

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Universite Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib



Faculté : Sciences et technologie  
Departement : Electronique et  
Télécommunications  
Laboratoire : Structures intelligentes



## THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Télécommunications

**Spécialité** : Système de Télécommunications

**Par** : MOHAMMED BELHADJ KHOULOU

### Intitulé

**Conception, optimisation et réalisation de nouvelles antennes micro ruban intelligentes miniatures reconfigurables pour les réseaux mobiles**

Soutenue publiquement, le 09 / 07 / 2025, devant le jury composé de :

| Nom & Prénom(s)         | Grade | Qualité       | Etablissement de rattachement   |
|-------------------------|-------|---------------|---|
| Dr Sekkal Mansouria     | MCA   | Présidente    | Université d'Ain Temouchent Belhadj Bouchaib  |
| Dr Benosman Hayat       | MCA   | Examinatrice  | Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen  |
| Dr Bousalah Fayza       | MCA   | Examinatrice  | Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen  |
| Dr Moulessehoul Wassila | MCA   | Examinatrice  | Université d'Ain Temouchent Belhadj Bouchaib  |
| Dr Ferouani Souheyla    | MCA   | Rapporteur    | Université d'Ain Temouchent Belhadj Bouchaib  |
| Dr Ziani Kerarti Djalal | MCA   | Co-rapporteur | Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications et des Technologies de l'Information et de la Communication (ENSTTIC) |
| Dr Debbal Mohammed      | MCA   | Invité        | Université d'Ain Temouchent Belhadj Bouchaib  |

## **DÉDICACES**

*Je dédie ce modeste travail*

*À mon très cher père, que j'aurais aimé avoir parmi nous, mais le Bon Dieu en a décidé autrement.*

*«ALLah Yarahmo»*

*À ma très chère mère, qui m'a toujours encouragée, soutenue dans mes études et aidée par tous les moyens dont elle disposait.*

*À mon époux RAFIK, pour son encouragement, son soutien, sa confiance envers moi et sa patience durant toutes ces années. Sans oublier mes deux anges, Aridj et Chahine, que Dieu protège.*

*À mon très cher frère Chihab.*

*A mes beaux-parents pour leurs encouragements et leur soutien moral tout au long de ce travail.*

*À la mémoire de ma très chère sœur Ahlem.*

*À ma famille.*

*À tous ceux qui m'ont soutenu et cru en moi.*

# Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma gratitude envers **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour Ses bénédictions, la force et le courage qu'Il m'a donnés pour accomplir ce travail. Grâce à Lui, j'ai pu surmonter les défis et terminer ma thèse.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement ma directrice de thèse, **Dr. FEROUANI Souheyla**, pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés et sa confiance tout au long de cette aventure. Sa rigueur scientifique et son soutien constant m'ont permis de surmonter les difficultés rencontrées et de mener ce projet à bien. Sa disponibilité et sa patience ont été des sources d'inspiration pour moi.

Je souhaite également remercier mon co-directeur, **Dr. Ziani Kerarti Djalal**, pour ses remarques pertinentes et son soutien tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Madame **SEKKAL Mansouria**, maître de conférences de classe « A » à l'université d'Aïn Témouchent, pour avoir accepté d'assurer la présidence de mon jury de mémoire. Je lui suis profondément reconnaissant pour sa disponibilité et son attention.

Mes vifs remerciements s'adressent également à mes examinatrices, Madame **MOULESSEHOUL Wassila**, maître de conférences de classe « A » à l'université de Aïn Témouchent, Madame **BENOSMAN Hayat**, maître de conférences de classe « A » à l'université de Tlemcen, et Madame **BOUSALAH Fayza**, maître de conférences de classe « A » à l'université de Tlemcen ainsi qu'à Monsieur **Debbal Mohammed**, maître de conférences de classe « A » à l'université de Aïn Témouchent, pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de mon travail de recherche et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Leurs remarques et observations ont grandement contribué à améliorer la qualité de ce projet.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma merveilleuse mère, pour ses prières, son aide sous toutes ses formes, et pour avoir cru en moi malgré toutes les difficultés. Tu as toujours été à mes côtés, merci infiniment **maman**. Je remercie également mon compagnon de vie, dont le soutien et la compréhension m'ont été précieux tout au long de ce projet, que je lui dédie en signe d'affection

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis qui ont été présents pour me soutenir moralement tout au long de ces années de travail.

# Résumé

Cette thèse porte sur la conception, l'optimisation et la réalisation d'antennes micro-ruban intelligentes miniatures reconfigurables adaptées aux technologies sans fil modernes telles que la 5G, le Wi-Fi 6 et l'Internet des objets (IoT). Deux types d'antennes reconfigurables en fréquence ont été développés : une antenne imprimée rectangulaire, offrant une couverture fiable à 3,53 GHz et 5,0 GHz pour les applications 5G et Wi-Fi 6, et une antenne patch pentagonale, couvrant une large gamme de fréquences (2,438 GHz à 7,805 GHz) adaptée à des usages variés comme le Wi-Fi, LTE, radar, satellite et IoT.

L'étude s'est également concentrée sur les antennes Yagi reconfigurables en diagramme de rayonnement à l'aide de diodes PIN. L'antenne Yagi à un élément génère un diagramme de rayonnement en mode **ON** et s'éteint en mode **OFF**, tandis que l'antenne Yagi à deux éléments, avec trois modes distincts (**ON-ON**, **ON-OFF**, **OFF-ON**), permet une adaptation efficace du rayonnement pour les technologies WiMAX et 5G.

Les résultats démontrent que ces antennes reconfigurables optimisent l'utilisation du spectre tout en améliorant la couverture et la qualité du signal. Elles représentent des solutions performantes et flexibles pour les télécommunications modernes, contribuant à des réseaux plus efficaces et adaptés aux besoins d'un environnement connecté en constante évolution.

**Mots clés :** Antenne reconfigurable, Antenne imprimée, Diode PIN, Réseau d'antennes, S11, Diagramme de rayonnement.

# Abstract

This thesis focuses on the design, optimization, and development of intelligent, miniature, and reconfigurable microstrip antennas tailored for modern wireless technologies such as 5G, Wi-Fi 6, and the Internet of Things (IoT). Two types of frequency-reconfigurable antennas were developed: a rectangular printed antenna, providing reliable coverage at 3.53 GHz and 5.0 GHz for 5G and Wi-Fi 6 applications, and a pentagonal patch antenna, covering a wide frequency range (2.438 GHz to 7.805 GHz) suitable for various applications, including Wi-Fi, LTE, radar, satellite, and IoT.

The study also focused on Yagi antennas with reconfigurable radiation patterns using PIN diodes. The single-element Yagi antenna generates a radiation pattern in the **ON** mode and is inactive in the **OFF** mode. The two-element Yagi antenna, with three distinct modes (**ON-ON**, **ON-OFF**, **OFF-ON**), enables effective beam reconfiguration for WiMAX, and 5G technologies.

The results demonstrate that these reconfigurable antennas optimize spectrum utilization while improving signal coverage and quality. They provide efficient and flexible solutions for modern telecommunications, contributing to more effective networks adapted to the evolving needs of a connected environment.

**Key words:** Reconfigurable antenna, Printed antenna, PIN diode, Antenna arrays, S11, Radiation pattern.

## ملخص

تركز هذه الأطروحة على تصميم، تحسين، وتنفيذ هوائيات ميكروشرطية ذكية، صغيرة الحجم وقابلة لإعادة التشكيل، مخصصة للتقنيات اللاسلكية الحديثة مثل الجيل الخامس (5G) ، والواي فاي 6 (Wi-Fi 6) ، وإنترنت الأشياء (IoT). تم تطوير نوعين من الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل في التردد: هوائي مطبوع مستطيل يوفر تغطية موثوقة عند 3.53 جيجاهرتز و5.0 جيجاهرتز لتطبيقات الجيل الخامس والواي فاي 6، وهوائي رقعة خماسي الشكل يغطي نطاقاً واسعاً من الترددات (2.438 جيجاهرتز إلى 7.805 جيجاهرتز)، مما يجعله مناسباً لمجموعة متنوعة من التطبيقات مثل الواي فاي، LTE، الرادار، الاتصالات عبر الأقمار الصناعية وإنترنت الأشياء.

ركزت الدراسة أيضاً على هوائيات "ياغي" القابلة لإعادة تشكيل نمط الإشعاع باستخدام صمامات PIN. وقد أظهر هوائي "ياغي" ذو العنصر الواحد أنه يولد نمط إشعاع في وضع التشغيل (ON) ويتوقف عن العمل في وضع الإيقاف (OFF) أما هوائي "ياغي" ذو العنصرين، فقد أتاح ثلاثة أوضاع مميزة (ON-ON) ، (ON-OFF) ، (OFF-ON) تمكن من إعادة تشكيل الإشعاع بشكل فعال لتلبية احتياجات تقنيات WiMAX ، والجيل الخامس.

تُظهر النتائج أن هذه الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل تعمل على تحسين استخدام الطيف مع تحسين تغطية الإشارة وجودتها. كما تقدم حلولاً فعالة ومرنة لأنظمة الاتصالات الحديثة، مما يساهم في إنشاء شبكات أكثر كفاءة تتكيف مع الاحتياجات المتغيرة لبيئة متصلة باستمرار.

**الكلمات المفتاحية:** هوائي قابل لإعادة التشكيل، هوائي مطبوع، ديود PIN ، مصفوفة هوائيات، S11، مخطط الإشعاع

# Table des matières

|  |     |
|--|-----|
| Remerciements.....   | ii  |
| Résumé.....  | iii |
| Abstract.....  | iv  |
| ملخص.....  | v   |
| Table des matières.....  | vi  |
| Table des Figures.....   | x   |
| Liste des Tableaux.....  | xiv |
| Liste des symboles et des abréviations.....                              | xv  |
| Introduction Générale.....   | 1   |
| I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES.....                                | 5   |
| I.1 Introduction.....  | 5   |
| I.2 Définition d'une antenne reconfigurable.....                         | 5   |
| I.3 Principe de fonctionnement des antennes reconfigurables.....         | 6   |
| I.3.1 Structure d'une antenne patch imprimée.....                        | 6   |
| I.3.2 La reconfigurabilité.....  | 7   |
| I.3.2.1 Diode PIN.....   | 8   |
| I.3.2.2 Diode Varicap.....   | 9   |
| I.3.2.3 MEMS.....  | 9   |
| I.3.2.4 Commutateur optique.....   | 10  |
| I.3.2.5 Matériaux adaptatifs.....  | 10  |
| I.3.2.6 Modification mécanique.....                                      | 11  |
| I.4 Classification des antennes reconfigurables.....                     | 11  |
| I.4.1 Les antenne reconfigurable en fréquence.....                       | 11  |
| I.4.2 Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement.....      | 21  |
| I.4.3 Les antennes reconfigurables en polarisation.....                  | 28  |
| I.5 Les avantages et les inconvénients des antennes reconfigurables..... | 35  |
| I.5.1 Avantages.....   | 35  |

|   |    |
|---|----|
| I.5.2 Inconvénients.....  | 36 |
| I.6 Les défis rencontrés .....  | 37 |
| I.7 Conclusion.....   | 37 |
| II APPLICATIONS DES ANTENNES RECONFIGURABLES .....  | 39 |
| II.1 Introduction .....   | 39 |
| II.2 Applications des antennes reconfigurables .....  | 39 |
| II.2.1 Réseau sans Fil (Wireless Networks).....   | 40 |
| II.2.2 Type des réseaux sans fil.....   | 40 |
| II.2.2.1 La technologie WI-FI .....   | 40 |
| II.2.2.2 Bluetooth .....  | 41 |
| II.2.2.3 ZigBee et LoRaWAN .....  | 41 |
| II.2.2.4 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).....   | 41 |
| • Classification des standards WiMAX.....   | 42 |
| a) WiMAX fixe (IEEE 802.16-2004) .....  | 42 |
| b) WiMAX mobile (IEEE 802.16e).....   | 42 |
| II.2.3 Les réseaux mobiles.....   | 42 |
| II.2.3.1 Évolution des réseaux mobiles .....  | 42 |
| II.2.3.2 Caractéristiques et importance de la bande de 3,5 GHz dans le spectre de la 5G .....                           | 43 |
| II.2.4 Lien avec les antennes reconfigurables .....   | 44 |
| II.2.4.1 La gestion de la congestion dans les réseaux mobiles.....  | 44 |
| II.2.4.2 L'optimisation de la couverture dans les réseaux sans fil.....   | 45 |
| II.2.4.3 L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les dispositifs IoT.....                                       | 45 |
| II.2.4.4 L'adaptation des antennes aux différentes normes de communication (Wi-Fi, 5G, etc.).....                       | 46 |
| II.3 Conclusion.....  | 46 |
| III ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN FREQUENCE.....  | 49 |
| III.1 Introduction .....  | 49 |
| III.2 Conception des antennes reconfigurables en fréquence .....  | 49 |
| III.3 Caractéristiques des diodes PIN BAR 63/64.....  | 50 |
| III.4 Conception d'une antenne imprimée rectangulaire reconfigurable en fréquence pour la technologie 5G et WIFI 6..... | 50 |
| III.4.1 Géométrie de l'antenne patch initial .....  | 50 |
| III.4.2 Résultats de simulation.....  | 52 |

|   |    |
|---|----|
| III.4.2.1 Le paramètre $ S_{11} $ .....   | 52 |
| III.4.2.2 Le diagramme de rayonnement.....  | 54 |
| III.4.2.3 Le gain.....  | 55 |
| III.5 Prototype et mesure de l'antenne patch rectangulaire.....   | 55 |
| III.6 Conception de l'antenne patch reconfigurable.....   | 56 |
| III.6.1 Résultats de simulations .....  | 57 |
| III.6.1.1 Paramètre $S_{11}$ .....  | 57 |
| III.6.1.2 Diagramme de rayonnement.....   | 57 |
| III.7 Conception d'une antenne patch pentagone reconfigurable en fréquences pour des applications sans fil et mobile..... | 59 |
| III.7.1 L'antenne pentagone proposée.....   | 59 |
| III.7.1.1 Les résultats de simulation de l'antenne initiale .....   | 60 |
| III.7.1.1.1 Paramètre $S_{11}$ .....  | 60 |
| III.7.1.1.2 Diagramme de rayonnement.....   | 62 |
| III.7.1.1.3 Gain.....   | 62 |
| III.7.2 Prototype et mesure de l'antenne patch pentagone proposé .....  | 63 |
| III.7.3 Antenne pentagone reconfigurable en fréquence.....  | 63 |
| III.7.3.1 Résultats de simulation en paramètre $S_{11}$ .....   | 64 |
| III.7.3.2 Résultats de simulation en diagramme de rayonnement.....  | 66 |
| III.7.3.3 Résultats de simulation en gain .....   | 71 |
| III.7.3.4 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux publiés .....                        | 72 |
| III.8 Conclusion.....   | 72 |
| IV ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT .....   | 75 |
| IV.1 Introduction.....  | 75 |
| IV.2 Conception des antennes reconfigurables diagramme de rayonnement.....  | 75 |
| IV.3 Caractéristiques des diodes PIN 1N4923.....  | 76 |
| IV.4 Analyse et mesure d'une antenne YAGI initiale .....  | 76 |
| IV.4.1 Conception de l'antenne YAGI.....  | 77 |
| IV.4.2 Mesure des paramètres d'adaptation .....   | 78 |
| IV.4.3 Le coefficient de réflexion $ S_{11} $ .....   | 78 |
| IV.4.4 Le diagramme de rayonnement .....  | 81 |
| IV.5 La reconfigurabilité en diagramme de rayonnement de l'antenne YAGI.....  | 82 |

|   |     |
|---|-----|
| IV.5.1 Reconfigurabilité d'une antenne Yagi unique.....   | 82  |
| IV.5.1.1 Résultat de simulation en coefficient de réflexion S11 .....   | 83  |
| IV.5.1.2 Résultat de simulation en Diagramme de rayonnement.....  | 84  |
| IV.5.2 Reconfigurabilité de l'antenne Yagi à un deux éléments.....  | 85  |
| IV.5.2.1 Résultats de simulation avec deux diodes PIN 1N4923.....   | 86  |
| Les figures IV.13, IV.14 et IV.15 illustrent les résultats de simulation obtenus en diagramme de rayonnement en utilisant la diode PIN 1N4923 du tableau IV.3. .... | 86  |
| IV.5.2.2 Résultats de simulation avec deux diodes PIN Schottky.....   | 87  |
| IV.5.2.3 Résultats de simulation avec deux diodes PIN BAR63/64-06.....  | 89  |
| a) PIN BAR 63-06.....   | 89  |
| ➤ Discussion des résultats.....   | 91  |
| b) PIN BAR 64-06.....   | 92  |
| ➤ Discussion des résultats.....   | 94  |
| IV.6 Comparaison des résultats avec les travaux de recherche.....   | 95  |
| IV.7 La miniaturisation de l'antenne Yagi à deux éléments .....   | 95  |
| IV.8 La reconfigurabilité de l'antenne Yagi miniature à deux éléments .....   | 98  |
| IV.9 Conclusion .....   | 100 |
| Conclusion Générale et Perspectives.....  | 102 |
| Bibliographie.....  | 104 |

# Table des Figures

## Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Antenne imprimée de forme rectangulaire .....  | 7  |
| Figure I.2 : Diverses méthodes ont été utilisées pour créer des antennes reconfigurables .....  | 8  |
| Figure I.3: Le circuit identique d'une diode dans les états ON et OFF .....   | 9  |
| Figure I.4: Le symbole et le circuit équivalent d'une diode varicap .....   | 9  |
| Figure I.5: Commutateur MEMES RF .....  | 10 |
| Figure I.6: Structure d'une antenne patch à fentes rectangulaires en micro ruban reconfigurable .....   | 12 |
| Figure I.7: Prototype de l'antenne.(a)L'antenne reconfigurable avec commutateurs est en mode OFF.(b)L'antenne reconfigurable avec commutateurs est en mode ON .....                                 | 12 |
| Figure I.8: (a) Conception reconfigurable de l'antenne (vue de dessus),(b) Vue en coupe .....   | 13 |
| Figure I.9: Structures fabriquées (a) lorsque les diodes (D1 et D2) sont à l'état bloqué (b) lorsqu'une diode (D1) est à l'état passant (c) lorsque les diodes (D1 & D2) sont à l'état passant..... | 13 |
| Figure I.10: Géométrie de l'antenne de l'antenne proposée: (a) antenne de référence; (b) antenne reconfigurable en fréquence .....  | 14 |
| Figure I.11: Les structures prototypées: (a) Mode M1; (b) Mode M2 ; (c)Mode M3; (d) Mode M4 .....   | 14 |
| Figure I.12: La structure de l'antenne patch circulaire en micro ruban reconfigurable proposée (vue de face).....   | 15 |
| Figure I.13: Conception d'une antenne reconfigurable avec différentes vues géométriques en formes de F (a) avant ; (b) côté; (c)arrière.....  | 15 |
| Figure I.14: Antenne monopôle fabriquée en forme de F:(a) vue de dessus, (b) vue arrière .....  | 16 |
| Figure I.15: Antenne patch circulaire reconfigurable .....  | 16 |
| Figure I.16: Structure d'antenne reconfigurable.....  | 17 |
| Figure I.17: Représentation symbolique des différents cas de l'antenne reconfigurable proposée .....  | 17 |
| Figure I.18: Géométrie de l'antenne reconfigurable proposée.....  | 18 |
| Figure I.19: Dimensions de l'antenne proposée (a) Vue de dessus (b) Vue de coté.....  | 18 |
| Figure I.20: La structure de l'antenne reconfigurable proposée.....   | 19 |
| Figure I.21: L'antenne planaire reconfigurable en fréquence (a)vue avant (b) vue arrière .....  | 20 |
| Figure I.22: Antenne monopôle reconfigurable en fréquence fabriquée.....  | 20 |
| Figure I.23: La géométrie de l'antenne proposée .....   | 21 |
| Figure I.24: (a) Schéma de l'antenne dipôle reconfigurable: (b) vue de dessus ; (c) vue de derrière.....  | 22 |
| Figure I.25: (a) Schéma de l'antenne dipôle reconfigurable : (b) vue de dessus ; (c) vue de dos .....   | 23 |
| Figure I.26: Photos du prototype réalisé (a) vue de dessus;(b) vue de dos .....   | 23 |
| Figure I.27: Géométrie de l'antenne Yagi-Uda planaire .....   | 24 |
| Figure I.28: Géométrie de l'antenne proposée. (a) vue de dessus (b) vue latérale (c) vue arrière .....  | 24 |
| Figure I.29: Prototype de l'antenne fabriqué (a) vue de face (b) vue arrière.....   | 25 |
| Figure I.30: (a)Schéma de l'antenne proposée (b) prototype fabriqué .....   | 25 |
| Figure I.31: Géométrie de l'antenne.....  | 26 |
| Figure I.32: L'antenne unipolaire proposée avec un élément parasite parallèle .....   | 27 |
| Figure I.33: La structure proposée.....   | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Figure I.34: (a) Vue tridimensionnelle des structures proposées. La couche de cuivre est utilisée pour concevoir la couche supérieure, la couche inférieure et la couche de substrat en matériau FR-4 à faible profil. (b) Vue supérieure de la couche de patch. (c) Vue supérieure de la couche de masse avec les deux diodes PIN ..... | 28 |
| Figure I.35: (a) Vue supérieure du patch (b) Structure de conception proposée avec une arrière (c) vue latérale de la structure de conception proposée .....   | 28 |
| Figure I.36: Configuration de l'antenne microruban carrée tronquée en coin avec polarisation commutable.....   | 29 |
| Figure I.37: Antenne reconfigurable à accord optique de polarisation (a) géométrie (b) prototype.....  | 30 |
| Figure I.38: (a) top view ;(c) prototype de l'antenne.....   | 30 |
| Figure I.39: Configuration physique de l'antenne proposée .....  | 31 |
| Figure I.40: Antenne micro ruban à polarisation reconfigurable proposée.....   | 32 |
| Figure I.41: Configuration de l'antenne proposée .....   | 32 |
| Figure I.42: La photo des différences sens fabriquées des antennes proposées (a) Ant.1,(b) Ant.2,(c) Ant.3 et (d) Ant.4 ....   | 33 |
| Figure I.43: Configuration de l'antenne circulaire en micro ruban avec capacité de polarisation reconfigurable.....  | 33 |
| Figure I.44: Sens des différences de l'antenne proposée (a) Polarisation linéaire à 2.15GHz (basse fréquence), (b) Polarisation linéaire à 2.25 GHz (haute fréquence), (c) RHCP à 2,4GHz, (d) LHCP à 2,4GHz.....   | 34 |
| Figure I.45: MPA à fente en U reconfigurable proposée (a) configuration géométrique simulée (b) configuration géométrique .....  | 34 |
| Figure I.46: Les prototypes reconfigurables avec vue de mesures en chambre an échoïque .....   | 35 |

## Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| Figure II.1 : Les fréquences de 5G repérées ..... | 44 |
|---|----|

## Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| Figure III.1 : Antenne patch rectangulaire avec encoche et la DGS.....                                   | 51 |
| Figure III.2: Le paramètre S11 avant adaptation .....  | 52 |
| Figure III.3 : Le coefficient de réflexion obtenu par divers essais .....                                | 53 |
| Figure III.4: Paramètre S11 de l'antenne patch rectangulaire.....  | 54 |
| Figure III.5: Le diagramme de rayonnement (a)3D (b) polaire de l'antenne rectangulaire proposée .....    | 54 |
| Figure III.6: Gain de l'antenne rectangulaire.....   | 55 |
| Figure III.7: Proptotype de l'antenne rectangulaire initiale proposée .....                              | 55 |
| Figure III. 8: Positions des switches sur le plan de masse (a) vue de face (b) vue arrière .....         | 56 |
| Figure III.9: Le paramètre S11 de l'antenne à deux états (ON-OFF et OFF-OFF) .....                       | 57 |
| Figure III.10: Diagramme de rayonnement simulé pour le mode ON a $f=3.5\text{GHz}$ .....                 | 58 |
| Figure III.11: Diagramme de rayonnement simulé pour le mode OFF à $f = 5\text{GHz}$ .....                | 58 |
| Figure III.12: L'antenne patch pentagonale proposée.....   | 59 |
| Figure III.13 : Le coefficient de réflexion de l'antenne pentagone initiale .....                        | 60 |
| Figure III.14: Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne pentagone initiale des essais effectués..... | 61 |
| Figure III.15: Le coefficient de réflexions de l'antenne pentagone finale proposée.....                  | 61 |
| Figure III.16: Diagramme de rayonnement (a) 3D (b) polaire.....  | 62 |
| Figure III.17: Le gain de l'antenne pentagone.....   | 62 |
| Figure III.18: Prototype de l'antenne patch pentagone .....  | 63 |
| Figure III.19: Antenne patch pentagonale reconfigurables(a)vue de face (b) plan de masse .....           | 64 |
| Figure III.20 : Le coefficient de réflexion S11 pour les 4 modes de fonctionnement M1/M2/M3 et M4 .....  | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Figure III. 21: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M1 aux fréquences 3.5GHz et 5.81GHz.....              | 67 |
| Figure III.22: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M2 aux fréquences 2.438GHz, 5.855GHz et 7.805GHz ..... | 68 |
| Figure III.23: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M3 aux fréquences 2.71GHz, 4.77 GHz et 6.30 GHz.....   | 70 |
| Figure III.24: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M4 aux fréquences 4.73 GHz et 6.29 GHz.....            | 71 |
| Figure III.25: Gain de l'antenne pentagonale proposée.....   | 71 |

## Chapitre IV

|  |    |
|--|----|
| Figure IV.1: L'antenne Yagi imprimée proposée.....   | 77 |
| Figure IV.2: Antenne Yagi imprimée fabriquée, (a) antenne prototype, (b) mesure de l'antenne en laboratoire .....                      | 78 |
| Figure IV.3: Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne Yagi imprimée proposée.....  | 79 |
| Figure IV. 4: Le coefficient de réflexion S11 des différents essais effectués .....  | 80 |
| Figure IV.5: Résultat finale du coefficient de réflexion de l'antenne initiale (simulé, vs mesuré).....                                | 81 |
| Figure IV.6: Diagramme de rayonnement 2D-3D à 3,62 GHz pour l'antenne initiale.....  | 81 |
| Figure IV.7: Antenne Yagi avec position de la diode PIN .....  | 82 |
| Figure IV.8: Circuit équivalent de la diode PIN.....   | 83 |
| Figure IV.9: Paramètre S11 pour les deux modes ON et OFF .....   | 83 |
| Figure IV. 10:Diagramme de rayonnement de l'antenne Yagi en Mode ON, (a) polaire, (b) 3D .....   | 84 |
| Figure IV.11: Diagramme de rayonnement de l'antenne Yagi en Mode ON, (a) polaire, (b) 3D .....   | 84 |
| Figure IV.12: Réseau d'antennes Yagi imprimées (a) vue de dessus, (b) vue de dessous.....  | 85 |
| Figure IV.13: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN 1N4923 pour le mode M1 .....                         | 86 |
| Figure IV.14: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN 1N4923 pour le mode M2 .....                         | 86 |
| Figure IV.15: Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN 1N4923 pour le mode M3.....                         | 87 |
| Figure IV.16: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN Schottky pour le mode M1 .....                       | 88 |
| Figure IV.17 : Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN Schottky pour le mode M2.....                      | 88 |
| Figure IV.18: Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN Schottky pour le mode M3.....                       | 89 |
| Figure IV.19 : Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR63-06 pour le mode M1..... | 90 |
| Figure IV.20: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR63-06 pour le mode M2.....  | 90 |
| Figure IV.21: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR63-06 pour le mode M3.....  | 91 |
| Figure IV.22 : Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M1..... | 92 |
| Figure IV.23: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M2.....  | 93 |
| Figure IV.24: Reconfigurable en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M3 .....    | 93 |
| Figure IV. 25 : Réseau d'antenne yagi à deux éléments miniature avec fentes.....   | 96 |
| Figure IV. 26: Le coefficient de réflexion S11 de notre réseau d'antenne miniature avec différentes études paramétriques .....         | 97 |
| Figure IV. 27: Taux d'onde stationnaire de l'antenne yagi miniature à deux éléments.....   | 98 |
| Figure IV. 28: Gain du réseau d'antennes à deux éléments.....  | 98 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Figure IV. 29: Réseaux d'antennes Yagi reconfigurable avec PIN BAR 64-06.....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>Figure IV. 30: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M1.....</b> | <b>99</b>  |
| <b>Figure IV. 31: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M2.....</b> | <b>99</b>  |
| <b>Figure IV. 32: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M3.....</b> | <b>100</b> |

# Liste des Tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.1: Les dimensions optimales finales de notre antenne .....  | 52 |
| Tableau III.2: L'étude paramétrique sur les encoches .....  | 53 |
| Tableau III.3: Mode de fonctionnement des diodes PIN BAR63 .....  | 56 |
| Tableau III.4 : Les dimensions optimales finales de notre antenne proposée .....  | 59 |
| Tableau III.5: Etudes paramétriques sur les dimensions des encoches .....   | 60 |
| Tableau III.6: Les modes de fonctionnement de la diode PIN .....  | 64 |
| Tableau III.7: Les valeurs de la diode PIN BAR64 utilisée .....   | 64 |
| Tableau III.8: Les quatre modes de fonctionnement des diodes PIN .....  | 65 |
| Tableau III.9 : Comparaison de nos résultats avec les résultats de la littérature .....   | 72 |
|   |    |
| Tableau IV.1: Dimensions initiales de l'antenne Yagi.....   | 78 |
| Tableau IV.2 : Les dimensions choisies pour l'étude paramétrique .....  | 79 |
| Tableau IV.3: Les valeurs de la diode PIN 1N4923 pour les deux états .....  | 83 |
| Tableau IV.4: Les valeurs des paramètres de la diode PIN Schottky pour l'état ON-OFF .....  | 87 |
| Tableau IV.5 : Mode de fonctionnement des diodes PIN BAR63 .....  | 89 |
| Tableau IV.6: Résumé des résultats de la simulation pour les trois modes de fonctionnement avec l'utilisation de la diode<br>BAR63-06.....    | 91 |
| Tableau IV.7: Modes de fonctionnement de la diode PIN BAR64-06 .....  | 92 |
| Tableau IV.8 : Résumé des résultats de la simulation pour les trois modes de fonctionnement avec l'insertion de la diode<br>PIN BAR64-06..... | 94 |
| Tableau IV.9: Comparaison avec d'autres travaux de recherches .....   | 95 |
| Tableau IV. 10 : L'étude paramétrique menée pour le réseau d'antennes miniatures à deux éléments.....   | 97 |

# Liste des symboles et des abréviations

**1G** : Première Génération

**2G** : Deuxième Génération

**3G** : Troisième Génération

**4G** : Quatrième Génération

**5G** : Cinquième Génération

**6G** : Sixième Génération

**BAN** : les réseaux corporels

**BP**: Bande Passante

**CST-MWS** : Computer simulation technologie MICROWAVE STUDIO.

**CP** : Circulation Polarisation (Circular Polarization)

**DARPA** : Agence de projets de recherche avancée pour la défense

**DGS**: Defected Ground Structure

**FR-4**: Flame Resistant -4

**HFSS**: High-Frequency Structure Simulator

**IEEE**: Institute of Electrical and Electronics Engineers

**IoT**: Internet Of Things (internet des objets)

**ISM**: Industrielle, Scientifique et Médicale

**GSM** : The Global System for Mobile Communications

**GPS** : Ground Positioning System

**LHCP** : Polarisation Circulaire Gauche (Left-Hand Circular Polarization)

**LP** : Polarisation Linéaire (Linear Polarization)

**LTE** : Long Term Evolution

**Mbps** : Mégabit par seconde

**MEMS**: Micro-Electro Mechanical Systems.

**PIN** : Positif-Intrinsèque-Négatif

**QoS** : Quality of Service

**RF** : Radio Fréquence

**RHCP** : RHCP : Polarisation Circulaire Droite (Right-Hand Circular Polarization)

**UMTS**: Universal Mobile Telecommunications System

**VNA**: Vector Network Analyzer

**VSWR**: Voltage Standing Wave Ratio

**WBAN**: Wireless Body Area Network

**Wi-Fi**: Wireless Fidelity

**WIMAX**: Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WLAN**: Wireless Local Area Network

---

# **Introduction Générale**

---

# Introduction Générale

Les communications sans fil ont connu une évolution rapide ces dernières années en raison de la demande croissante des utilisateurs et des industries, devenant ainsi un élément incontournable de notre quotidien.

