



## Mémoire de Master

### Présenté au

**Département** : Génie Électrique

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Télécommunications

**Spécialité** : Systèmes des Télécommunications

### Réalisé par :

**REGUIEG Sarah**

## Thème

# Conception et réalisation d'une antenne reconfigurable en fréquence

Soutenu le: 30/10/2021

Devant la commission composée de :

Mr :	MOHAMMEDI Ahmed	M.CA	Univ. Bouira	Président
	DJELLID Asma	M.C.B	Univ. M'sila	Rapporteur
	AYAD Mouloud	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur

# Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur Dr. Djellid Asma, pour l'assistance et l'accompagnement qu'elle m'a offert afin de réaliser ce travail mais aussi tout au long de mon cursus.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce mémoire et de participer à ma soutenance.

Je tiens également à remercier Dr. Mansoul Ali et Mr Mokhtari Mokhtar du Centre de Développement des Technologies Avancées ainsi qu'à Mlle Abbas Amina pour leurs aides précieuses durant la réalisation.

Je remercie infiniment ma famille ainsi que mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

On exprime aussi notre gratitude à tous nos enseignants qui ont intervenu dans la formation du master « Systèmes de Télécommunication ».

*Sarah*

# Table des matières

Table des figures	iii
Liste des tableaux	1
Introduction générale	2
<b>1 Généralités sur les antennes reconfigurables</b>	<b>4</b>
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 ANTENNE RECONFIGURABLE	4
1.3 INTERET DE LA RECONFIGURATION D'ANTENNE	5
1.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ANTENNES RECON- FIGURABLES	5
1.4.1 TECHNIQUES DE RECONFIGURATION	6
1.4.2 Dispositifs électriques de commutations	8
1.5 CLASSIFICATION DES ANTENNES RECONFIGURABLES	12
1.5.1 Reconfigurabilité en fréquence	12
1.5.2 Reconfigurabilité en polarisation	12
1.5.3 Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement	13
1.5.4 Reconfigurabilité hybride	13
1.6 CONCLUSION	13
<b>2 Conception d'une antenne PIFA bi bandes.</b>	<b>14</b>
2.1 INTRODUCTION	14
2.2 ANTENNE PIFA BI BANDES	14
2.2.1 ETAPE I. Antenne PIFA	14
2.2.2 ETAPE 2. Modification de la ligne de transmission	16

2.2.3	ETAPE 3. Insertion d'un 1er slot . . . . .	19
2.2.4	ETAPE 4. Insertion des deux rectangles métalliques . . . . .	21
2.2.5	ETAPE 5. Insertion d'un 2ième slot . . . . .	23
2.3	GEOMETRIE DE L'ANTENNE FINALE . . . . .	26
2.3.1	Coefficient de réflexion . . . . .	26
2.4	CONCLUSION . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Simulation et réalisation d'une antenne reconfigurable</b>	<b>29</b>
3.1	INTRODUCTION . . . . .	29
3.2	SIMULATION ET MESURE DE L'ANTENNE RECONFIGURABLE . . . . .	29
3.2.1	Modélisation de la diode pin . . . . .	29
3.2.2	Cas idéal . . . . .	30
3.2.3	Cas circuit équivalent . . . . .	37
3.2.4	Comparaison . . . . .	44
3.3	CONCLUSION . . . . .	45
	<b>Conclusion générale</b>	<b>46</b>

# Table des figures

1.1	Technique de reconfiguration. . . . .	7
1.2	(a) : circuit équivalent d'une diode varactor ; (b) : symbole diode varactor. . . . .	9
1.3	Schéma et circuit équivalent d'une diode PIN. . . . .	10
2.1	(a). Géométrie de l'antenne patch rectangulaire : (a). vue dessus, (b). Vue dessous, (c). Vue sur le pin de court circuit. . . . .	15
2.2	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 1. . . . .	16
2.3	Antenne PIFA après l'insertion de l'inset feed . . . . .	17
2.4	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2. . . . .	17
2.5	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2 pour plusieurs valeur de $l_t$ . . . . .	18
2.6	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2 pour plusieurs valeur de $w_t$ . . . . .	18
2.7	Antenne PIFA après l'insertion du premier slot. . . . .	19
2.8	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 3. . . . .	20
2.9	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2 pour plusieurs valeur de $ls1$ . . . . .	20
2.10	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 3 pour plusieurs valeur de $ws1$ . . . . .	21
2.11	Antenne PIFA de l'étape 4. . . . .	21
2.12	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 4. . . . .	22
2.13	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 4 pour plusieurs valeur de $la1$ . . . . .	23
2.14	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 4 pour plusieurs valeur de $la$ positions des rectangles. . . . .	23

2.15	Antenne PIFA de l'étape 5. . . . .	24
2.16	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5. . . . .	24
2.17	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5 pour plusieurs valeur de $l_2$ . . . . .	25
2.18	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5 pour plusieurs valeur de la largeur du slot. . . . .	26
2.19	Antenne PIFA bi bandes. . . . .	26
2.20	Coefficient de réflexion de l'antenne PIFA bi bandes. . . . .	27
3.1	a. Modèle de simulation dans le cas OFF-OFF. b. Modèle réalisé de l'antenne PIFA reconfigurable. . . . .	30
3.2	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF (modèle idéal). . . . .	31
3.3	Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l'antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.27GHz et b.5.8GHz dans le cas OFF-OFF (cas idéal). . . . .	32
3.4	Modèle de simulation dans le cas OFF-ON de l'antenne PIFA reconfigurable. . . . .	33
3.5	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON (modèle idéal). . . . .	33
3.6	Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.15GHz. . . . .	34
3.7	Modèle de simulation dans le cas ON-OFF de l'antenne PIFA reconfigurable. . . . .	34
3.8	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-OFF (modèle idéal). . . . .	35
3.9	Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 4.86GHz (Etat ON-OFF). . . . .	35
3.10	Modèle de simulation dans le cas ON-ON de l'antenne PIFA reconfigurable. . . . .	36
3.11	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-ON (modèle idéal). . . . .	36
3.12	Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 4.78GHz (Etat ON-ON). . . . .	37

3.13	a. Modèle de simulation sous HFSS. b. Modèle de simulation sous CST. c. Modèle réalisé de l'antenne PIFA reconfigurable d. Antenne réalisée avec diodes PIN. . . . .	38
3.14	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF (modèle circuit équivalent). . . . .	39
3.15	Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l'antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.21GHz et b.5.44GHz dans le cas OFF-OFF (cas circuit équivalent). . . . .	40
3.16	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON (modèle circuit équivalent). . . . .	41
3.17	Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l'antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.14GHz et b.6.19GHz dans le cas OFF-ON (cas circuit équivalent). . . . .	42
3.18	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-OFF (modèle circuit équivalent). . . . .	42
3.19	Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.17GHz (Etat ON-OFF). . . . .	43
3.20	Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-ON (modèle circuit équivalent). . . . .	43
3.21	Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.1GHz (Etat ON-ON). . . . .	44

# Liste des tableaux

2.1	Dimensions de l'antenne PIFA initiale. . . . .	15
2.2	Dimensions de l'antenne PIFA Bi bandes finale. . . . .	27
3.1	Fréquence de résonance (HFSS, CST, Mesure) de l'antene recon- figurabl avec diode pin. . . . .	45



# Introduction générale

Avec l'évolution rapide des systèmes de communication, les appareils sans fil peuvent nécessiter diverses applications simultanément. L'utilisation de plusieurs antennes dans le même système multifonctionnel augmente le coût, le poids et la taille de l'appareil. Ces limitations deviennent un problème sérieux avec l'augmentation du nombre d'éléments électroniques. Par conséquent, il existe une demande énorme pour mettre en œuvre des antennes multi-performances (fréquence de fonctionnement, large bande, polarisation et diagramme de rayonnement) pour couvrir chacune des différentes applications du système. Cette tâche très exigeante a incité les concepteurs d'antennes à développer des antennes, avec des capacités de reconfiguration de leurs performances (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) pour les différents services demandés.

Les antennes avec reconfiguration de polarisation sont largement utilisées pour fournir un schéma de modulation puissant permettant d'éviter les effets d'évanouissement par trajets multiples et d'améliorer la stabilité du système. Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement modifient la forme, la direction et le gain des diagrammes de rayonnement afin de privilégier ou non certaines directions. Beaucoup d'attention a été accordée aux antennes reconfigurables en fréquence en raison de leur capacité à intégrer différentes bandes de fonctionnement dans un seul composant.

Dans ce cadre, l'objectif de ce mémoire de master est la conception et la réalisation d'une antenne reconfigurable en fréquence utilisant la technique de la diode pin. Pour atteindre cet objectif, nous effectuons la simulation de l'antenne proposée à l'aide de deux logiciels électromagnétiques HFSS (High Frequency Structure Simulation) et CST (Computer Simulation Tool). Concernant la réalisation, nous la faisons au niveau d'une société spécialisée dans la fabrication électronique des circuits imprimés qui s'appelle ALMITech à Alger. Les

mesures de réalisation s'effectuent au niveau du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) à Baba Hassen. Alger.

Le manuscrit après l'introduction générale est organisé comme suit :

**Chapitre 1 :** Le premier chapitre a pour objectif de présenter la technologie de reconfiguration. Nous allons aborder les généralités sur les antennes reconfigurables, leurs avantages, leurs inconvénients, l'intérêt de leurs utilisations, et nous allons aussi présenter les techniques de reconfigurabilité et la classification des antennes reconfigurables.

**Chapitre 2 :** Dans le second chapitre, nous présentons la conception d'une antenne PIFA bi bandes miniaturisée. nous commençons par une antenne PIFA rectangulaire proposée de taille  $2 \times 1.5 \text{ mm}^2$  qu'on va l'améliorer de sorte qu'elle résonne à la fréquence 5.8GHz. Pour cela, nous allons faire une étude paramétrique détaillée en utilisant le logiciel HFSS, ce qui va nous permettre d'observer l'effet de chaque paramètre sur les caractéristiques de l'antenne. Cinq étapes sont utilisées pour avoir l'antenne PIFA souhaitée.

**Chapitre 3 :** Après l'obtention de notre antenne finale, nous passerons dans ce chapitre à la reconfiguration simulée et mesurée, nous allons voir l'influence de l'ajout de deux diodes pin sur notre antenne et si on arrive à avoir une reconfiguration en fréquence, nous allons modéliser les diodes pin par deux méthodes : d'abord par un carré métallique puis par leur circuit équivalent RLC. Une comparaison entre les résultats des mesures effectuées et ceux obtenus par les simulateurs HFSS et CST est faite.

Finalement, le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble de ce travail et présente les perspectives envisagées.

# Chapitre 1

## Généralités sur les antennes reconfigurables

### 1.1 INTRODUCTION

Avec les progrès des communications sans fil, il existe une demande énorme pour mettre en œuvre des antennes intelligentes pour régler leurs caractéristiques de fonctionnement (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) en fonction des exigences du système. De plus, l'utilisation d'antennes multiples pour couvrir chacun des différents services sans fil qui sont dispersés sur une large bande de fréquences augmente le coût du système, et créer l'encombrement des antennes,

Dans ce chapitre, nous allons présenter les antennes reconfigurables en donnant l'intérêt de leur utilisation, en citant leurs avantages et leurs inconvénients. Par la suite nous présentons un état de l'art des antennes reconfigurables, nous citons les techniques de reconfigurations et la classification de ces antennes reconfigurables.

### 1.2 ANTENNE RECONFIGURABLE

Le terme "antenne reconfigurable" a été introduit pour la toute première fois en 1998 [1]. Les antennes reconfigurables étendent les capacités des antennes traditionnelles en offrant la possibilité de modifier leur configuration, c'est-à-dire de modifier une ou plusieurs de leurs caractéristiques de base par des moyens électriques, mécaniques ou autres, en fonction des exigences, des besoins et du

contexte environnemental [2].

### 1.3 INTERET DE LA RECONFIGURATION D'ANTENNE

Les antennes imprimées sont énormément utilisées dans le domaine de communications mobiles (téléphones mobiles, tablettes et des laptops). Ces antennes sont conçues pour fonctionner sur une seule gamme de fréquence, ce qui limite fortement la variété des services (WIFI, WLAN, GSM...). Etant donné que l'utilisation de plusieurs antennes pour un seul dispositif n'est pas faisable, l'utilisation d'antennes capable de changer de bande d'utilisation suivant le besoin de l'utilisateur permet d'éliminer ce problème. On parle donc du concept de reconfigurabilité [3].

Les antennes reconfigurables offrent plus de liberté que les antennes patch simple (ou les paramètres et les caractéristiques sont fixes et inchangeables), parce qu'elles ont la possibilité de modifier la fréquence de fonctionnement, et de changer la bande de fréquences par elle-même, de filtrer les signaux parasites et d'orienter le lobe principal vers la direction souhaiter ce qui augmente et améliore la capacité du réseau (mobile) [4].

On peut dire que l'intérêt principal des antennes reconfigurables figure dans leurs aptitudes à apporter plus de fonctionnalités et de liberté aux systèmes de communication et de télédétection, de sorte à améliorer leurs performances.

### 1.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ANTENNES RECONFIGURABLES

Les antennes reconfigurables présentent de nombreux avantages parmi eux, nous allons en citer quelques uns [5-6] :

- Comme on a pu le citer auparavant, elles ont la capacité de changer et d'accorder leurs paramètres ce qui permet d'apporter plus de fonctionnalités qui permet d'améliorer leurs performances.
- La reconfigurabilité des antennes peut être avantageuse dans le cadre d'infrastructures ou de matériaux ayant une longue durée de vie.
- Ces antennes sont utiles aux systèmes complexes et exigeants en reconfiguration comme la radio logicielle (ou SDR : Software Defined Radio) qui

permet de mélanger l'adaptation matérielles et logicielles avec une grande flexibilité.

- Elles présentent des avantages sur les systèmes composés de plusieurs éléments à fonction unique : potentiellement elles vont permettre un gain de volume, de poids, frais de maintenance, de sorte qu'elles s'adaptent aux nouveaux standards.
- Elles permettent d'avoir le niveau de fonctionnalités nécessaire, mais aussi à les intégrer dans des systèmes efficaces, raisonnablement complexes et peu coûteux.

Bien que ce types d'antennes présentent de nombreux avantages, cela n'empêchent pas l'existence de certains inconvénients, parmi ces inconvénients on retrouve [5] :

- La reconfigurabilité d'antenne, provoque des pertes, que ce soit dans les composants semi-conducteurs, les lignes de polarisations des composants RF-MEMS ou sur les matériaux actifs. Ces pertes impactent directement sur le gain et l'efficacité.
- Une antenne reconfigurable coûte plus cher qu'une antenne patch classique. Ce coût additionnel est directement lié à l'ajout de composants actifs sur l'antenne, qui ont parfois de haute performance, mais il peut aussi résulter de la complexité de sa structure (par exemple : on peut souder des composants sur l'antenne).
- De nombreux problèmes sont générés par la complexité de ce type d'antennes qui est notamment due aux structures de polarisation, qui se traduit par une fragilité matérielle (et un surcoût qu'on a évoqué plus haut). Par ailleurs, la complexité géométrique, et liée à l'intégration de composants actifs dans une structure rayonnante, qui entraînent des difficultés conceptuelles et de simulation, notamment au niveau des calculs électromagnétiques, et de la consommation énergétique.

#### 1.4.1 TECHNIQUES DE RECONFIGURATION

Il existe multiples techniques pour faire la reconfiguration d'une antenne. Le but de techniques est de modifier les caractéristiques de l'antenne. Pour ce qui est des techniques électriques, cela peut se faire avec des composants actifs tels que, les diodes PIN et les RF-MEMS et les Varactors. Pour ce qui est du type optique, il faut utiliser des éléments de commutations optiques tels que les photo-

conducteurs. Pour la technique physique, la reconfigurabilité peut être réalisée par une modification mécanique dans la structure de l'antenne. La technique qui est centrée sur l'utilisation de matériaux intelligents comme les ferrites et les cristaux liquides.

