010
- [32] S. DAKHLI, "Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par méta matériaux", Thèse soutenue à Supélec Paris le 15 Juin 2015, Université de Rennes.
- [33] Behdad, N. and K. Sarabandi, A varactor-tuned dual-band slot antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, issue 2, pp. 401-408, 2006.
- [34] Trong Duc Nguyen. Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive. Autre. Université de Grenoble, 2012.
- [35] J. T. Bernhard, "Reconfigurable Antennas". San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2007
- [36] Doae El Hadria, Alia Zakritia , Asmaa Zugarib, Artuc " Reconfigurable Antenna for Wi-Fi and 5G Applications", 13th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2019)
- [37] Dr.Otman El Mrabet, "High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial", IETR, UMR CNRS 6164, INSA, 20 avenue Butte des Coësmes 35043 Rennes, FRANCE 2005 - 2006

- [38] H. Errifi, A. Baghdad, A. Badri & A. Sahel, "Analyse et Conception d'Antenne Réseau à Deux Patch Rectangulaires Alimentée en Série", Congrès Méditerranéen des Télécommunications, FST de Mohammedia, Maroc, 2014.
- [39] B. Hammache and all, "Reconfigurable Triple Notched-Band Ultra Wideband Antenna, 2016.