Dans le secteur des télécommunications sans fil, les antennes occupent une place centrale. Elles sont essentielles pour l'émission et la réception des ondes électromagnétiques. Une antenne convertit l'énergie électrique en énergie électromagnétique, qui est ensuite diffusée lors de l'émission et captée lors de la réception. Elle possède des caractéristiques spécifiques telles que le diagramme de rayonnement, la fréquence de résonance, la polarisation et l'impédance d'entrée, qui sont cruciales pour une transmission fiable des informations. Pour garantir une connexion stable et performante aux réseaux mobiles, des concepteurs ont développé des antennes imprimées, devenues indispensables dans les télécommunications grâce à leur légèreté, leur compacité, leur faible coût, leur facilité de fabrication et leur faible consommation d'énergie. De plus, elles peuvent être intégrées dans divers circuits électroniques.

Cependant, ces antennes présentent certaines limitations, fonctionnant généralement sur des bandes étroites. Les nouvelles applications de communications sans fil nécessitent des systèmes d'antennes plus performants, capables de répondre à ces exigences. C'est pourquoi l'antenne reconfigurable représente une solution prometteuse pour s'adapter aux nouveaux standards.

Avec l'émergence de nouveaux standards de communication, les systèmes de télécommunication doivent intégrer un grand nombre de fonctionnalités pour permettre la coexistence de plusieurs normes sur une même antenne. Cela inclut la réduction des interférences entre utilisateurs, l'amélioration du débit des transmissions, la prévention des phénomènes d'évanouissement et l'optimisation de la réception du signal.

Les tendances récentes mettent en avant le développement d'antennes à large bande, multibandes et reconfigurables, qui suscitent un intérêt croissant pour répondre à diverses applications au sein d'un même appareil. Ces dispositifs peuvent être utilisés dans de nombreux contextes, tels que le GPS, le GSM, le WLAN ou le Bluetooth. En réponse à ces besoins variés, des antennes adaptées ont été conçues.

Les antennes reconfigurables, introduites pour la première fois en 1999, augmentent les capacités fonctionnelles des antennes traditionnelles en permettant l'adaptation de leurs configurations en fonction

## INTRODUCTION GENERALE

des besoins. Une antenne est considérée comme reconfigurable ou agile lorsqu'elle peut modifier de manière dynamique une ou plusieurs de ses caractéristiques, telles que la fréquence de fonctionnement, le diagramme de rayonnement ou la polarisation, selon les exigences d'une application spécifique ou d'un environnement donné. L'un des principaux avantages de ces antennes est leur capacité à optimiser le fonctionnement et les performances des terminaux sans fil tout en réduisant la complexité et le coût. En effet, une seule antenne reconfigurable peut remplacer plusieurs antennes à fonction unique. Elles trouvent des applications dans divers domaines, notamment les systèmes de communication sans fil (Wi-Fi, WLAN, etc.), les radars et les satellites.

La reconfiguration d'une antenne peut être effectuée à travers différentes techniques. La première consiste à modifier les caractéristiques de l'antenne à l'aide de composants actifs tels que les diodes PIN (Positif-Intrinsèque-Négatif), les RF-MEMS et les varactors (ou diodes varicaps) pour les ajustements électriques. Dans le domaine optique, des éléments de commutation optique, comme les photoconducteurs, sont utilisés. Par ailleurs, la reconfigurabilité peut également être obtenue par des modifications mécaniques de la structure de l'antenne, ce qui est connu sous le nom de reconfigurabilité physique. Une autre approche consiste à utiliser des matériaux intelligents, tels que les ferrites et les cristaux liquides, pour permettre la reconfiguration.

La conception et la fabrication d'une antenne qui soit à la fois performante et efficace, intégrant des fonctions contrôlables telles que la reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement ou en polarisation, tout en étant compacte pour des applications où l'espace et le poids sont contraints, tout en maintenant de bonnes performances, représentent un défi majeur. Il s'agit de trouver un équilibre entre la reconfigurabilité et les performances fondamentales de l'antenne, notamment la largeur de bande et l'efficacité de rayonnement. Ce sont ces enjeux que nous avons abordés au cours de cette thèse. Les travaux réalisés visent à étudier et à développer des prototypes d'antennes patch pour chacune des fonctionnalités d'agilité, notamment l'agilité en fréquence et l'agilité du diagramme de rayonnement, en utilisant la technique de la diode PIN. La simulation de ces antennes sera effectuée à l'aide du logiciel CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio).

Le manuscrit de la thèse est structuré en quatre chapitres :

- **Les antennes reconfigurables** : Ce chapitre explore les différents types d'antennes reconfigurables, leurs principes de fonctionnement, ainsi que les techniques utilisées pour leur reconfiguration.

## INTRODUCTION GENERALE

- **Applications des antennes reconfigurables** : Ce chapitre présente les applications des antennes reconfigurables dans divers domaines, en mettant en évidence leurs avantages dans des systèmes de communication sans fil modernes.
- **Conception et réalisation d'antenne agile en fréquence** : Ce chapitre explore les antennes capables de modifier leur fréquence de fonctionnement de manière dynamique. Cette agilité en fréquence permet à l'antenne de s'adapter aux besoins spécifiques de l'application, en permettant l'utilisation de plusieurs bandes de fréquences au sein d'un même composant. La reconfiguration en fréquence est particulièrement utile dans les systèmes modernes de communication, où la demande de connectivité multi-bande est essentielle.
- **Conception et réalisation d'antennes imprimées agiles en diagramme de rayonnement** : Ce chapitre se concentre sur un réseau d'antennes capables de modifier leur diagramme de rayonnement, en détaillant les méthodes et les défis associés à cette fonctionnalité.

# CHAPITRE I

---

## ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

---

# CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

## I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

### I.1 Introduction

Les antennes patch, ou antennes à micro-ruban, jouent un rôle essentiel dans les systèmes modernes de communication sans fil et sont devenues incontournables dans les réseaux de communication actuels [1][2]. Habituellement conçues pour fonctionner sur une seule bande de fréquence, ces antennes présentent une limitation importante pour des applications nécessitant une couverture multi-bande, comme le Wi-Fi, le WLAN ou le GSM. Comme il est souvent peu pratique d'intégrer plusieurs antennes sur un même appareil, le développement d'antennes capables de changer de bande de fréquence représente une alternative prometteuse. C'est pourquoi les antennes reconfigurables imprimées suscitent un intérêt croissant dans la recherche pour diverses applications.

Les antennes reconfigurables offrent des avantages et des possibilités que les antennes classiques ne peuvent égaler. Grâce à leurs caractéristiques innovantes, elles permettent de remplir diverses fonctions, telles que la modification de la fréquence de résonance, l'ajustement des diagrammes de rayonnement, ou encore la reconfiguration de la polarisation [3][4]. Après leur fabrication, ces fonctionnalités peuvent être modifiées dynamiquement à l'aide de dispositifs de commutation, tels que les diodes PIN, les RF MEMS, et les varactors. Ainsi, une seule antenne reconfigurable peut remplacer plusieurs antennes à usage unique, offrant des économies significatives en termes de coûts, de poids, et de volume.

Ce chapitre commence par une description détaillée des antennes reconfigurables, incluant leur principe de fonctionnement, les différentes techniques employées pour atteindre la reconfigurabilité, ainsi que les types de reconfigurabilité disponibles. Des exemples issus de l'état de l'art seront présentés pour chaque type, en mettant en lumière leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Enfin, nous conclurons ce chapitre en explorant les défis techniques et conceptuels auxquels ces antennes sont confrontées.

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

Le terme « antenne reconfigurable » a été utilisé pour la première fois par Mitola en 1999 [5]. En général, les antennes intelligentes sont des dispositifs capables de réagir automatiquement et en temps réel [6]. Au cours des dix dernières années, les antennes patch reconfigurables sont devenues essentielles dans

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

les communications mobiles et sans fil contemporaines, car elles sont très adaptables et capables de répondre aux besoins en termes de fréquences, de diagramme de rayonnement et de polarisation.

Une antenne est considérée comme agile (reconfigurable ou paramétrable) lorsqu'elle peut modifier dynamiquement ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) après sa fabrication. Cette modification de fonctionnalité s'effectue en fonction des exigences de l'environnement de l'antenne et de l'application [8]. Il existe plusieurs techniques pour fabriquer une antenne reconfigurable, y compris l'utilisation de composants actifs tels que les diodes PIN, les RF-MEMS et les varactors pour le type électrique [9][10], l'insertion de photoconducteurs pour la transmission optique [11], Enfin, un type de configurabilité basé sur des modifications mécaniques dans la conception de l'antenne est appelé configurabilité physique [12].

### I.3 Principe de fonctionnement des antennes reconfigurables

#### I.3.1 Structure d'une antenne patch imprimée

Deschamps a introduit pour la première fois le concept d'antennes planaires en 1953 [13]. L'antenne demeure l'élément le plus crucial [14] et constitue un composant indispensable dans le domaine des communications [15]. Cela est particulièrement vrai ces dernières années, avec la montée en popularité des systèmes de communication sans fil pour des dispositifs de taille réduite [14]. Parmi les divers types d'antennes, l'antenne micro-ruban se distingue par son potentiel remarquable, grâce à ses caractéristiques uniques, telles que sa compacité, sa légèreté et, surtout, sa facilité d'intégration sur des surfaces planes et courbes [16][17].

Une antenne micro-ruban, dans sa forme la plus simple, se compose d'un patch rayonnant gravé sur une face d'un substrat diélectrique, avec un plan de masse de l'autre côté [20] (voir figure I.1). Le patch est généralement fabriqué à partir de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'or et peut adopter diverses formes [18].

L'élément rayonnant peut épouser plusieurs formes, en pratique, les rectangles, triangles, carrés et disques sont les plus fréquemment utilisés. Ces géométries sont privilégiées en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication [19].

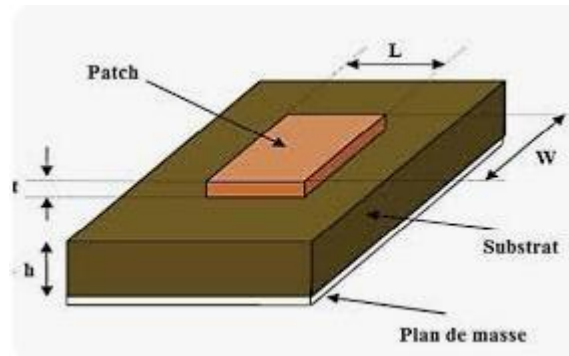


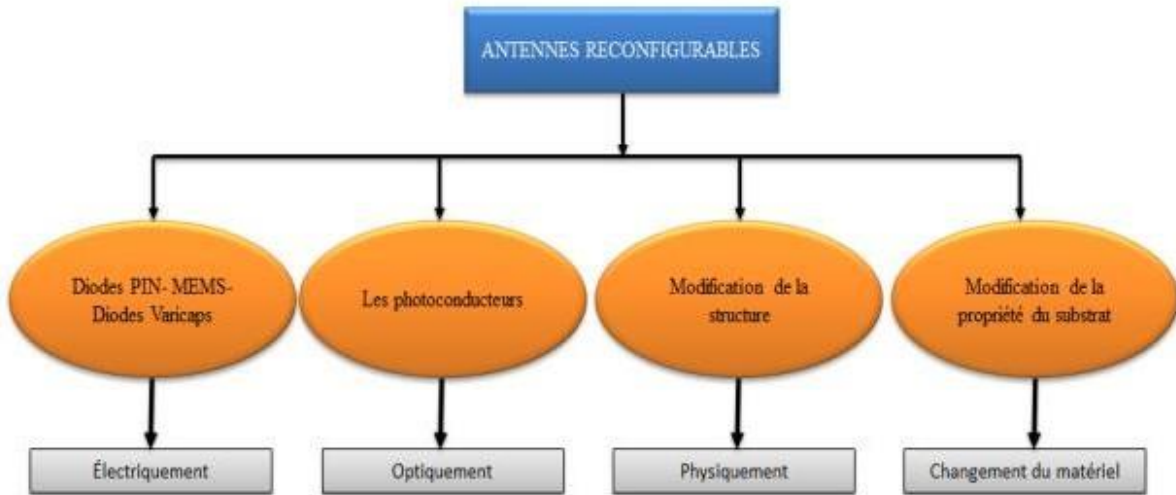
Figure I.1 : Antenne imprimée de forme rectangulaire [7]

### I.3.2 La reconfigurabilité

Les antennes reconfigurables planaires sont les plus courantes en raison de la facilité avec laquelle elles peuvent être fabriquées et intégrées dans de petits appareils électroniques tels que les ordinateurs portables et les téléphones mobiles[21][22][23]. Il existe de nombreuses approches différentes pour reconfigurer les fonctionnalités de l'antenne [24]. Comme le montre la figure I.2, six principaux types de techniques de reconfiguration sont utilisés pour mettre en œuvre des antennes reconfigurables. Les antennes reconfigurables électriquement reposent sur des systèmes micro-électromécaniques à radiofréquence (RF-MEMS), des diodes PIN (Positif-Intrinsèque-Négatif) et des diodes varacteurs (ou varicaps) pour rediriger leurs courants de surface [25][26][27][28].

Les antennes optiquement reconfigurables utilisent des composants de commutation photoconducteurs [29][30][31][32][33]. En modifiant la structure de l'antenne, il est possible d'obtenir des antennes physiquement reconfigurables [34][35][36][37]. Enfin, des matériaux intelligents (modification des propriétés du substrat), tels que les ferrites et les cristaux liquides, peuvent être utilisés pour créer des antennes reconfigurables[38][39][40][41].

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.2 :** Diverses méthodes ont été utilisées pour créer des antennes reconfigurables

### I.3.2.1 Diode PIN

La diode PIN est utilisée comme un interrupteur rapide pour les signaux de haute fréquence. Lorsqu'elle est polarisée en direct, la diode PIN présente une impédance relativement faible et se comporte comme un circuit fermé (état ON). En revanche, comme le montre la figure I.3, lorsqu'elle est polarisée en inverse, elle offre une très grande impédance en parallèle avec une conductance très faible, ce qui la rend équivalente à un circuit ouvert (état OFF). Les avantages des diodes PIN incluent leur faible coût et leur facilité d'intégration. Étant donné qu'elles nécessitent une faible tension de polarisation, elles sont également fiables. Cependant, leurs principaux inconvénients sont la consommation de puissance en état ON, les pertes d'insertion dans les circuits micro-ondes, ainsi que la puissance RF qu'elles ne peuvent pas supporter. De plus, ce type de diode ne peut pas fonctionner à très hautes fréquences et est généralement limité à 6 GHz [6][42][43][44].

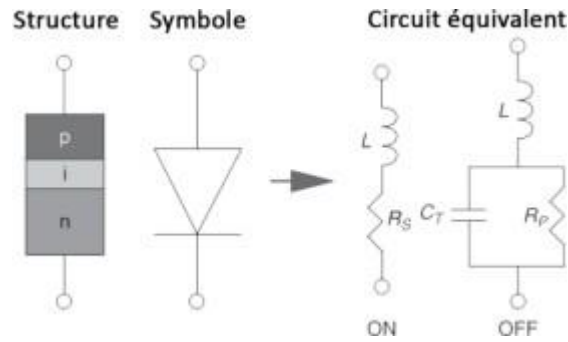


Figure I.3: Le circuit identique d'une diode dans les états ON et OFF

La reconfigurabilité du diagramme de rayonnement, de la polarisation ou de la fréquence peut être obtenue à l'aide d'une diode PIN. De nombreux types d'antennes, y compris les dipôles imprimés, les antennes à fentes, les antennes patch micro-ruban, les PIFA et les résonateurs diélectriques, l'ont utilisée [45][46][47][48][49].

### I.3.2.2 Diode Varicap

La diode varicap, également connue sous le nom de varactor, est un condensateur variable capable de modifier la capacité de résistance en raison de la modification de la tension de polarisation [24], dont la capacité peut être contrôlée en appliquant une tension inverse à ses bornes (Figure I.4) [8].

L'avantage de ce type de composants est la facilité d'intégration, le réglage continu, le courant continu et la faible consommation. Cependant, l'un des inconvénients les plus importants de ces composants est leur faible capacité [50][51][52].

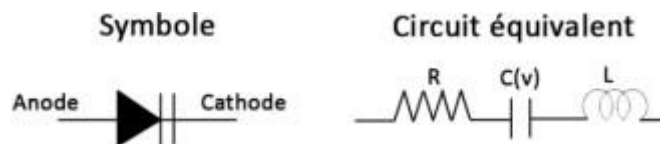


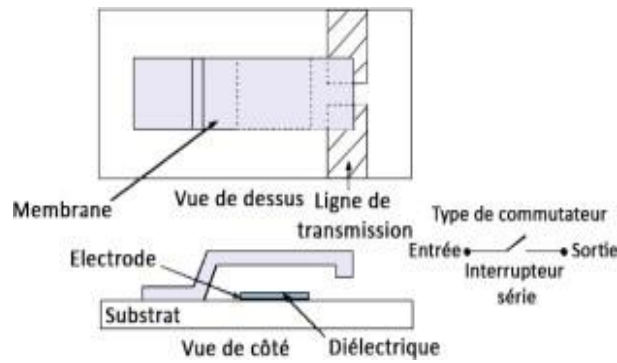
Figure I.4: Le symbole et le circuit équivalent d'une diode varicap

### I.3.2.3 MEMS

Un composant du commutateur de systèmes micro-électromécaniques RF (MEMS) a été développé par le Dr Larry Larson des laboratoires de recherche Hughes à Malibu, en Californie, en 1990-

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

1991 avec le soutien de la DARPA (Agence de projets de recherche avancée pour la défense) [53]. Ces commutateurs créent un court-circuit ou un circuit ouvert à l'aide d'un mouvement mécanique (voir la figure I.5). Ils ont moins de perte d'insertion, une isolation supérieure, une faible consommation d'énergie en CC et une gestion de puissance relativement élevée par rapport à une diode PIN ou à une autre diode à semi-conducteurs [24].



**Figure I.5:** Commutateur MEMES RF

Cependant, les commutateurs MEMS RF ont certains inconvénients, tels que des tensions d'activation élevées, des coûts plus élevés, une fiabilité inférieure et une disponibilité commerciale limitée [54]. Ces composants sont utilisés dans une variété de conceptions d'antennes et d'applications en raison de leur large plage de fréquences de fonctionnement [55][56][57][58][59].

### I.3.2.4 Commutateur optique

Le commutateur optique photoconducteur est une alternative aux circuits de polarisation utilisés dans d'autres approches, lesquels augmentent souvent la complexité et peuvent influencer négativement le rayonnement de l'antenne. Ce type de commutateur offre un temps de réponse plus rapide que les solutions précédemment évoquées, bien que son coût de fabrication reste élevé [6]. Plusieurs antennes reconfigurables intégrant ce composant sont décrites dans les travaux [11][30][32][60][61].

### I.3.2.5 Matériaux adaptatifs

Les matériaux dits « adaptatifs », « intelligents » ou « reconfigurables », dont les propriétés électriques (comme la permittivité, la perméabilité ou la conductivité) peuvent être modifiées par un champ électrique ou magnétique externe, représentent une méthode efficace pour rendre les antennes

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

réglables. Ces matériaux permettent de garantir une certaine adaptabilité aux dispositifs dans lesquels ils sont intégrés [62]. Ils peuvent servir de substrats pour les structures métalliques de l'antenne ou être utilisés sous forme de couches minces structurées localement pour remplacer les commutateurs électroniques mentionnés plus tôt. Bien qu'ils présentent des avantages tels que leur légèreté et leur facilité d'intégration, leur utilisation peut nécessiter des circuits de commande complexes, des tensions de contrôle élevées ou des aimants permanents (dans le cas des matériaux magnétiques). De plus, leur temps de réponse peut être significatif, et les pertes engendrées ne sont pas négligeables [62]. Parmi ces matériaux, les cristaux liquides, les matériaux magnétiques et ferroélectriques ont récemment été étudiés pour développer des antennes reconfigurables.

### I.3.2.6 Modification mécanique

Enfin, une méthode moins répandue pour concevoir des antennes reconfigurables repose sur la modification mécanique de leur structure. En altérant la forme physique de l'antenne, il est possible de modifier des paramètres tels que le diagramme de rayonnement, la polarisation ou la fréquence de fonctionnement [6][63][64][65].

## I.4 Classification des antennes reconfigurables

Comme mentionné précédemment, Une antenne est considérée comme agile lorsqu'elle est capable de modifier dynamiquement ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) après sa fabrication. Cette modification de fonctionnalité est effectuée en fonction des exigences de l'environnement de l'antenne et de l'application [8][66][67][68].

Il existe trois principaux types de reconfiguration: la reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation. En outre, il est possible de trouver une combinaison de ces trois reconfigurations dans un seul système antenne.

### I.4.1 Les antenne reconfigurable en fréquence

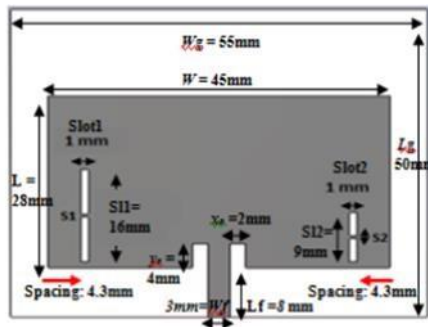
Le nombre de standards et normes de télécommunications, tels que le GSM, GPS, UMTS, LTE, Bluetooth, WiFi, WLAN, WiMAX et leur cohabitation sur une même antenne, est en constante augmentation et suscite un intérêt croissant. C'est pourquoi l'agilité en fréquence de l'antenne est devenue une fonctionnalité très importante et essentielle [69][70][71][72][73]. La reconfiguration de la réponse fréquentielle comprend diverses fonctionnalités telles que la commutation de fréquence, l'adaptation de fréquence, le changement de bande passante. Elles peuvent changer dynamiquement d'une fréquence de

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

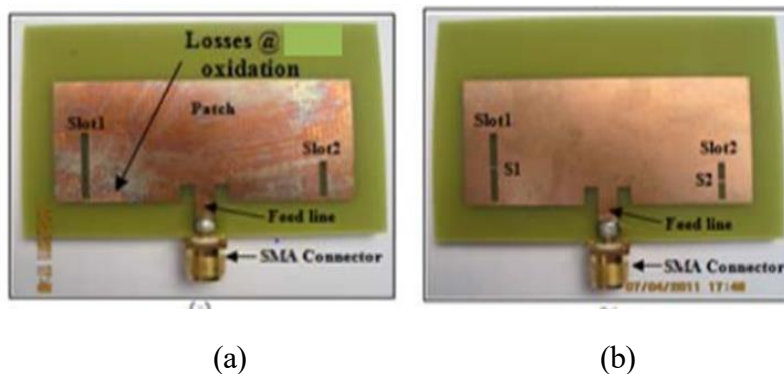
résonance à une autre [74], ou varier en continu dans une gamme de fréquences [75].

Récemment, la reconfiguration des fréquences a fait l'objet d'une grande attention, c'est pour cette raison plusieurs études ont été menées dans le cadre des antennes agile en fréquence car elles sont devenues un candidat naturel pour ces nouveaux systèmes de communication, donc dans cette section, nous passons en revue certains des travaux des spécialistes des antennes sur les antennes reconfigurables en fréquence.

Dans cet article [76], les auteurs ont conçu une nouvelle antenne patch reconfigurable à fentes rectangulaires, avec des fréquences de fonctionnement dans la plage de 2 à 6 GHz. Le patch reconfigurable à fente rectangulaire en micro-ruban fonctionne à plusieurs bandes, ainsi qu'à une seule bande de fréquences : soit à la fois à 2,4 GHz et à 5,8 GHz avec les conditions de commutation OFF, soit à 2,4 GHz uniquement avec les conditions de commutation ON, pour l'application du réseau local sans fil (WLAN). La figure I.6 montre la structure de cette antenne, tandis que la figure I.7 illustre les deux prototypes de l'antenne proposée.



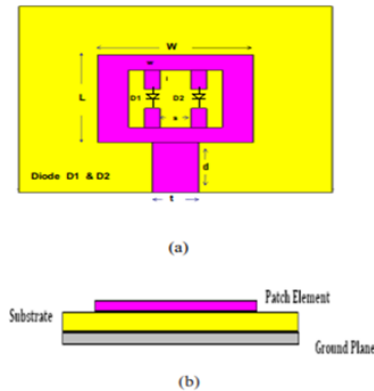
**Figure I.6:** Structure d'une antenne patch à fentes rectangulaires en micro ruban reconfigurable



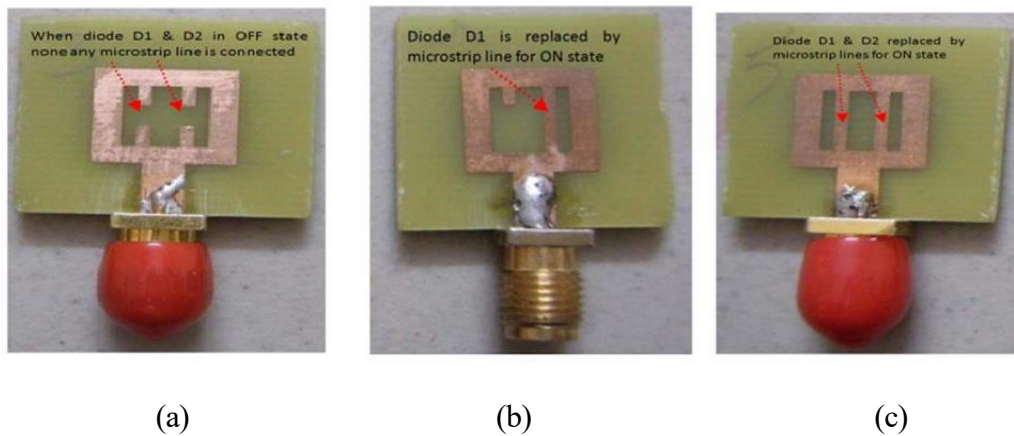
**Figure I.7:** Prototype de l'antenne : (a) Mode OFF (b) Mode ON

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Dans cet article [77], une nouvelle conception d'antenne reconfigurable en fréquence est proposée pour les dispositifs sans fil. Dans cette conception, une antenne patch rectangulaire avec une fente carrée utilisant deux diodes PIN à la fréquence centrale de 10 GHz a été élaborée. La reconfiguration de la fréquence simulée est réalisée dans la gamme de fréquences de 10 à 10,5 GHz, tandis que les résultats mesurés montrent un comportement similaire dans la plage de 10,216 à 10,552 GHz. La reconfiguration de la fréquence s'effectue en commutant les diodes en état de marche ou d'arrêt.



**Figure I.8:** (a) Conception reconfigurable de l'antenne (vue de dessus),(b) Vue en coupe

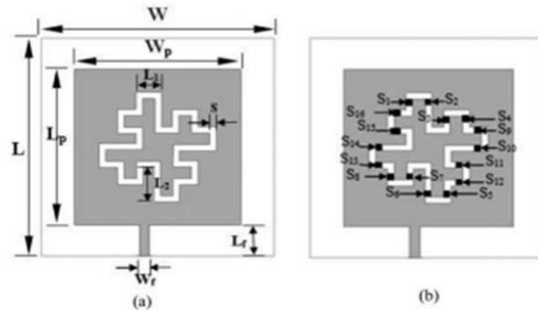


**Figure I.9:** Structures fabriquées : (a) Mode OFF OFF (b) Mode ON OFF (c) Mode M3 ON ON

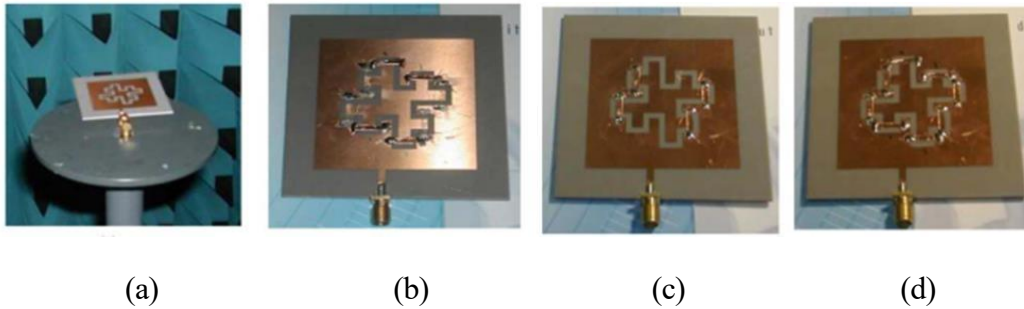
Dans [78], L'antenne proposée consiste en un patch de forme carrée avec une fente fractale Koch-Island centrée et optimisée. L'antenne permet de reconfigurer les bandes de fréquences en incorporant 16 diodes PIN à l'intérieur de la fente fractale. L'antenne proposée est capable de basculer entre 15 bandes de

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

fréquences de fonctionnement centrées sur 1,7, 1,77, 2,36, 2,43, 3,30, 3,61, 3,67, 3,79, 4,05, 4,34, 4,59, 5,2, 5,27, 5,47 et 5,57 GHz par le biais de quatre modes de fonctionnement M1-M4 sur la large gamme de 1-6 GHz. Quatre prototypes, correspondant aux quatre modes M1 à M4, ont été réalisés et caractérisés expérimentalement. Des photos des prototypes réalisés sont présentées dans la Figure I.11.