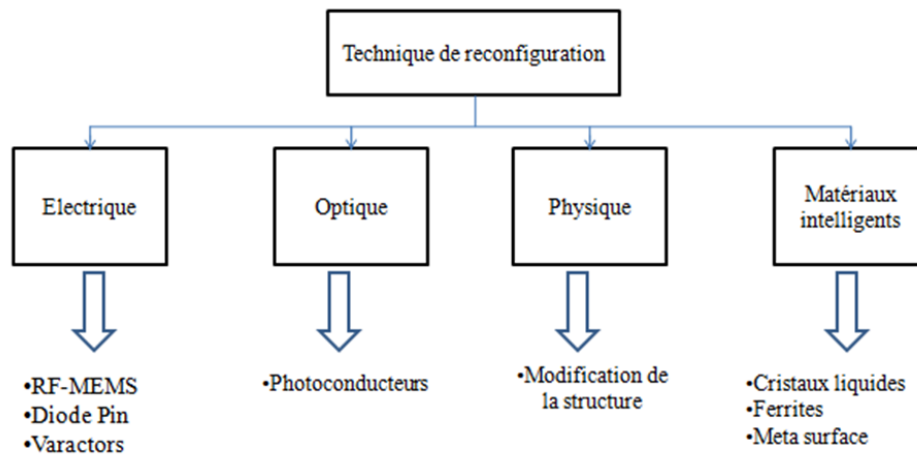


FIGURE 1.1 – Technique de reconfiguration.

**Technique électrique** : Dans ce type de méthode de reconfiguration, les caractéristiques de l'antenne sont modifiées à l'aide de composants de commutation électroniques tels que des diodes PIN, des varactors ou des MEMS [7]. Grâce à ces commutateurs, la structure de l'antenne peut être reconfigurée, ce qui entraîne une redistribution du courant de surface et modifie les caractéristiques fondamentales de l'antenne en termes de fréquence, de diagramme de rayonnement et de polarisation.

**Technique optique** : Ce type de technique de reconfiguration est basé sur l'utilisation de commutateurs photoconducteurs, constitués d'un matériau semi-conducteur (silicium ou arséniure de gallium) [8,9].

Dans la reconfiguration optique, les commutateurs photoconducteurs rendent inutile l'utilisation de fils métalliques. Ainsi il y'a moins d'interférences et une isolation élevée par rapport aux commutateurs électriques [10,11]. En outre, ils présentent des vitesses de commutation extrêmement rapides, en nanosecondes. L'utilisation de commutateurs photoconducteurs permet de contrôler optiquement

les largeurs de bande opérationnelles et le diagramme de rayonnement d'une antenne.

Contrairement à la reconfiguration électrique, l'approche photoconductrice ne nécessite pas l'utilisation de lignes de polarisation, et peut être intégrée à la carte mère de l'antenne sans ajouter un système complexe pour modifier la structure de rayonnement [12, 13]

**Technique physique** : Dans la reconfiguration physique, la structure rayonnante de l'antenne peut être reconfigurée mécaniquement pour obtenir des caractéristiques différentes. Contrairement aux autres techniques de reconfiguration avec commutateurs, ce type d'antenne reconfigurable ne nécessite pas l'intégration d'éléments actifs, Elle peut réduire les lignes complexes en utilisant une partie de rotation mécanique. Cependant, la flexibilité des performances de ce type d'antenne est limitée et il est difficile de fournir une reconfiguration multifonctionnelle. Elle nécessite une structure volumineuse ce qui augmente la difficulté de sa mise en œuvre dans les petits périphériques. [14, 15].

**Technique basée sur des matériaux intelligents** : Les antennes reconfigurables avec des matériaux intelligents sont un sujet de recherche très récent, qui présente de nombreux défis tels que la fiabilité et l'efficacité qui doivent encore être étudiés. Cependant, il existe certaines conceptions qui présentent des résultats notables ayant été rapportées dans les dernières années [15, 17]. Dans ce type de technique de reconfiguration, les caractéristiques des antennes peuvent être reconfigurées en pompant un fluide dans un creux placé derrière l'antenne pour modifier les caractéristiques du substrat en termes de permittivité électrique relative ou de perméabilité magnétique. Parmi ces matériaux intelligents, on peut citer les matériaux à transition tel que les dioxydes de vanadium et les matériaux à changement de phase tel que les PCM et des autres matériaux intelligents tels que les ferroélectriques et les cristaux liquides [18, 19].

#### 1.4.2 Dispositifs électriques de commutations

**Les MEMS** : Les commutateurs MEMS sont des dispositifs qui fonctionnent grâce à un mouvement mécanique pour réaliser un court-circuit ou un circuit ouvert dans les circuits RF. Les commutateurs MEMS peuvent être conçus dans différentes configurations basées sur le trajet du signal, le mécanisme d'actionnement (électrostatique, thermique ou magnétostatique), le type de contact (oh-

mique ou capacitif) et le type de structure (cantilever ou pont). La force nécessaire au mouvement mécanique peut être obtenue par différents mécanismes d'actionnement tels que l'électrostatique et la magnétostatique.

Les commutateurs RF-MEMS, qui sont capables de supporter jusqu'à 20 W ont trouvé des applications dans les systèmes radar, les analyseurs de réseau, les systèmes de communication par satellites [20]. Un RF-MEMS est un micro/nano système comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, il utilise l'électricité comme une source d'énergie. On peut le considérer comme une version miniature d'un interrupteur mécanique standard [20].

**Les diodes varactors** : leur nom vient de l'anglais variable capacitor, ce sont des diodes qui se comportent comme des condensateurs dont la capacité peut être contrôlée en appliquant une tension inverse à ses bornes. Elles peuvent également être intégrées à l'antenne reconfigurable, soit sur l'élément rayonnant, soit sur la ligne d'alimentation. Elles nécessitent une source de tension continue (DC). En modifiant les niveaux de tension, sa capacité change, ce qui permet de régler les performances de l'antenne. Donc ces diodes fonctionnent toujours en polarisation inverse et constituent un dispositif semi-conducteur dépendant de la tension.



FIGURE 1.2 – (a) : circuit équivalent d'une diode varactor ; (b) : symbole diode varactor.

**Les diodes PIN** : La diode PIN est un composant incontournable qui est largement utilisé dans les circuits RF tel que les commutateurs, les atténuateurs...etc. Elle est utilisée dans un grand nombre d'applications allant de la bande UHF aux fréquences micro-ondes [3].

Dans ce travail, nous utiliserons des diodes PIN comme commutateur afin de réaliser la reconfiguration d'une antenne patch.

**Définitions** : La diode PIN est un semi-conducteur qu'on peut considérer comme une résistance variable dans le cadre des systèmes micro-ondes. La valeur



de la résistance est proportionnelle au courant de polarisation directe. Vu la structure physique de la diode PIN, elle a la capacité de contrôler le signal RF sans introduire de distorsions qui affecte l'enveloppe du signal [21].

La Figure (1.3) montre la géométrie de cette diode où la région I caractérise l'isolation. La région P est la l'anode de la diode, alors que la région N représente la cathode.

Lorsqu'elle est polarisée en direct, la diode présente une impédance relativement faible, et par conséquent, elle se comporte comme un circuit fermé (l'état ON). Mais une polarisation dans le sens inverse offre une très grande impédance en parallèle avec une très faible conductance, elle se comporte donc comme un circuit ouvert (l'état OFF) [22].

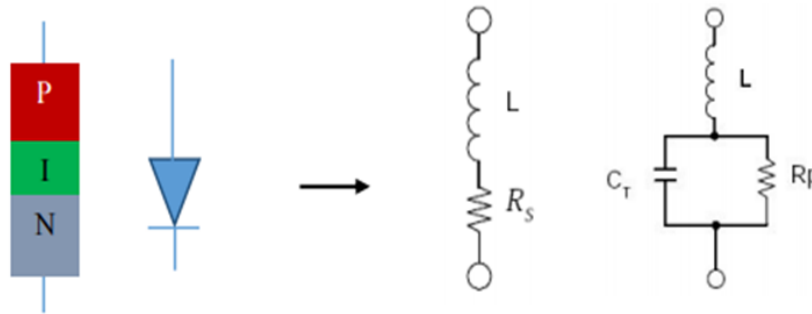


FIGURE 1.3 – Schéma et circuit équivalent d'une diode PIN.

**Caractéristiques d'une diode PIN :** Les diodes PIN sont caractérisées en direct par la valeur de la résistance  $R_s$  et en inverse par la valeur de la capacité  $C_T$ . Pour la plupart des diodes la résistance varie de 0,6 à 6  $\Omega$ , et la capacité de 0,04 à 1 pF pour toutes applications et fréquences de fonctionnement confondues. Elles sont connu avec des temps de commutation rapides ( $\approx 100$  ns) et ses boîtiers de petites dimensions [22].

La diode est aujourd'hui un composant incontournable. Elle peut être utilisé quelle que soit la fréquence de fonctionnement, elles sont disponibles en boîtier dans le commerce et sont facilement intégrables sur circuit imprimé. Leur coût varie en fonction de la fréquence de fonctionnement. Aux fréquences microondes, ces composants restent relativement chers. Les pertes et la consommation constituent

l'inconvénient majeur de ces diodes [23].

**Applications des diodes PIN :** La diode PIN est utilisée comme redresseur haute tension. La couche intrinsèque de la diode offre une séparation entre les deux couches, ce qui permet de tolérer des tensions inverses plus élevées.

Elle est également utilisée comme photodétecteur pour convertir la lumière en courant qui a lieu dans la couche de déplétion d'une photodiode, l'augmentation de la couche de déplétion en insérant la couche intrinsèque fait progresser les performances en augmentant le volume dans lequel le changement de lumière se produit.

Cette diode est un élément idéal pour donner une commutation électronique dans les applications de l'électronique. Elle est principalement utile pour les applications de conception RF, elle est utilisée comme un commutateur radiofréquence idéal. La diode PIN est capable de donner des niveaux de cohérence beaucoup plus élevés que les relais RF qui sont souvent la seule autre alternative [24].

**Avantages et inconvénients des diodes PIN :** Comme tous les autres commutateurs, la diode PIN dispose de nombreux avantages, nous allons en citer quelques-uns :

- Ces diodes ont une tension de claquage élevée, la zone intrinsèque est plus épaisse et plus large ce qui fait que cela protège le circuit d'un courant important.
- La diode PIN a une faible résistance et une faible capacité à l'état passant en radio fréquence la couche intrinsèque est large en raison de la faible capacité de la diode.
- Elles sont utilisées en Photo détection, en raison de la largeur de la couche intrinsèque, il y'a plus de photon qui touche la surface ce qui fait que la génération de la paire électron-trou augmente a son tour.
- Elles sont multifonctionnelles, elles peuvent également être utilisées comme un atténuateur commandé dans un étage HF, ou comme élément de commutation pour router des signaux HF.
- La diode PIN supporte des puissances très élevées et elle en consomme peu.

Malgré leurs nombreux avantages, l'inconvénient majeur des diodes PIN reste leurs temps de recouvrement : le passe de l'état passant a l'état bloqué. Des pertes de puissance sont causées lors de ce temps de recouvrement. [3].

## 1.5 CLASSIFICATION DES ANTENNES RECONFIGURABLES

Il existe une très large variété d'antennes reconfigurables et donc plusieurs façons de les classer. Cette catégorisation peut être faite selon la propriété optique, les propriétés diélectriques ou encore de leur structure géométrique.

Une autre façon de les classer est de les distinguer selon les fonctions de reconfigurabilité qu'elles offrent, la classification ressort comme le résultat d'un besoin de reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement ou en polarisation et toute combinaison des trois reconfigurations précédentes [2].

### 1.5.1 Reconfigurabilité en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence ont attiré l'attention des chercheurs et des communautés industrielles en raison de leur capacité de changer ses fréquences de travail. Ils sont capables à réduire la taille des systèmes, à minimiser les interférences avec d'autres systèmes sans fil et à maximiser le débit [5]. La résonance d'une antenne flexible proposée peut être commutée par le changement de la longueur effective de l'élément rayonnant et la modification du plan de masse et des réseaux d'alimentation soit par l'aide d'un commutateur électrique ou optique, ou bien par une antenne basée sur les matériaux intelligent aussi ça peut être réalisé par la modification de la permittivité de l'antenne, la forme ou le type d'antenne.

### 1.5.2 Reconfigurabilité en polarisation

L'intégration des antennes agiles en polarisation dans des systèmes de communication sans fil et par satellite est de plus en plus populaire et en plein essor. La propriété d'agilité en polarisation doit être réalisée tout en gardant le même comportement fréquentiel et même rayonnement. Il s'agit de modifier uniquement l'orientation vectorielle du champ E. La diversité de polarisation permet d'atténuer l'influence néfaste causée par les trajets multiples en évitant les problèmes de pertes d'évanouissement offrant ainsi une meilleure efficacité dans la réception du signal de communication [2].

### 1.5.3 Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement

Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement procurent la capacité de changer la forme et la direction des diagrammes de rayonnement et de privilégier ou non certaines directions. Cette option permet l'optimisation des bilans de liaison et ainsi d'améliorer les débits de transmission. Elle permet également de diminuer les interférences avec les autres utilisateurs, d'éviter les phénomènes d'évanouissements (fading) dans les environnements multi-trajets et d'augmenter l'autonomie afin d'améliorer la performance globale du système.

### 1.5.4 Reconfigurabilité hybride

Dans les antennes hybrides (composées), deux des méthodes de reconfiguration précédentes peuvent être combiné. Ces antennes sont classées en deux catégories :

- Fréquence et polarisation
- Fréquence et diagramme de rayonnement.

Les avantages de la reconfigurabilité hybride figurent dans le fait qu'ils ont une plus grande flexibilité et une plus grande diversité, ce qui ouvre la voie à un nouveau domaine de recherche.

## 1.6 CONCLUSION

Dans ce 1er chapitre, on a pu nous familiariser avec le concept des antennes reconfigurables. D'abord on les a présentés ainsi que leurs domaines d'utilisation, leurs avantages et leurs inconvénients. Par la suite on parler des différentes technique de reconfiguration (électrique, optique, physique... ect), on a également parlé des différents commutateurs utilisés en RF (Diode PIN, RF-MEMS ... ect), on a présenté la classification de la reconfiguration (en fréquence, en polarisation, en diagramme de rayonnement). Ce chapitre englobe de façon générale l'état de l'art des antennes reconfigurables.

## Chapitre 2

# Conception d'une antenne PIFA bi bandes.

### 2.1 INTRODUCTION

La conception de l'antenne est une étape indispensable dans le but de gagner du temps et d'optimiser la structure sous les paramètres requis. La conception peut également prendre en compte les paramètres diélectriques et dimensionnels pour avoir les performances désirées.

Dans ce chapitre nous allons intéresser par la conception d'une antenne PIFA miniaturisée avec un comportement bi bandes et avoir la fréquence de résonance 5.8 GHz. Pour cela, une conception par 5 étapes est faite et une étude paramétrique de notre antenne proposée est présentée afin de ressortir avec une antenne souhaitée.

### 2.2 ANTENNE PIFA BI BANDES

#### 2.2.1 ETAPE I. Antenne PIFA

##### a. Description du modèle

Initialement, on commence avec une antenne PIFA rectangulaire. L'antenne proposée est conçue sur un substrat de (FR4) qui a une permittivité relative  $\epsilon_r = 4.4$ , et une épaisseur de substrat de  $h_s = 1,6$  mm. L'antenne est de dimension de  $20 \times 15 \text{ mm}^2$ . Cette antenne a un plan de masse complet de dimension  $20 \times 15 \text{ mm}^2$ . L'antenne est alimentée par une ligne d'alimentation qui a une impédance

caractéristique  $Z=50\Omega$ , comme elle est illustrée dans la figure 2.1. Le patch, et le plan de masse sont en cuivre qui a une épaisseur de 0.035mm. Le court-circuit est fait par un pin métallique de forme cylindrique de rayon  $r_{pin}=0.3mm$ , ce pin relie le patch au plan de masse comme nous pouvons voir sur la figure 2.1 (c).