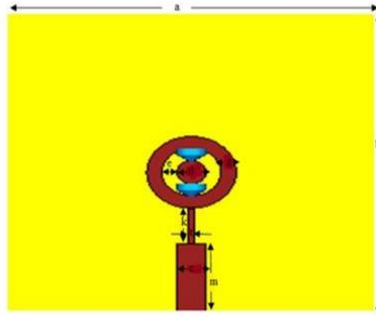
**Figure I.10:** Géométrie de l'antenne de l'antenne proposée: (a) antenne de référence; (b) antenne reconfigurable en fréquence



**Figure I.11:** Les structures prototypées: (a) Mode M1; (b) Mode M2 ; (c) Mode M3; (d) Mode M4

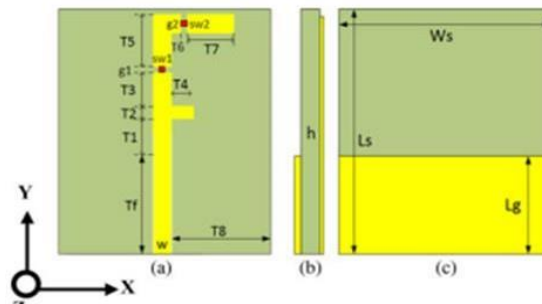
Une antenne patch microstrip circulaire reconfigurable a été conçue dans [79]. Dans la conception prévisible, deux diodes sont introduites avec une fente circulaire sur le patch pour produire quatre bandes de fréquences différentes reconfigurables à 19,49 GHz, 19,56 GHz, 19,62 GHz et 20,27 GHz, respectivement. Le paramètre S11 simulée pour toutes les bandes est inférieure à -10 dB à différentes fréquences.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



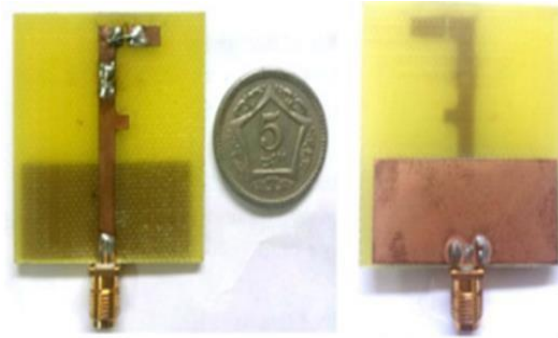
**Figure I.12:** La structure de l'antenne patch circulaire en micro ruban reconfigurable proposée (vue de face)

Dans [80], les auteurs ont présenté une antenne plane hexa-bande reconfigurable en fréquence (figure I.13). L'antenne proposée fonctionne dans quatre modes de fréquence différents, en fonction de l'état des deux commutateurs. L'antenne proposée fonctionne à six fréquences, 2,10, 2,40, 3,35, 3,50, 5,28 et 5,97 GHz. Ces bandes de fréquences sont dédiées à des applications sans fil utiles, notamment 3G Advanced (2,10 GHz), Wireless Fidelity (Wi-Fi) (2,40 GHz), WiMAX (3,35 GHz), WiMAX (3,5 GHz), WLAN (5,28 GHz) et services fixes et mobiles par satellite (5,97 GHz). Un gain satisfaisant de 1,96, 2,20, 2,671, 2,81, 3,80 et 3,88 dBi. L'antenne est fabriquée (figure I.14) sur un matériau de substrat relativement moins cher et abordable (FR-4) avec une constante diélectrique de  $\epsilon_r = 4,5$ .



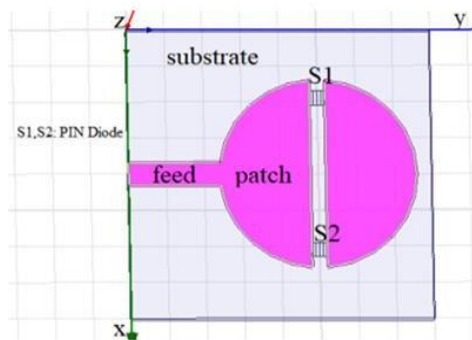
**Figure I.13:** Conception d'une antenne reconfigurable avec différentes vues géométriques en formes de F (a) avant ; (b) côté; (c) arrière

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.14:** Antenne monopôle fabriquée en forme de F:(a) vue de dessus, (b) vue arrière

Ce travail [81] représente une application possible dans la communication sans fil utilisant une antenne patch Microstrip reconfigurable. Le substrat diélectrique de l'antenne patch Microstrip circulaire proposée est fabriqué avec de l'époxy FR 4 et une conception de patch  $40 \times 40 \times 1,6 \text{ mm}^3$ . Ce travail fournit une méthodologie pour concevoir des antennes reconfigurables avec commutateur à diode PIN. La reconfiguration de fréquence réalisée par les diodes PIN. Dans la plage de 3 GHz à 6,9 GHz, la reconfigurabilité de fréquence est réalisée. Pour faire résonner l'antenne à différentes fréquences, une diode PIN est utilisée. La structure de l'antenne patch circulaire permet d'obtenir une large bande passante améliorée. Les résultats montrent une meilleure reconfiguration de fréquence.



**Figure I.15:** Antenne patch circulaire reconfigurable

Une antenne patch reconfigurable à fente en « Y », adaptée aux radars, aux communications par satellite, aux réseaux sans fil de la génération 5G et à la collecte d'énergie en ondes millimétriques est présenté dans [82]. La reconfigurabilité de la fréquence est réalisée en utilisant 2 diodes PIN intégrées dans l'élément rayonnant de l'antenne. Quatre fréquences sont produites à l'aide de l'antenne proposée, soit respectivement 49,84 GHz, 31,65 GHz, 31,4GHz et 45,45 GHz.

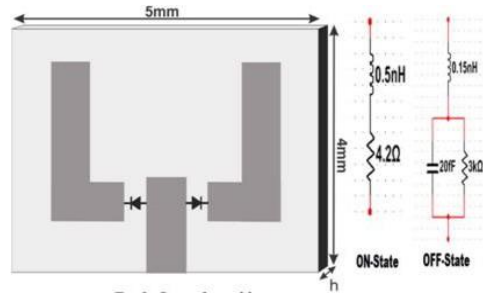


Figure I.16: Structure d'antenne reconfigurable

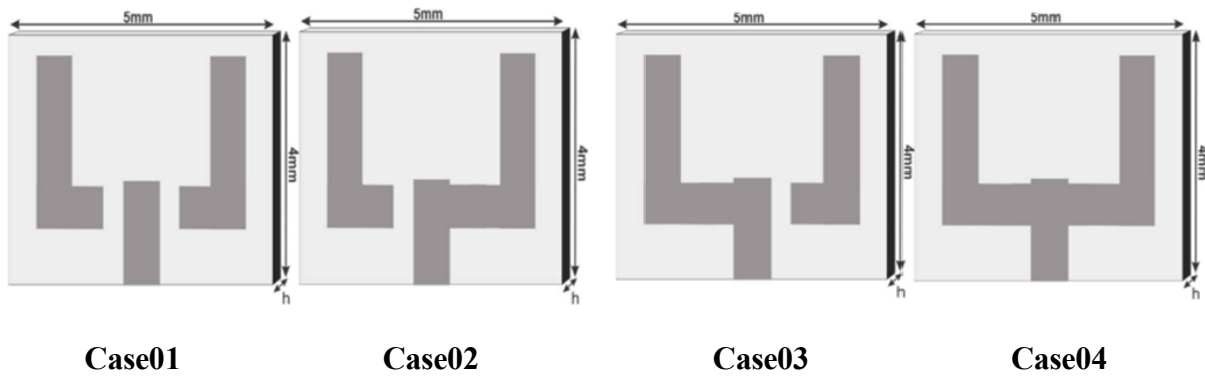
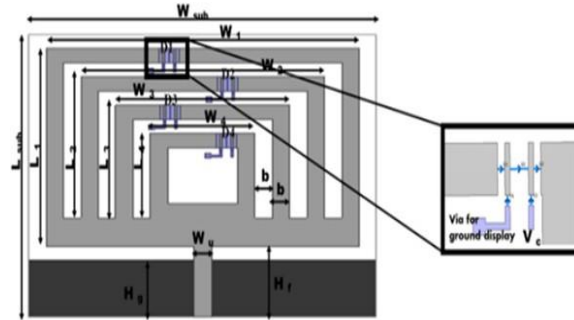


Figure I.17: Représentation symbolique des différents cas de l'antenne reconfigurable proposée

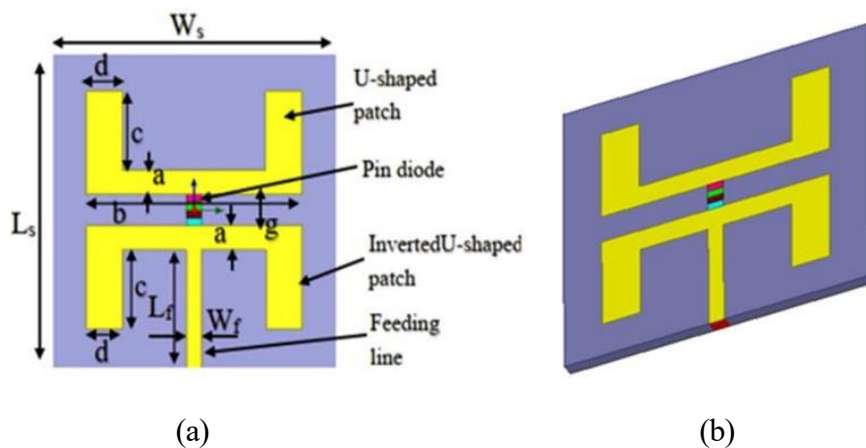
L'antenne proposée dans [83], est une antenne bi-bande reconfigurable en fréquence pour les applications WiMAX et LTE 2500 à l'aide de quatre commutateurs à diode PIN. L'antenne fabriquée fonctionne dans la gamme de fréquences LTE et WiMAX (2,5-2,69 GHz et 3,4-3,6 GHz) respectivement. L'antenne proposée résonne à 2,52 et 3,49 GHz lorsque les diodes PIN sont activées et résonne à 2,68 et 3,58 GHz lorsque les diodes PIN sont désactivées. L'antenne présente une bonne concordance entre les résultats mesurés (configuration de mesure de l'antenne avec VNA) et les résultats simulés (Ansys-HFSS).

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.18:** Géométrie de l'antenne reconfigurable proposée

Dans cette recherche [84], une antenne patch microstrip reconfigurable en fréquence est proposée pour des applications en bande S et en bande C. Ici, un patch en forme de U et un patch en forme de U inversé sont utilisés. La diode à broche est placée entre les deux patches. On utilise un substrat FR4\_epoxy dont la permittivité relative est de 4,4. La diode est d'abord mise en position ON, puis en position OFF. Lorsqu'elle est activée, elle fonctionne comme une application en bande C coupée à 4,756 GHz et sa perte de retour, son rapport tension-onde stationnaire (VSWR), sa largeur de bande, son gain et sa directivité sont respectivement de -24,12 dB, 1,09 dB, 200 MHz, 6,039 dBi et 6,394 dBi. Lorsqu'il est désactivé, il fonctionne comme une application en bande S coupée à 2,38 GHz et ses coefficients de réflexion, sa largeur de bande, son gain et sa directivité sont respectivement de -21,08 dB, 1,19 dB, 51 MHz, 5,95 dBi et 6,309 dBi.

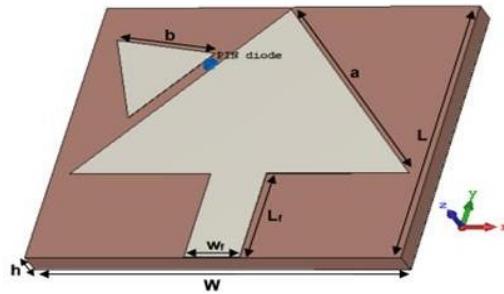


**Figure I.19:** Dimensions de l'antenne proposée (a) Vue de dessus (b) Vue de côté

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Dans cet article, une nouvelle antenne patch reconfigurable en fréquence est proposée. L'antenne prévue est conçue sur le substrat diélectrique FR4-époxy avec une permittivité relative de 4,4, avec un volume compact de  $25 \times 21 \times 1,67\text{mm}^3$ .

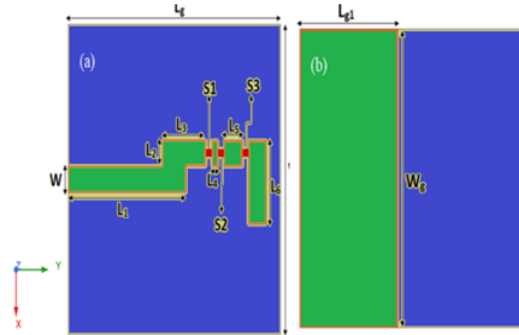
L'antenne proposée [85] est constituée d'une diode PIN, placée sur le patch rayonnant pour obtenir une reconfigurabilité de la fréquence. En fonction de l'état de commutation de la diode PIN, l'antenne peut fonctionner à deux gammes de fréquences différentes. La simulation de l'antenne proposée est mise en œuvre à l'aide de CST microwave studio, elle a été re-simulée dans le logiciel Ansys HFSS pour confirmer les résultats obtenus. Les performances de l'antenne sont analysées à partir du coefficient de réflexion, du rapport d'ondes stationnaires de tension (VSWR), de la distribution du courant de surface et du diagramme de rayonnement. L'antenne a deux fréquences de résonance : 3,44 GHz (Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)) et 5,26 GHz (Wireless Local Area Network (WLAN)).



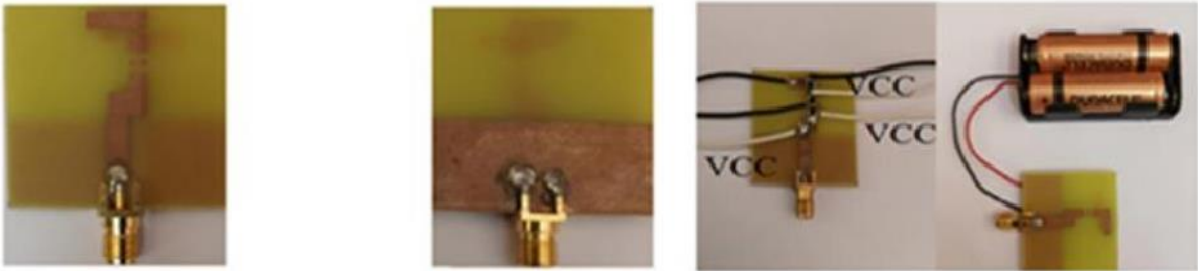
**Figure I.20:** La structure de l'antenne reconfigurable proposée

Dans ce travail [86], une nouvelle antenne monopôle reconfigurable en fréquence multi bande est proposée (figure I.21). Elle est conçue pour résonner dans un mode bi-bande et trois modes mono bande. Les fréquences de résonance souhaitées sont obtenues en utilisant différents états de commutation des diodes PIN RF. Ils sont utilisée 3 diodes PIN, l'antenne a la capacité de produire une bande double (2,4 pour les applications Wi-Fi et 6,2 pour la bande C) et 3 bandes uniques à 3,5 GHz (fréquence inférieure à 6 GHz pour les applications 5G), 4,7 GHz (Vo5G), 5,8 GHz (communications de véhicule à tout). La simulation de la conception de l'antenne est réalisée avec le logiciel High-Frequency Structure Simulator Version 17 (HFSSV17). Cette antenne compacte ( $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 1,6 \text{ mm}$ ) peut être facilement placée à l'intérieur des appareils de communication portables modernes. La figure I.22 présente l'antenne fabriquée.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.21:** L'antenne planaire reconfigurable en fréquence (a) vue avant (b) vue arrière



**Figure I.22:** Antenne monopôle reconfigurable en fréquence fabriquée

Les auteurs dans [87] ont proposé une antenne patch reconfigurable en fréquence, cette antenne a été conçue, étudiée et produite dans le cadre de cette étude. Deux diodes à commutation rapide ont été insérées comme nouvelle technique de reconfiguration électrique. Ainsi, l'antenne proposée est capable de fonctionner dans différentes bandes. Une antenne ultra-compacte de  $31 \times 21 \text{ mm}^2$  a offert diverses fréquences de fonctionnement telles que la bande S à 2,4 GHz, la bande C à 4,97 GHz, 5,06 GHz, 5,18 GHz, 5,1 GHz et 7,94 GHz, la bande X à 10,73 GHz, 10,91 GHz et 11,9 GHz, la bande Ku à 13,52 GHz, 14,78 GHz, 14,97 GHz, 15,63 GHz, 16,4 GHz, 17,3 GHz et 17,48 GHz, ainsi que la bande K à 19 GHz. Plusieurs bandes ont été proposées et sont bien adaptées aux technologies modernes telles que la bande industrielle, scientifique et médicale (ISM) : Bluetooth, la fidélité sans fil (Wi-Fi), ZigBee, l'internet des objets (IoT), WiMAX et les compteurs d'énergie intelligents. De même, l'évolution à long terme (LTE), les applications 5G, les systèmes fixes sans fil (FWS) et les applications de communication par satellite.

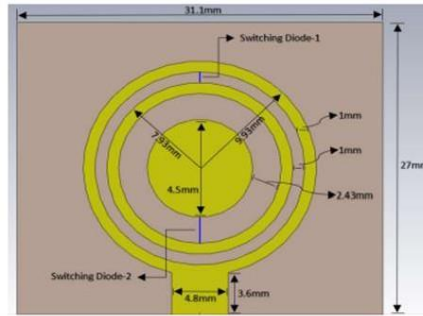


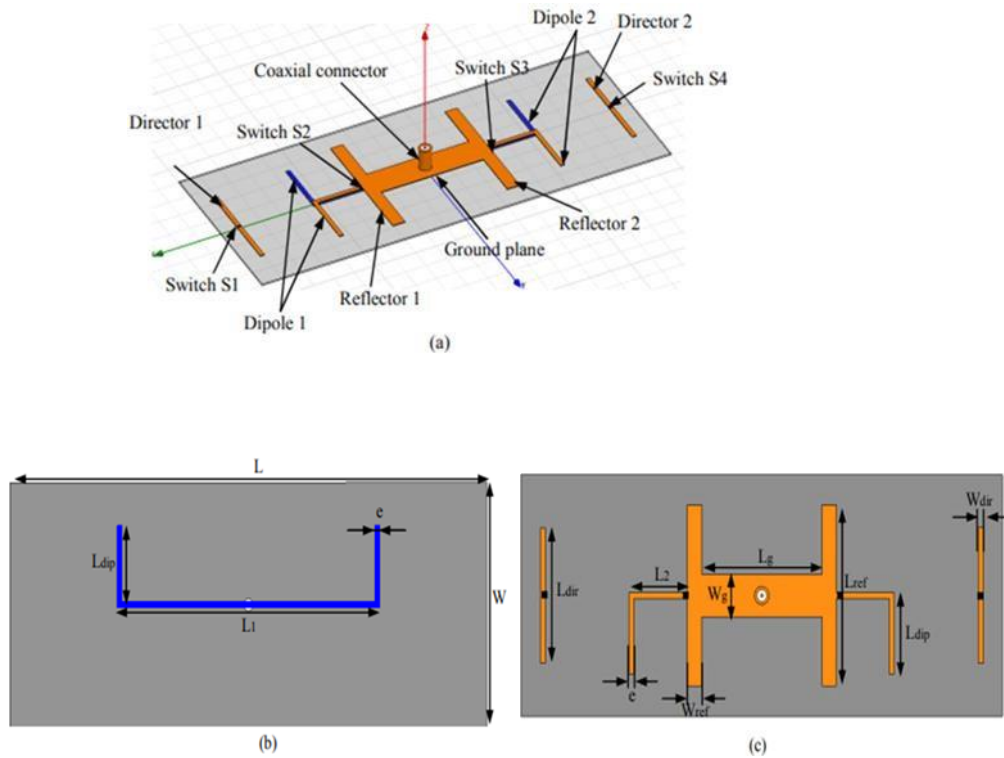
Figure I.23: La géométrie de l'antenne proposée

### I.4.2 Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

La forme, la direction et le gain des diagrammes de rayonnement sont modifiés par les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement pour déterminer s'ils privilégient ou non certaines directions [88][89][90][91]. Ce type de reconfiguration peut être utilisé pour éviter les sources de bruit, améliorer la sécurité et économiser de l'énergie en modifiant la directivité vers les utilisateurs visés. Par conséquent, ce type de reconfiguration peut être utile pour éviter les signaux provenant des directions non souhaitées ou pour renforcer le signal dans une direction souhaitée. En outre, La reconfigurabilité en diagramme utilise un seul élément rayonnant ou un réseau d'antennes [6].

Ces dernières années, les antennes à diagramme de rayonnement reconfigurable sont de plus en plus demandées en raison des exigences croissantes en matière de qualité et de capacité des systèmes de télécommunication. De plus, la caractéristique d'agilité du diagramme de rayonnement contribue à éviter les environnements bruyants, à améliorer la sécurité et à économiser de l'énergie en dirigeant mieux le signal vers les utilisateurs prévus, ce qui améliore les performances globales des systèmes de communication sans fil modernes [92]. Plusieurs antennes à diagramme de rayonnement reconfigurable ont été rapportées, telles qu'une antenne dipôle imprimée planaire, conçue en combinant deux dipôles élémentaires, avec des propriétés de diagramme de rayonnement reconfigurables a été proposée pour les systèmes de communication sans fil comme le montre l'article[92]. L'agilité a été assurée par l'utilisation de quatre diodes PIN autour de 2,64 GHz. L'antenne est capable d'incliner son diagramme de rayonnement et son angle d'ouverture dans la direction  $\varphi=0^\circ$  ou  $\varphi=180^\circ$  en fonction des états des commutateurs. Un prototype de la structure de base a été réalisé et caractérisé.

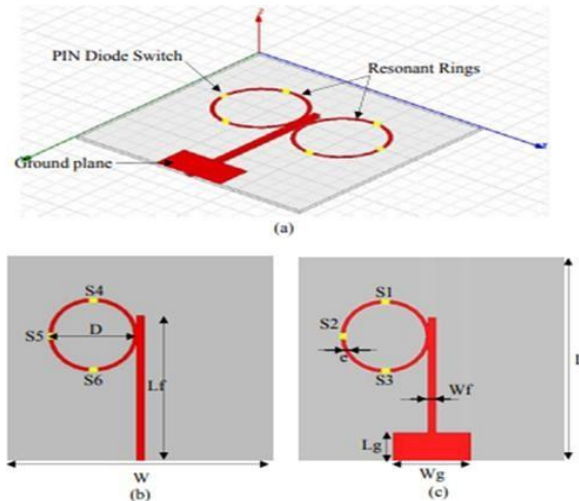
## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.24:** (a) Schéma de l'antenne dipôle reconfigurable: (b) vue de dessus ; (c) vue de derrière

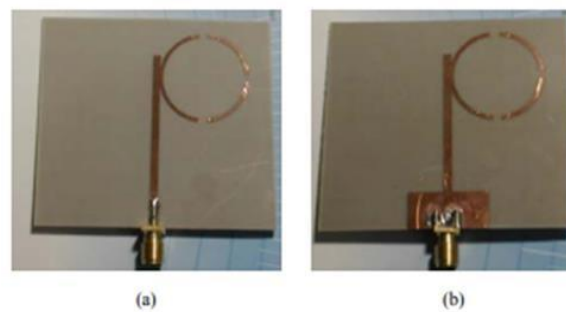
Une antenne dipôle imprimée planaire alimentée par une micro-bande avec des propriétés de diagramme de rayonnement reconfigurables est proposée pour les communications sans fil dans [93]. La structure consiste en deux anneaux résonnants, chacun étant imprimé sur une couche de substrat. Le dipôle peut modifier son diagramme de rayonnement dans différentes directions en fonction de l'état de six diodes PIN chargées sur les anneaux de résonance (trois diodes PIN sur chaque anneau de résonance). L'antenne conçue fonctionne à 2,4 GHz lorsque tous les commutateurs sont activés et adopte un comportement multifréquence pour différents états des commutateurs. Un prototype a été fabriqué (figure I.26).

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.25:** (a) Schéma de l'antenne dipôle reconfigurable ; (b) vue de dessus ; (c) vue de dos

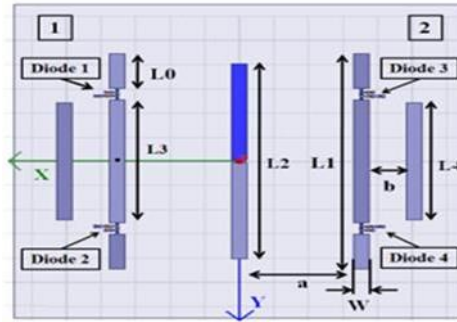
La figure I.25 illustre la géométrie de l'antenne reconfigurable conçue et la figure I.26 présente les photos du dipôle prototypé avant l'intégration des commutateurs.



**Figure I.26:** Photos du prototype réalisé (a) vue de dessus;(b) vue de dos

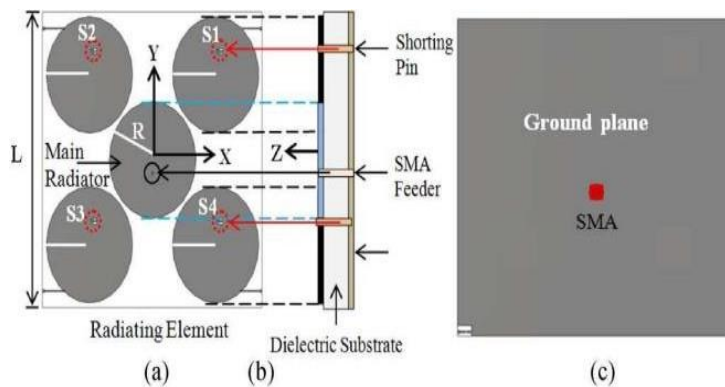
Les auteurs de [94] ont présenté une antenne Yagi-Uda planaire reconfigurable au niveau du diagramme de rayonnement, modifie la direction du diagramme de  $+XZ$  a  $-XZ$  tout en conservant la forme du faisceau en activant ou en désactivant les commutateurs à diode PIN. L'antenne utilise un substrat de 130 mm x 130 mm (Arlon AD 250TM  $\epsilon_r = 2,5$ ) d'une épaisseur de 1,6 mm.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



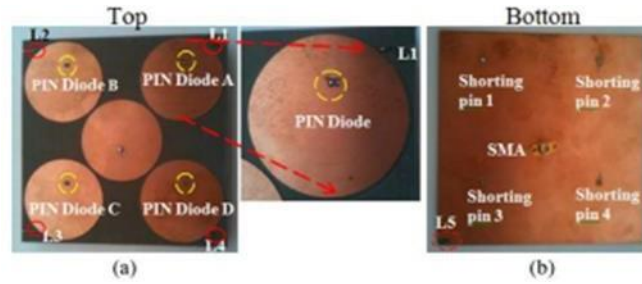
**Figure I.27:** Géométrie de l'antenne Yagi-Uda planaire

Dans [95] une antenne compacte et multidirectionnelle reconfigurable est présentée. La conception de l'antenne est basée sur les principes de l'antenne Yagi-Uda commune. Le patch circulaire principal est entouré de plusieurs patches circulaires parasites qui agissent soit comme réflecteur(s) soit comme directeur(s) en fonction de l'arrangement de commutation, et quatre commutateurs à diode p-i-n sont utilisés pour assurer la reconfiguration du faisceau. L'antenne proposée a été fabriquée et évaluée expérimentalement, et les résultats mesurés sont en bon accord avec les résultats simulés. La largeur de bande de fonctionnement s'étend de 2,36 à 2,39 GHz, et l'antenne peut assurer le contrôle du faisceau dans neuf directions angulaires différentes :  $(0^\circ, 23^\circ)$ ,  $(45^\circ, 22^\circ)$ ,  $(90^\circ, 24^\circ)$ ,  $(135^\circ, 22^\circ)$ ,  $(180^\circ, 24^\circ)$ ,  $(225^\circ, 25^\circ)$ ,  $(270^\circ, 25^\circ)$ , et  $(315^\circ, 22^\circ)$ , avec des niveaux de gain réalisés supérieurs à 7,0 dBi. Par conséquent, l'antenne proposée est un candidat potentiel pour les applications WiMAX et pourrait être appliquée au système de communication mobile point à point.



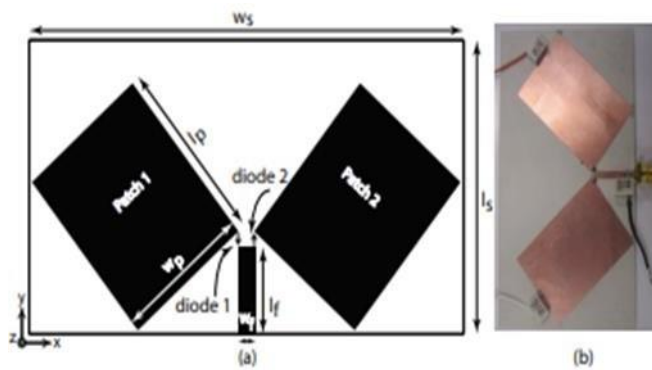
**Figure I.28:** Géométrie de l'antenne proposée. (a) vue de dessus (b) vue latérale (c) vue arrière

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.29:** Prototype de l'antenne fabriqué (a) vue de face (b) vue arrière

L'objectif de cet article [96] est de présenter la conception, le fonctionnement et la fabrication d'une antenne patch reconfigurable. Deux patches rectangulaires placés perpendiculairement l'un à l'autre sont alimentés par une ligne d'alimentation commune (figure I.30). Ces patches sont alimentés par les coins afin d'obtenir une adaptation d'impédance exacte pour les deux éléments. La commutation entre les patches est réalisée à l'aide de diodes PIN, connectées entre la ligne d'alimentation et les patches. La polarisation de la diode PIN 1 excite le patch 1, ce qui produit un diagramme de rayonnement large à  $30^\circ$  sur le côté droit du plan yz avec un gain de 5,85 dBi. Le diagramme est reconfiguré en passant au patch 2 à l'aide de la diode PIN 2, ce qui donne un diagramme de rayonnement large à  $-30^\circ$  du côté gauche du plan yz avec un gain de 5,9 dBi. Un bon accord entre les résultats simulés et mesurés est obtenu à la fréquence de résonance de 2,43 GHz.

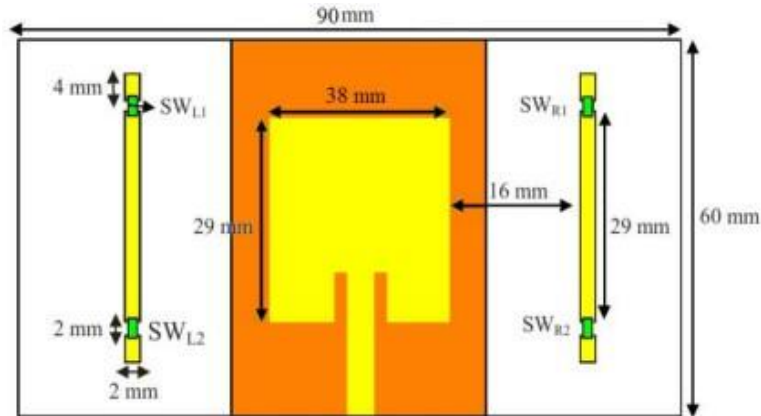


**Figure I.30:** (a) Schéma de l'antenne proposée (b) prototype fabriqué

Cette recherche[97] présente une antenne patch microstrip reconfigurable en diagramme de rayonnement à 2,45 GHz avec des bras parasites pour contrôler la direction du faisceau rayonné pour le

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

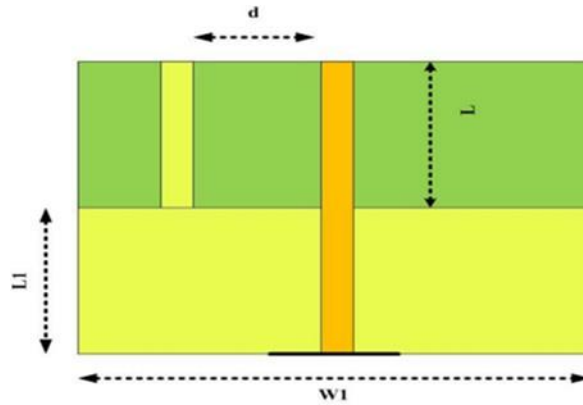
réseau corporel sans fil (WBAN) et le réseau local sans fil (WLAN). Le gain réalisé de l'antenne passe de 1,93 dB (mode hors-corps) à 1,4 dB (mode sur le corps). La bande de fréquence de fonctionnement centrée sur la fréquence de 2,45 GHz reste inchangée avec une largeur de bande de 80 MHz. Le gain réalisé de l'antenne passe de 1,93 dB (mode hors-corps) à 1,4 dB (mode sur le corps). La bande de fréquence de fonctionnement centrée sur la fréquence de 2,45 GHz reste inchangée avec une largeur de bande de 80 MHz.



**Figure I.31:** Géométrie de l'antenne

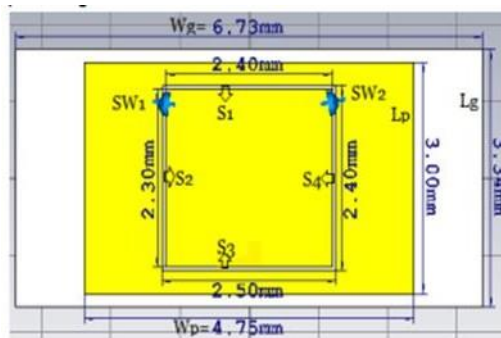
Cet article [98] présente la conception et l'analyse d'une antenne monopolaire reconfigurable destinée aux applications WLAN. Un élément parasite connecté au plan de masse par une diode PIN est placé parallèlement au monopôle rayonnant. Lorsque la diode est commutée entre les états ON et OFF, la fonction de l'élément parasite passe d'un réflecteur à un directeur, ce qui conduit à deux diagrammes de rayonnement différents. Les simulations réalisées à l'aide du logiciel CST ont démontré la faisabilité de l'antenne proposée.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



**Figure I.32:** L'antenne unipolaire proposée avec un élément parasite parallèle

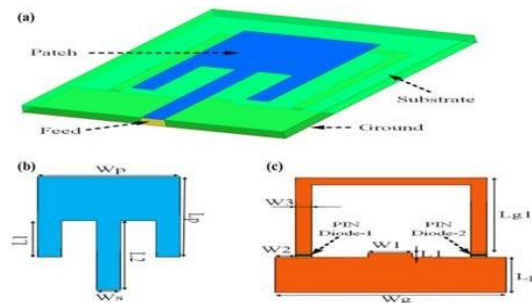
Cette recherche [99] porte sur la conception d'une antenne reconfigurable pour la 5G. Donc les auteurs propose une nouvelle antenne reconfigurable en termes de diagramme de rayonnement pour les applications 5G (cinquième génération). Un patch rectangulaire est entouré d'une structure rayonnante rectangulaire creuse, la technique d'alimentation est une sonde coaxiale dont le diamètre de connexion est de 0,14 mm. Le patch est connecté à la structure rectangulaire par deux interrupteurs SW1 et SW2, qui fourniront à leur tour trois diagrammes de rayonnement différents, les Modes, en fonction des états ON et OFF des interrupteurs. Lorsque SW1 est désactivé et SW2 activé, le mode 1 rayonne dans une direction avec un angle de  $38^\circ$ . Lorsque SW1 est ON et SW2 est OFF, Mode 2, le motif rayonne dans le plan de rayonnement, exactement à l'opposé du Mode 1, avec un angle de  $-38^\circ$ . En mode 3, le motif est dirigé simultanément vers les angles de  $\pm 41^\circ$  ; dans ce cas, les deux interrupteurs, SW1 et SW2, sont désactivés. La conception proposée résonne dans la plage de fréquences constante de 38 GHz, utile pour les réseaux de communication cellulaire à large bande 5G.



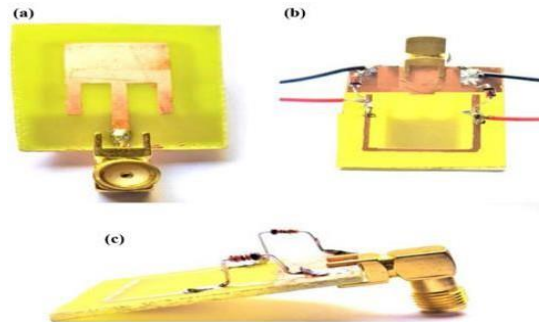
**Figure I.33:** La structure proposée

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Le manuscrit présenté représente une antenne patch microstrip miniaturisée avec reconfiguration de la fréquence et du diagramme de rayonnement dans [100]. Trois modes sont analysés sur la base des actions de commutation de deux diodes PIN pour réaliser l'accordabilité. La structure proposée permet d'accorder les deux bandes. La conception proposée offre une largeur de bande de 700 MHz, et une capacité d'inclinaison du faisceau de  $30^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $+35^\circ$ ,  $-90^\circ$  et  $120^\circ$ . La simulation et la fabrication sont effectuées pour la vérification. La conception proposée peut être utilisée pour des applications multibandes dans les bandes S et C.



**Figure I.34:** (a) Vue tridimensionnelle des structures proposées. La couche de cuivre est utilisée pour concevoir la couche supérieure, la couche inférieure et la couche de substrat en matériau FR-4 à faible profil. (b) Vue supérieure de la couche de patch. (c) Vue supérieure de la couche de masse avec les deux diodes PIN



**Figure I.35:** (a) Vue supérieure du patch (b) Structure de conception proposée avec une arrière (c) vue latérale de la structure de conception proposée

### I.4.3 Les antennes reconfigurables en polarisation

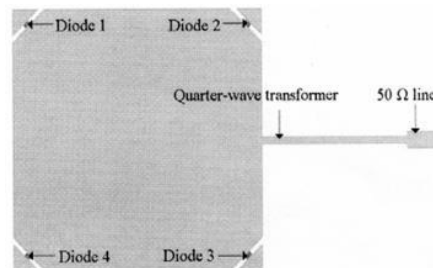
La reconfiguration de la polarisation d'une antenne implique une modification de sa polarisation, qu'elle soit linéaire (verticale ou horizontale) ou circulaire (droite ou gauche). L'objectif de ces antennes

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

est de modifier l'orientation vectorielle du champ émis sans affecter les fréquences résonantes ou la forme du diagramme de rayonnement. En général, il est nécessaire de réussir à changer le sens et ou la phase de circulation des courants sur un élément rayonnant sans modifier son allure ou ses cheminements [88] [101].

En polarisation, la reconfiguration d'une antenne implique de changer sa polarisation (linéaire ou circulaire) sans changer sa fréquence de résonance ni son diagramme de rayonnement [102]. Cette approche implique de changer la direction et/ou la phase de circulation des courants sur l'élément de rayonnement d'une antenne. Donc nous avons vous présenter quelque travaux qui ont abordé ce type d'antenne.

Dans [103] une nouvelle antenne microruban reconfigurable avec sens de polarisation commutable est proposée. L'antenne proposée a une structure simple, composée d'un patch rayonnant carré tronqué en coin, de quatre petits conducteurs triangulaires et d'une ligne d'alimentation en microruban. Ils ont utilisé des diodes PIN indépendamment sur le patch, elle peut produire une polarisation linéaire ou une polarisation circulaire gauche ou droite en fonction des tensions de polarisation. L'antenne proposée convient aux applications dans les communications sans fil et les communications mobiles par satellite.

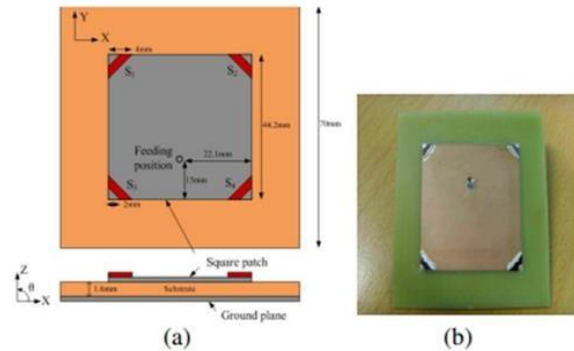


**Figure I.36:** Configuration de l'antenne microruban carrée tronquée en coin avec polarisation commutable

Une antenne à polarisation circulaire reconfigurable (CP) pour les applications GPS [104] est conçue et fabriquée à l'aide de quatre commutateurs photoconducteurs. En contrôlant l'état ON/OFF de chacun des quatre interrupteurs photoconducteurs sur l'antenne patch, la polarisation de l'antenne peut passer de linéaire (LP) à CP, et de CP gauche (LHCP) à CP droite (RHCP). La géométrie et le prototype fabriqué de l'antenne reconfigurable sont représentés respectivement sur les figures I.37 (a) et (b). Afin de

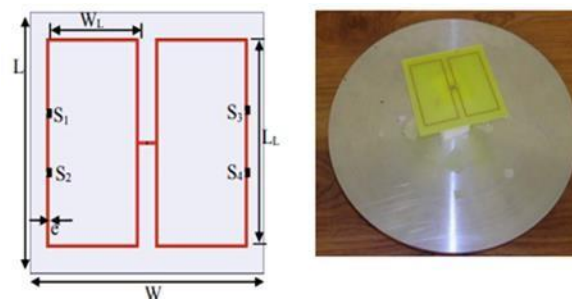
## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

réaliser le fonctionnement du CP via une alimentation unique, le patch d'antenne est tronqué aux quatre coins et les quatre coins sont séparés du patch avec un espace de 1,4 mm. Quatre interrupteurs en silicium (S1, S2, S3 et S4) sont placés au-dessus de l'espace. En contrôlant l'état ON/OFF de chacun de ces quatre interrupteurs, la polarisation de l'antenne peut être commutée de LP à CP et de LHCP à RHCP.



**Figure I.37:** Antenne reconfigurable à accord optique de polarisation (a) géométrie (b) prototype

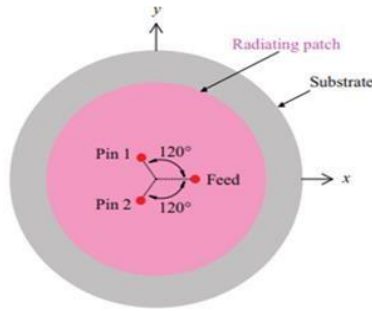
Une antenne imprimée à polarisation agile a été conçue dans [105], prototypée et caractérisée expérimentalement pour les applications GPS et Iridium. Sa structure est simple et consiste en deux boucles rectangulaires rayonnantes. Le dipôle à alimentation unique proposé est capable de basculer entre la polarisation linéaire (LP) et la polarisation circulaire (CP) ou entre deux CP (polarisation circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP) en contrôlant les deux diodes PIN chargées sur chaque boucle rectangulaire. La symétrie de rayonnement de l'antenne est maintenue et un bon accord est obtenu entre les résultats simulés et mesurés.



**Figure I.38:** (a) top view ;(c) prototype de l'antenne

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

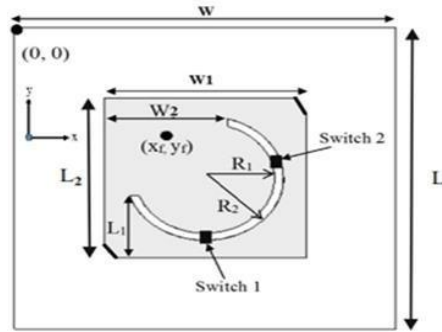
Une conception simple d'antenne microruban reconfigurable à polarisation unique est présentée dans cet article [106]. L'antenne comprend une plaque rayonnante circulaire, une alimentation de sonde et deux broches parasites. Grâce au réglage des charges réactives entre les broches parasites et le plan de masse, la polarisation de l'antenne peut être reconfigurée entre polarisation linéaire, polarisation circulaire droite et polarisation circulaire gauche. La configuration de l'antenne microruban est simple et facile à fabriquer.



**Figure I.39:** Configuration physique de l'antenne proposée

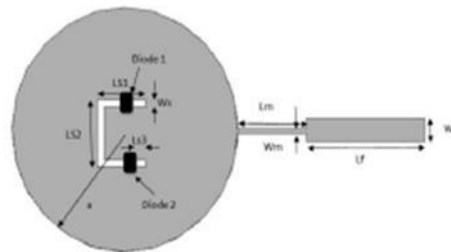
Cet article[107] présente une antenne reconfigurable à polarisation circulaire pour les applications 5G, de taille compacte et présentant une bonne réponse en fréquence. L'antenne micro ruban proposée est conçue sur un substrat FR-4 avec un constant diélectrique relatif de 4,3 et a une taille maximale de 30 à 30 mm<sup>2</sup> avec une alimentation de sonde coaxiale de 50  $\Omega$ . Cette conception comporte deux commutateurs à diode PIN contrôlant la reconfiguration entre la polarisation circulaire droite (RHCP) et la polarisation circulaire gauche (LHCP).L'antenne proposée a été simulée à l'aide du logiciel de studio micro-ondes CST : elle possède des bandes de 3,35 à 3,77 GHz et de 3,4 à 3,72 GHz pour les deux états de reconfiguration, et chacune est adaptée aux applications 5G avec un bon gain de 4,8 dB pour les deux modes de fonctionnement.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



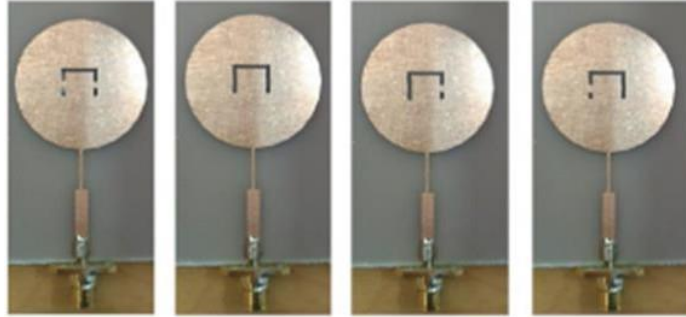
**Figure I.40:** Antenne micro ruban à polarisation reconfigurable proposée

Une nouvelle antenne micro ruban à alimentation unique avec une polarisation commutable pour quatre états avec l'utilisation de deux diodes PIN seulement est proposée [108]. Cette antenne convient aux systèmes de réseaux locaux sans fil (WLAN). L'avantage de cette antenne est sa structure simple, elle contient un patch circulaire rayonnant, deux commutateurs (diode PIN), et une ligne d'alimentation microruban de  $50 \Omega$ . Elle peut être commutée entre quatre états différents : deux états de polarisation linéaire (LP), un état de polarisation circulaire gauche (LHCP) et un état de polarisation circulaire droite (RHCP). Les différents sens de l'antenne proposée sont fabriqués au lieu d'utiliser des diodes PIN. La figure I.42 illustre tous les états des antennes fabriquées.



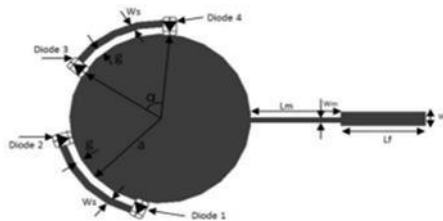
**Figure I.41:** Configuration de l'antenne proposée

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES



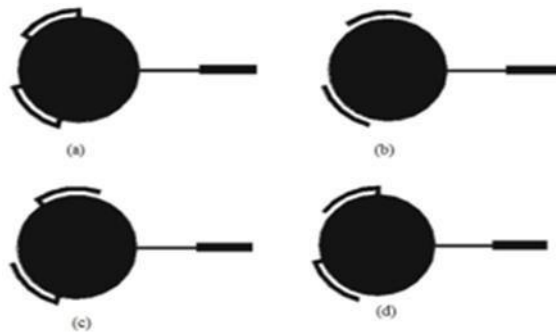
**Figure I.42:** La photo des différences sens fabriquées des antennes proposées (a)Ant.1,(b) Ant.2,(c) Ant.3 et (d) Ant.4

Une nouvelle antenne circulaire reconfigurable à alimentation unique en microruban avec diversité de polarisation est proposée [109]. La structure simple de cette antenne contient un patch circulaire rayonnant, quatre commutateurs (diode PIN) et une ligne d'alimentation en microruban de  $50 \Omega$ . Elle peut être commutée entre quatre états différents : deux états pour la polarisation linéaire (LP), un état pour la polarisation circulaire gauche (LHCP) et un état pour la polarisation circulaire droite (RHCP).



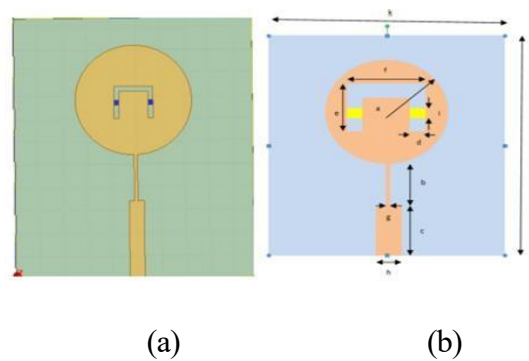
**Figure I.43:** Configuration de l'antenne circulaire en micro ruban avec capacité de polarisation reconfigurable

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

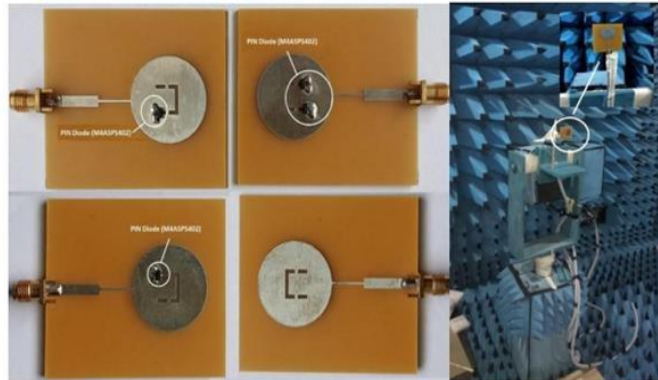


**Figure I.44:** Sens des différences de l'antenne proposée (a) Polarisation linéaire à 2.15GHz (basse fréquence), (b) Polarisation linéaire à 2.25 GHz (haute fréquence), (c) RHCP à 2,4GHz, (d) LHCP à 2,4GHz.

Cette étude [110] décrit et illustre une antenne patch microruban reconfigurable commutable. En allumant et éteignant les diodes PIN, l'antenne suggérée peut passer d'un état de polarisation distinct à un autre. Les diodes PIN sont entrées en contact avec des éléments de patch parasite en forme de O pour former le patch circulaire. 3,24 GHz est une fréquence de résonance avec ( $S_{11}$  inférieure à -10 dB). La capacité de l'antenne à effectuer une transition entre les polarisations circulaires gauche et droite (LHCP et RHCP) a été vérifiée par comparaison des résultats simulés et mesurés observés.



**Figure I.45:** MPA à fente en U reconfigurable proposée (a) configuration géométrique simulée (b) configuration géométrique



**Figure I.46:** Les prototypes reconfigurables avec vue de mesures en chambre anéchoïque

### I.5 Les avantages et les inconvénients des antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables offrent plusieurs avantages et inconvénients. Voici un aperçu :

#### I.5.1 Avantages

- **Flexibilité de fréquence** : Permettent de changer de fréquence de fonctionnement selon les besoins, ce qui est essentiel pour des applications multi-bandes ou dans des environnements à spectre partagé.
- **Optimisation de l'usage du spectre** : Facilitent une meilleure exploitation du spectre disponible en permettant de passer d'une bande à une autre, réduisant ainsi les interférences et améliorant la capacité du réseau.
- **Ajustement dynamique** : Offrent des ajustements en temps réel en fonction des conditions environnementales, comme les obstacles, ou des exigences réseau, telles que les changements de charge ou d'utilisation.
- **Réduction des coûts** : Une antenne reconfigurable peut remplacer plusieurs antennes fixes, réduisant ainsi les coûts de fabrication, d'installation et d'entretien. Cela est particulièrement avantageux pour les dispositifs compacts ou les applications nécessitant une portabilité.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

- **Amélioration des performances** : La reconfiguration permet d'adapter les caractéristiques de l'antenne, comme le gain ou la direction du faisceau, pour optimiser la réception ou l'émission dans des conditions spécifiques, améliorant ainsi la qualité du signal et la couverture.
- **Adaptabilité aux applications avancées** : Essentielles pour des technologies émergentes comme la 5G, la 6G, l'IoT, ou les communications satellitaires, où la reconfiguration assure la compatibilité avec divers standards et environnements.

### I.5.2 Inconvénients

- **Complexité de conception** : La conception et la fabrication d'antennes reconfigurables demandent des technologies avancées, telles que les diodes PIN, les MEMS, ou les matériaux intelligents, ce qui augmente leur complexité par rapport aux antennes traditionnelles.
- **Coût élevé** : Les composants actifs (commutateurs, circuits de contrôle) et les procédés de fabrication plus sophistiqués rendent ces antennes plus coûteuses, en particulier pour des applications à grande échelle.
- **Consommation d'énergie** : Le fonctionnement des composants actifs, comme les circuits de commande et les mécanismes de reconfiguration, peut nécessiter une consommation d'énergie supplémentaire, ce qui est un inconvénient pour les dispositifs à faible puissance ou autonomes.
- **Fiabilité limitée** : Les composants électroniques intégrés, tels que les commutateurs et les circuits de contrôle, introduisent des points de défaillance potentiels, réduisant la fiabilité globale et augmentant les besoins en maintenance.
- **Limites de performance** : Dans certaines applications spécifiques, les antennes reconfigurables peuvent ne pas atteindre les performances optimales des antennes fixes, notamment en termes de gain ou de bande passante.
- **Temps de reconfiguration** : La transition entre différentes configurations peut prendre un temps non négligeable, surtout avec des technologies moins avancées, ce qui peut limiter leur utilisation dans des environnements nécessitant une reconfiguration ultra-rapide.
- **Complexité de commande et de pilotage** : Les antennes reconfigurables nécessitent un contrôle précis, souvent via des algorithmes ou des systèmes électroniques complexes, ce qui peut être difficile à implémenter dans certains systèmes.

## CHAPITRE I ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

### I.6 Les défis rencontrés

- **Reconfigurabilité** : L'un des principaux défis consiste à concevoir une antenne capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement selon les besoins. Cela peut inclure le réglage de la fréquence de fonctionnement, du diagramme de rayonnement ou bien une combinaison. Les méthodes de reconfiguration peuvent varier, allant de l'utilisation de structures mécaniques à l'intégration de composants électroniques actifs, etc .....
- **Compactness et intégration** : Les antennes reconfigurables sont souvent utilisées dans des applications où l'espace et le poids sont limités, tels que les dispositifs portables ou les véhicules aérospatiaux. Par conséquent, la conception doit prendre en compte la compacité (faible taille) et l'intégration de l'antenne dans ces environnements restreints, tout en maintenant de bonnes performances.
- **Efficacité et performances** : L'ajout de fonctionnalités reconfigurables peut parfois affecter l'efficacité et les performances globales de l'antenne. Il est essentiel de trouver un équilibre entre les capacités de reconfiguration et les performances essentielles, telles que la directivité et le gain, pour garantir une performance optimale dans différentes configurations.
- **Large bande de fréquences** : Les antennes reconfigurables doivent souvent couvrir une large gamme de fréquences pour être polyvalentes. La conception d'une antenne capable de fonctionner efficacement sur plusieurs bandes de fréquences peut être complexe et nécessite des compromis entre la largeur de bande, et les performances globales de l'antenne.

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des antennes reconfigurables. Nous avons commencé par définir ce type d'antenne, puis décrit les différentes techniques de reconfiguration ainsi que leur classification. Par la suite, nous avons exposé plusieurs travaux de recherche relatifs aux antennes reconfigurables, en mettant particulièrement l'accent sur celles capables de changer de fréquence, celles dotées d'un diagramme de rayonnement agile, et celles permettant une modification de leur polarisation. Nous avons également discuté des avantages et des inconvénients de ces structures antennaires reconfigurables. Enfin, nous avons abordé les principaux défis auxquels ces antennes sont confrontées, notamment en matière de conception, de fiabilité et de performance.

## **CHAPITRE II**

---

# **APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES**

---

### *II APPLICATIONS DES ANTENNES RECONFIGURABLES*

#### **II.1 Introduction**

L'essor rapide des technologies de communication sans fil et mobiles a entraîné des exigences croissantes en termes de performance, de couverture et d'efficacité énergétique. Les réseaux modernes, tels que la 5G, l'Internet des objets (IoT), les réseaux Wi-Fi et les systèmes de communication à haut débit, nécessitent des solutions innovantes pour répondre à la demande de connectivité toujours plus importante. Les antennes reconfigurables apparaissent comme une solution idéale pour relever ces défis, en offrant une flexibilité et une adaptabilité sans précédent.

À la différence des antennes traditionnelles fixes, les antennes reconfigurables ont la capacité de modifier leurs paramètres de fonctionnement tels que la fréquence, la direction du faisceau, la polarisation ou la forme du rayonnement en fonction des besoins du réseau. Cette faculté d'ajustement dynamique permet d'optimiser l'utilisation du spectre, d'améliorer la couverture, de gérer la congestion du réseau et de répondre aux impératifs d'efficacité énergétique, en particulier dans le cas des dispositifs IoT [111][112] [113].

Ce chapitre explore les diverses applications des antennes reconfigurables dans les réseaux mobiles et sans fil, en soulignant leur rôle déterminant dans la gestion de la congestion, l'optimisation de la couverture, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et leur capacité à s'adapter aux différentes normes de communication. Nous analyserons également comment ces antennes participent à l'évolution des infrastructures de communication pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs mobiles dans des environnements de plus en plus complexes et en constante évolution.

#### **II.2 Applications des antennes reconfigurables**

Mettre à disposition une seule antenne pour diverses applications représente l'un des défis majeurs des systèmes de communication contemporains. Les antennes compactes et économiques de ces structures sont idéales pour des systèmes de communication modernes tels que la 5G, WiMax, l'Internet des objets (IoT), la détection radar, les réseaux de capteurs, les systèmes embarqués, les réseaux corporels (BAN) et les applications biomédicales [114]. Dans ce chapitre, nous discuterons des différents domaines d'application des antennes reconfigurables, en particulier dans les réseaux sans fil et les réseaux mobiles, en mettant en lumière leurs avantages et leurs défis dans ces contextes.

## **CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES**

### **II.2.1 Réseau sans Fil (Wireless Networks)**

Les réseaux sans fil sont des systèmes de communication qui permettent la transmission de données sans avoir besoin de câbles physiques. Ils utilisent des ondes électromagnétiques, telles que les ondes radio, les micro-ondes ou l'infrarouge, pour transmettre des informations à travers l'air. Ces réseaux sont au cœur de nombreuses technologies modernes, y compris Wi-Fi, Bluetooth, réseaux mobiles (comme 3G, 4G, 5G), et réseaux de capteurs sans fil. Les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité et mobilité, permettant aux utilisateurs de se connecter à Internet ou de communiquer sans être limités par des câbles [115].

De plus, ils sont essentiels dans l'ère de l'Internet des objets (IoT), où une multitude de dispositifs connectés échangent des données sans fil. Cependant, bien qu'ils présentent de nombreux avantages, tels que la facilité d'installation et la couverture étendue, les réseaux sans fil peuvent souffrir de limitations en termes de sécurité, de congestion du spectre, et de portée, ce qui nécessite des solutions innovantes pour assurer leur efficacité et leur fiabilité.

### **II.2.2 Type des réseaux sans fil**

#### **II.2.2.1 La technologie WI-FI**

Le Wi-Fi est un réseau local qui utilise la fréquence du signal radio pour établir des connexions entre les ordinateurs et d'autres appareils connectés, permettant ainsi la communication entre les appareils et les personnes connectées. Il s'agit d'un terme composé qui signifie « Wireless Fidelity » en français, qui désigne la fidélité sans fil. Il a été initialement attribué à la certification délivrée par l'organisme « WECA1 », qui a pour objectif de s'assurer de promouvoir le Wi-Fi en tant que norme sans fil mondiale sur tous les marchés. Cette appellation générale désigne la norme de communication IEEE802.11 pour les réseaux sans fil locaux « WLAN<sup>2</sup> » [116].

Le débit de transfert de données du réseau est exprimé en Mbps (mégabit par seconde) [117].

Le réseau WiFi utilise les deux bandes de fréquence 2.4GHz et 5GHz pour transmettre son signal. Le principal motif d'utilisation de la bande 2.4GH a été sa disponibilité générale et sa large couverture. Toutefois, cette bande présente des limitations de vitesse et une probabilité d'interférence en raison de son utilisation par d'autres objets et réseaux [117].

Par conséquent, la bande 5GHz est apparue. Moins encombrée, elle propose une connexion plus stable et constitue une solution idéale pour échapper aux interférences. Sa vitesse peut atteindre jusqu'à 3 fois celle de son prédécesseur. Cependant, cette bande a une portée inférieure à celle de la bande 2.4GHz.

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

Les principales distinctions entre les bandes 2.4 GHz et 5 GHz résident dans la bande passante, c'est-à-dire la vitesse et la portée, également connue sous le nom de couverture. Chaque bande a ses propres atouts et en effet, les deux bandes de fréquences sont extrêmement performantes. Cependant, en fonction de la situation, il est recommandé de mettre en marche l'une ou l'autre sur les routeurs WiFi de votre réseau [118].

### II.2.2.2 Bluetooth

Ce réseau est utilisé pour les communications à courte portée, principalement entre des appareils comme les smartphones, les casques, et les enceintes. Il est optimisé pour les échanges de petites quantités de données sur des distances réduites (généralement jusqu'à 100 mètres). Les dispositifs Bluetooth opèrent principalement dans la bande de fréquence 2,4 GHz (plus précisément de 2,402 GHz à 2,480 GHz) [119].

### II.2.2.3 ZigBee et LoRaWAN

Ces technologies sont adaptées aux réseaux de capteurs et à l'Internet des objets (IoT), où la portée est importante et la consommation énergétique est un facteur crucial [120].

- **ZigBee** fonctionne dans les bandes de fréquences 2,4 GHz (mondial), 868 MHz (Europe), et 915 MHz (Amérique du Nord).
- **LoRaWAN** utilise principalement les bandes ISM, notamment 433 MHz, 868 MHz (Europe), et 915 MHz (Amérique). Ces bandes non licenciées permettent une communication à longue portée avec une faible consommation d'énergie.

### II.2.2.4 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

C'est une technologie sans fil relativement récente qui vise à offrir un accès à large bande dans les réseaux métropolitains sans l'utilisation excessive de câbles. Conçu pour fournir des connexions à haut débit, WiMAX est considéré comme une alternative efficace aux technologies filaires traditionnelles, en particulier dans les régions mal desservies ou éloignées. Il permet de relier des utilisateurs fixes et mobiles à Internet, avec une capacité d'extension flexible du réseau, assurant ainsi une couverture étendue et une gestion optimisée de la qualité de service (QoS). Le WiMAX repose sur les normes IEEE 802.16 (versions 2004/2005) [121, 122,123] et offre des débits de données élevés, pouvant atteindre jusqu'à 100 Mbps, tout en couvrant des distances allant jusqu'à 50 km pour les utilisateurs fixes et mobiles. Ce qui différencie WiMAX des autres technologies sans fil est sa capacité à offrir une couverture à grande échelle avec une infrastructure relativement simple et économique. Ce facteur rend WiMAX particulièrement adapté aux zones rurales ou peu denses, là où les infrastructures filaires sont souvent inexistantes ou coûteuses à

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

déployer. Initialement, WiMAX opérait sur des bandes de fréquence allant de 10 à 66 GHz, destinées à des applications à haute capacité, mais avec une portée relativement limitée. Cependant, avec l'apparition de la norme de mobilité IEEE 802.16e, de nouvelles bandes de fréquence allant de 2 à 6 GHz ont été spécifiées, permettant d'élargir la portée et d'améliorer la couverture. Ces nouvelles bandes incluent des sous-bandes spécifiques, telles que 5,2-5,8 GHz, qui sont attribuées à des utilisations particulières sous licence, tandis que des bandes libres, comme 2,3-2,7 GHz et 3,4-3,7 GHz, sont également utilisées [124].