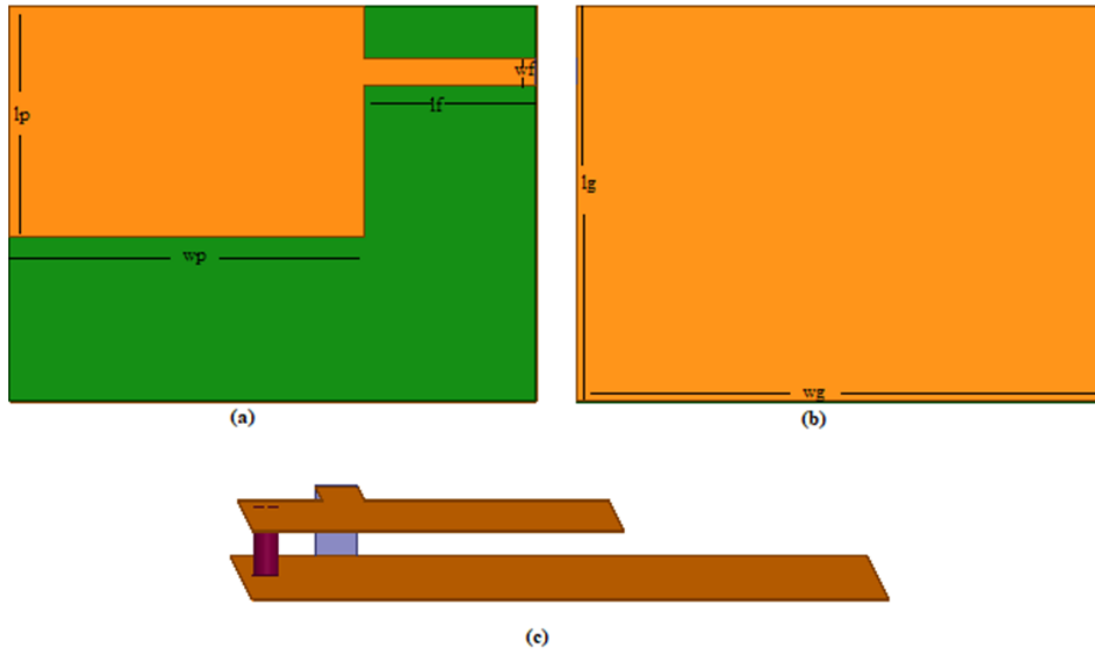


FIGURE 2.1 – (a). Géométrie de l'antenne patch rectangulaire : (a). vue dessus, (b). Vue dessous, (c). Vue sur le pin de court circuit.

Les dimensions de cette antenne PIFA proposée sont présentées dans le tableau 2.1. Le modèle d'antenne a été simulé en utilisant le logiciel HFSS.18.

TABLE 2.1 – Dimensions de l'antenne PIFA initiale.

Paramètre	Description	Valeur (mm)
lg	La largeur du plan de masse.	15
wg	La longueur du plan de masse.	20
lp	La largeur du patch.	8.75
wp	La longueur du patch.	13.5
lf	La longueur de la ligne d'alimentation.	6
wf	La largeur de la ligne d'alimentation.	1

### b. Coefficient de réflexion

La figure 2.2 illustre le  $|S_{11}|$  simulé de l'antenne PIFA initiale en fonction de la fréquence. Nous pouvons observer que cette antenne a une résonance à 5.91GHz pour un coefficient de réflexion de -21dB, et également une autre résonance à 2.27 GHz pour un coefficient de réflexion de -11.54dB. Mais pour la fréquence que nous recherchons qui est 5.8GHz le coefficient de réflexion est insatisfaisant.

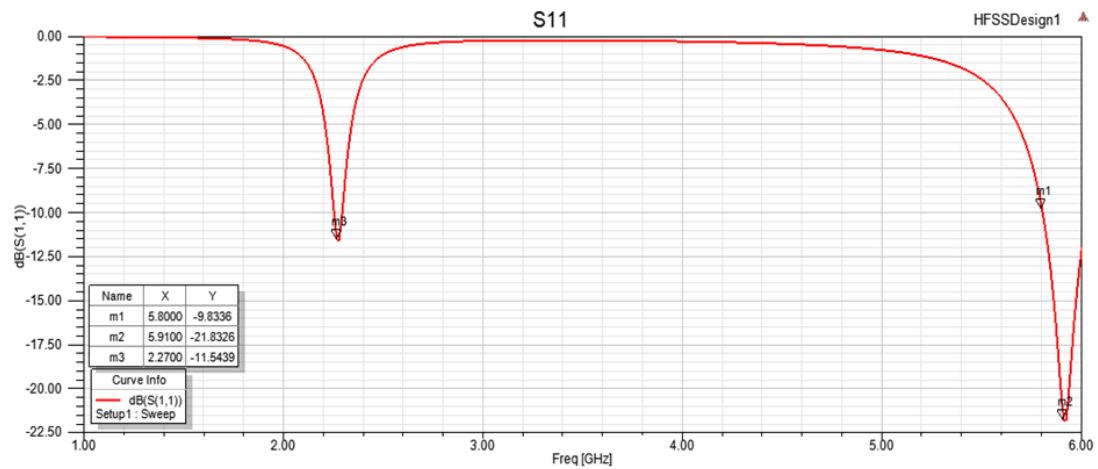


FIGURE 2.2 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 1.

## 2.2.2 ETAPE 2. Modification de la ligne de transmission

### a. Description du modèle

Nous allons commencer par insérer des troncatures (inset feed). D'une largeur  $l_t=1$  mm et une longueur  $w_t=2$  mm.

### b. Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 2.4 en termes de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence. Nous pouvons observer que l'ajout de troncatures a permis de diminuer le coefficient de réflexion, on obtient une fréquence de résonance à 5.81GHz avec un coefficient de réflexion de -25.25dB et une autre à 2.21 GHz avec un coefficient de réflexion de -12.52 dB.

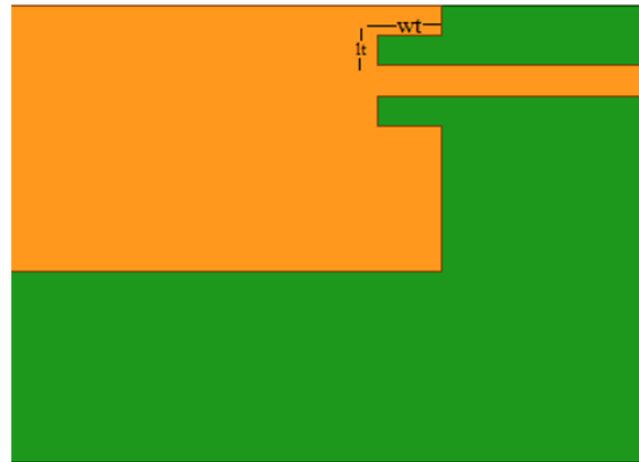


FIGURE 2.3 – Antenne PIFA après l'insertion de l'inset feed

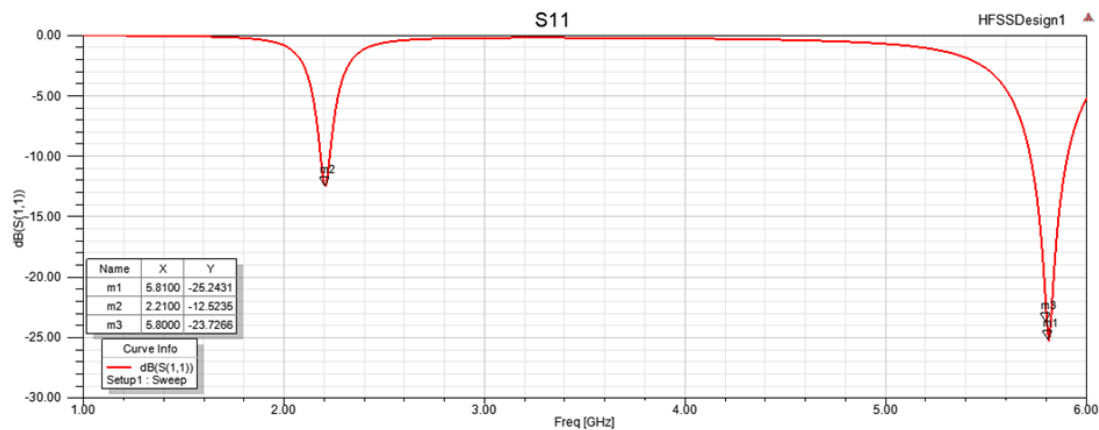


FIGURE 2.4 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2.

### c. Etude paramétrique

**Effet de la longueur de la troncature.** On fixe la largeur de l'inset feed à 2mm et on varie la longueur de 0.25mm à 1.5mm avec un pas de 0.25mm. A partir de la figure 2.5. On peut voir que le changement de la longueur de la troncature joue légèrement sur l'adaptation mais il n'influe pas sur les fréquences de fonctionnement.



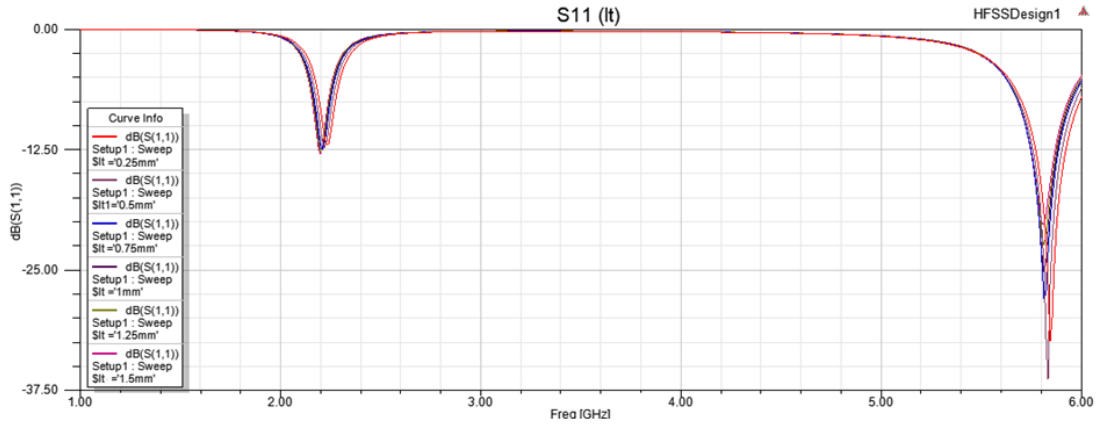


FIGURE 2.5 – Coefficient de réflexion S11 de l’antenne PIFA de l’étape 2 pour plusieurs valeur de  $l_t$ .

**Effet de la largeur de la troncature.** On fixe la largeur à 1mm et on varie la longueur  $w_t$  de 1mm à 4mm avec un pas de 0.75mm. - On peut voir que la variation dans la longueur de la troncature joue sur l’adaptation et sur la fréquence de résonance, pour  $w_t=1mm$  on a une résonance à 5.89 Ghz pour un coefficient de réflexion de  $-30.72dB$ , mais pour  $w_t=4mm$  on a une fréquence de résonance de 5.51GHz pour  $-10.34dB$ . Plus la largeur de la troncature augmente plus on perd l’adaptation et on s’éloigne de la fréquence de résonance recherchée.

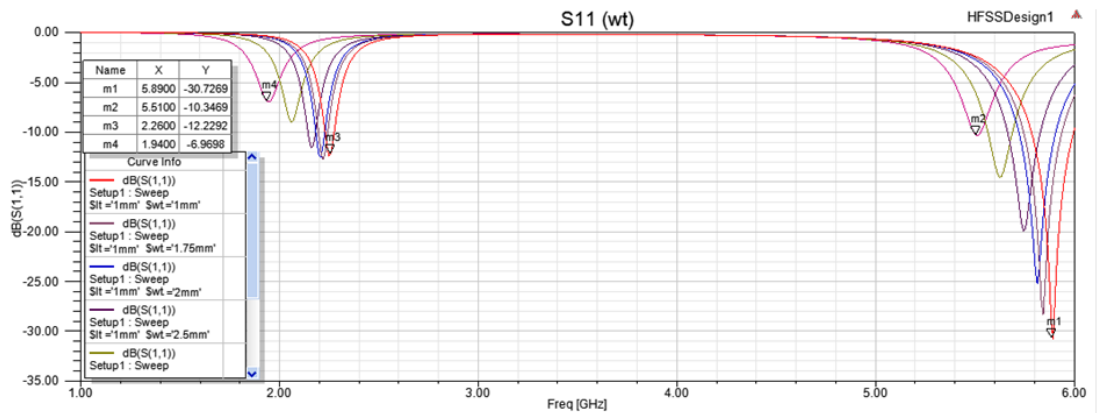


FIGURE 2.6 – Coefficient de réflexion S11 de l’antenne PIFA de l’étape 2 pour plusieurs valeur de  $w_t$ .

### 2.2.3 ETAPE 3. Insertion d'un 1er slot

#### a. Description du modèle

On insert un 1er slot qui a une longueur  $ls1=5\text{mm}$  et une largeur  $ws1=1\text{mm}$  (Figure 2.7)

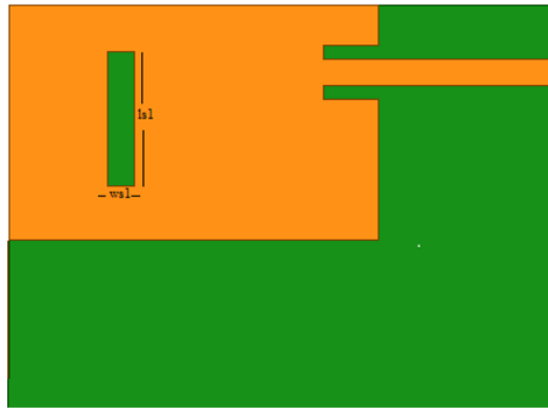


FIGURE 2.7 – Antenne PIFA après l'insertion du premier slot.

#### b. Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 2.8 en termes de coefficient de réflexion  $S_{11}$ . On a une fréquence de résonance de 5.68 GHz avec un coefficient de réflexion de  $-31.82\text{ dB}$ , et une autre de 2.22GHz avec un coefficient de réflexion de  $-12.35\text{ dB}$ . L'insertion de ce slot a affecté la fréquence de résonance et le niveau d'adaptation.

#### c. Etude paramétrique

**Effet de la longueur du slot.** On fixe la largeur du slot à 1mm et on varie la longueur  $ls1$  de 2mm à 6mm avec un pas de 1mm. Lorsque qu'on varie la longueur du slot cela change la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion. Pour  $ls1=3\text{mm}$  on obtient une fréquence de résonance de 5.79 GHz pour un coefficient de réflexion de  $-37.96\text{ dB}$ , pour  $ls1=6\text{mm}$  la fréquence de résonance devient 5.55 GHz pour un coefficient de réflexion de  $-23.77\text{dB}$  (Figure 2.9).

**Effet de la largeur du slot.** On fixe la longueur du slot à 5mm et on varie la largeur  $ws1$  de 0.5mm à 4mm avec un pas de 0.5 mm. La variation dans la largeur

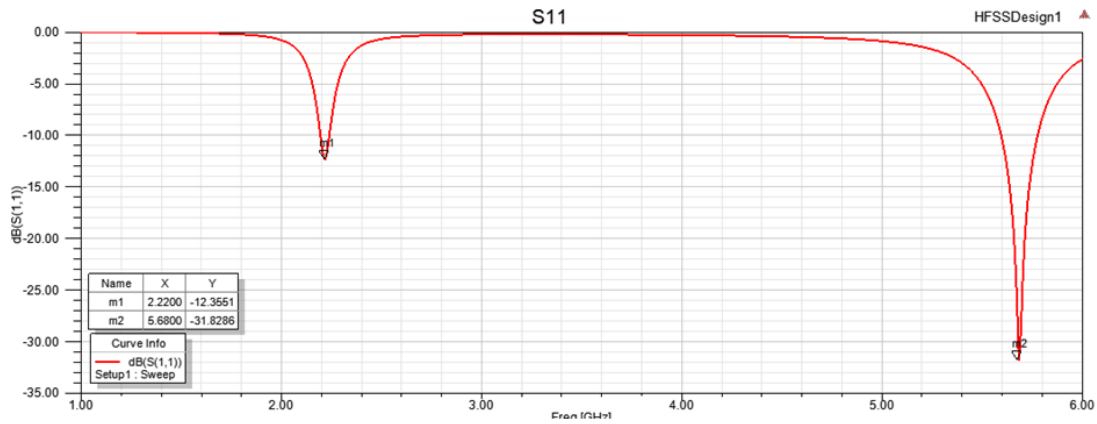


FIGURE 2.8 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 3.