- **Classification des standards WiMAX**

Les différentes évolutions de la norme IEEE 802.16 peuvent être classées en deux grandes catégories :

- a) WiMAX fixe (IEEE 802.16-2004) :** Ce mode est conçu pour des utilisateurs fixes avec une antenne installée de manière permanente, semblable à une antenne de télévision. Le WiMAX fixe opère généralement dans les bandes de fréquence de 2,5 GHz et 3,5 GHz, qui nécessitent une licence d'exploitation, ainsi que dans la bande libre de 5,8 GHz [125]. Il est particulièrement adapté aux environnements où une couverture étendue est nécessaire sans la mobilité.
- b) WiMAX mobile (IEEE 802.16e) :** Connue sous le nom de "WiMAX portable", cette version est spécifiquement conçue pour les appareils mobiles. Elle permet de connecter des utilisateurs en déplacement tout en maintenant une connexion à haut débit à Internet. La bande de fréquence s'étend de 2 à 6 GHz, avec des extensions possibles en fonction des régulations locales [126]. Ce mode est similaire à la 4G et est utilisé dans des scénarios où la mobilité et l'accès rapide à Internet sont essentiels, comme dans les environnements urbains denses.

### II.2.3 Les réseaux mobiles

Les réseaux mobiles, de leur côté, sont spécialement développés pour fournir des services de communication aux utilisateurs en mouvement. Ils permettent aux appareils mobiles (tels que les smartphones, tablettes, etc.) de se connecter à Internet et de passer des appels, tout en garantissant une couverture étendue sur de larges zones géographiques.

#### II.2.3.1 Évolution des réseaux mobiles

- 1. 1G (Première génération) :** Le 1G était principalement un réseau analogique, permettant uniquement la transmission de la voix sur de courtes distances. Il a été remplacé par des réseaux plus performants.
- 2. 2G (Deuxième génération) :** Le passage au numérique a permis la transmission de données et de messages texte (SMS). Ce réseau a marqué un grand pas dans la téléphonie mobile.

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

3. **3G (Troisième génération)** : Les réseaux 3G ont introduit des débits de données plus élevés, permettant l'accès à Internet mobile, la vidéo en streaming et d'autres services multimédias.
4. **4G (Quatrième génération)** : La 4G a apporté une augmentation significative des débits de données, permettant des services comme la vidéo HD en temps réel et des applications plus exigeantes en bande passante.
5. **5G (Cinquième Génération)**: Les bénéfices de la technologie 5G sont importants, comme une diminution de la consommation d'énergie, des débits plus élevés, une connectivité améliorée, une optimisation du travail à distance et une prolongation de la durée de vie des appareils. Effectivement, la connexion 5G propose des vitesses jusqu'à 10 fois plus élevées que la 4G, ce qui facilite le téléchargement, l'édition et le partage rapide de fichiers volumineux à partir de smartphones. En outre, elle garantit une transmission rapide et sans interruption des données grâce à une latence minimale [127]. Le choix de la bande de fréquence pour les réseaux mobiles repose sur un équilibre entre couverture et capacité. Les fréquences basses sont privilégiées pour assurer une meilleure couverture, car elles offrent de meilleures caractéristiques de propagation. En revanche, les fréquences élevées sont utilisées pour accroître la capacité, grâce à leur large bande passante, qui permet de gérer un plus grand volume de trafic [128].

### II.2.3.2 Caractéristiques et importance de la bande de 3,5 GHz dans le spectre de la 5G

Les bandes de fréquences de la 5G sont réparties en deux gammes distinctes selon la région et les décisions réglementaires prises par chaque pays. Parmi celles-ci figurent les bandes suivantes [129]:

- **La première gamme de fréquence** : comprend deux bandes de fréquence :
  - ✓ **Bandes inférieures à 1 GHz** : Ces bandes de fréquences inférieures à 1 GHz offrent une couverture plus large et une meilleure pénétration à travers les obstacles, mais elles présentent des vitesses de transmission plus faibles.
  - ✓ **Bandes inférieures à 6 GHz** : Cette bande intermédiaire comprend les fréquences allant de 410 MHz à 7125 MHz. Les fréquences souvent utilisées dans cette plage pour la 5G incluent 3,5 GHz et 2,5 GHz. Ce spectre de fréquences de milieu de gamme offre un bon équilibre entre couverture et capacité.
- **La 2ème gamme de fréquences** : Cette bande haute fait référence aux fréquences allant de 24,25 GHz à 71,0 GHz, y compris les 24 GHz, 28 GHz, 39 GHz et 47 GHz. Les fréquences des ondes millimétriques permettent d'atteindre des débits de données très élevés. Cependant, elles ont une portée plus limitée et sont plus sensibles aux obstacles.

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

La fréquence de 3,5 GHz a été envisagée et acceptée par la plupart des pays [130][131]. La bande des 3,5 GHz, également connue sous le nom de bande des 3,5 GHz, est généralement considérée comme la plage de fréquences principale pour la 5G [127].

La bande C comprend des fréquences de 3.4 GHz à 3.8 GHz, cette bande constitue la bande-cœur de la 5G, qui est fréquemment utilisées pour les déploiements 5G. Cette plage de fréquences offre des bénéfices particuliers en ce qui concerne la conception et les performances des antennes [132].

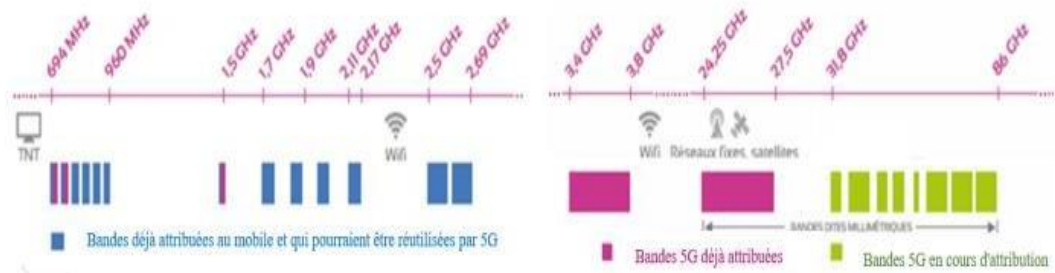


Figure II.1 : Les fréquences de 5G repérées

### II.2.4 Lien avec les antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables jouent un rôle clé dans l'amélioration des performances des réseaux mobiles et sans fil, notamment grâce à leur capacité à ajuster dynamiquement leurs propriétés en fonction des besoins spécifiques du système ou de l'environnement. Ces antennes offrent une grande flexibilité, ce qui permet de mieux gérer la congestion du réseau, d'optimiser la couverture, d'améliorer l'efficacité énergétique et d'adapter les systèmes de communication à diverses normes. Voici des détails sur chaque application mentionnée :

#### II.2.4.1 La gestion de la congestion dans les réseaux mobiles

Dans les réseaux mobiles, la congestion peut survenir lorsqu'il y a trop d'appareils ou de données à gérer dans une zone donnée. Cela peut entraîner des lenteurs de connexion, des interruptions de service ou une faible qualité de la communication. Les antennes reconfigurables peuvent aider à résoudre ce problème en modifiant leur fréquence, leur orientation ou leur diagramme de rayonnement pour répartir la charge plus efficacement. Par exemple, elles peuvent:

- Changer de fréquence pour éviter les canaux surchargés.

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

- Ajuster leur forme de rayonnement pour concentrer les signaux là où la demande est la plus forte, en réduisant l'interférence avec d'autres utilisateurs.
- Optimiser la polarisation pour améliorer la capacité du réseau et réduire les interférences dues à la polarisation croisée des signaux.

### II.2.4.2 L'optimisation de la couverture dans les réseaux sans fil

Les antennes reconfigurables sont particulièrement utiles pour améliorer la couverture dans les réseaux sans fil, en particulier dans les environnements complexes comme les zones urbaines denses ou les espaces intérieurs. Leur capacité à ajuster dynamiquement:

- **L'orientation du faisceau:** Permet de mieux diriger les signaux vers les zones nécessitant une couverture accrue, réduisant ainsi les zones mortes.
- **La forme et la direction du rayonnement:** Ces ajustements permettent de maximiser la couverture et la pénétration du signal, tout en minimisant les interférences et la consommation énergétique dans des régions moins sollicitées. Cela peut être particulièrement bénéfique dans des réseaux comme le Wi-Fi dans des espaces publics ou des bâtiments, où les signaux doivent se frayer un chemin à travers des obstacles physiques.

### II.2.4.3 L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les dispositifs IoT

Dans les réseaux de l'Internet des objets (IoT), les appareils sont souvent conçus pour être économes en énergie, car ils fonctionnent sur des batteries et doivent maximiser leur autonomie. Les antennes reconfigurables peuvent contribuer à cette efficacité énergétique de plusieurs façons :

- **Adaptation automatique de la bande passante et de la puissance de transmission :** En ajustant dynamiquement la bande passante et la puissance d'émission en fonction des besoins du moment, ces antennes réduisent la consommation d'énergie des dispositifs IoT.
- **Optimisation de la connectivité :** Grâce à leur capacité à ajuster la direction de leur rayonnement, les antennes reconfigurables peuvent réduire la puissance de transmission nécessaire pour atteindre un récepteur à distance, ce qui permet de conserver l'énergie.

## CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES

- **Gestion de la consommation en fonction de l'environnement** : Par exemple, dans des environnements de faible signal, l'antenne peut ajuster sa direction ou son gain pour maximiser l'efficacité de la communication sans augmenter la consommation d'énergie.

### II.2.4.4 L'adaptation des antennes aux différentes normes de communication (Wi-Fi, 5G, etc.)

Les antennes reconfigurables sont particulièrement adaptées aux systèmes de communication qui nécessitent de gérer plusieurs normes et fréquences, comme Wi-Fi, 5G, et d'autres technologies de communication sans fil. Ces réseaux utilisent souvent différentes bandes de fréquences et types de modulation qui nécessitent des caractéristiques d'antenne spécifiques pour fonctionner de manière optimale.

- **Adaptation aux différentes fréquences** : Une antenne reconfigurable peut changer de fréquence ou ajuster son comportement en fonction des exigences du réseau (par exemple, la bande 2.4 GHz pour le Wi-Fi ou les bandes millimétriques pour la 5G).
- **Compatibilité multi-normes** : Les antennes peuvent être configurées pour s'adapter à diverses normes de communication, permettant à un même dispositif de fonctionner sur différents réseaux ou technologies sans nécessiter de plusieurs antennes physiques.
- **Transition entre différentes technologies** : Une antenne peut passer facilement de la bande Wi-Fi à la bande 5G, en ajustant ses caractéristiques pour optimiser la communication, ce qui est crucial dans les environnements où plusieurs types de réseaux doivent coexister et fonctionner en harmonie.

### II.3 Conclusion

Les antennes reconfigurables constituent une avancée majeure dans l'optimisation des réseaux mobiles et sans fil modernes. Leur capacité à ajuster dynamiquement des paramètres clés tels que la fréquence, la direction du faisceau, la polarisation et la forme du rayonnement en fonction des besoins du réseau permet de répondre efficacement aux défis complexes de la gestion du spectre, de la couverture, de la congestion et de l'efficacité énergétique. Ces caractéristiques sont particulièrement pertinentes pour des technologies en constante évolution telles que la 5G, l'IoT, et les réseaux à haut débit, qui exigent une flexibilité et une réactivité accrues. Dans ce chapitre, nous avons exploré les applications essentielles des antennes reconfigurables, mettant en évidence leur rôle crucial dans l'optimisation des performances des réseaux mobiles et sans fil. De la gestion de la congestion à l'amélioration de la couverture, en passant par

## **CHAPITRE II APPLICATIONS DES ANTENNES IMPRIMEES RECONFIGURABLES**

l'adaptation aux diverses normes de communication, ces antennes apportent une solution efficace aux besoins croissants en connectivité et en efficacité. À mesure que les réseaux évoluent pour intégrer de nouvelles technologies et répondre à une demande toujours plus élevée, les antennes reconfigurables joueront un rôle central dans l'amélioration de la qualité des services offerts aux utilisateurs. En conclusion, l'adoption généralisée des antennes reconfigurables dans les infrastructures de communication est un facteur clé pour garantir des réseaux mobiles et sans fil plus efficaces, plus souples et mieux adaptés aux défis technologiques à venir.

Dans le chapitre suivant, nous simulerons plusieurs structures d'antennes patch micro-ruban reconfigurables en fréquence intégrant des composants actifs, tels que des diodes PIN. Ces conceptions seront développées et analysées à l'aide du logiciel CST-MWS, en ciblant diverses applications dans les systèmes de télécommunications mobiles.

## **CHAPITRE III**

---

# **CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN FREQUENCE**

---

## III ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN FREQUENCE

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la conception et l'optimisation d'antennes imprimées reconfigurables, avec une attention particulière à l'intégration des diodes **PIN BAR 63/64** pour des applications dans les technologies sans fil et mobile à savoir la 5G et le Wi-Fi 6. Les antennes reconfigurables sont au cœur des recherches récentes dans le domaine des télécommunications sans fil, en raison de leur capacité à s'adapter dynamiquement aux conditions de fonctionnement et aux fréquences de transmission. Nous débutons par une analyse détaillée des caractéristiques des diodes **PIN BAR 63/64**, utilisées pour la reconfiguration de l'antenne en fonction des besoins de la communication. Ensuite, nous abordons la conception d'une antenne imprimée rectangulaire reconfigurable en fréquence, en explorant son application pour les technologies 5G et Wi-Fi 6. Nous détaillons la géométrie de l'antenne patch initiale, suivie des résultats de simulation du paramètre S11 et du gain pour évaluer ses performances. La conception de l'antenne patch reconfigurable est ensuite explorée, avec une nouvelle présentation des résultats de simulation pour vérifier l'optimisation des caractéristiques de l'antenne. Une autre approche de conception est ensuite présentée, à travers la conception d'une antenne patch pentagonale reconfigurable en fréquences pour les applications sans fil et mobiles, accompagnée de ses résultats de simulation. Enfin, les performances de ces antennes sont comparées et analysées en fonction de leurs résultats en termes de S11 et gain, afin d'évaluer leur viabilité pour les systèmes de communication modernes.

Ce chapitre fournit une analyse complète et détaillée de chaque étape de la conception, permettant ainsi de comprendre l'impact des différentes configurations et la manière dont les antennes reconfigurables peuvent être optimisées pour les technologies de télécommunication de prochaine génération.

### III.2 Conception des antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables de notre projet de recherche doivent contenir :

- **Technologie de commutation** : Diodes PIN pour changer les fréquences.
- **Adaptabilité** : Une seule antenne peut couvrir plusieurs fréquences en permutant entre différents modes.
- **Optimisation des matériaux** : Utilisation de matériaux avancés ou des substrats performants (FR-4) pour minimiser les pertes et maximiser les performances.
- **Caractéristiques** : reconfigurabilité pour permettre le passage entre différentes bandes, petit facteur de forme pour intégration dans des appareils compacts (smartphones, routeurs, etc.), large

bande passante pour supporter plusieurs canaux, gain modéré à élever pour assurer une couverture suffisante dans des environnements à haute densité.

### III.3 Caractéristiques des diodes PIN BAR 63/64

Les diodes utilisées dans notre recherche sont de type **PIN BAR63/64**, elles sont spécifiquement conçues pour les applications RF et micro-ondes dans les bandes fréquences qui incluent 3.5 GHz. Cela les rend compatibles avec les applications LTE/5G, les radars, réseaux sans fil ou les systèmes de commutation d'antennes. Elles sont caractérisées par :

- **Faible résistance série (R)** en mode ON : Une faible résistance série, comme celle des **BAR63/64**, garantit de faibles pertes d'insertion, ce qui est essentiel pour maintenir un bon rendement à 3.5 GHz.
- **Faible capacité parasite (C)** en mode OFF : Les valeurs de capacité autour de **0.04 pF à 0.15 pF** pour les **BAR63/64** assurent un bon isolement et minimisent les interférences lorsque la diode est en mode OFF, même à des fréquences proches de 3.5 GHz.
- **Temps de commutation rapide** : Les **BAR63/64** offrent des temps de commutation rapides, permettant une reconfiguration efficace des antennes.

### III.4 Conception d'une antenne imprimée rectangulaire reconfigurable en fréquence pour la technologie 5G et WIFI 6

#### III.4.1 Géométrie de l'antenne patch initial

L'antenne initiale proposée est une antenne rectangulaire imprimée à 3.5 GHz, alimentée par une ligne micro ruban adaptée à 50 Ohm. Le substrat utilisé est de type FR-4 avec  $\epsilon_r = 4,3$  et  $h = 1,5$  mm, ce qui représente sa permittivité et son épaisseur, respectivement [7].

La figure III.1 montre la géométrie initiale de l'antenne. Cette configuration a été réalisée en utilisant une méthode d'adaptation, consistant à ajouter des encoches aux coins du patch rectangulaire pour optimiser l'adaptation à la fréquence souhaitée et la technique du plan de masse DGS pour améliorer les performances ainsi que la bande passante de notre antenne.

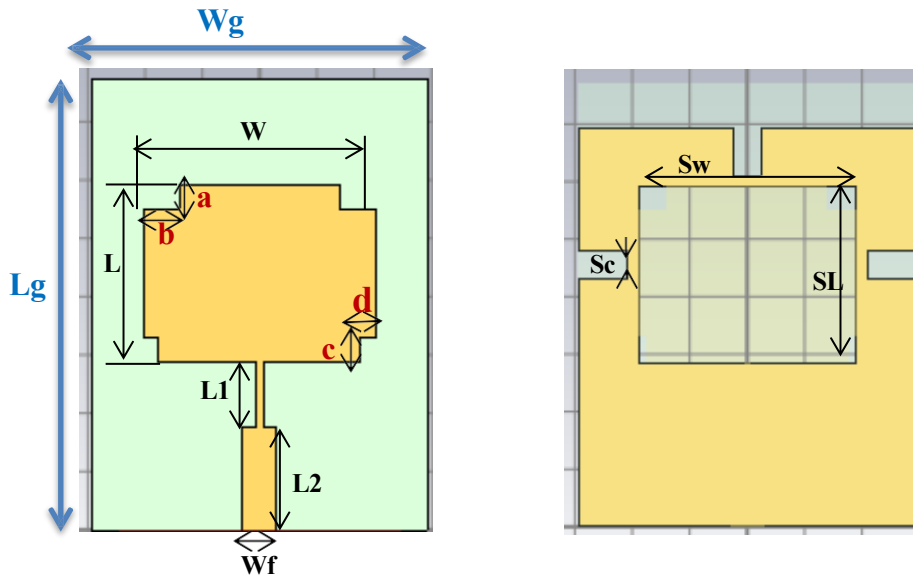


Figure III.1 : Antenne patch rectangulaire avec encoche et la DGS

Nous avons calculées les dimensions de notre antenne à partir des équations suivantes [133]:

$$W = \frac{1}{2fr\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{sr+1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{w}{h} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta L}{2} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}\mu_0\epsilon_0}} - 2 \Delta L \quad (4)$$

$$L_{eff} = L + 2 \Delta L \quad (5)$$

Les valeurs des paramètres de l'antenne patch rectangulaire sont indiquées dans le tableau III.1, et elles ont été calculées à partir des équations présentées précédemment.

Tableau III.1: Les dimensions optimales finales de notre antenne

| Les paramètres | Les valeurs (mm) |
|----------------|------------------|
| W              | 20.32            |
| L              | 15.25            |
| Wg             | 29.32            |
| Lg             | 38.57            |
| L1             | 5.50             |
| L2             | 8.82             |
| Wf             | 2.92             |
| Sw             | 18.94            |
| SL             | 15.25            |
| Sc             | 2.50             |

### III.4.2 Résultats de simulation

#### III.4.2.1 Le paramètre |S11|

La figure III.2 présente le coefficient de réflexion S11 de l'antenne initiale :

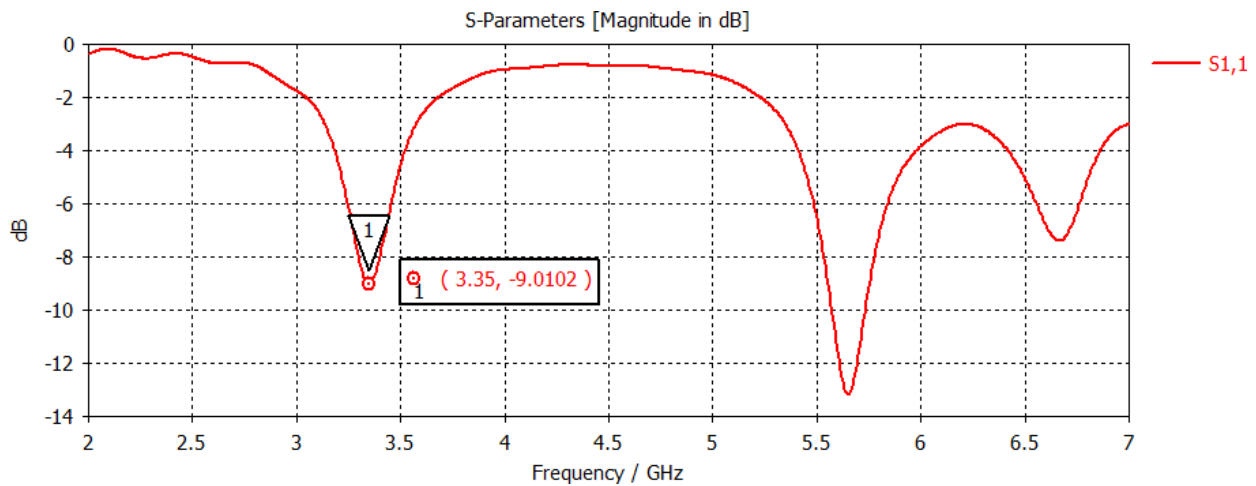


Figure III.2: Le paramètre S11 avant adaptation

Nous avons atteint une fréquence de 3,35 GHz avec un pic de -9,0102 dB en utilisant les dimensions initiales de l'antenne, ce qui montre que celle-ci n'est pas adaptée à l'application de la 5ème génération.

Nous allons insérer des encoches au niveau du patch et du plan de masse puis nous allons effectuer une étude paramétrique sur leurs paramètres afin d'adapter notre antenne à la fréquence 3.5 GHz.

Les valeurs retenues sont présentés dans le tableau III.2 :

Tableau III.2: L'étude paramétrique sur les encoches

| Simulations       | Les dimensions des encoches<br>(mm) |      |      |      | Résultats de la simulation |             |
|-------------------|-------------------------------------|------|------|------|----------------------------|-------------|
|                   | a                                   | b    | c    | d    | La fréquence<br>(GHz)      | S11<br>(dB) |
| Simulation1       | 2                                   | 3.66 | 1.98 | 1.76 | 3.28                       | -13.198     |
| Simulation 2      | 1.70                                | 4    | 1.88 | 2    | 3.325                      | -11.442     |
| Simulation 3      | 1.97                                | 2.96 | 2.58 | 1.16 | 3.464                      | -35.925     |
| Simulation4       | 2.07                                | 3    | 2.28 | 2    | 3.648                      | -17.49      |
| Simulation finale | 2.01                                | 3.16 | 2.18 | 1.36 | 3.5                        | -25.448     |

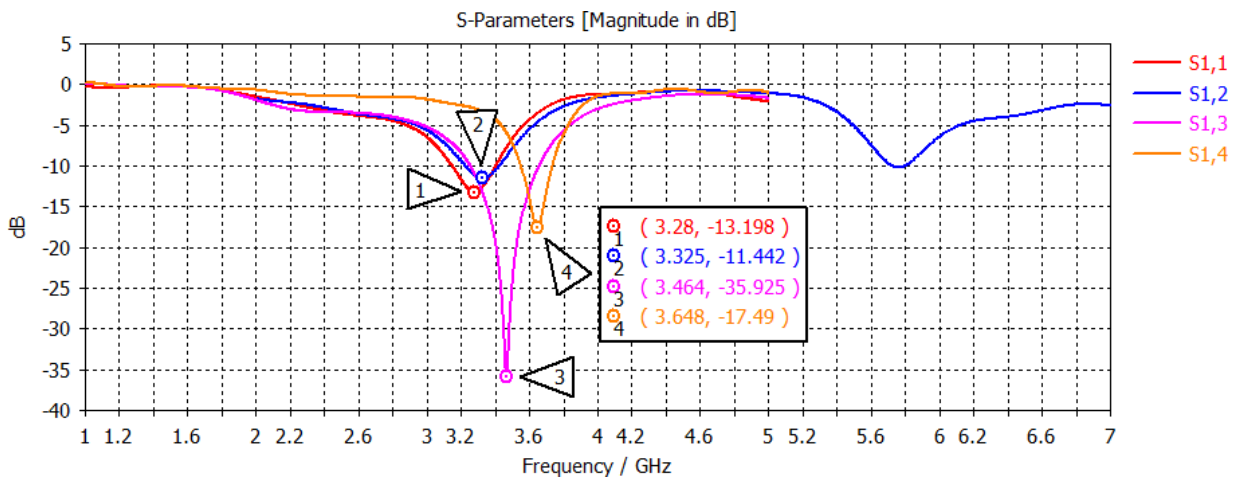


Figure III.3 : Le coefficient de réflexion obtenu par divers essais

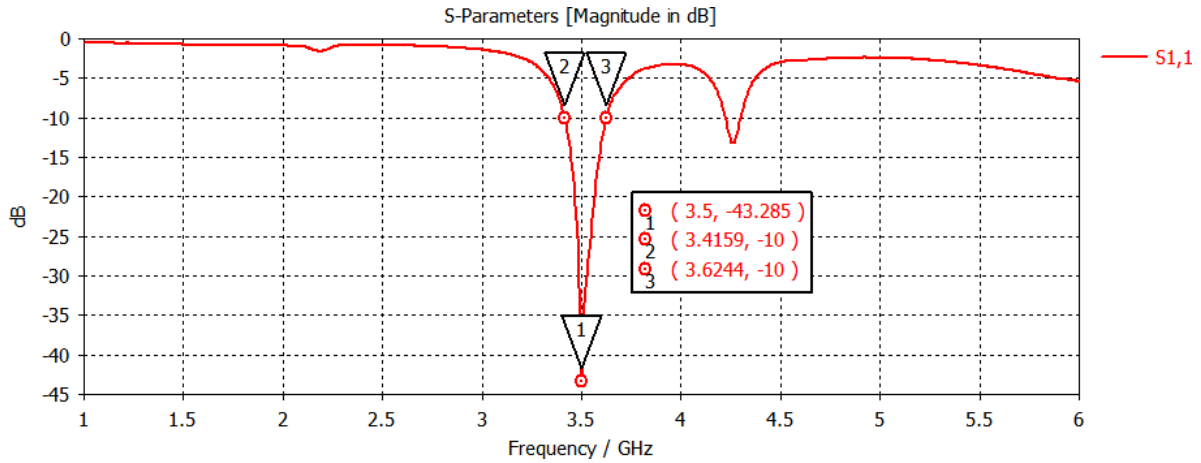


Figure III.4: Paramètre S11 de l'antenne patch rectangulaire

La figure III.4 donne un coefficient de réflexion de -43.285 à 3,5 GHz. La largeur de bande est comprise entre 3,41 et 3,62, elle est de 210 MHz. Le résultat est satisfaisant.

### III.4.2.2 Le diagramme de rayonnement

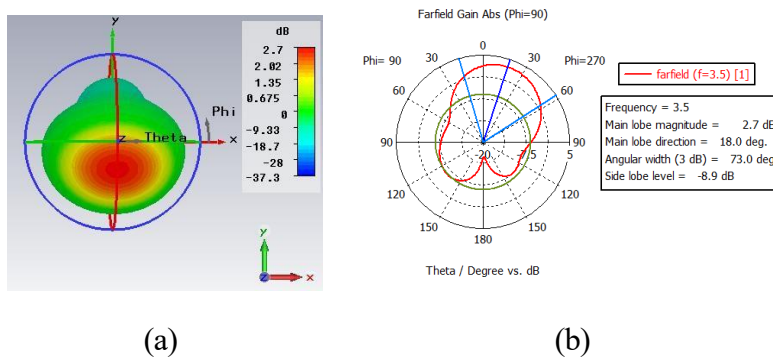


Figure III.5: Le diagramme de rayonnement (a)3D (b) polaire de l'antenne rectangulaire proposée

La figure III.5 présente le diagramme de rayonnement de notre antenne initiale en 3D et polaire. Le diagramme de rayonnement de cette antenne est omnidirectionnel, la largeur angulaire est de 73 degrés.

III.4.2.3 Le gain

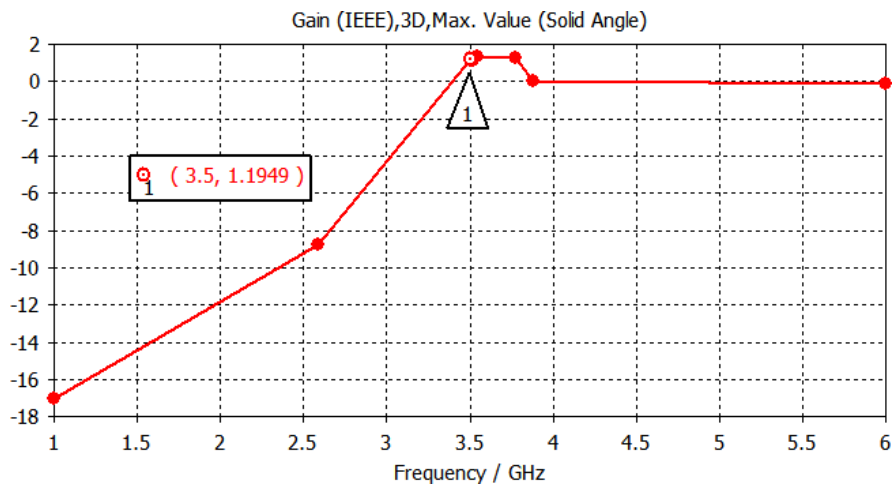


Figure III.6: Gain de l'antenne rectangulaire

Dans la figure III.6, le gain obtenu à 3.5GHz est de 1.19 dB.

III.5 Prototype et mesure de l'antenne patch rectangulaire

Le prototype de l'antenne patch rectangulaire proposée est montré sur la figure III.7, Nous avons utilisé un analyseur de réseau pour mesurer le coefficient de réflexion. Le résultat du S11 mesuré -22 dB est presque similaire à celui simulé à l'aide du logiciel CST, la légère différence entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales s'explique principalement par les tolérances de fabrication, l'inégalité de la soudure, ainsi que la qualité du connecteur SMA.

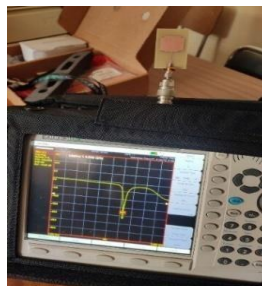


Figure III.7: Prototype de l'antenne rectangulaire initiale proposée

III.6 Conception de l'antenne patch reconfigurable

Nous avons inséré deux interrupteurs (S1, S2), comme le montre la figure III.8, sur le plan de masse DGS, afin d'alterner entre les deux bandes de fréquences. Lorsque les deux interrupteurs sont activés, le premier mode de fonctionnement est M1, et lorsqu'ils sont désactivés, le second mode est M2. Les valeurs des éléments dans les modes ON et OFF sont mentionnées dans le tableau III.3:

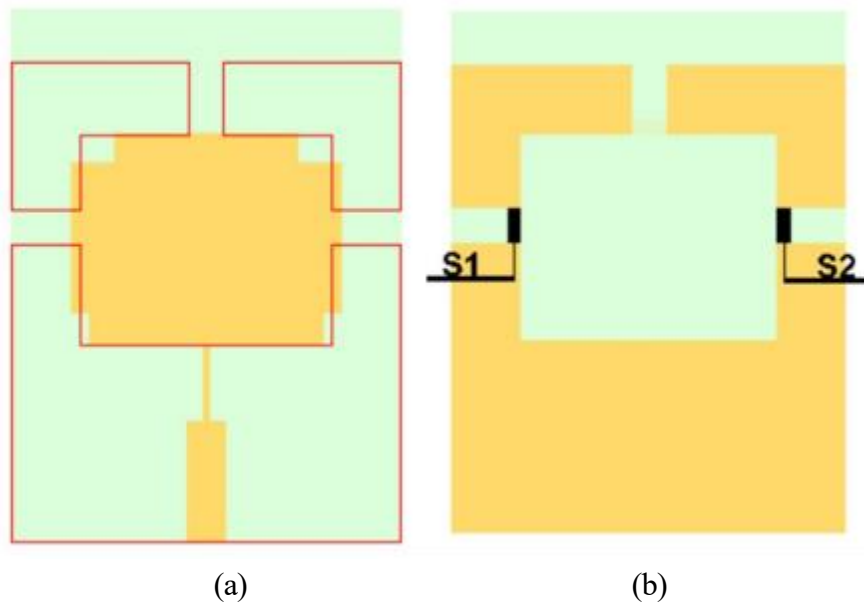


Figure III. 8: Positions des switches sur le plan de masse (a) vue de face (b) vue arrière

Les valeurs des paramètres de la diode PIN ainsi que leurs modes de fonctionnement dans notre antenne proposée sont données sur le tableau III.3:

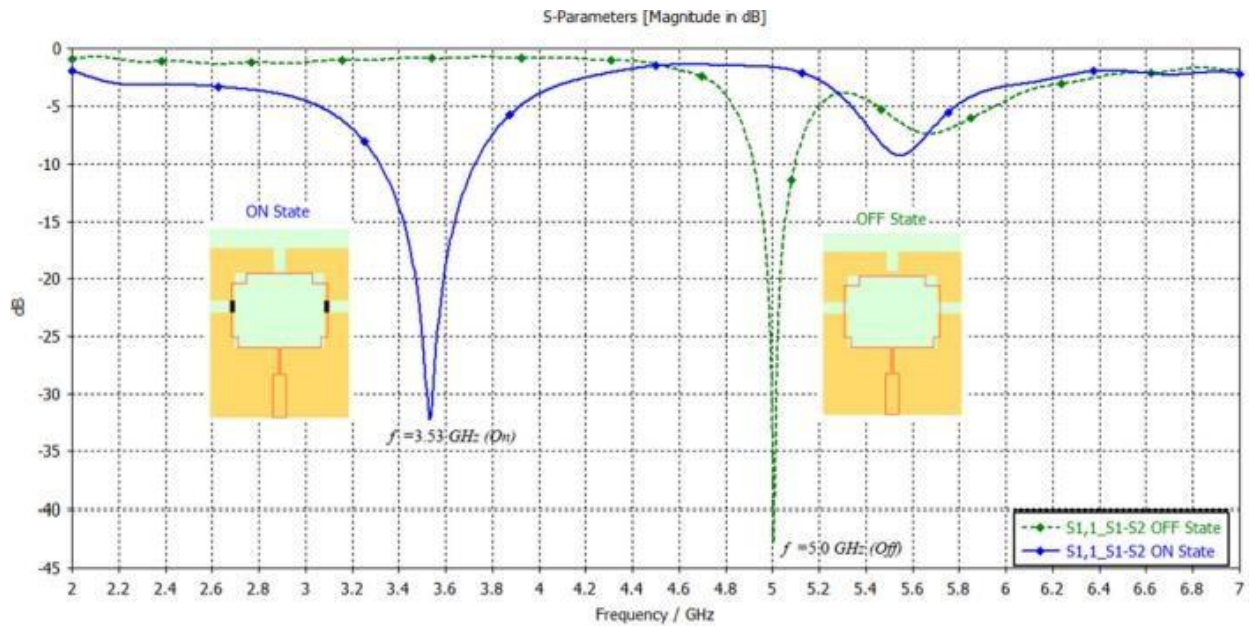
Tableau III.3: Mode de fonctionnement des diodes PIN BAR63

| Etat de la diode  | Résistance (R) | Inducteur (L) | Capacité(C) |
|-------------------|----------------|---------------|-------------|
| M1 mode (ON-ON)   | 0.15Ω          | 0.5 nH        | 0.15pF      |
| M2 mode (OFF-OFF) | /              | 0.5 nH        | 0.15pF      |

### III.6.1 Résultats de simulations

Nous allons présenter dans les figures III.9, III.10 et III.11 les résultats de simulations de la reconfigurabilité de l'antenne patch rectangulaire en termes de S11 et diagramme de rayonnement pour les deux modes de fonctionnement :

#### III.6.1.1 Paramètre S11



**Figure III.9:** Le paramètre S11 de l'antenne à deux états (ON-ON et OFF-OFF)

La figure III.9 montre la commutation entre les deux modes de fonctionnement, en mode M1 (état ON- ON). La fréquence obtenue est de 3,53 GHz à -32 dB avec 422 MHz de largeur de bande ; en mode M2 (état OFF-OFF), la fréquence passe à 5.0 GHz à -42 avec 209 MHz de largeur de bande.

Les résultats sont très satisfaisants pour les applications 5G et Wi-Fi 6.

III.6.1.2 Diagramme de rayonnement

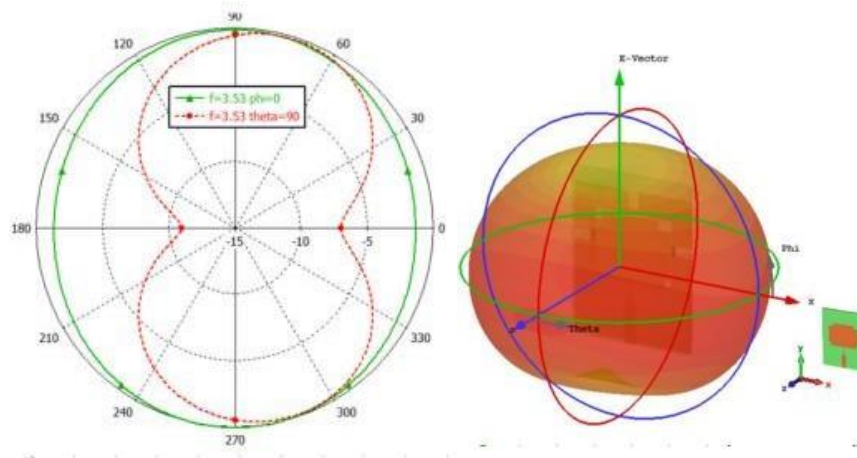


Figure III.10: Diagramme de rayonnement simulé pour le mode ON-ON a  $f=3.5\text{GHz}$

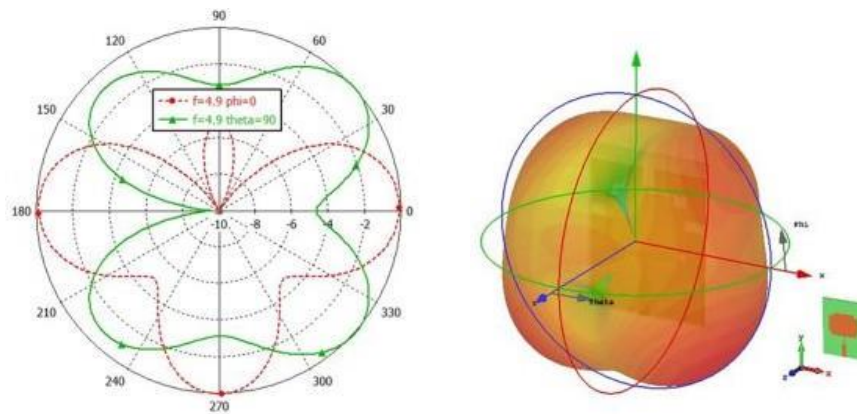


Figure III.11: Diagramme de rayonnement simulé pour le mode OFF-OFF a  $f = 5\text{GHz}$

Les figures III.10 et III.11 illustrent les diagrammes de rayonnement normalisés 2D et 3D de l'antenne proposée à l'état ON et à l'état OFF, respectivement, à 3.53GHz GHz et 5 GHz. Les diagrammes 3D montrent que l'antenne pour l'état ON a un diagramme de rayonnement omnidirectionnel, et concernant le deuxième mode (état OFF) de l'antenne, le diagramme de rayonnement reste à peu près omnidirectionnel, avec moins de dissipation dans les autres directions.

III.7 Conception d'une antenne patch pentagone reconfigurable en fréquences pour des applications sans fil et mobile

III.7.1 L'antenne pentagone proposée

Nous allons simuler une antenne patch pentagone conçu à partir de la forme rectangulaire (équations [1-5]) , alimentée par une ligne micro ruban de 50 ohms. Elle est construite sur un substrat diélectrique FR4 ayant une permittivité diélectrique de 4,3 et une hauteur  $h = 1,5\text{mm}$ . Cette structure est conçue pour opérer dans la plage de fréquences de [3,4-3,8] GHz, destinée aux applications mobiles de la cinquième génération [134]. Le tableau III.4 présente les dimensions optimales de l'antenne proposée.

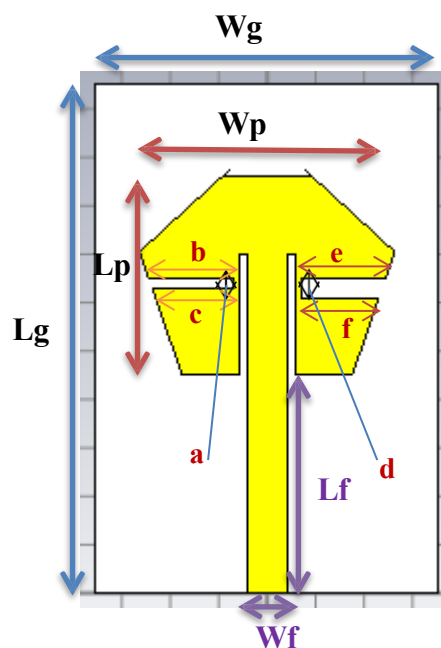


Figure III.12: L'antenne patch pentagonale proposée

Tableau III.4 : Les dimensions optimales finales de notre antenne proposée

| Les paramètres | Les dimensions (mm) |
|----------------|---------------------|
| $W_p$          | 26.31               |
| $L_p$          | 20.24               |
| $W_g$          | 35.31               |
| $L_g$          | 52.58               |
| $L_f$          | 22.50               |
| $W_f$          | 4                   |

III.7.1.1 Les résultats de simulation de l'antenne initiale

Nous allons présenter dans les figures III.13, III.14, III.15, III.16 et III.17 les résultats de simulation en fonction du paramètre S11, diagramme de rayonnement et le gain :

III.7.1.1.1 Paramètre S11

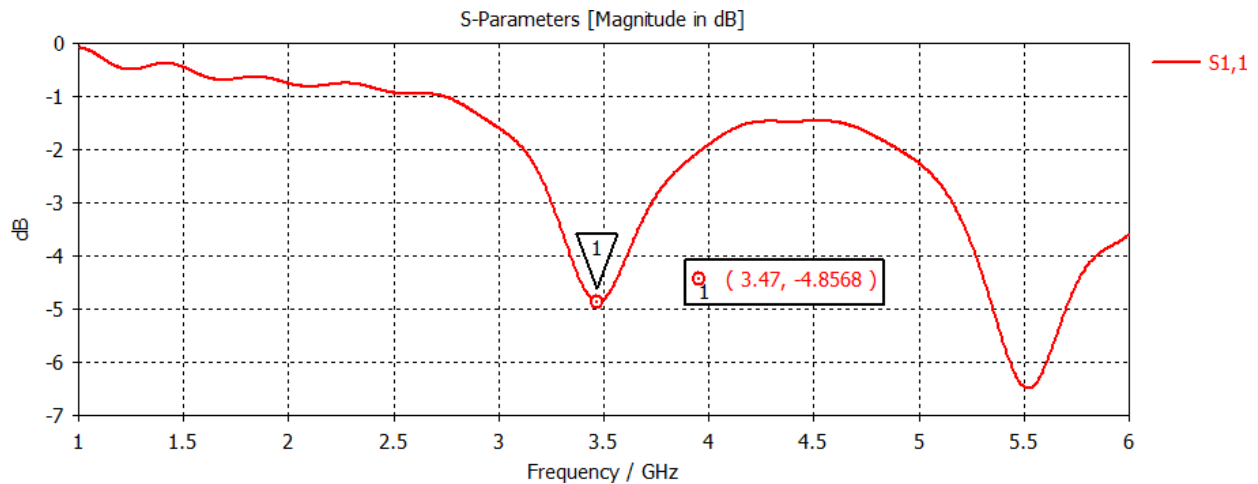


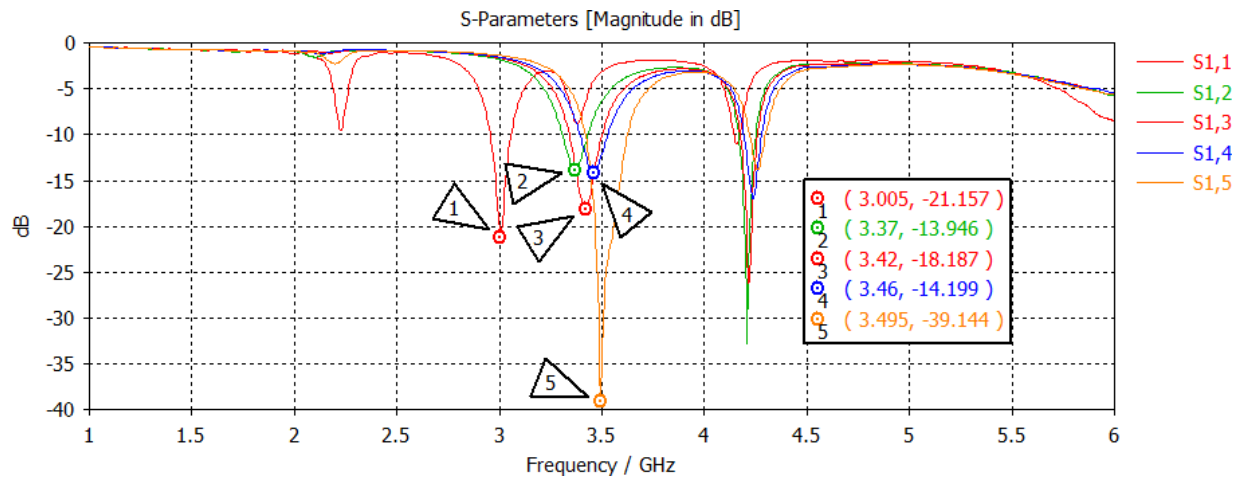
Figure III.13 : Le coefficient de réflexion de l'antenne pentagone initiale

La figure III.13 donne un coefficient de réflexion  $S_{11}$  de -4.8568 dB à la fréquence de 3.47GHz avec les dimensions initiales de l'antenne proposée, nous remarquons bien que l'antenne n'est pas adaptée aux applications mobiles et sans fil, nous allons alors, créer des encoches sur le patch et la ligne d'alimentation (comme le montre la figure III.12), puis nous allons faire une étude paramétrique sur leurs dimensions tel que le montre le tableau III.5:

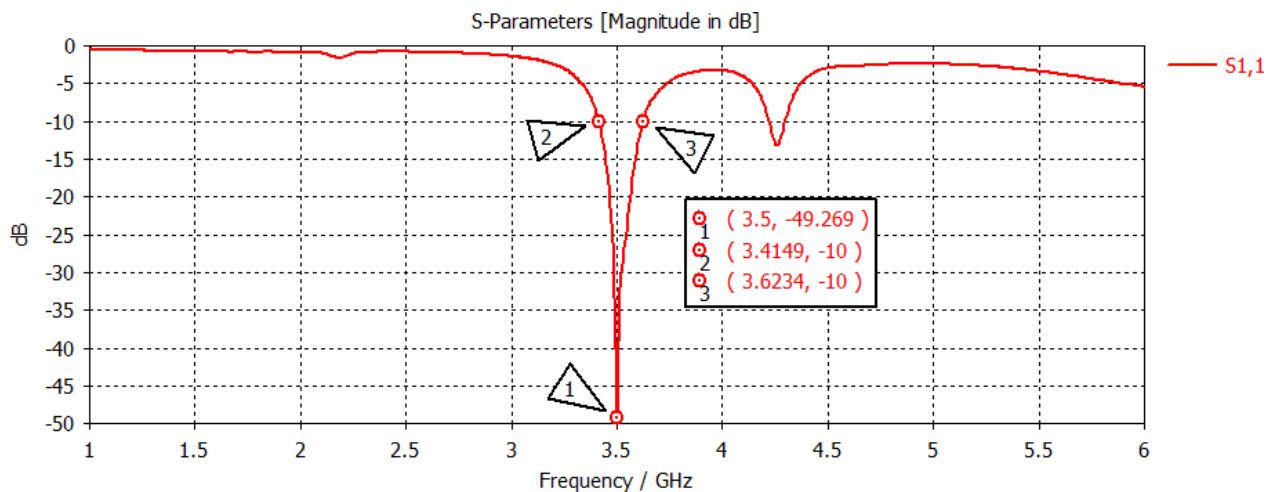
Tableau III.5: Etudes paramétriques sur les dimensions des encoches

| Simulations     | Les dimensions des encoches (mm) |      |      |      |      |      | Les résultats de la simulation |          |
|-----------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|--------------------------------|----------|
|                 | a                                | b    | c    | d    | e    | f    | la fréquence (GHz)             | S11 (dB) |
| Simulation1     | 3                                | 8.5  | 8.16 | 4.50 | 8.91 | 7.36 | 3.005                          | -21.157  |
| Simulation2     | 2.10                             | 9.04 | 8.32 | 2.80 | 8.52 | 7.56 | 3.37                           | -13.946  |
| Simulation3     | 1                                | 9    | 8.69 | 2    | 8.54 | 7.85 | 3.42                           | -18.187  |
| Simulation4     | 1.20                             | 8.65 | 8.31 | 2.15 | 8.37 | 7.97 | 3.46                           | -14.199  |
| Simulation5     | 1.10                             | 8.69 | 8.35 | 2.24 | 8.70 | 7.94 | 3.495                          | -39.144  |
| Résultat finale | 1                                | 8.71 | 8.37 | 2.14 | 8.71 | 7.97 | 3.5                            | -49.269  |

Le paramètre S11 de l'antenne pentagonale initiale pour les différents essais est illustré dans la figure III.14 :



**Figure III.14:** Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne pentagone initiale des essais effectués



**Figure III.15:** Le coefficient de réflexions de l'antenne pentagone finale proposée

La figure III.15 montre un coefficient de réflexion avec un pic de -49,269 dB à une fréquence de 3,5 GHz et une largeur de bande de 208,5 MHz allant de 3,4149 GHz à 3,6234 GHz. Ces résultats sont très favorables aux applications 5G.

III.7.1.1.2 Diagramme de rayonnement

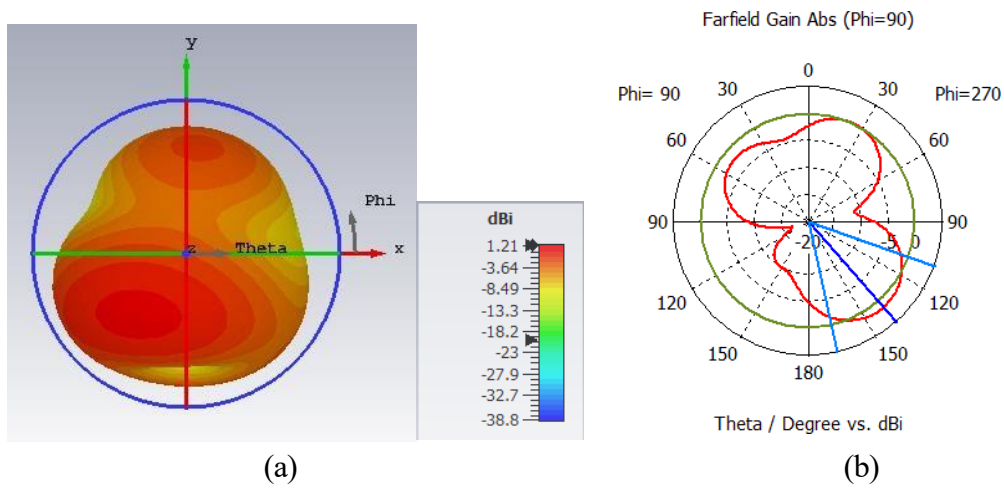


Figure III.16: Diagramme de rayonnement (a) 3D (b) polaire

La figure III.16 montre le diagramme de rayonnement 3D et polaire de l'antenne 3,5 GHz proposée. La largeur angulaire à 3dB est de 58 degrés.

III.7.1.1.3 Gain

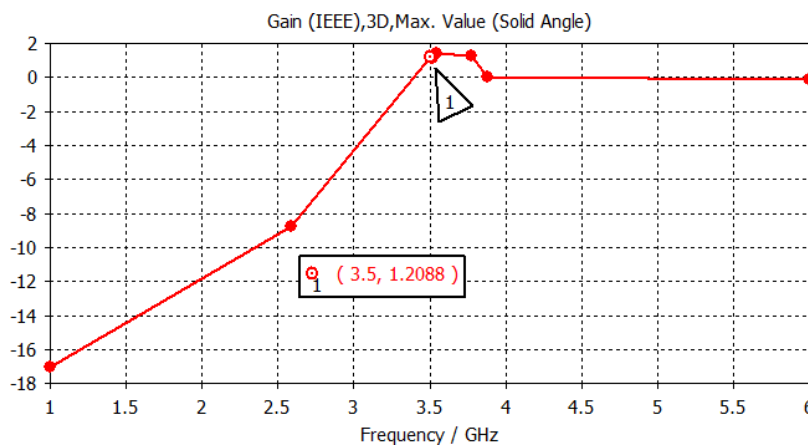


Figure III.17: Le gain de l'antenne pentagone

Comme le montre la figure III.17, nous avons obtenu un gain de 1,2088 dB à 3,5 GHz.

### III.7.2 Prototype et mesure de l'antenne patch pentagone proposé

Le prototype de l'antenne patch pentagone proposée est montré sur la figure III. 18, Nous avons utilisé un analyseur de réseau VNA allant de 23MHz-6200GHz pour mesurer le coefficient de réflexion. Le résultat du S11 mesuré -14.3 GHz est presque similaire à celui simulé à l'aide du logiciel CST, la légère différence entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales s'explique principalement par les tolérances de fabrication, l'inégalité de la soudure, ainsi que la qualité du connecteur SMA.

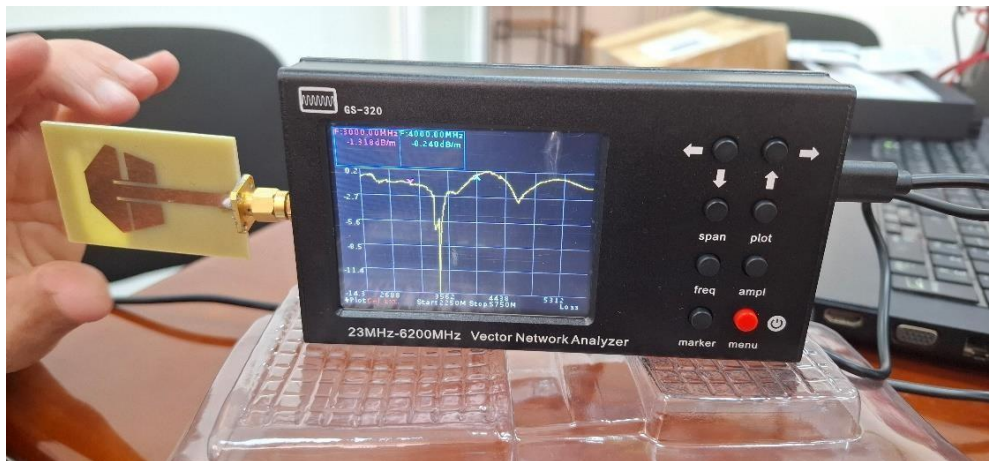


Figure III.18: Prototype et mesure de l'antenne patch pentagone

### III.7.3 Antenne pentagone reconfigurable en fréquence

Pour obtenir la reconfigurable de la fréquence, nous avons inséré quatre diodes PIN BAR64 (D1, D2, D3 et D4), sur les fentes du patch, comme le montre la figure III.19.

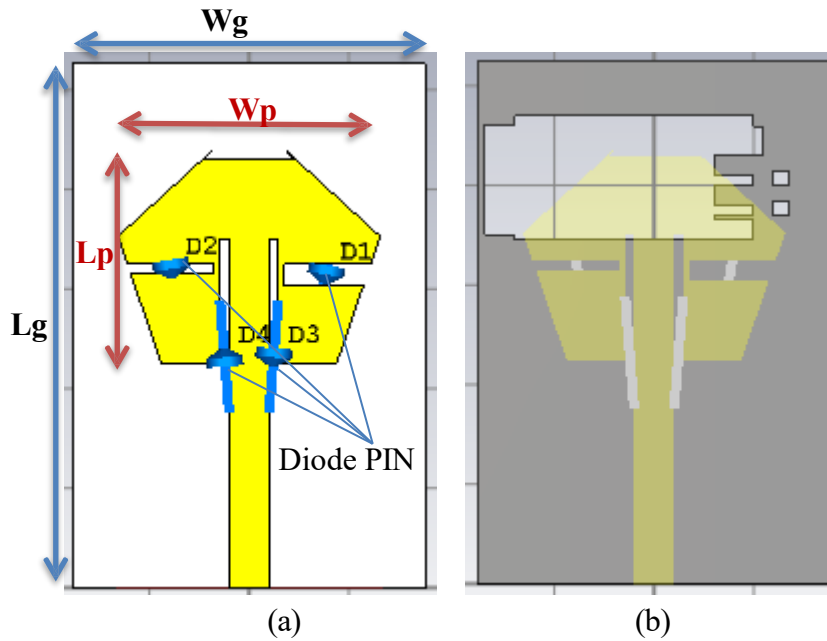


Figure III.19: Antenne patch pentagonale reconfigurable (a) vue de face (b) plan de masse

Les tableaux III.6 et III.7 indiquent les quatre modes de fonctionnement des diodes PIN BAR64 M1/ M2/ M3/ M4 et la valeur des éléments isolés utilisés dans ce travail pour réaliser la reconfiguration de la fréquence.