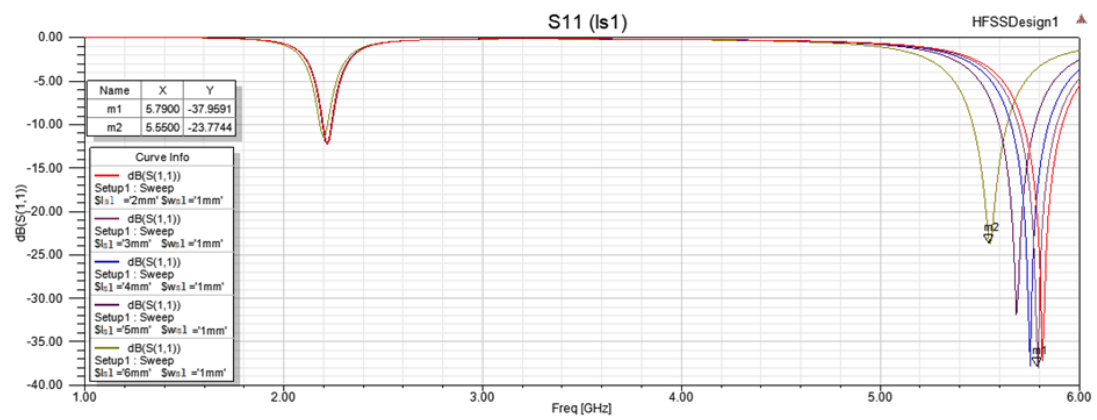


FIGURE 2.9 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 2 pour plusieurs valeur de ls1.

du slot impacte l'adaptation et la fréquence de résonance, pour  $ws1=0.5\text{mm}$  on a une fréquence de résonance de 5.73 GHz pour  $-35.59\text{ dB}$ , mais pour  $ws1=4\text{mm}$  la fréquence de résonance est de 5.4 GHz pour  $-20.09\text{ dB}$  (Figure 2.10).

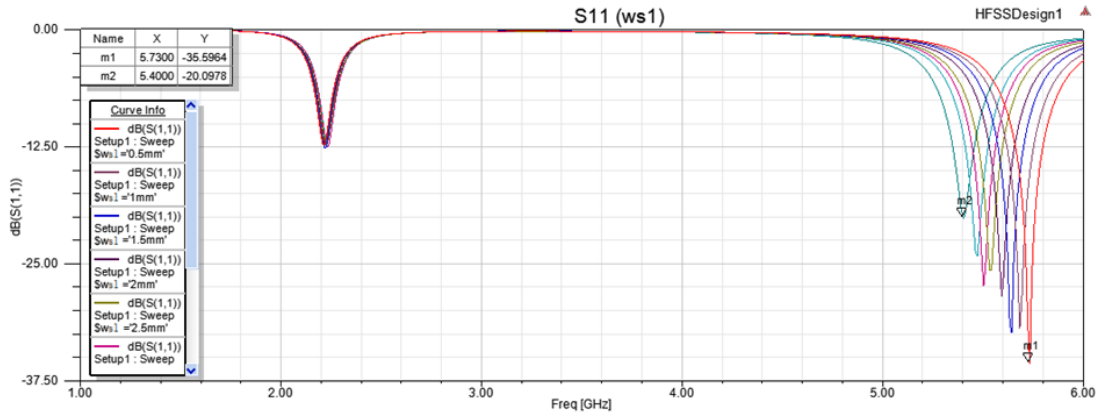


FIGURE 2.10 – Coefficient de réflexion S11 de l’antenne PIFA de l’étape 3 pour plusieurs valeur de wsl.

### 2.2.4 ETAPE 4. Insertion des deux rectangles métalliques

#### a. Description du modèle.

On rajoute deux rectangle métalliques d’une largeur de 0.5mm, un est horizontale avec une longueur  $w_{a1}= 6\text{mm}$ , et un autre vertical avec une longueur  $l_{a1}=5.75\text{mm}$ . La distance entre les deux et le patch est de 0.5mm (Figure 2.11)



FIGURE 2.11 – Antenne PIFA de l’étape 4.

#### b. Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 2.12 en termes de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence. On remarque que ça augmente

légèrement le coefficient de réflexion. L'antenne présente deux résonances une à 2.22GHz avec  $S_{11}=-12.3\text{dB}$  et 5.68GHz avec  $S_{11}=-31.62\text{dB}$ .

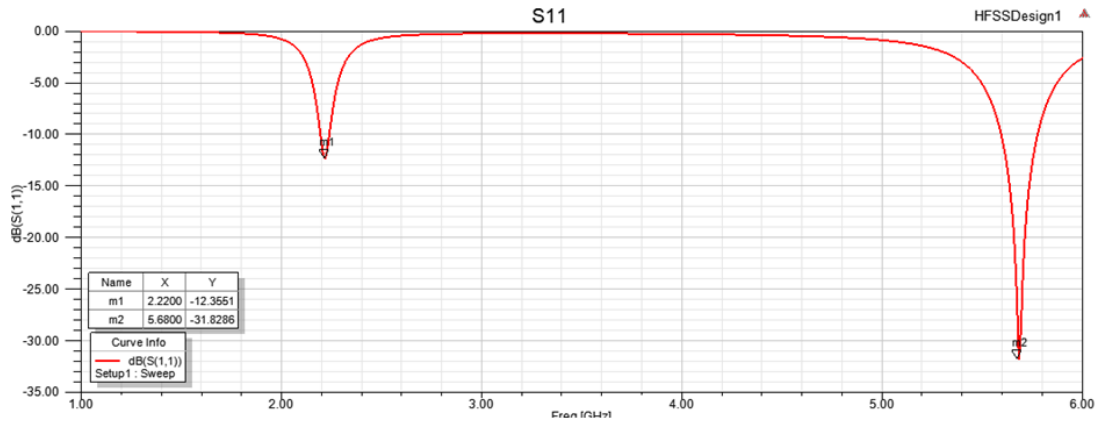


FIGURE 2.12 – Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne PIFA de l'étape 4.

### c. Etude paramétrique

**Effet de la longueur des rectangles.** Nous allons varier la longueur des rectangles sans changer leurs positions, le rectangle vertical de 1.25 mm à 5.75 mm avec un pas de 0.75mm et le stub horizontal de 2mm à 6mm avec un pas de 0.5 mm. La modification dans la longueur des rectangles affect légèrement la résonance, sans changer la fréquence de résonance.

**Effet de la position des rectangles.** Nous allons varier la position des rectangles sans changer leurs positions, le stub vertical de 7 mm à 15 mm avec un pas de 1 mm et le stub horizontal de 1 mm à 8 mm avec un pas de 1 mm. En variant la position des rectangles impacte sur l'adaptation donc il faut faire attention avec leur emplacement, comme on peut voir dans la figure 2.14. Quand le rectangle vertical est a 12 mm et l'horizontal a 1 mm on obtient une fréquence de 5.79 GHz avec une résonance de  $-41.62$  dB, mais quand le stub vertical est a 12mm et l'horizontal a 3mm on a une fréquence de 5.84 GHz pour une résonance de  $-17.34$  dB.

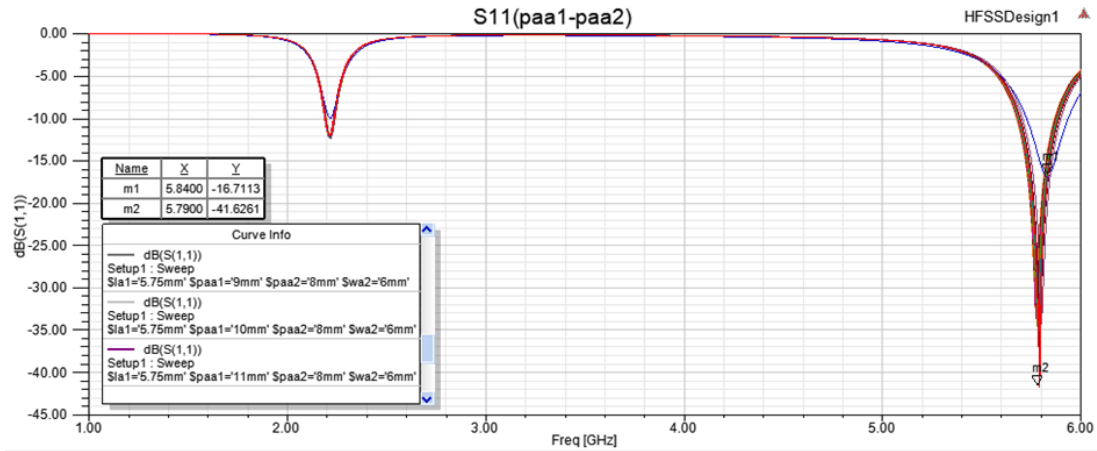


FIGURE 2.13 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 4 pour plusieurs valeur de  $l_1$ .

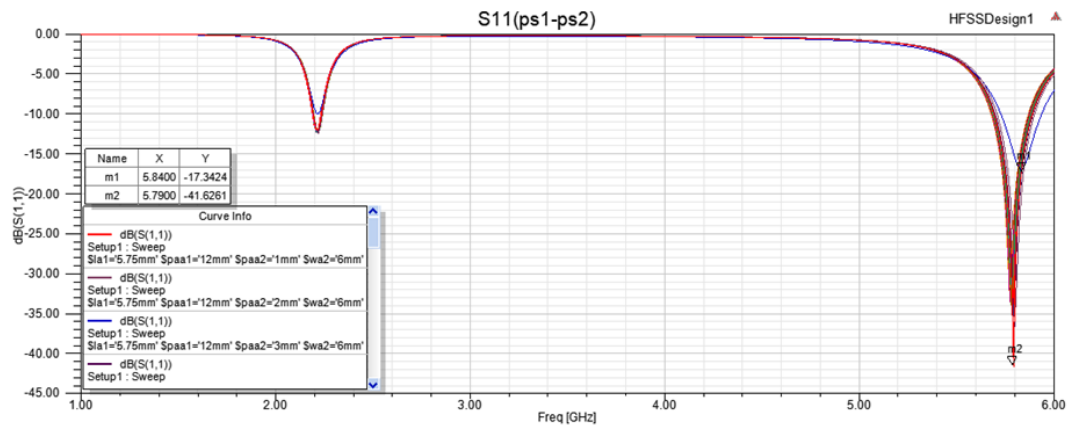


FIGURE 2.14 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 4 pour plusieurs valeur de la positions des rectangles.

### 2.2.5 ETAPE 5. Insertion d'un 2ième slot

#### a. Description du modèle

On insert un 2ème slot qui a une longueur  $l_2=4.5\text{mm}$  et une largeur  $w_2=2\text{mm}$ . (Figure 2.15)

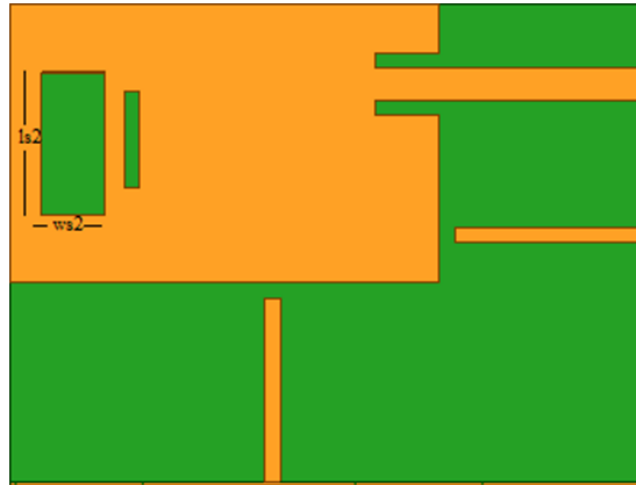


FIGURE 2.15 – Antenne PIFA de l'étape 5.

**b. Coefficient de réflexion**

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 2.16 en termes de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence. L'ajout de ce 2ème slot a permis d'avoir la fréquence 5.8GHz avec un bon coefficient de réflexion qui est de -31.91 dB.

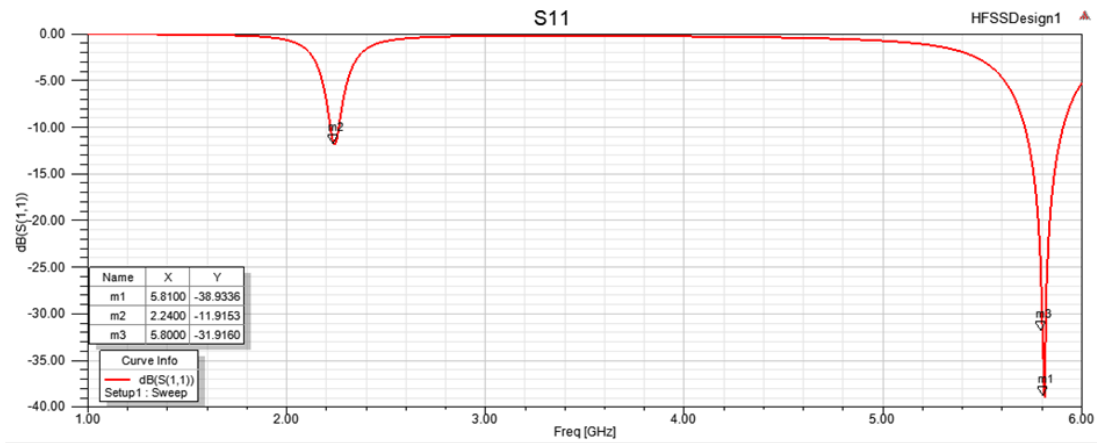


FIGURE 2.16 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5.

## c. Etude paramétrique

**Effet de la longueur du slot.** On fixe la largeur du slot à 2 mm et on varie la longueur  $ls_2$  de 4 mm à 7.5 mm avec un pas de 0.5 mm. La variation de la longueur du slot joue sur l'adaptation et la fréquence de résonance. Pour  $ls_2=7.5\text{mm}$  on a une fréquence de résonance de 5.65GHz pour  $-34.23$  dB, pour  $ls_2=7\text{mm}$  on a une fréquence de 5.7GHz pour  $-47.62\text{dB}$  et pour  $ls_2=4\text{mm}$  la fréquence est de 5.82GHz pour  $-38.05\text{dB}$ .

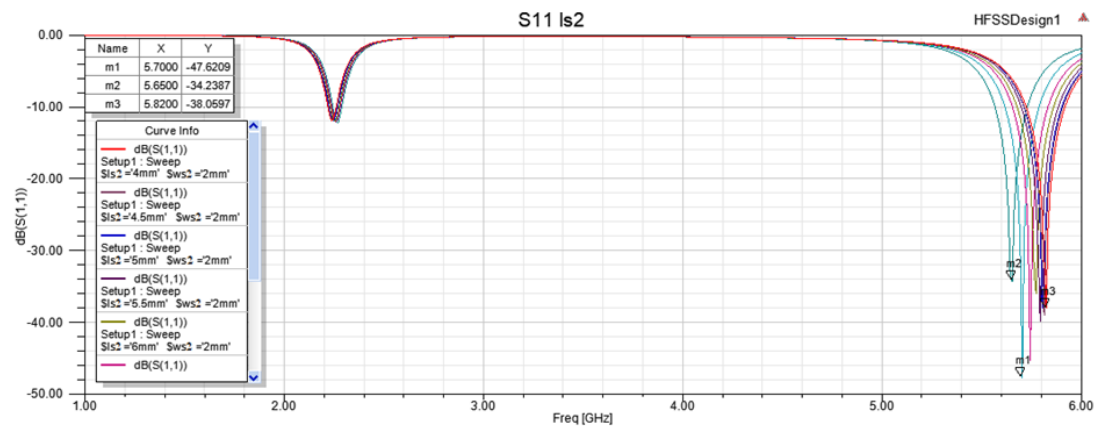


FIGURE 2.17 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5 pour plusieurs valeur de  $ls_2$ .