Tableau III.6: Les modes de fonctionnement de la diode PIN

| Mode de fonctionnement | Le mode M1       | Le mode M2             | Le mode M3                | Le mode M4               |
|------------------------|------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Etat des diodes        | D1/D2/D3/D4 :OFF | D1: OFF<br>D2/D3/D4:ON | D1/D2/D3 : ON<br>D4 : OFF | D1/D2: ON<br>D3/D4 : OFF |

Tableau III.7: Les valeurs de la diode PIN BAR64 utilisée

| Etat de la diode | Résistance (R) | Inducteur (L) | Capacité (C) |
|------------------|----------------|---------------|--------------|
| ON               | 3 $\Omega$     | 2.6e-13 H     | 0            |
| OFF              | 20k $\Omega$   | 0H            | 0.04E-12F    |

### III.7.3.1 Résultats de simulation en paramètre S11

Nous allons présenter dans la figure III.20 les résultats de la reconfigurabilité de l'antenne pentagone avec 4 modes de fonctionnement:

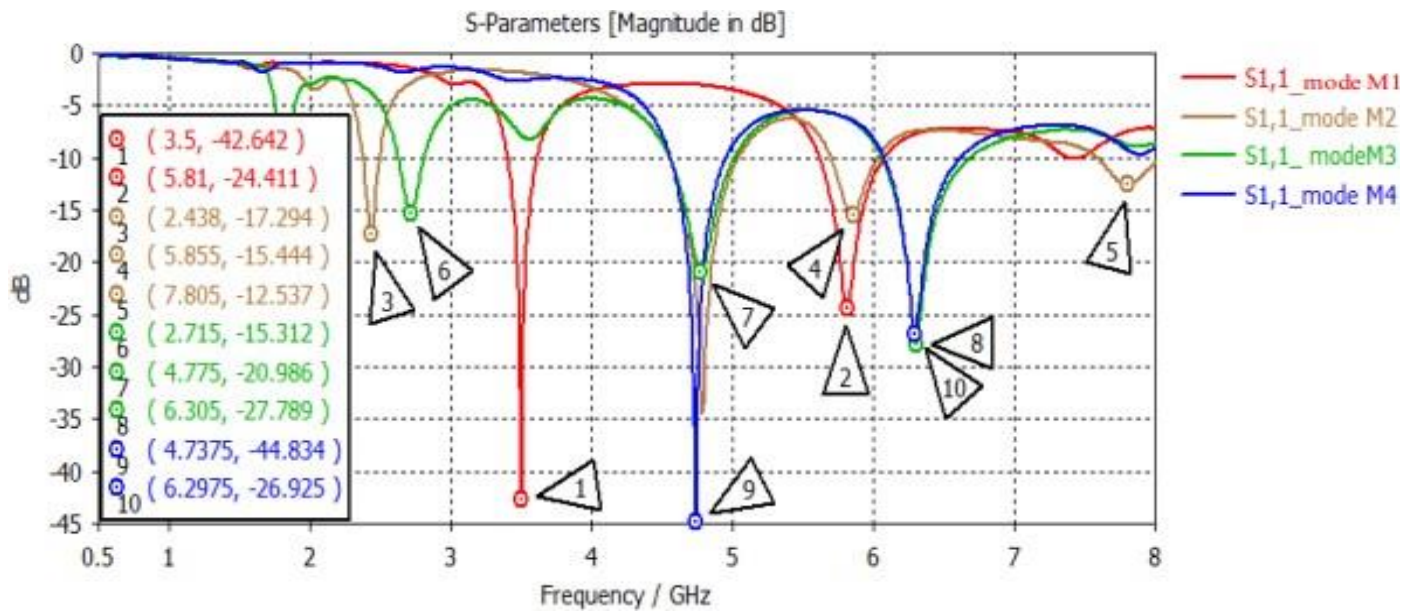


Figure III.20 : Le coefficient de réflexion S11 pour les 4 modes de fonctionnement M1/M2/M3 et M4

Comme le montre la figure III.20, plusieurs fréquences sont obtenues en commutant dans les quatre modes de fonctionnement. Le tableau III.8 reprend tous les résultats obtenus ainsi que S11, les fréquences, la largeur de bande et le gain pour les quatre modes des diodes PIN :

Tableau III.8: Les quatre modes de fonctionnement des diodes PIN

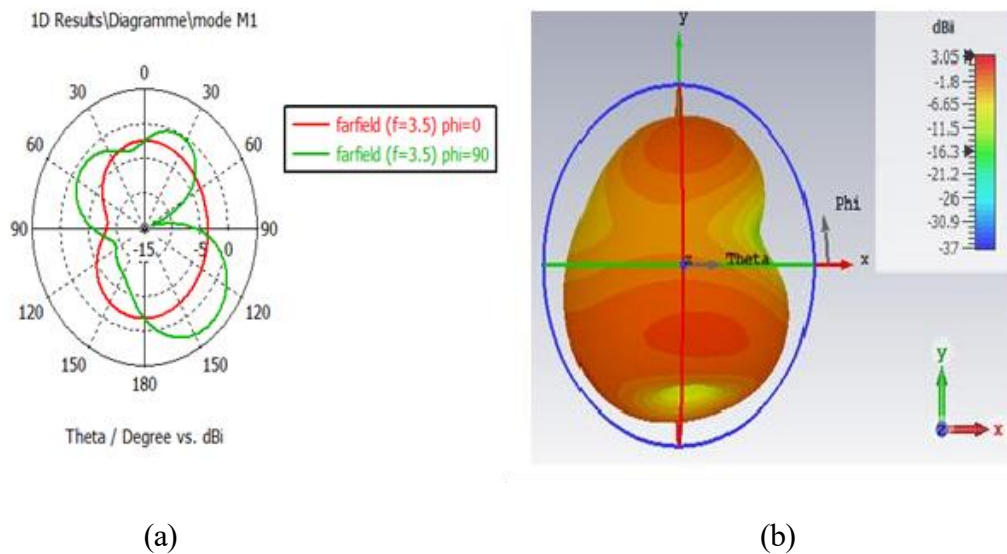
| Mode de fonctionnement | S11 (dB) | La largeur de bande | Gain dBi | Les fréquences obtenues GHz | Domaine d'application   |
|------------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------------|---|
| Mode M1                | -42.642  | 205.7               | 3.05     | F1=3.5                      | 5G<br>Wi-Fi (802.11a, 802.11n, 802.11ac, et 802.11ax).  |
|                        | -24.411  | 451.8               | 2.06     | F2=5.81                     |   |
| Mode M2                | -17.294  | 117.9               | 0.664    | F1=2.438                    | Wi-Fi 802.11b/g/n, Bluetooth<br>Wi-Fi (802.11a/n/ac/ax)<br>Radars : la bande X (7–11 GHz)   |
|                        | -15.444  | 327.6               | 1.59     | F2=5.855                    |   |
|                        | -12.537  | 476.75              | 3.97     | F3=7.805                    |   |
| Mode M3                | -15.312  | 181.9               | 2.31     | F1=2.715                    | Réseaux mobiles LTE (4G), WiMax<br>Réseaux sans fil, Radars<br>Radars de navigation,<br>Communications par satellite, la bande C (4–8 GHz), |
|                        | -20.986  | 453.3               | 0.0938   | F=4.775                     |   |
|                        | -27.789  | 617.7               | 1.41     | F3=6.305                    |   |
| Mode M4                | -44.834  | 389.5               | 0.35     | F1=4.7375                   | Radars à moyenne portée<br>Radars de navigation, Réseaux fixes sans fil, Communications satellite   |
|                        | -26.925  | 535                 | 2.19     | F2=6.2975                   |   |

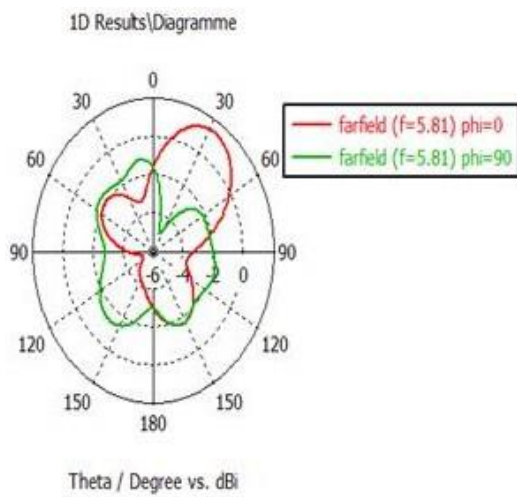
## CHAPITRE III CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES AGILE EN FREQUENCE

Nous avons obtenu, dans le tableau III.8, une antenne reconfigurable en fréquence couvrant plusieurs domaines d'application, en permutant l'état des diodes PIN dans quatre modes de fonctionnement. Les fréquences obtenues, **F1 = 2.438 GHz**, **F2 = 2.715 GHz**, **F3 = 4.7375 GHz**, **F4 = 4.775 GHz**, **F5 = 5.81 GHz**, **F6 = 5.855 GHz**, **F7 = 6.2975 GHz**, **F8 = 6.305 GHz** et **F9 = 7.805 GHz**, permettent de répondre à un large éventail d'applications. Ces dernières incluent les réseaux Wi-Fi (2.4 GHz et 5 GHz), les communications LTE (4G), les systèmes radar (moyenne et longue portée), les communications par satellite, les réseaux sans fil fixes, les radars de navigation, ainsi que les applications industrielles, militaires et IoT. Ce large spectre de fréquences met en évidence la polyvalence et l'adaptabilité de cette antenne pour des usages civils et professionnels.

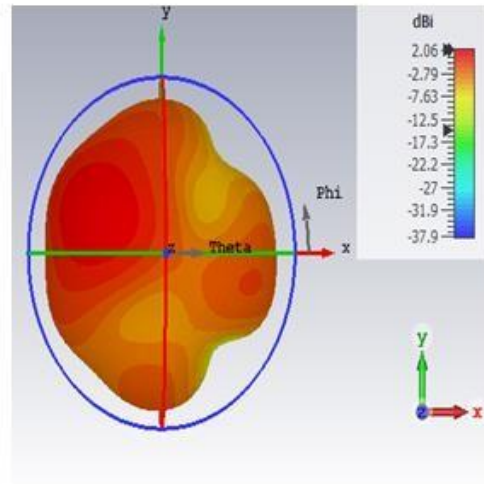
### III.7.3.2 Résultats de simulation en diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement des 4 PIN diodes modes de fonctionnement de l'antenne patch pentagone proposé est donné sur les figures III.21, III.22, III.23 et III.24 :



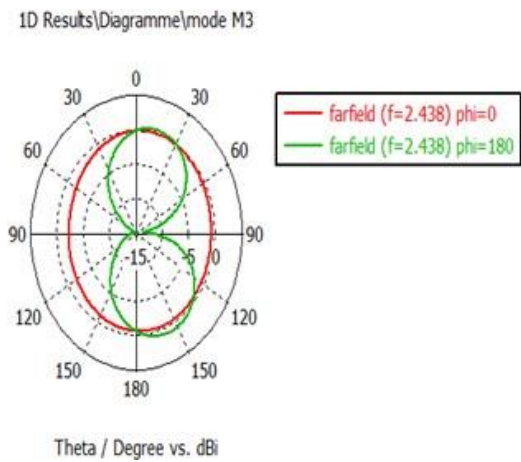


(a)

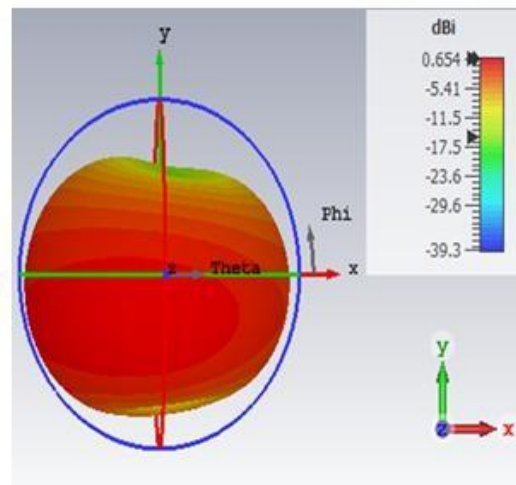


(b)

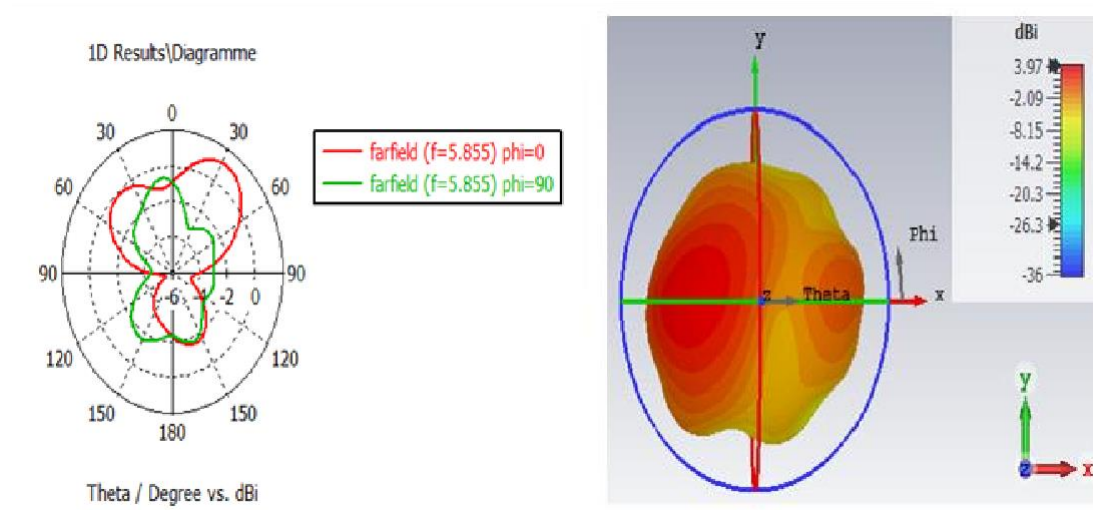
Figure III. 21: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M1 aux fréquences 3.5GHz et 5.81GHz



(a)

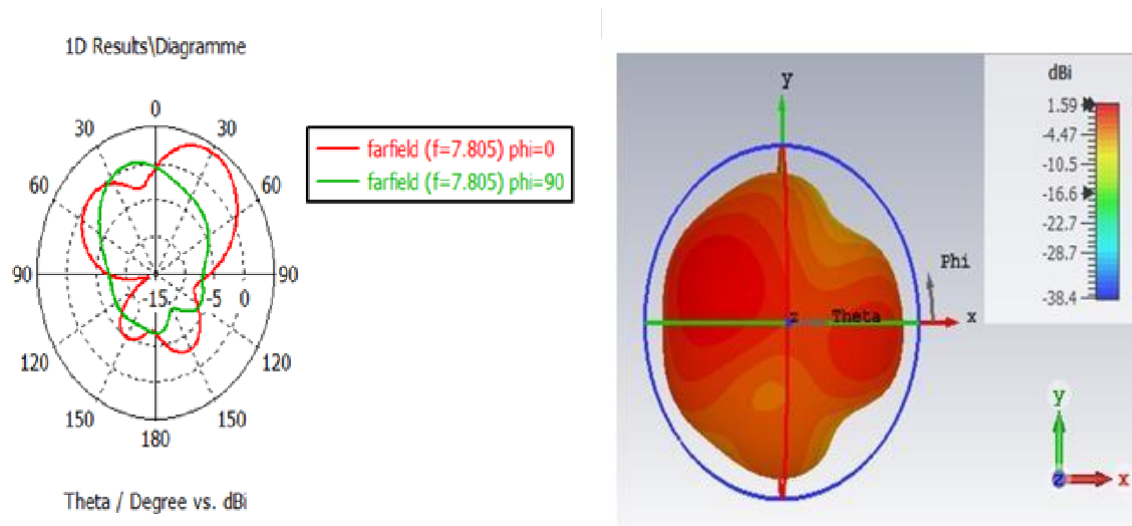


(b)



(a)

(b)

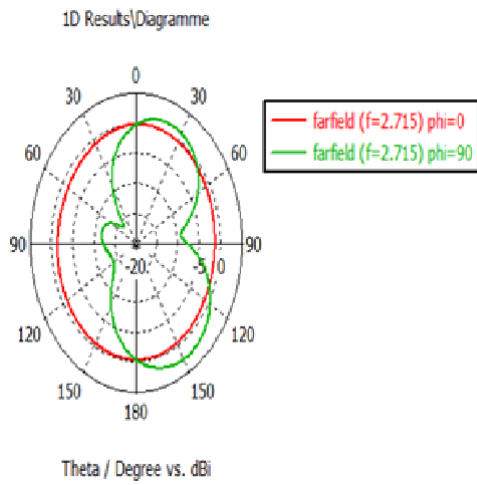


(a)

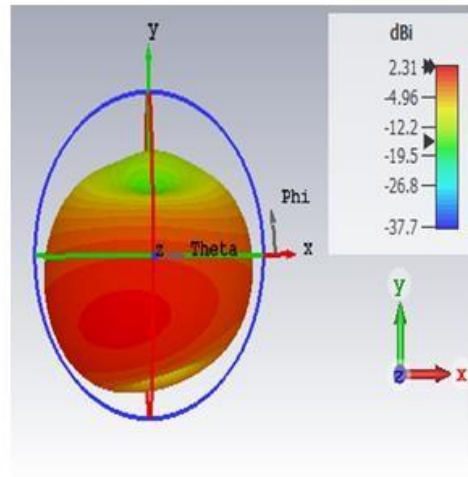
(b)

Figure III.22: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M2 aux fréquences 2.438GHz, 5.855GHz et 7.805GHz

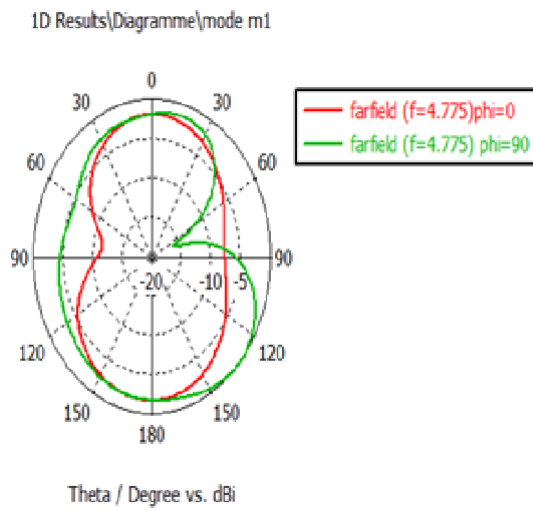
# CHAPITRE III CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES AGILE EN FREQUENCE



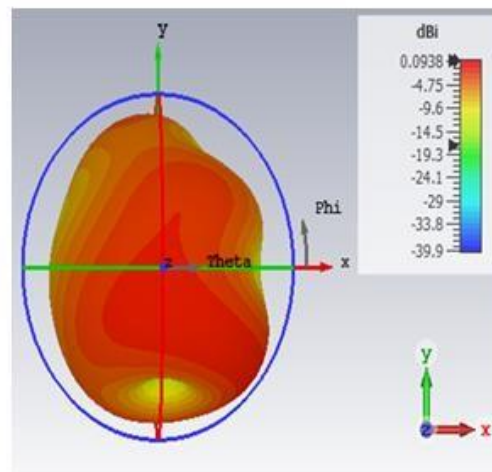
(a)



(b)



(a)



(b)

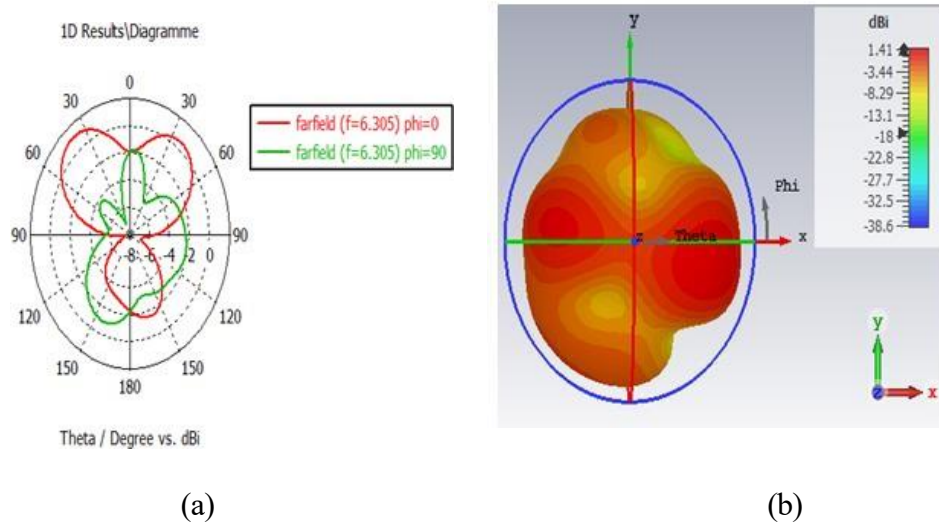
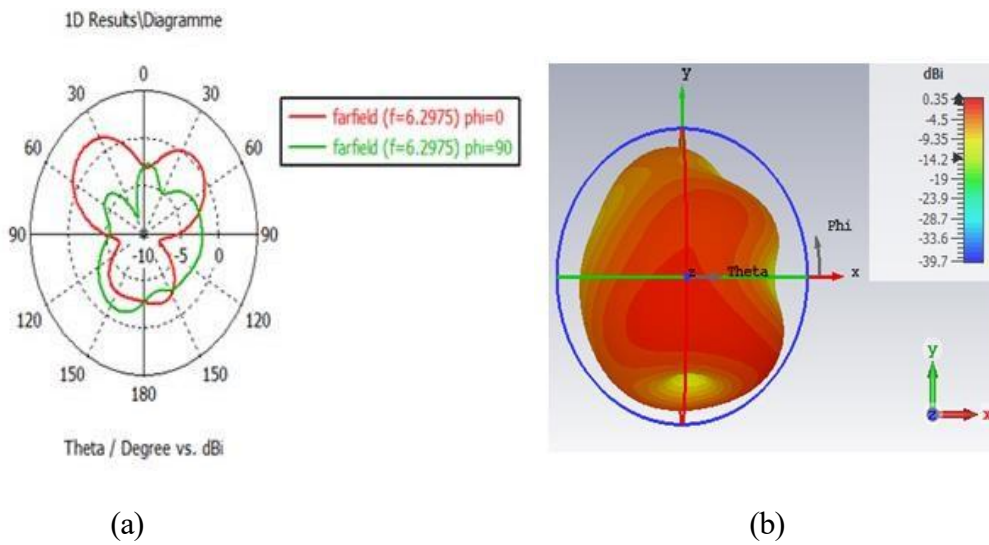


Figure III.23: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M3 aux fréquences 2.71GHz, 4.77 GHz et 6.30 GHz



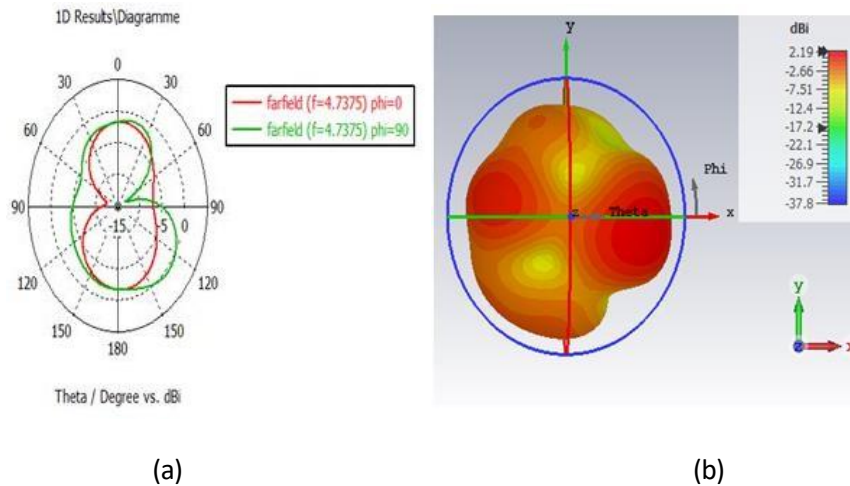


Figure III.24: Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D du mode M4 aux fréquences 4.73 GHz et 6.29 GHz

Les diagrammes de rayonnement pour les quatre modes de fonctionnement des diodes PIN dans les plans 2D et 3D de notre antenne reconfigurable proposée sont illustrés dans les figures III.21, III.22, III.23 et III.24, respectivement. Les diagrammes de rayonnement sont presque omnidirectionnels sur toutes les fréquences obtenues.

### III.7.3.3 Résultats de simulation en gain

La figure III.25 présente le gain obtenu de l'antenne patch pentagone avec les 4 modes de fonctionnements:

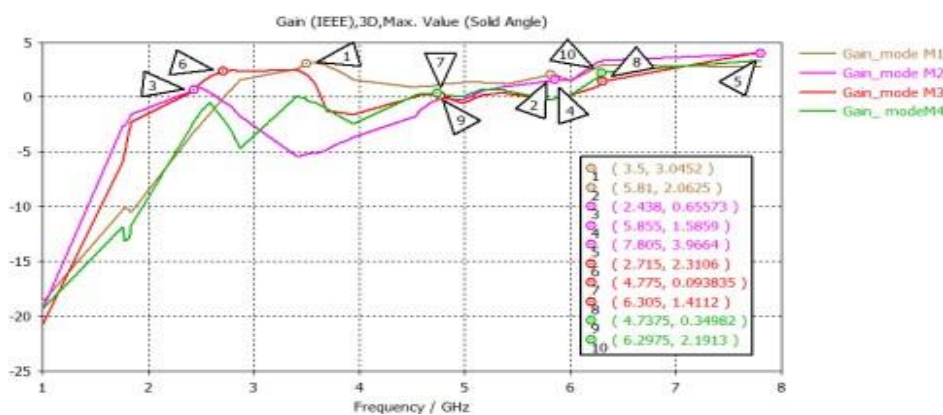


Figure III.25: Gain de l'antenne pentagonale proposée

La figure Figure III.25 montre les gains obtenus pour les quatre modes de fonctionnement, ils varient entre 1 et 4 dBi, ces valeurs sont très satisfaisantes pour les applications sans fil et mobiles.

**III.7.3.4 Résultats de simulation en comparaison des résultats avec d'autres travaux publiés**

Nous allons présenter dans cette partie la comparaison de notre travail avec les résultats d'autres recherches :

**Tableau III.9** : Comparaison de nos résultats avec les résultats de la littérature

| <b>Ref</b>           | <b>Freq (GHz)</b>   | <b>S11 (dB)</b>  | <b>Gain (dB)</b>   | <b>Dimension (mm<sup>2</sup>)</b> |
|----------------------|---|--|--|-----------------------------------|
| [74]                 | 2.8/2.9/3.4/3.5/5.2/ 5.9  | -20.09/-19.64/<br>-55.43/-62.93/<br>-35.25/-24.54  | 1.38/1.45/1.32/1.33/0.6<br>2/2.02                                | 26×28                             |
| [135]                | 2.45/3.2/2.1/3.5  | -35.33/ -42.17/<br>-33.16/ -35.16  | 1.73/1.97/1.01/1.86  | 37 × 35                           |
| <b>Notre travail</b> | 3.5/5.81//2.438/5.855/<br>/7.805/2.715/4.775/<br>6.305/4.7375/ 6.2975 | -42.642/-24.411/<br>-17.294/ 15.444/<br>-12.537/-15.312/<br>-20.986/-27.789/<br>- 44.834/-26.925 | 3.05/2.06/0.664/<br>1.59/3.97/2.31/<br>0.0938/1.41/0.35/<br>2.19 | 26.31×20.24                       |

Comme le montre le tableau III.9, la comparaison porte sur la taille de l'antenne, les fréquences de fonctionnement et le gain. L'antenne proposée présente une dimension compacte de 26,31\*20,24 mm<sup>2</sup>. Contrairement aux études de [74] et [135], nous avons obtenu dix fréquences avec une largeur de bande significative en basculant entre les quatre modes. Le gain maximal obtenu est de 3,97 dB, ce qui est nettement plus élevé que celui rapporté dans les travaux de [74] [135].

**III.8 Conclusion**

Ce chapitre a présenté la conception et l'analyse de deux types d'antennes reconfigurables en fréquence, adaptées aux technologies modernes de communication sans fil telles que **5G**, **Wi-Fi 6** et d'autres applications mobiles et sans fil. Les résultats obtenus pour chaque conception témoignent de la flexibilité et de l'efficacité des antennes dans des environnements variés. Pour l'antenne imprimée rectangulaire reconfigurable en fréquence, les résultats en modes M1 (ON-ON) et M2 (OFF-OFF) ont démontré une excellente performance avec des fréquences respectivement à 3,53 GHz (avec une bande

### CHAPITRE III CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES AGILE EN FREQUENCE

passante de 422 MHz) et 5,0 GHz (avec une bande passante de 209 MHz). Ces performances sont particulièrement adaptées pour les applications 5G et Wi-Fi 6, offrant une couverture fiable et une faible atténuation. Quant à la conception de l'antenne patch pentagonale reconfigurable, elle a montré une capacité à couvrir un large éventail de fréquences allant de 2.438 GHz à 7.805 GHz, grâce à la permutation des états des diodes PIN dans quatre modes de fonctionnement. Ces fréquences permettent de couvrir des applications multiples telles que les réseaux Wi-Fi, les communications LTE, les systèmes radar, ainsi que les communications par satellite, les réseaux sans fil fixes, et même les applications industrielles, militaires et IoT. Cette capacité de couvrir un large spectre de fréquences met en évidence la polyvalence de l'antenne et sa capacité à s'adapter à différents besoins en matière de télécommunications.

En conclusion, ces conceptions montrent l'efficacité des antennes reconfigurables pour répondre aux exigences des systèmes de communication modernes. Elles offrent des solutions pratiques et performantes pour des applications variées, avec une capacité à s'ajuster dynamiquement à différents scénarios de fonctionnement.

Nous allons concevoir dans le chapitre suivant un autre type d'antenne imprimée reconfigurable en diagramme de rayonnement pour les réseaux mobiles et sans fil.

## **CHAPITRE IV**

---

### **CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT**

---

## ***IV ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT***

### **IV.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons une antenne Yagi imprimée simple et un réseau à deux éléments, ce dernier étant doté de diagrammes de rayonnement reconfigurables contrôlés par des diodes **PIN (BAR63/64-06)**. Ces antennes sont spécifiquement conçues pour des applications dans les réseaux WiMAX et 5G. La reconfigurabilité de l'antenne Yagi à deux éléments (réseau) est assurée par l'utilisation de deux diodes PIN, l'activation et la désactivation de ces diodes permettent de passer d'un mode opérationnel à un autre, entraînant ainsi des modifications dans les diagrammes de rayonnement, telles que le gain, la direction et la largeur du faisceau.

Ce chapitre sera structuré autour des points suivants : d'abord, la conception des antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement ; ensuite, les caractéristiques des diodes **PIN 1N4923** utilisées pour la reconfigurabilité ; nous procéderons à l'analyse et la mesure de l'antenne Yagi initiale ; puis nous aborderons la reconfigurabilité en diagramme de rayonnement du réseau d'antenne Yagi à deux éléments, ensuite, nous effectuerons une comparaison des résultats obtenus avec les travaux de recherche existants. Enfin nous allons procéder à la miniaturisation du réseaux d'antenne Yagi à deux éléments pour faciliter son intégration et son utilisation dans les dispositifs de la 5G.

### **IV.2 Conception des antennes reconfigurables diagramme de rayonnement**

Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement de ce travail doivent contenir :

- **Une technologie de commutation** : Utilisation de diodes PIN pour modifier dynamiquement le diagramme de rayonnement.
- **Une reconfigurabilité directionnelle** : Orientation du faisceau principal dans différentes directions pour une couverture directionnelle optimisée.
- **Réduction des interférences** : Adaptabilité permettant de minimiser les interférences indésirables et d'améliorer l'efficacité énergétique.
- **Optimisation des matériaux** : Utilisation de substrats performants, tels que le FR-4, pour maximiser les performances et minimiser les pertes.
- **Caractéristiques clés** : Contrôle précis du rayonnement, Facteur de forme compact pour intégration dans des dispositifs modernes, bande passante adaptée pour des applications variées, gain modéré à élever, garantissant une couverture fiable dans des environnements denses.

- **Applications** : Réseaux 5G, WiMax, dispositifs IoT, ...

### IV.3 Caractéristiques des diodes PIN 1N4923

Les diodes utilisées dans notre recherche sont de type **PIN 1N4923** spécifiquement conçues pour les applications RF et micro-ondes, couvrant une large gamme de fréquences, y compris celles utilisées dans les systèmes 5G, LTE, WiMax et les dispositifs de commutation d'antennes. Elles se distinguent par :

- **Faible résistance série (R) en mode ON** : Une résistance série de  $3.5 \Omega$ , associée à une inductance de  $0.45 \times 10^{-9}$  H, garantit des pertes d'insertion minimales, optimisant ainsi les performances des systèmes RF et micro-ondes.
- **Faible capacité parasite (C) en mode OFF** : Avec une capacité parasite typique de  $0.08 \times 10^{-12}$  F et une résistance parallèle élevée de  $3.5 \text{ k}\Omega$ , ces diodes assurent un bon isolement en mode OFF, réduisant les interférences et permettant un fonctionnement stable même à des fréquences élevées.
- **Temps de commutation rapide** : Les PIN 1N4923 offrent des temps de commutation rapides, essentiels pour une reconfiguration dynamique des antennes et une adaptation instantanée aux besoins des systèmes modernes.

### IV.4 Analyse et mesure d'une antenne YAGI initiale

Les antennes Yagi, conçues par le professeur japonais Hidetsugu Yagi dans les années 1920, sont devenues des éléments essentiels dans le domaine des communications sans fil grâce à leur simplicité de conception et leur efficacité remarquable. Utilisées couramment dans les systèmes de transmission de télévision, les communications radio et d'autres applications à fréquence élevée, les antennes Yagi se distinguent par leur capacité à fournir un gain directionnel élevé tout en maintenant une taille relativement compacte. Cette caractéristique les rend particulièrement adaptées aux environnements urbains, où l'espace est souvent limité.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de mesurer une antenne Yagi initiale, en mettant en évidence ses performances en termes de gain, de directivité et de largeur de bande. Cette analyse implique une étude approfondie de la conception de l'antenne, des matériaux utilisés et des méthodes de fabrication.

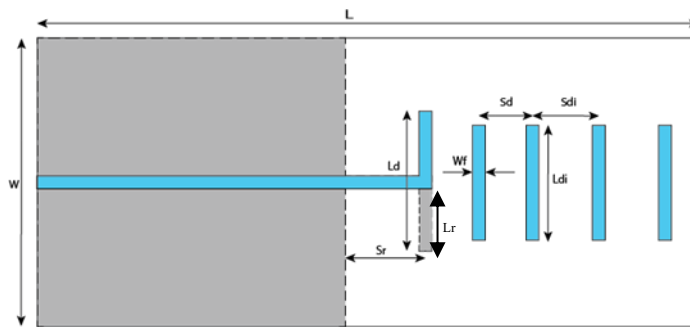
Par la suite, des mesures expérimentales seront réalisées pour valider les caractéristiques théoriques de l'antenne et évaluer son comportement dans des conditions réelles. En outre, cette recherche vise à identifier les éventuelles améliorations qui pourraient être apportées à la conception de l'antenne Yagi pour optimiser ses performances. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension

des antennes Yagi et de leur potentiel d'application dans les systèmes de communication modernes, tout en fournissant des pistes pour des recherches futures dans le domaine des antennes directionnelles.