**Effet de la largeur du slot.** On fixe la longueur du slot à 4.5mm et on varie la largeur  $ws_2$  de 1 mm à 3 mm avec un pas de 0.5 mm. Le changement dans la largeur du 2ème slot a un effet sur l'adaptation et sur la fréquence de résonance. Pour  $ws_2=3\text{mm}$  on a une fréquence de 5.95 GHz pour  $-21.91$  dB et pour  $ws_2=1.5\text{mm}$  on a une fréquence de résonance à 5.7 GHz pour un coefficient de réflexion de  $-44.27$  dB.



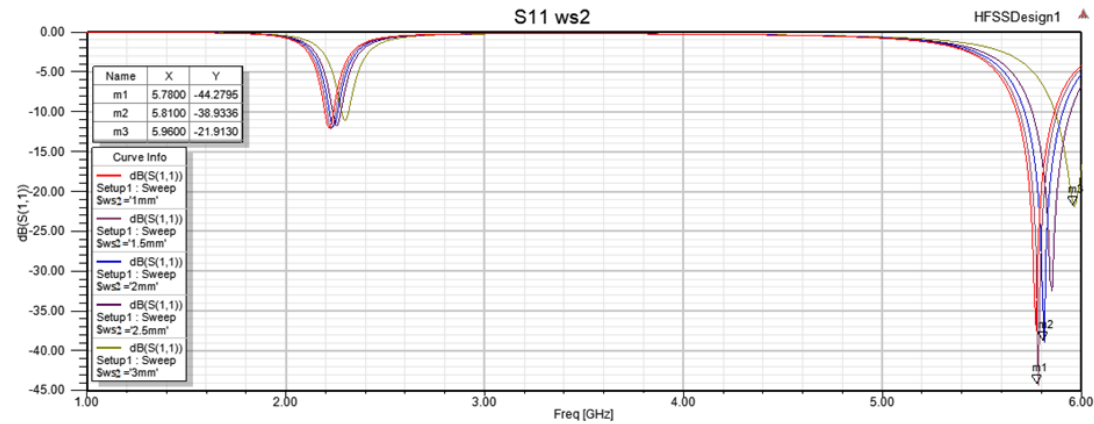


FIGURE 2.18 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'étape 5 pour plusieurs valeur de la largeur du slot.

### 2.3 GEOMETRIE DE L'ANTENNE FINALE

Après avoir fait l'étude paramétrique de l'antenne, on obtient la structure de notre antenne PIFA proposée (voir figure 2.19). Le tableau 2.2 présente les dimensions des paramètres de l'antenne finale.

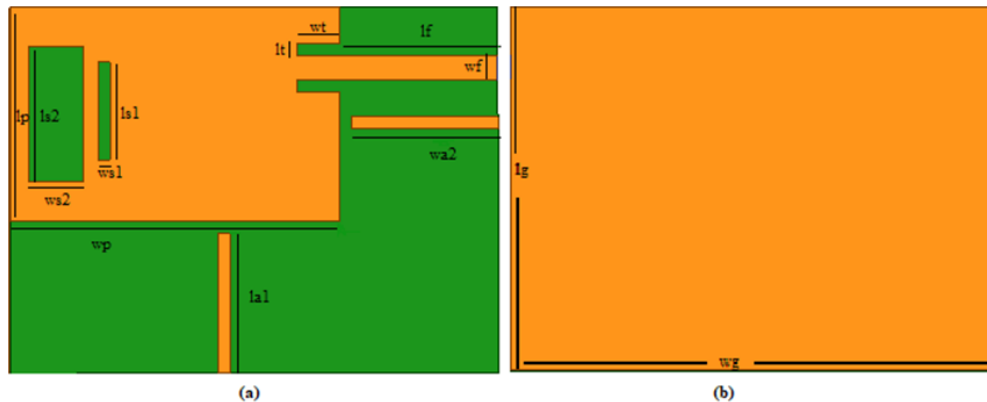


FIGURE 2.19 – Antenne PIFA bi bandes.

#### 2.3.1 Coefficient de réflexion

La figure 2.20 présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne PIFA de l'architecture finale en fonction de la fréquence. L'antenne présente un comportement

TABLE 2.2 – Dimensions de l'antenne PIFA Bi bandes finale.

Paramètre	Description	Valeur (mm)
lg	La largeur du plan de masse.	15
wg	La longueur du plan de masse.	20
lp	La largeur du patch.	8.75
wp	La longueur du patch.	13.5
lf	La longueur de la ligne d'alimentation.	1
wf	La largeur de la ligne d'alimentation.	6.5
lt	La longueur d'inset feed.	0.5
wt	La largeur d'inset feed.	1.75
ls1	La longueur du 1er slot.	4
ws1	La largeur du 1er slot.	0.5
ls2	La longueur du 2ème slot.	2.5
ws2	La largeur du 2ème slot.	2.25
la1	La largeur du rectangle vertical.	5.75
wa2	La longueur du rectangle horizontal.	6
paa1	La position du rectangle horizontal.	11
paa2	La position du rectangle vertical.	5
D	La distance entre le patch et les rectangles.	0.5
rpin	rayon du pin court circuit.	0.3

bi bandes aux fréquence 2.27GHz et 5.8GHz avec un niveau d'adaptation  $-12\text{dB}$  et  $-46.79\text{dB}$  respectivement. L'antenne présente un bon niveau d'adaptation.

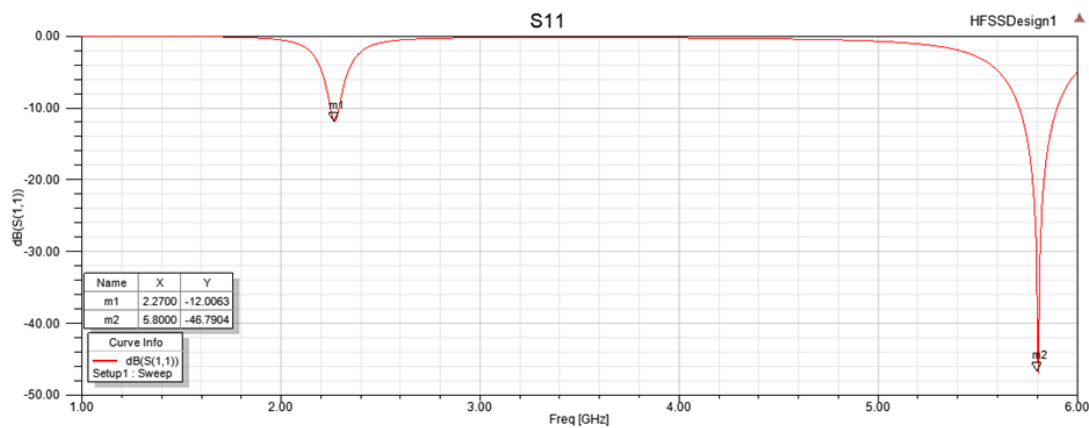


FIGURE 2.20 – Coefficient de réflexion de l'antenne PIFA bi bandes.

## 2.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la conception d'antenne PIFA bi bandes par le simulateur HFSS18. Afin de l'utiliser pour avoir une antenne reconfigurable. Une conception complète est faite pour avoir les performances souhaitées (comportement bi bande et avoir une résonance à la fréquence 5.8GHz). Ainsi une étude de l'effet de chaque paramètre a été présentée. Les résultats obtenus montrent que chaque paramètre a un effet différent sur le rayonnement de l'antenne. l'antenne finale de ce chapitre est utilisée pour avoir une antenne reconfigurable dans le chapitre suivant.

## Chapitre 3

# Simulation et réalisation d'une antenne reconfigurable

### 3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons faire la reconfiguration de l'antenne du chapitre précédent à l'aide de deux diodes pin, nous observons l'effet de ses diodes sur les performances et les caractéristiques de l'antenne et nous pourrons également comparer entre la reconfiguration dans le cas idéal et dans le cas où on utilise le circuit équivalent des diodes pin.

Par la suite, On passe à la réalisation de notre antenne. Nous allons faire la réalisation pour les deux cas de reconfiguration avec plaque métallique et avec diodes pin, par la suite nous allons faire les mesures de ses deux cas. Les résultats de simulation et de la mesure sont comparés et commentés.

### 3.2 SIMULATION ET MESURE DE L'ANTENNE RE-CONFIGURABLE

Afin d'effectuer la reconfiguration de notre antenne nous allons insérer 2 diodes pin qui relie l'extrémité du patch et celle des rectangles métalliques.

#### 3.2.1 Modélisation de la diode pin

La diode pin peut être modélisée par deux méthodes :

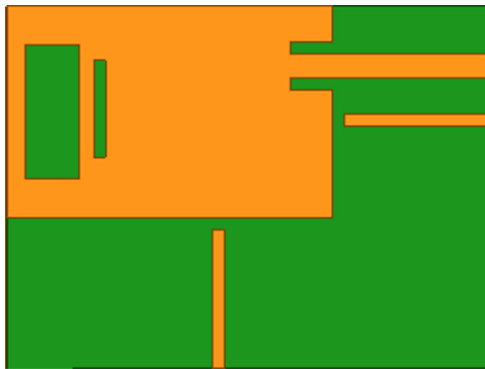
- Cas idéal : la diode pin peut être représentée dans ce cas avec une pièce métallique (cuivre) de dimension  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$  d'une épaisseur de 0.035 mm qui relie le patch avec les rectangles métalliques.
- Circuit équivalent : La diode est modélisée dans ses deux états OFF, ON selon la figure 1.3. La diode utilisée lors de la réalisation est BAR 64-02V H6327 Infineon PIN Diodes, leurs caractéristiques sont :
  - La capacité  $c=0.13\text{pF}$  ( $V=0.1\text{V}$ ).
  - La résistance  $R=2.1\Omega$  ( $I=10\text{mA}$ ).
  - L'inductance  $L=0.6 \text{ nH}$ .

### 3.2.2 Cas idéal

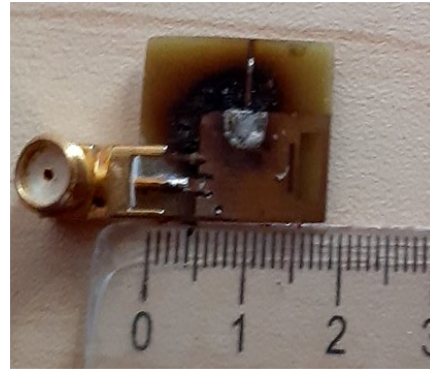
Dans cette partie nous présentons les performances de simulation et mesure de l'antenne reconfigurable dans le cas où on modélise les diode pin par le modèle idéal où dans l'état OFF ; les diodes sont représentées par un vide, et dans l'état ON par une pièce métallique qui relie le rectangle métallique et le patch. Donc quatres cas sont étudiés (OFF-OFF, OFF-ON, ON-OFF et ON-ON).

#### a. Cas OFF-OFF

La figure 3.1 montre le schéma et le modèle réalisé de l'antenne PIFA à l'état off-off où les deux diodes sont éteintes.



(a)



(b)

FIGURE 3.1 – a. Modèle de simulation dans le cas OFF-OFF. b. Modèle réalisé de l'antenne PIFA reconfigurable.

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.2 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF. A partir de cette figure l'antenne présente un comportement bi bandes avec les résonances sont :

- Pour la simulation : une première à 2.27 GHz pour un niveau d'adaptation -12dB et une autre à 5.8 GHz pour un coefficient de réflexion de -45.79 dB.
- Pour la mesure : une résonance à la fréquence 2.26 GHz avec coefficient de réflexion -11.08dB et une autre à 5.83GHz avec un niveau d'adaptation -12.79dB.

On remarque un très bon accord entre les résultats de simulation et les mesures pour l'antenne reconfigurable dans le cas OFF-OFF.

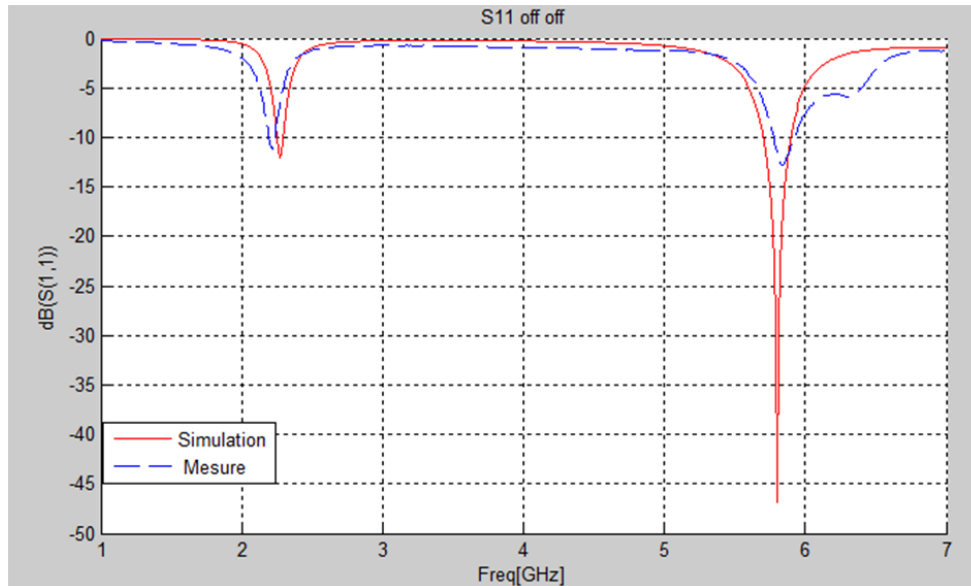


FIGURE 3.2 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF (modèle idéal).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.3 présente le gain total en dB de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF du modèle idéal. L'antenne présente un diagramme omnidirectionnel du gain max de -10.dB et 1.72dB pour les fréquences 2.27GHz et 5.8GHz respectivement.

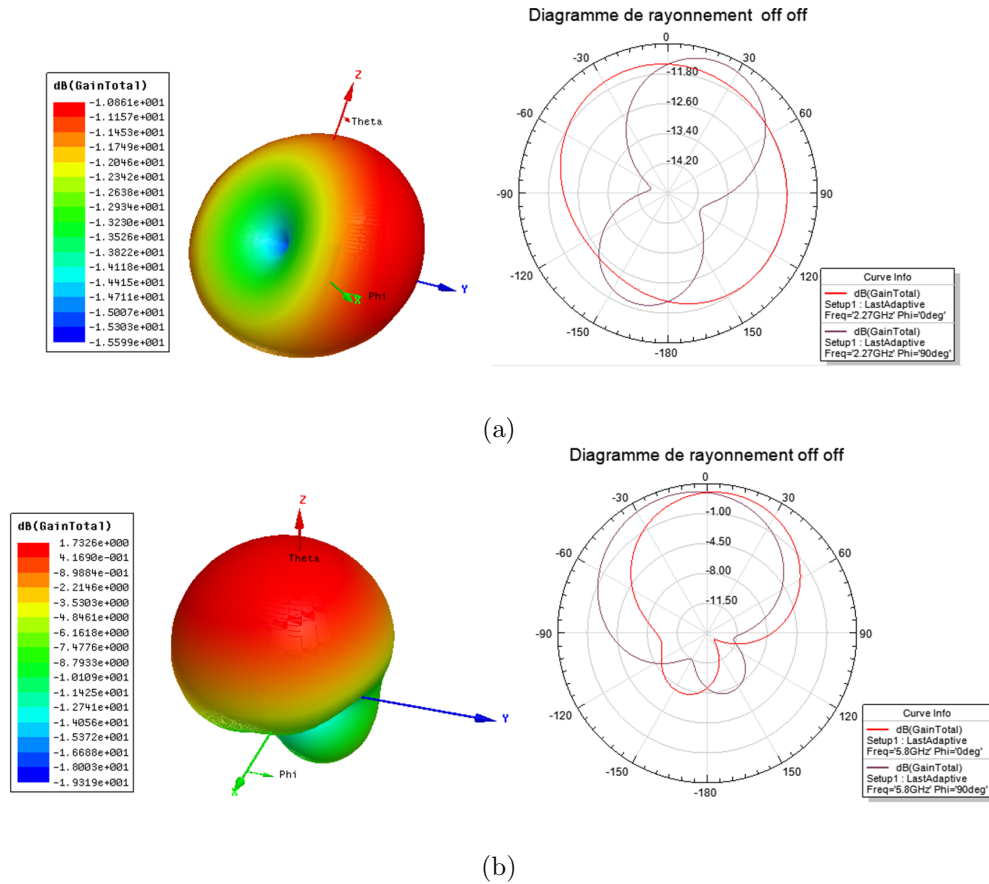


FIGURE 3.3 – Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l’antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.27GHz et b.5.8GHz dans le cas OFF-OFF (cas idéal).

**a. Cas OFF-ON**

La figure 3.4 montre la structure de l’antenne reconfigurable pour l’état OFF-ON (la diode horizontale est éteinte est la diode verticale est allumée).

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.5 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l’antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON. L’antenne présente une fréquence de résonance à 2.15GHz avec un  $S_{11}=-11.17\text{dB}$  pour la simulation et une résonance à 2.16GHz avec un  $S_{11}=-11.06\text{dB}$  pour les mesures expérimentales.



FIGURE 3.4 – Modèle de simulation dans le cas OFF-ON de l'antenne PIFA reconfigurable.

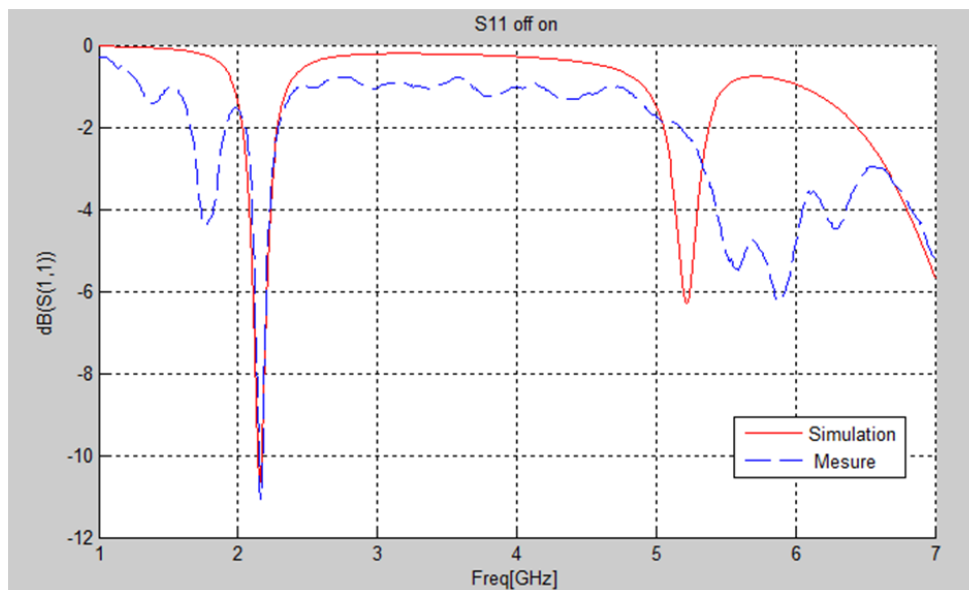


FIGURE 3.5 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON (modèle idéal).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.6 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne PIFA reconfigurable dans l'état OFF-ON. L'antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d'un gain maximal de -11.7dB.



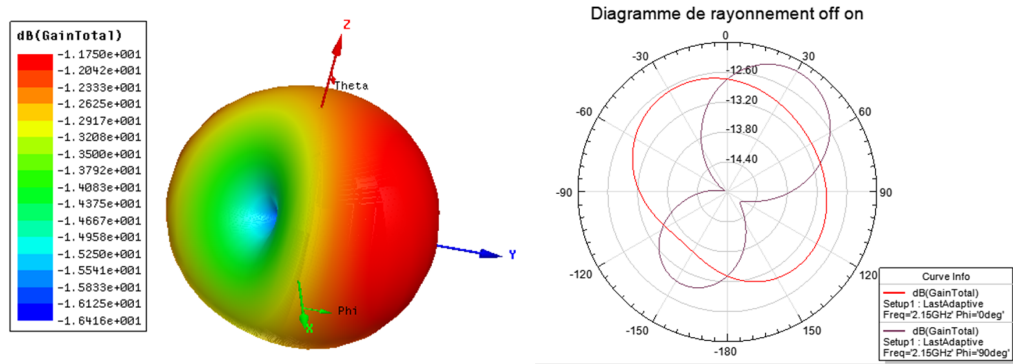


FIGURE 3.6 – Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.15GHz.

#### a. Cas ON-OFF

La figure 3.7 montre la structure de l'antenne reconfigurable pour l'état ON-OFF (la diode horizontale est allumée et la diode verticale est éteinte).

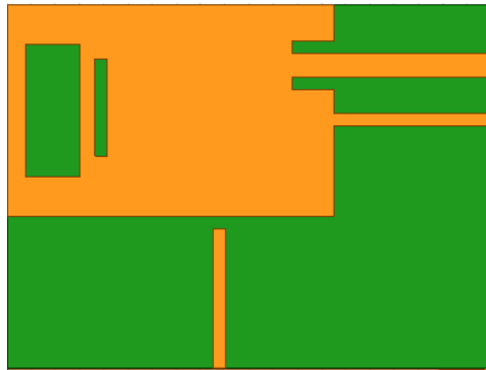


FIGURE 3.7 – Modèle de simulation dans le cas ON-OFF de l'antenne PIFA reconfigurable.

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.8 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-OFF. L'antenne présente une fréquence de résonance à 4.86GHz avec un  $S_{11} = -22.24\text{dB}$  pour la simulation et une résonance à 4.18GHz avec un  $S_{11} = -22.29\text{dB}$  pour les mesures expérimentales.

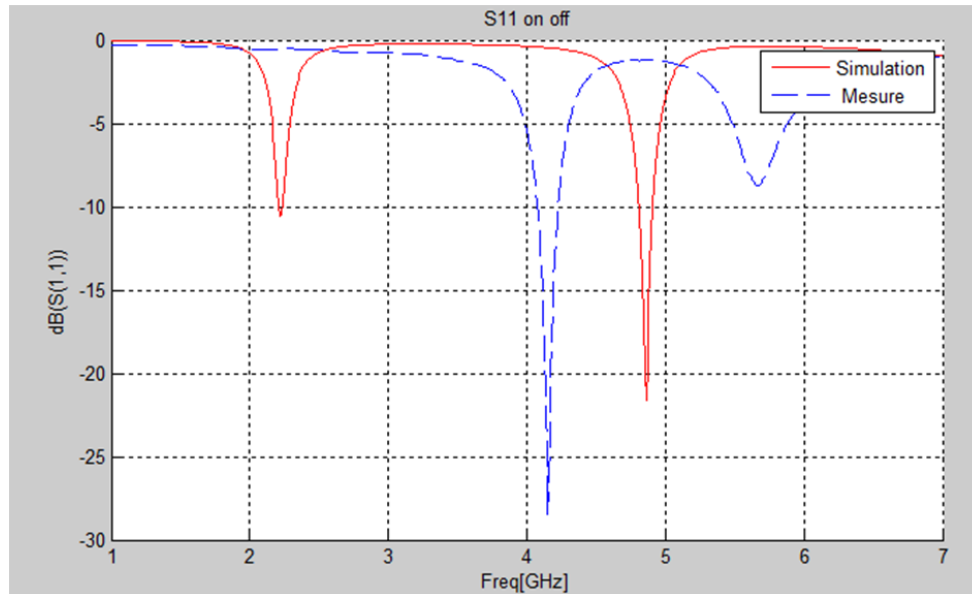


FIGURE 3.8 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l’antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-OFF (modèle idéal).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.9 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l’antenne PIFA reconfigurable dans l’état ON-OFF à la fréquence 4.86GHz. L’antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d’un gain maximal de -0.76dB.

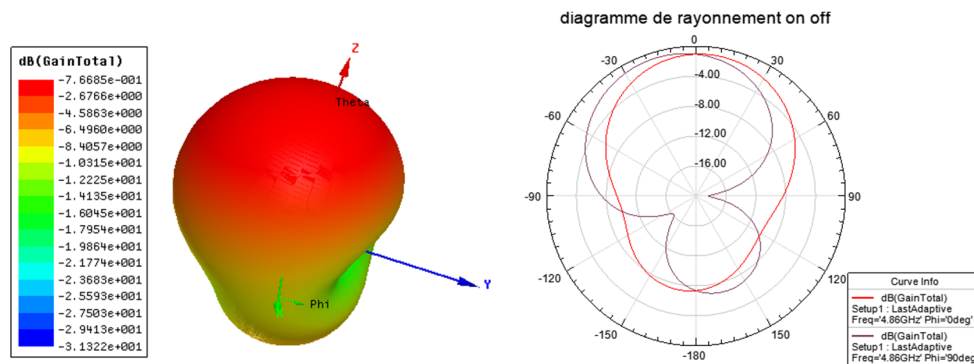


FIGURE 3.9 – Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l’antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 4.86GHz (Etat ON-OFF).

**a. Cas ON-ON**

La figure 3.10 montre la structure de l'antenne reconfigurable pour l'état ON-ON (les deux diodes sont allumées).

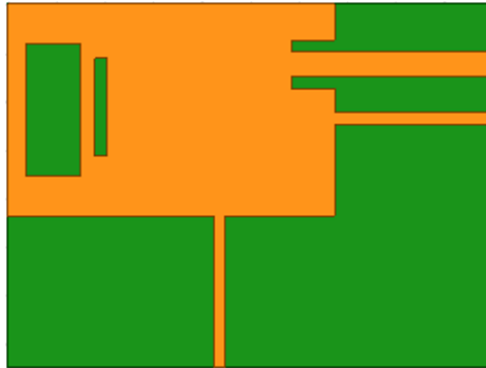


FIGURE 3.10 – Modèle de simulation dans le cas ON-ON de l'antenne PIFA reconfigurable.

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.11 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré dans le cas ON-ON. L'antenne présente une fréquence de résonance à 4.78GHz (-13.21dB) et 4.15GHz (-23.56dB) la simulation et mesures respectivement.

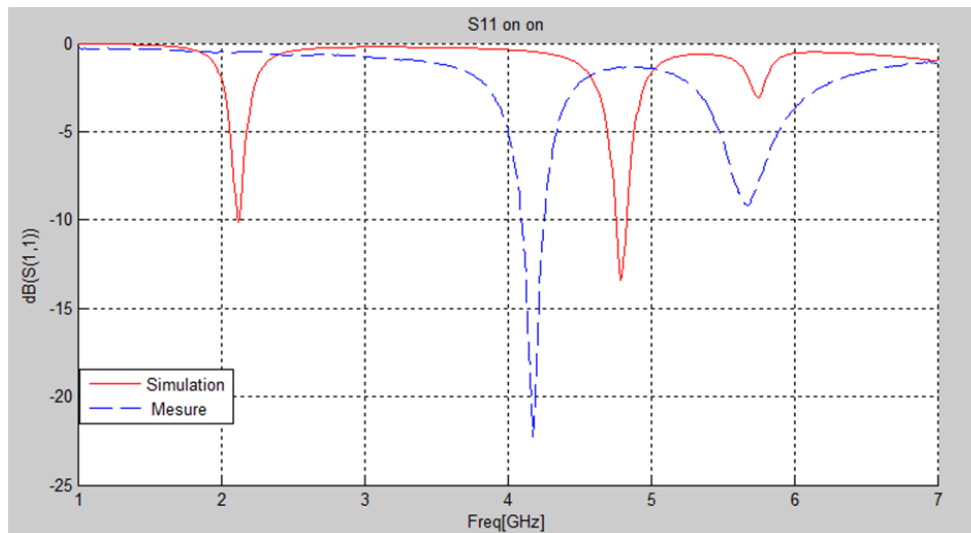


FIGURE 3.11 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-ON (modèle idéal).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.12 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne PIFA reconfigurable dans l'état ON-OFF à la fréquence 4.78GHz. L'antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d'un gain maximal de -0.85dB.

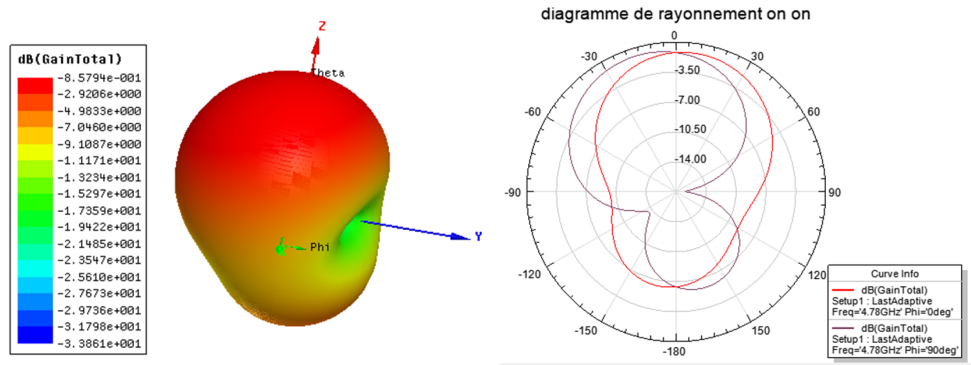


FIGURE 3.12 – Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 4.78GHz (Etat ON-ON).

### 3.2.3 Cas circuit équivalent

Actuellement, nous présentons les performances de simulation et mesure de l'antenne reconfigurable dans le cas où on modélise les diode pin par son circuit équivalent. Pour les besoins de la réalisation on a du élargir les rectangles métalliques, on a passé de 0.5mm à 0.8mm, et on a créé un carré de chaque coté sur une longueur de 1mm. La structure de l'antenne est présentée dans la figure 3.13 a.

#### a. Cas OFF-OFF

La figure 3.13 montre le schéma sous HFSS et CST et le modèle réalisé de l'antenne PIFA reconfigurable.

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.14 présente le coefficient de réflexion simulé (HFSS et CST) et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF. A partie de cette figure l'antenne présente un comportement bi bandes avec les résonances sont :

- Pour la simulation sous HFSS : une première à 2.21 GHz pour un niveau d'adaptation -15.30dB et une autre à 5.44 GHz pour un coefficient

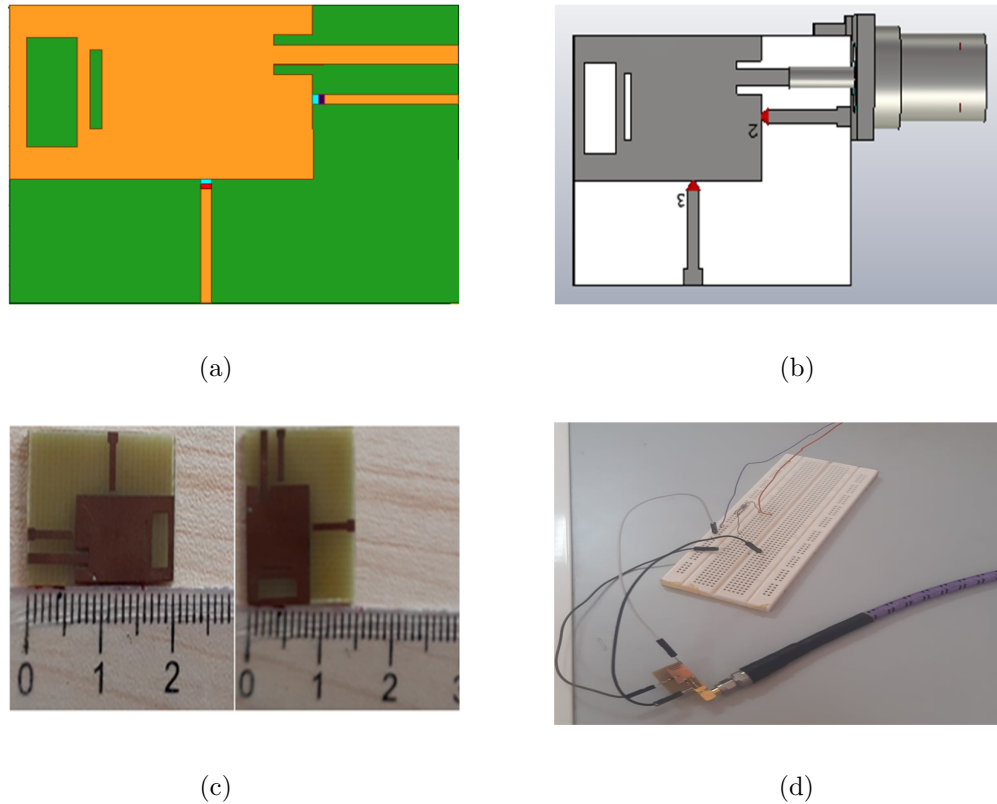


FIGURE 3.13 – a. Modèle de simulation sous HFSS. b. Modèle de simulation sous CST. c. Modèle réalisé de l'antenne PIFA reconfigurable d. Antenne réalisée avec diodes PIN.

de réflexion de -14.83 dB.

- Pour la simulation sous CST : une première à 2.24 GHz pour un niveau d'adaptation -12.14dB et une autre à 5.51 GHz pour un coefficient de réflexion de -30.81 dB.
- Pour la mesure : une résonance à la fréquence 2.21 GHz avec coefficient de réflexion -12.2dB et une autre à 5.34 GHz avec un niveau d'adaptation -18.53dB.

On remarque un très bon accord entre les résultats de simulation et les mesures pour l'antenne reconfigurable dans le cas OFF-OFF.

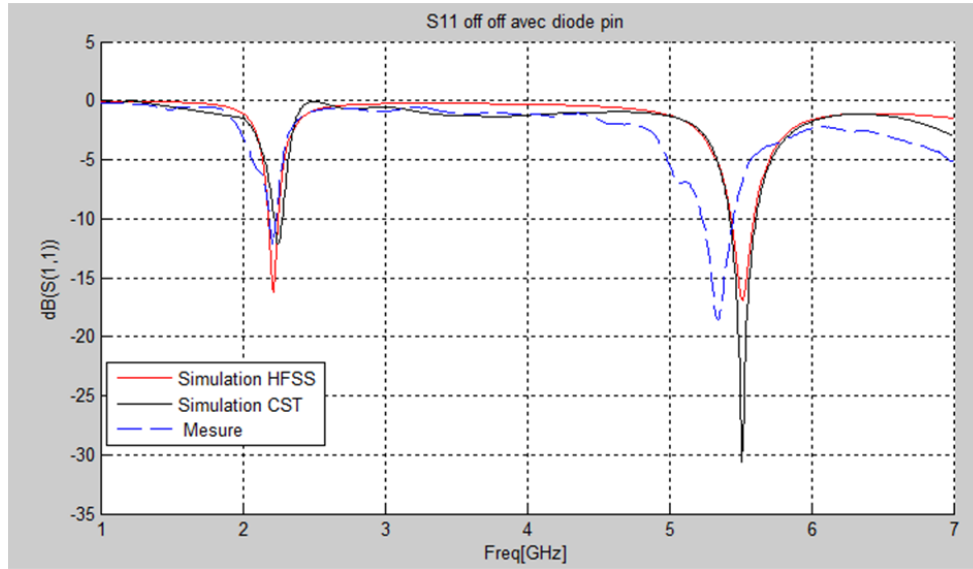
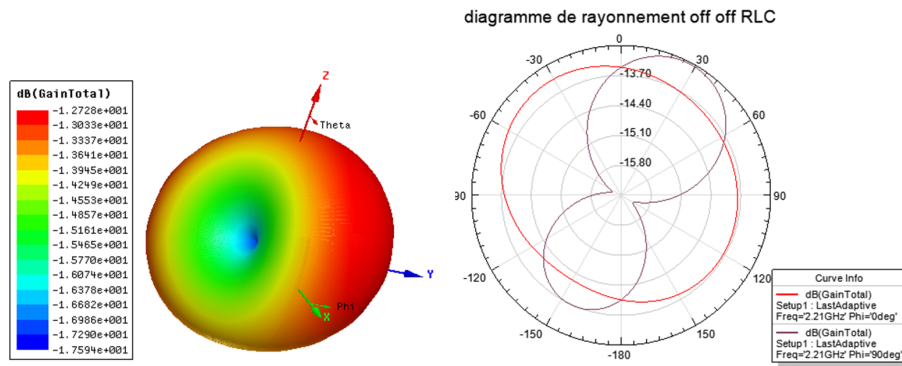
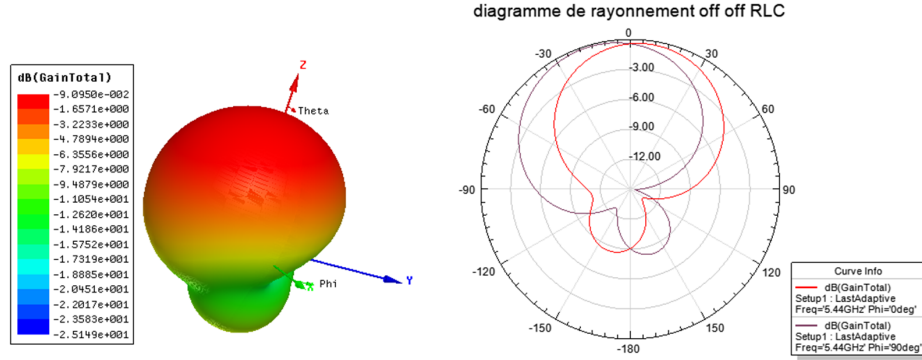


FIGURE 3.14 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l’antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF (modèle circuit équivalent).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.15 présente le gain total en dB de l’antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-OFF. L’antenne présente un diagramme omnidirectionnel du gain max de -12.7dB et 0.09dB pour les fréquences 2.21GHz et 5.44GHz respectivement.



(a)



(b)

FIGURE 3.15 – Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l'antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.21GHz et b.5.44GHz dans le cas OFF-OFF (cas circuit équivalent).

### b. Cas OFF-ON

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.16 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON. L'antenne présente une fréquence :

- Pour la simulation sous HFSS : une première à 2.14 GHz pour un niveau d'adaptation -13.31dB et une autre à 6.19 GHz pour un coefficient de réflexion de -31.06 dB.
- Pour la simulation sous CST : une première à 2.11 GHz pour un niveau d'adaptation -18.49dB et une autre à 5.95 GHz pour un coefficient de réflexion de -35.33 dB.
- Pour la mesure : une résonance à la fréquence 5.75 GHz avec coefficient de réflexion -13.13dB.

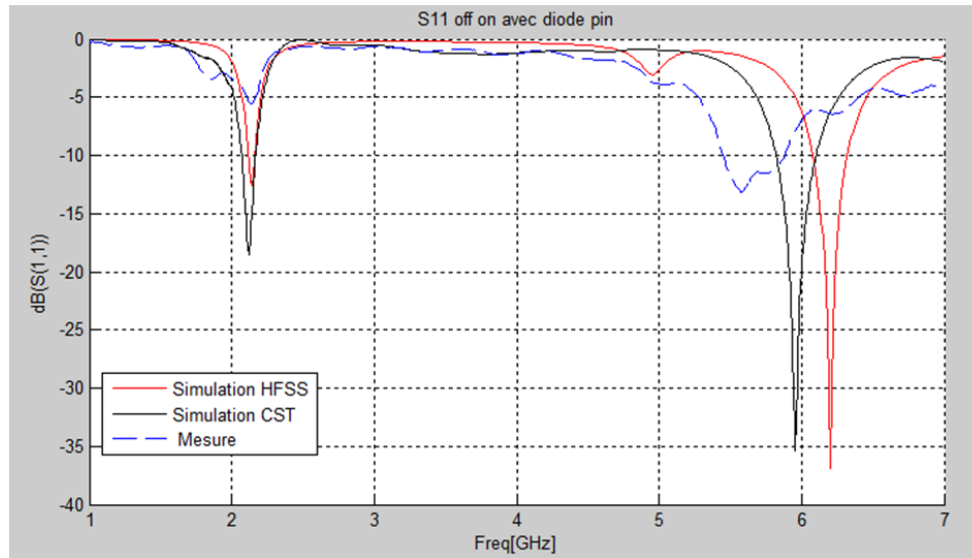
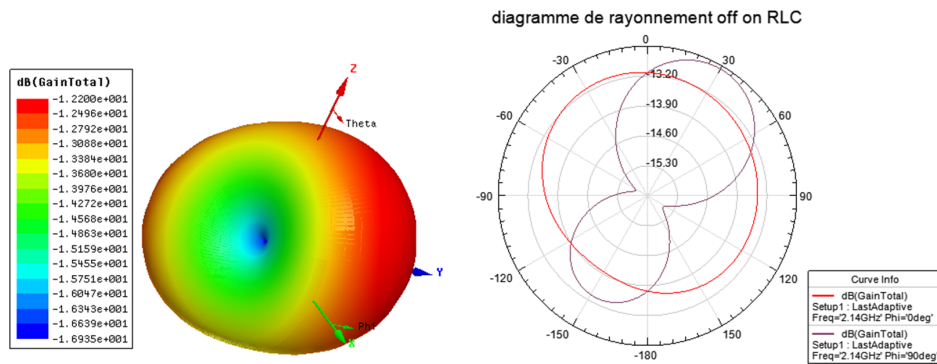


FIGURE 3.16 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l’antenne PIFA reconfigurable dans le cas OFF-ON (modèle circuit équivalent).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.17 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l’antenne PIFA reconfigurable dans l’état OFF-ON. L’antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d’un gain maximal de -12.2dB, -1.32dB pour les deux fréquences de résonance respectivement.



(a)



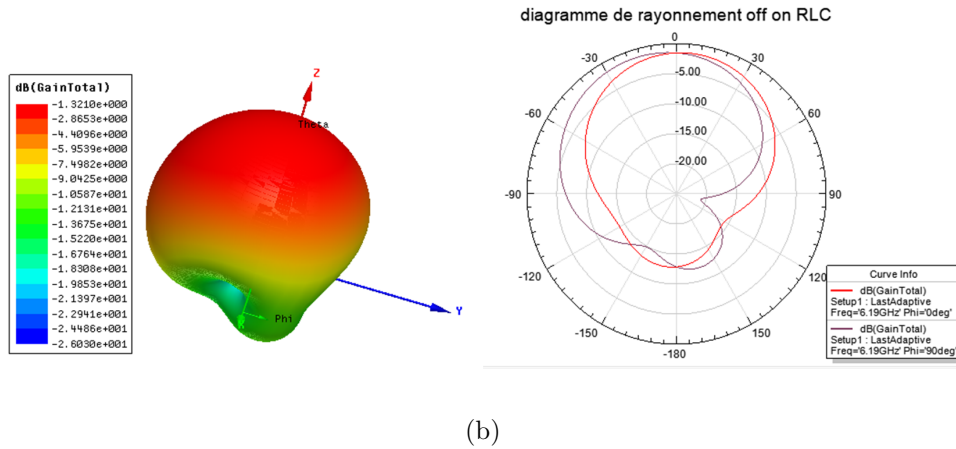


FIGURE 3.17 – Diagramme de rayonnement en 3D (gauche), 2D(droite) de l'antenne PIFA reconfigurable dans la fréquence a. 2.14GHz et b.6.19GHz dans le cas OFF-ON (cas circuit équivalent).

a. Cas ON-OFF

**Coefficient de réflexion.** La figure 3.18 présente le coefficient de réflexion simulé et mesuré dans le cas ON-OFF. L'antenne présente une fréquence de résonance à 2.17GHz, 2.18GHz et à 2.16GHz pour HFSS, CST et mesure respectivement.

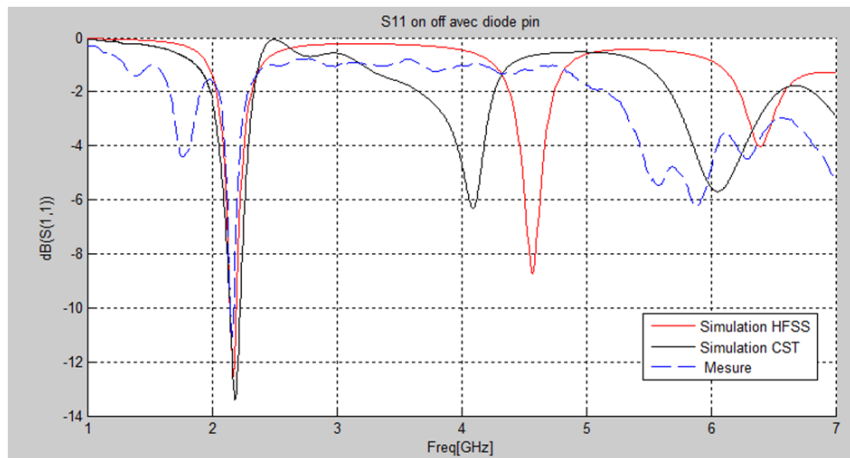


FIGURE 3.18 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-OFF (modèle circuit équivalent).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.19 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne PIFA reconfigurable dans l'état ON-OFF à la fréquence 2.17GHz. L'antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d'un gain maximal de -12.4dB.

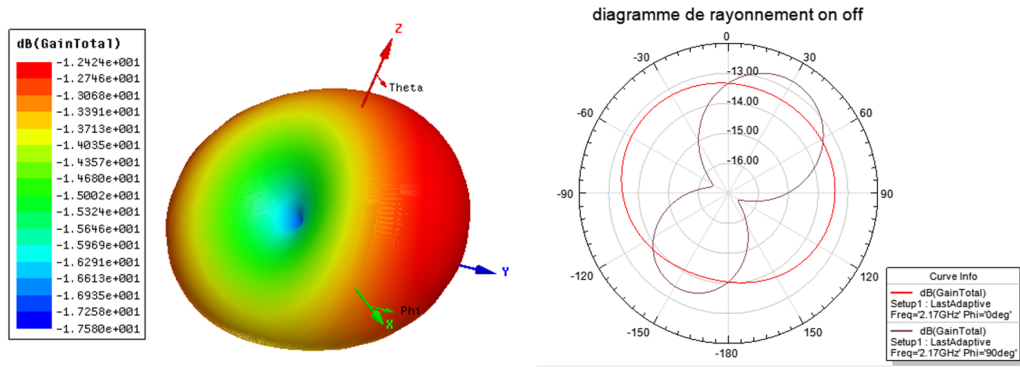


FIGURE 3.19 – Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.17GHz (Etat ON-OFF).

**a. Cas ON-ON**

**Coefficient de réflexion.** Dans le cas ON-ON. L'antenne présente une fréquence de résonance à 2.1GHz (-10.63dB), 2.05GHz (-14.15dB) et 2.16GHz (-11.06dB) pour HFSS, CST et mesures respectivement (Figure 3.20).

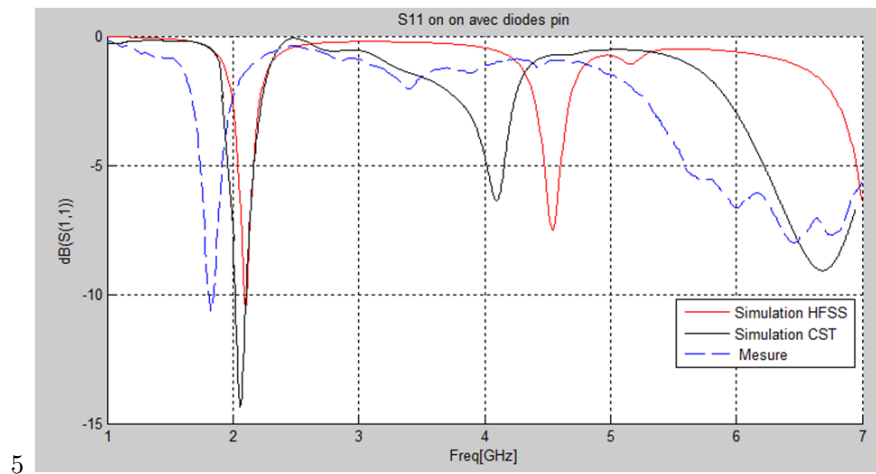


FIGURE 3.20 – Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne PIFA reconfigurable dans le cas ON-ON (modèle circuit équivalent).

**Diagramme de rayonnement.** La figure 3.21 présente le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D de l'antenne PIFA reconfigurable dans l'état ON-ON à la fréquence 2.1GHz. L'antenne présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel d'un gain maximal de -12.35dB.

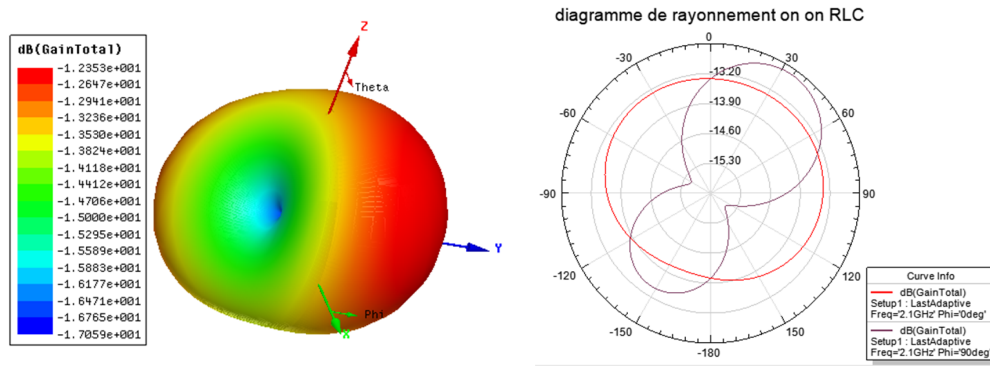


FIGURE 3.21 – Diagramme de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne PIFA reconfigurable à la fréquence 2.1GHz (Etat ON-ON).

### 3.2.4 Comparaison

Le tableau suivant résume les résultats précédents. Nous pouvons dire que les résultats obtenus par la simulation HFSS et CST sont en accord mais pour les résultats de mesure, on remarque que la fréquence au tour de 2.1GHz est perdue pour l'état OFF-ON, et qu'on a une fréquence de résonance décalée des autres à 5.57GHz. Pour l'état ON-OFF la fréquence de résonance est pratiquement la même dans les 3 cas. Pour ce qui est de l'état ON-ON ; la fréquence est quasiment la même entre la simulation HFSS et CST mais elle est un peu décalée avec celle de la mesure.

TABLE 3.1 – Fréquence de résonance (HFSS, CST, Mesure) de l'antenne reconfigurable avec diode pin.

	<b>OFF-OFF</b>	<b>OFF-ON</b>	<b>ON-OFF</b>	<b>ON-ON</b>
Mesure	-2.21GHz(12.2dB)	/	2.16GHz(-11.06dB)	1.83GHz(-10.63dB)
	5.34GHz(-18.53dB)	5.57(-13.13dB)	/	/
HFSS	2.21GHz(-15.30dB)	2.14GHz(-13.31dB)	2.17GHz(-12.53dB)	2.1GHz(-10.63dB)
	5.44GHz(-14.83dB)	6.19GHz(-31.06dB)	/	/
CST	2.24GHz(-12.14dB)	2.11GHz(-12.14dB)	2.18GHz(-13.40dB)	2.05GHz(-14.15dB)
	5.51GHz(-30.82dB)	5.95GHz(-35.33dB)	/	/

### 3.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la réalisation de l'antenne proposée a été effectuée, et les mesures ont été faites dans le cas idéal et le cas de circuit équivalent. Nous avons pu voir les résultats de mesures de notre réalisation et les comparer avec les résultats de simulation HFSS et CST. Ces résultats nous ont montré qu'une reconfiguration en fréquence a pu être effectuée en utilisant une plaque métallique d'une part et en utilisant des diodes pin d'une autre part. On peut dire que l'antenne a été fabriquée avec succès et que les performances de l'antenne mesurées sont en bon accord avec celles de la simulation.

# Conclusion générale

Durant notre études nous avons comme objectif de faire la conception et la réalisation d'une antenne PIFA Bi bandes reconfigurable en fréquence avec la technique des diodes pin.

Nous avons commencé par donner des généralités sur les antennes reconfigurables, l'intérêt de leurs utilisations, les avantages et les inconvénients qu'elles présentent. Nous avons également parlé des techniques de reconfigurations ( électrique, optique, mécanique , matériaux agiles ), des différents dispositifs de commutation en se basant sur la diode Pin , et de la classifications des antennes reconfigurable ( en fréquence, en polarisation et en diagramme de rayonnement ).

Ensuite, nous avons fait la conception d'une antenne Pifa Bi bandes rectangulaire avec une des fréquences à 5.8GHz en utilisant le logiciel HFSS. On a commencé par faire une étude paramétrique détaillée en 5 étapes ou nous avons pu voir l'effet de chaque paramètre sur les caractéristiques de l'antenne. Ce qui nous a permis d'obtenir notre antenne Pifa Bi bandes final.

Après avoir obtenu notre antenne finale, nous somme passer a la reconfiguration simulée et mesurée de notre antenne en utilisant des diodes pin. Nous a commencés par modéliser les diodes pin par un carré métallique pour représenter le cas idéal on a comparé les résultats obtenu sur HFSS et ceux de la mesure et on a pu observer qu'on a réussi à avoir une reconfiguration en fréquence. Puis on a modélisé les diodes pin par deux diodes pin de type bar6402v. Nous avons fait une comparaison des simulations sur HFSS et sur CST avec ceux de la mesure et la aussi la reconfiguration a été réalisée.

L'objectif de notre étude est réalisé, on a pu démontrer qu'il était possible de faire la reconfiguration en fréquence d'une antenne Pifa en utilisant des diodes pin dans la simulation comme dans la réalisation.

Dans ce travail, plusieurs aspects liés aux antennes reconfigurables ont été

adressés. Cependant, les perspectives de recherche liées à ce travail sont nombreuses :

- Il serait intéressant d'appliquer autres techniques pour avoir une reconfigurabilité d'antenne.
- Il serait intéressant de modifier le prototype pour avoir une reconfigurabilité hybride (reconfigurabilité en fréquence et en diagramme de rayonnement).
- Il serait intéressant de modifier la structure pour avoir une reconfigurabilité pour autres fréquences pour plus applications.

# Bibliographie

[1] C. A.BALANIS, « Modern Antenna Handbook », JOHN WILEY & SONS, Canada, 2008.

[2] H.Medkour, « Reconfigurable antenna », Thèse de doctorat, Faculté de technologie université Ferhat abbas, Setif, 2019.

[3] K. Boufeldja «Modélisation et Synthèse de réseaux périodiques et non Périodiques d’antennes microrubans par l’application d’un Algorithme Génétique-Flou», Thèse de doctorat, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr, Tlemcen, 2011.

[4] Z.Safa, Z.Lahbib, « Simulation of a Rectangular Patch Antenna », Journal International « Computer Science and Information Technology & Security», vol. 2, no. 1, pp. 2249-9555, 2012.

[5] S.Hage-Ali « Antennes et dispositifs hyperfréquences millimétriques ultrasouples reconfigurables a base de Microsystèmes Magnéto-Electro-Mécaniques (MMEMS) : Conception, réalisation, mesures », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.

[6] J. T. Bernhard, “Reconfigurable Antennas,” Synthesis Lectures on Antennas, vol. 2, pp. 1–66, 18, 20, 21 janvier 2007.

[7] N.O.Parchin, H.J.Basherlou , I.A.Al-Yasir , A.M.Abdulkhaleq ,R.A.Abd-Alhameed, « Reconfigurable Antennas : Switching Techniques— A Survey », Electronics review MDPI , suisse, 15 Fevrier 2020.

[8] S.Pendharker, R.K.Shevgaonkar, A.N.Chandorkar, « Optically controlled frequency-reconfigurable microstrip antenna with low photoconductivity », IEEE Antennas Wireless Propagation , Lettonie, 2014, 13, 99–102.

[9]V.Sathi, N.Ehtheshami, J. Nourinia, « Optically tuned frequency reconfigurable microstrip antenna », IEEE Antennas Wireless Propagation, Lettonie, 2012, 11, 1018–1020.

[10] P.J.Liu, D.S.Zhao, B.Z.Wang, « Design of optically controlled microwave switch for reconfigurable antenna systems ». conférence internationale « Microwave and Millimeter Wave Technology », Guilin, Chine, 18–21 avril 2007 ; pp. 1–4.

[11] P.Alizadeh, A.S.Andy, C.Parini, K.Z.Rajab, « A reconfigurable reflectarray antenna in Ka-band using optically excited silicon » conférence internationale « Antennas and Propagation, Davos »,Suisse,10–15 Avril 2016 ; pp. 1–5.

[12] Y.Tawk, A.R.Albrecht, S.Hemmady, G.Balakrishnan, C.G.Christodoulou, « Optically pumped frequency reconfigurable antenna design », IEEE Antennas Wireless Propagation, Lettonie. 2010, 9, 280–283.

[13] D.Patron, A.S.Daryoush, K.R.Dandekar, « Optical control of reconfigurable antennas and application to a novel pattern reconfigurable planar design », journal Lightwave Technology 2014, 32, 3394–3402.

[14] Y.Tawk, J.Costantine, F.Ayoub, C.Christodoulou, D.Doyle, S.A.Lane, « Physically reconfigurable antennas : Concepts and automation » Symposium International IEEE « Antennas and Propagation » et USNC/URSI radio nationale



meeting scientifique, San Diego, CA, état unis, 9–14 Juillet 2017 ; pp. 419–420.

[15] W.Wang, G.Zong, B.F. Zhuang, Y. ;Zhang, « Mechanically reconfigurable antenna based on novel metasurface for frequency tuning-range improvement » conférence internationale IEEE « Microwave and Millimeter Wave Technology », Beijing, Chine, 5–8 Juin 2016 ; pp. 629–631.

[16] P.Liu, S.Yang, X.Wang, M.Yang, J.Song, L.Dong, « Directivity reconfigurable wideband two-arm spiral antenna »,IEEE Antennas Wireless. Propagation, Lettonie. 2016, 16, pp. 66–69.

[17] K.Aljonubi, A.O.AlAmoudj, R.J.Langle, I.Reane, « Reconfigurable antenna using smart material » 7ème conférence européenne« Antennas and Propagation », Gothenburg, Suède, 8–12 Avril 2013.

[18] T.S.Teeslink, D.Torres, J.L.Ebel, N.Sepulveda, D.E.Anagnostou, « Reconfigurable bowtie antenna using metal-insulator transition in vanadium dioxide », IEEE Antennas Wireless. Propagation Lettonie. 2015, 14, pp. 1381–1384.

[19] G.B.Zhang, R.C Gough, M.R.Moorefield, K.J.Cho, A.T.Ohta, W.A Shiroshima, « A liquid-metal polarization-pattern-reconfigurable dipole antenna », IEEE Antennas Wireless. Propagation. Lettonie. 2018, 17, 50–53.

[20] N. Kingsley, « Comparative study of analytical and simulated doubly-supported RF MEMS switches for mechanical and electrical performance » Journal « MicroElectroMechanical Systems, VOL. 16, NO. 5, Octobtre 2007.

[21] H.Nachouane, « Contribution à la conception et à la réalisation d’antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération », Thèse de doctorat, Institut National des Postes et Télécommunications , Alger, 2017.

[22] C.Amel, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN », Master, Faculté de Technologie, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2018.

[23] M.Mtimat, « Conception et réalisation de circuits de micro-ondes a contrôle linéaire », Maitrise en génie électrique, Ecole de Technologie Supérieure Université du QUÉBEC, Canada, 2003.

[24] M.Nouiri, Z.Terki, « Conception d'une Antenne Microruban Reconfigurable à base de Diode PIN et des Structures EBG », Master, Université Mohamed Boufiaf, Msila, 2019.

## Résumé :

Les antennes reconfigurables offrent de multiples fonctions en modifiant dynamiquement leurs caractéristiques (telles que la fréquence de résonance, la polarisation, le diagramme de rayonnement ou toute combinaison de ces trois paramètres). Leur agilité et leur diversité créent de nouvelles possibilités d'application pour les systèmes radio (tels que les réseaux locaux, les liaisons satellites et surtout la radio cognitive). Dans ce mémoire, nous avons fait la conception et la réalisation d'une antenne Pifa reconfigurable en fréquence en utilisant deux diodes pin , nous avons commencé par faire la conception de l'antenne en faisant une étude paramétrique détaillée en utilisant le logiciel HFSS, puis on est passé à la simulation des diodes pin dans le cas idéal et dans le cas du circuit équivalent RLC. Après ça on est passé à la réalisation dans les deux. La reconfiguration en fréquence de l'antenne a été réalisée tout en conservant la polarisation et le diagramme de rayonnement.

**Mots clés :** antenne PIFA reconfigurable - diodes PIN - HFSS – simulation-réalisation.

## Abstract :

Reconfigurable antennas offer multiple functions by dynamically changing their characteristics (such as resonant frequency, polarization, radiation pattern, or any combination of these three parameters). Their agility and diversity create new application possibilities for radio systems (such as local networks, satellite links and above all cognitive radio). In this work, we designed and made a frequency reconfigurable Pifa antenna using two pin diodes, we started by designing the antenna by doing a detailed parametric study using HFSS software, then we simulated the pin diodes in the ideal case and in the case of the equivalent RLC circuit. After that we made the realisation of the antenna in both cases. The frequency reconfiguration of the antenna was carried out while maintaining the polarization and the radiation pattern.

**Keywords:** reconfigurable PIFA antenna - PIN diodes - HFSS - simulation-realization.

## الملخص:

تقدم الهوائيات القابلة للتشكيل وظائف متعددة عن طريق تغيير خصائصها ديناميكياً (مثل تبديل الترددات أو الاستقطاب أو نمط الإشعاع أو أي مزيج من هذه الصفات الثلاثة). يخلق تنوعها إمكانيات تطبيق جديدة للأنظمة الراديوية (مثل الشبكات المحلية ووصلات الأقمار الصناعية وقبل كل شيء الراديوية المعرفي). في هذا العمل ، قمنا بتصميم ثم إنشاء هوائي PIFA قابل للتشكيل باستخدام صمامين ثنائيين ، بدأنا بتصميم الهوائي عن طريق إجراء دراسة مفصلة باستخدام برنامج HFSS. انتقلنا إلى محاكاة الصمامات الثنائية في الحالة المثالية وفي حالة الدارة المكافئة RLC. بعد ذلك انتقلنا إلى الإنشاء في كل من الحالتين. لقد تم إجراء إعادة تشكيل الهوائي بتبديل الترددات مع الحفاظ على الاستقطاب و نمط الإشعاع.

**الكلمات المفتاحية:** الهوائيات PIFA القابلة للتشكيل- صمام ثنائي -HFSS- محاكاة- إنشاء.