**IV.4.1 Conception de l'antenne YAGI**

L'antenne dipôle Yagi, illustrée à la figure IV.1, est une conception populaire et largement utilisée. Nous allons la faire simulée sur un substrat FR4 avec une permittivité de 4,35 et une épaisseur de 1,5 mm. Cette antenne comprend un élément actif (le radiateur principal) ainsi qu'un ou plusieurs éléments parasites, dont nous en utilisons quatre pour augmenter la directivité.

La figure IV.2(a) montre le prototype de l'antenne fabriquée, tandis que la figure IV.2 (b) présente la mesure des paramètres d'adaptation réalisée dans notre laboratoire. Nous avons calculé les dimensions de l'antenne en utilisant les références de [136] pour qu'elle soit adaptée aux applications WiMAX et la 5G . De plus, les paramètres optimisés de l'antenne sont récapitulés dans le tableau IV.1.



**Figure IV.1:** L'antenne Yagi imprimée proposée

Les dimensions de l'antenne sont calculées à l'aide des équations suivante [136]

$$L_d = 0.47\lambda \tag{1}$$

$$L_{di} = 0.406\lambda \tag{2}$$

$$L_r = 0.76\lambda \tag{3}$$

$$S_r = 0.25\lambda \tag{4}$$

$$S_{di} = 0.34\lambda \tag{5}$$

La largeur de la ligne d'alimentation est déterminée par l'équation suivante [137]

$$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ B-1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \tag{6}$$

Tableau IV.1: Dimensions initiales de l'antenne Yagi

| Les paramètres | les valeurs (mm) |
|----------------|------------------|
| W              | 48               |
| L              | 138              |
| h              | 1.5              |
| Sr             | 10               |
| Wf             | 3                |
| Ld             | 30               |
| Sd             | 11.3             |
| Sdi            | 14.3             |
| Ldi            | 24.5             |

#### IV.4.2 Mesure des paramètres d'adaptation

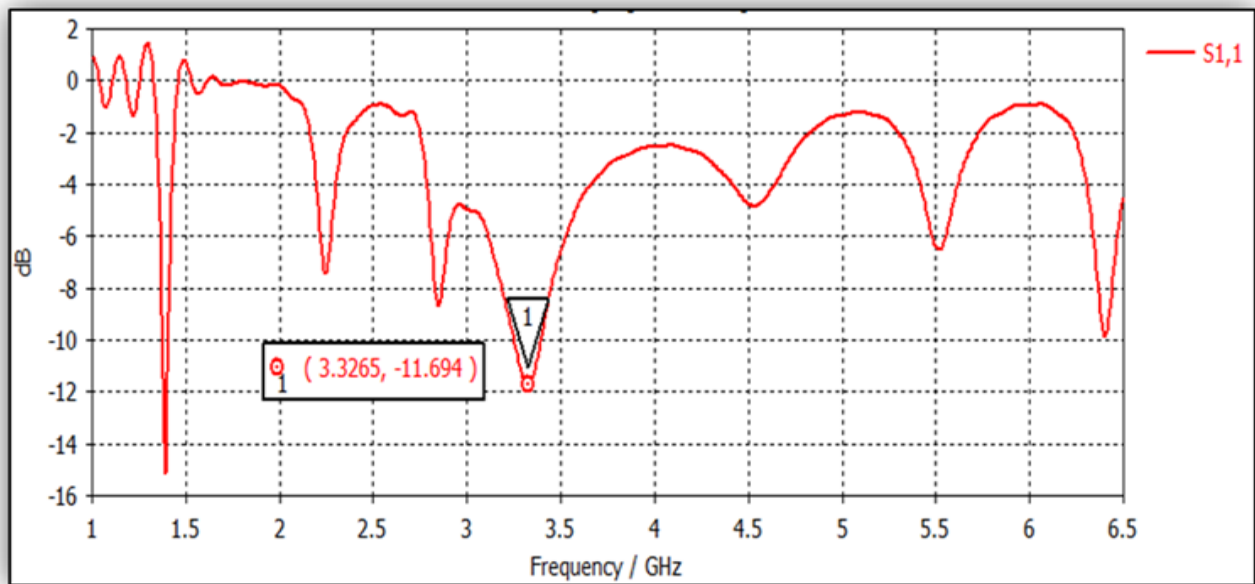
Nous allons présenter dans la figure IV.2, le prototype et la mesure de l'antenne imprimée Yagi-Uda en laboratoire avec un analyseur de réseau vectoriel VNA (2.2 -6) GHz :



Figure IV.2: Antenne Yagi imprimée fabriquée, (a) antenne prototype, (b) mesure de l'antenne en laboratoire

#### IV.4.3 Le coefficient de réflexion $|S_{11}|$

La proposition d'antenne a fait l'objet d'une simulation, d'une fabrication et d'une évaluation pour confirmer sa performance d'adaptation. La simulation a été réalisée à l'aide de CST Microwave Studio [138], les résultats sont présentés dans la figure IV.3:



**Figure IV.3:** Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne Yagi imprimée proposée

La figure IV.3 montre la première simulation avec les valeurs initiales des paramètres de l'antenne Yagi, la fréquence de résonance est égale à 3,3265 GHz avec un coefficient de réflexion obtenu est égal à -11,694dB. Ces résultats ne sont pas satisfaisants, l'antenne ne répond pas aux besoins de la bande WiMax [3.3-3.6] GHz et de la 5G [3.4-3.8] GHz. Nous allons donc effectuer une étude paramétrique de la longueur des composants de l'antenne Yagi ( $L_d$ ,  $L_{di}$ ) de la figure IV.1. Ces derniers ont une influence profonde sur le coefficient de réflexion S11 et la formation de son diagramme de rayonnement. Le tableau IV.2 résume les résultats de simulations obtenues :

**Tableau IV.2 :** Les dimensions choisies pour l'étude paramétrique

| Simulations | Les dimensions choisies |          | Les résultats de la simulation |          |
|-------------|-------------------------|----------|--------------------------------|----------|
|             | $L_d$                   | $L_{di}$ | La fréquence (GHz)             | S11 (dB) |
| Simulation1 | 40.28                   | 34.80    | 3.3265                         | -11.694  |
| Simulation2 | 40                      | 34.20    | 3.365                          | -14.323  |
| Simulation3 | 38.60                   | 31.22    | 3.398                          | -10.955  |
| Simulation4 | 35                      | 29.5     | 3.486                          | -10.623  |
| Simulation5 | 32.15                   | 26.23    | 3.5685                         | -23.895  |
| Simulation6 | 31.10                   | 25.50    | 3.5905                         | -34.563  |

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

|                   |    |      |          |           |
|-------------------|----|------|----------|-----------|
| Simulation finale | 30 | 24.5 | 3.627519 | -45.51859 |
|-------------------|----|------|----------|-----------|

Les résultats de simulations sont illustrés par le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence, comme le montre la Figure IV.4:

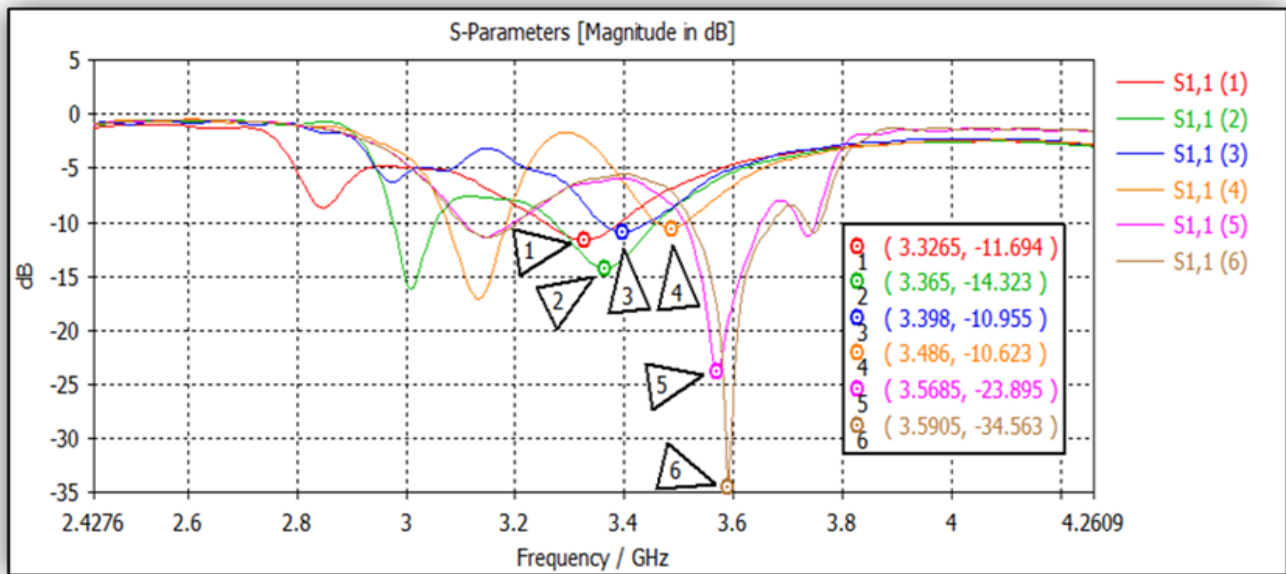
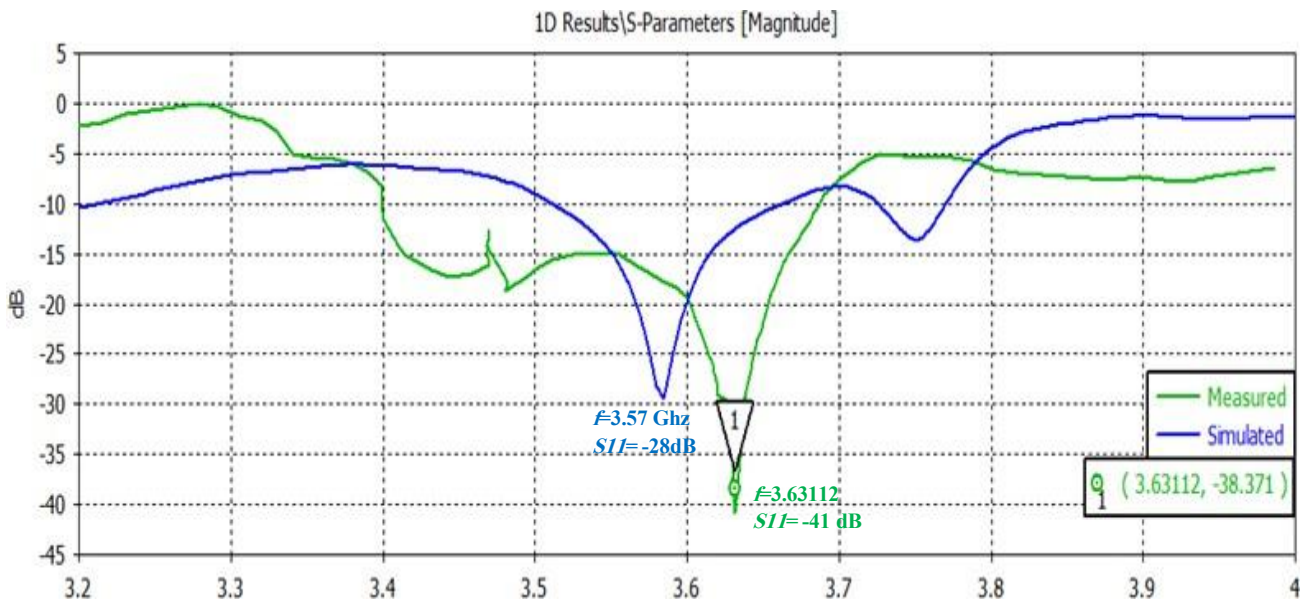


Figure IV. 4: Le coefficient de réflexion S11 des différents essais effectués

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

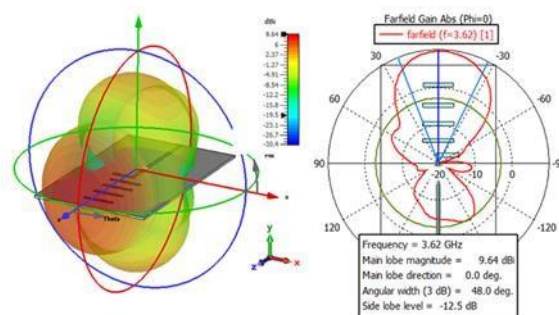


**Figure IV.5:** Résultat finale du coefficient de réflexion de l'antenne initiale (simulé, vs mesuré)

Nous avons obtenu sur le Figure IV.5 un  $S_{11}$  de -28 dB à la fréquence 3.57 GHz. Les résultats de simulations sous CST microwave sont presque similaires à celle mesurée à l'aide d'analyseur de réseau vectoriel VNA (2.2-6) GHz. L'antenne proposée est bien adaptée dans la gamme de fréquences 5G, WiMax fixe " IEEE 802.16d" et mobile " IEEE 802.16e" avec une fréquence de 3, 63 GHz, dépassant -40 dB à la fréquence opérationnelle.

### IV.4.4 Le diagramme de rayonnement

La figure IV.6 présente les diagrammes de rayonnement du gain initial de l'antenne en 2D et en 3D à une fréquence de 3,62 GHz.



**Figure IV.6:** Diagramme de rayonnement 2D-3D à 3,62 GHz pour l'antenne initiale

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

Cette figure IV.6 présente les caractéristiques de rayonnement directionnel d'une antenne YAGI-Uda, en mettant l'accent sur ses performances à une fréquence de 3,62 GHz, où elle présente un gain de crête de 9,64 dB. Le diagramme permet de visualiser la façon dont l'antenne dirige l'énergie dans l'espace 3D, la majeure partie de l'énergie étant concentrée le long du lobe principal (visible dans les régions rouge/jaune)

### IV.5 La reconfigurabilité en diagramme de rayonnement de l'antenne YAGI

#### IV.5.1 Reconfigurabilité d'une antenne Yagi unique

L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne Yagi destinée à être intégrée dans des réseaux d'antennes reconfigurables, capables de passer d'un diagramme de rayonnement à un autre. Nous allons positionner une diode PIN (D1) (figure IV.7) sur le dipôle de l'antenne Yagi, et de tester son fonctionnement en mode ON et OFF, afin d'atteindre la flexibilité désirée dans le diagramme de rayonnement. La diode est modélisée de manière précise à l'aide d'un circuit RLC (figure IV.8), avec les valeurs des composants extraites des spécifications techniques du fabricant.

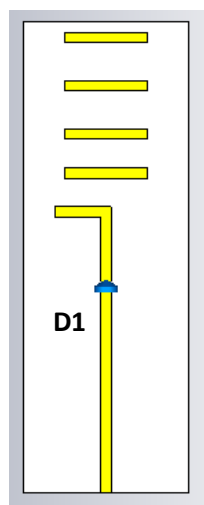
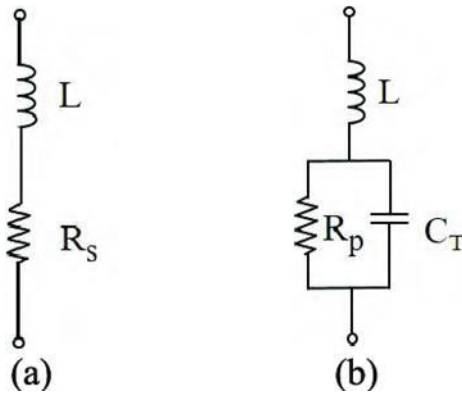


Figure IV.7: Antenne Yagi avec position de la diode PIN

**CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT**



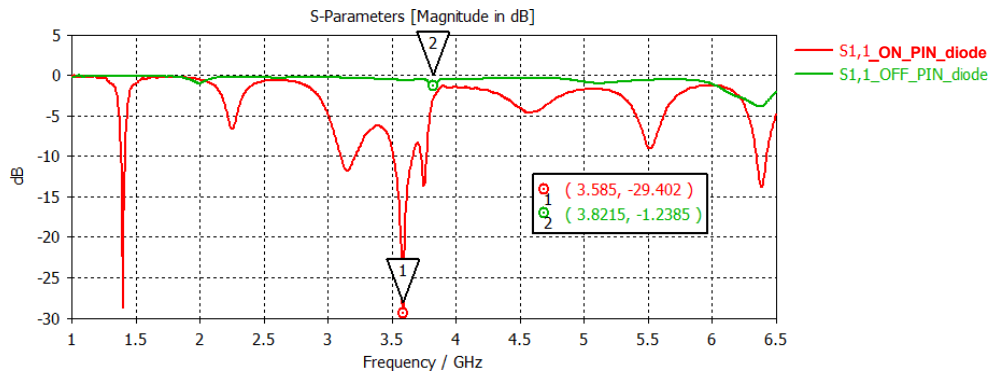
**Figure IV.8:** Circuit équivalent de la diode PIN

**IV.5.1.1 Résultat de simulation en coefficient de réflexion S11**

Nous allons présenter les résultats de simulation du paramètre S11 dans la figure IV. 9 après insertion de la diode PIN de type **1N4923** en mode ON et OFF, Les modes de fonctionnement et les valeurs RLC correspondantes pour de cette diode **PIN 1N4923** sont détaillés dans le tableau IV.3:

**Tableau IV.3:** Les valeurs de la diode **PIN 1N4923** pour les deux états

| Etat de la diode | Résistance (R) | Inductance (L) | Capacité (C) |
|------------------|----------------|----------------|--------------|
| <b>ON</b>        | 3.5 $\Omega$   | 0.45nH         | 0            |
| <b>OFF</b>       | 3.5k $\Omega$  | 0.45nH         | 0.08pF       |



**Figure IV.9:** Paramètre S11 pour les deux modes ON et OFF

La figure IV.9 montre un coefficient de réflexion de -29 à la fréquence 3.585 GHz en mode ON et -1.23 à la fréquence 3.82 en mode OFF.

# CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

## IV.5.1.2 Résultat de simulation en Diagramme de rayonnement

- *Etat ON*

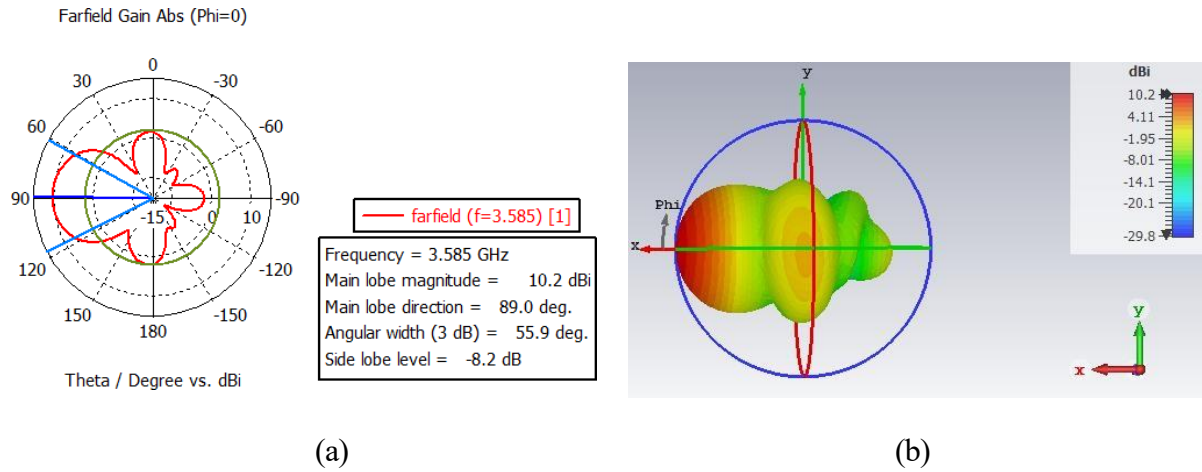


Figure IV. 10:Diagramme de rayonnement de l'antenne Yagi en Mode ON, (a) polaire, (b) 3D

- *Etat OFF :*

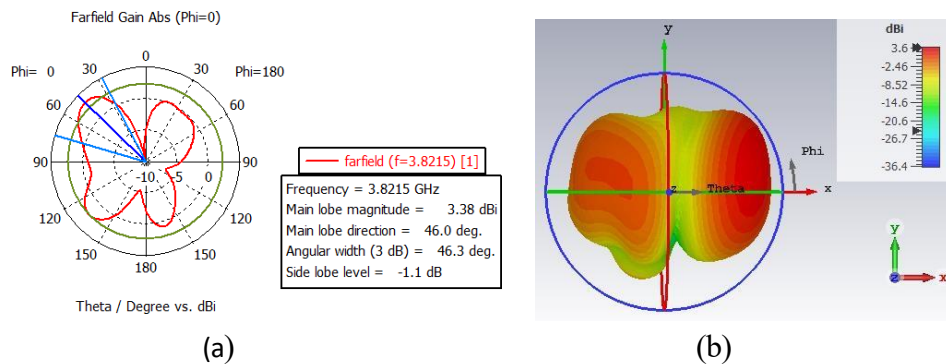
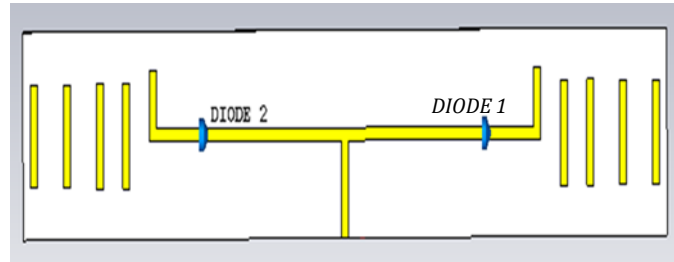


Figure IV.11: Diagramme de rayonnement de l'antenne Yagi en Mode ON, (a) polaire, (b) 3D

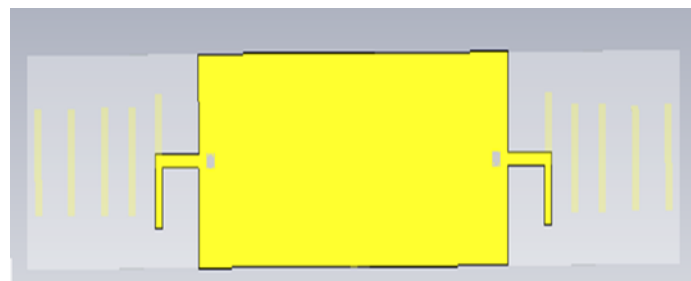
D'après les figures IV.10 et IV.11, nous pouvons conclure que l'antenne Yagi est fonctionnelle à la fréquence de 3,58 GHz en mode ON, ce qui la rend adaptée aux applications 5G et WiMAX. En revanche, en mode OFF, le dipôle est inactif, ce qui entraîne l'absence de tout rayonnement.

#### IV.5.2 Reconfigurabilité de l'antenne Yagi à un deux éléments

Dans cette section, nous allons concevoir un réseau d'antennes patch Yagi-Uda à deux éléments, avec deux diodes PIN insérées dans la même position que dans l'antenne Yagi simple. Cette configuration vise à obtenir une reconfiguration du diagramme de rayonnement, comme illustré dans la figure IV.12. L'ajout d'un élément supplémentaire transforme l'antenne en un réseau, offrant ainsi la possibilité d'améliorer les performances en termes de directivité et de contrôle du faisceau.



(a)



(b)

**Figure IV.12:** Réseau d'antennes Yagi imprimées (a) vue de dessus, (b) vue de dessous

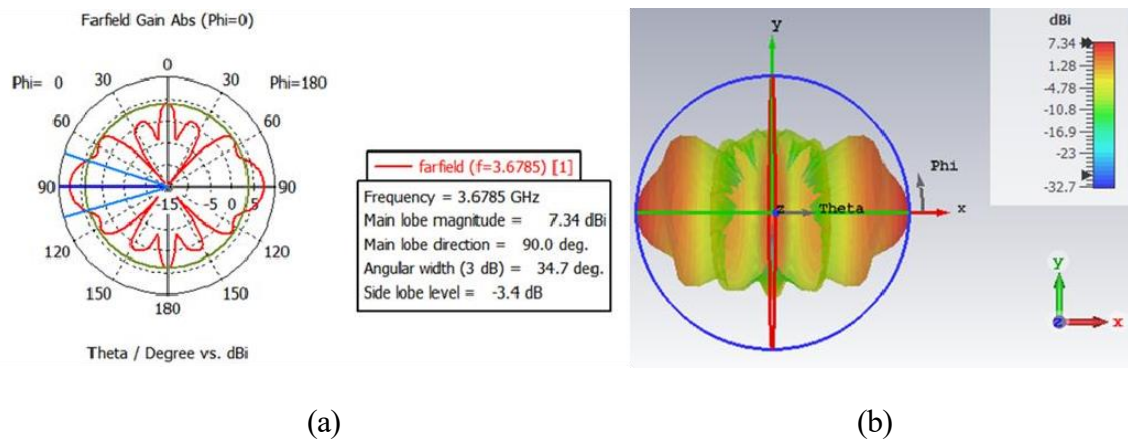
Pour atteindre la reconfiguration souhaitée, nous avons testé plusieurs types de diodes PIN sur la ligne d'alimentation des deux éléments afin de déterminer leur influence sur le comportement du diagramme de rayonnement. Nous allons présenter de manière progressive nos résultats de simulations avec les diodes : **PIN 1N4923**, **PIN Schottky** et **PIN BAR63/64-06**, en utilisant 3 modes de fonctionnement M1 (ON, ON), M2 (ON, OFF) et M3 (OFF, ON). Cette démarche permet de démontrer

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

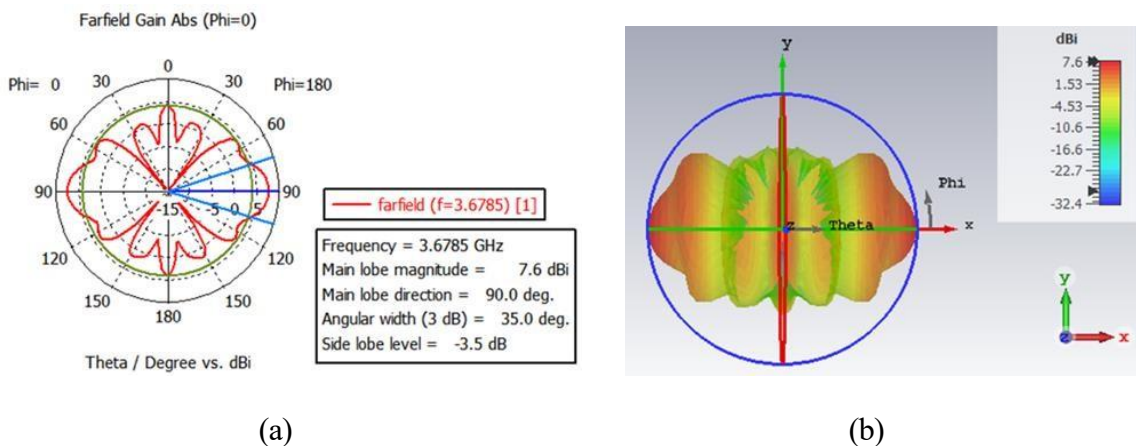
l'impact de chaque diode sur les performances globales et de valider la configuration optimale pour une reconfiguration efficace.

### IV.5.2.1 Résultats de simulation avec deux diodes PIN 1N4923

Les figures IV.13, IV.14 et IV.15 illustrent les résultats de simulation obtenus en diagramme de rayonnement en utilisant la diode PIN 1N4923 du tableau IV.3.

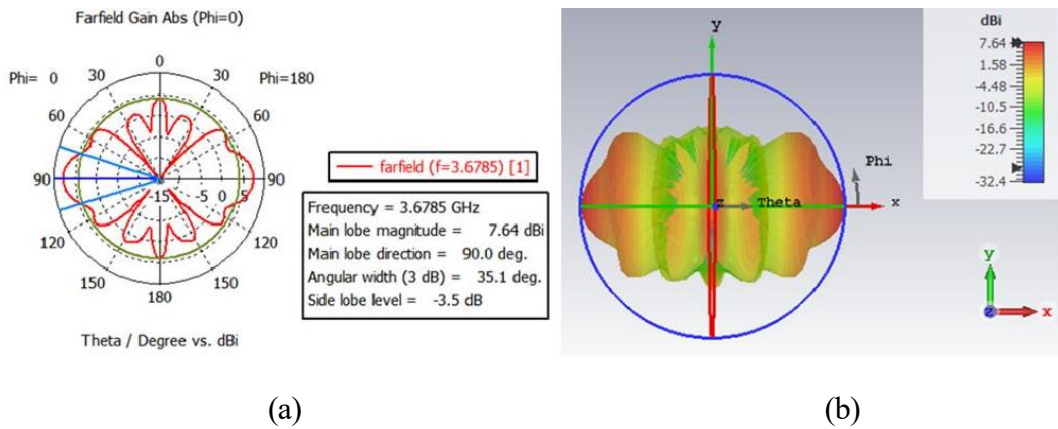


**Figure IV.13:** Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN 1N4923 pour le mode M1



**Figure IV.14:** Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN 1N4923 pour le mode M2

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT



**Figure IV.15:** Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN 1N4923** pour le mode M3

D'après les figures IV.13, IV.14 et IV.15, Le réseau d'antenne Yagi n'est pas reconfigurable ni en diagrammes de rayonnement, ni en fréquence. La diode **PIN 1N4923** ne répond pas à nos besoins. Nous allons alors essayer le deuxième type de diode.

### IV.5.2.2 Résultats de simulation avec deux diodes PIN Schottky

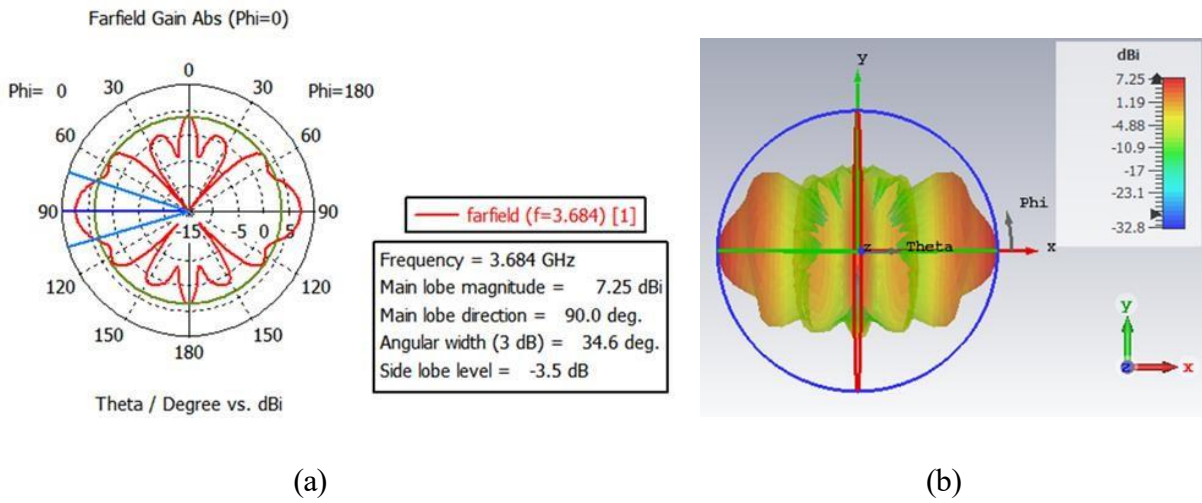
Le tableau IV.4 présente les valeurs de la diode **PIN Schottky** utilisée pour le réseau d'antenne Yagi imprimée à deux éléments :

**Tableau IV.4:** Les valeurs des paramètres de la diode **PIN Schottky** pour l'état ON-OFF

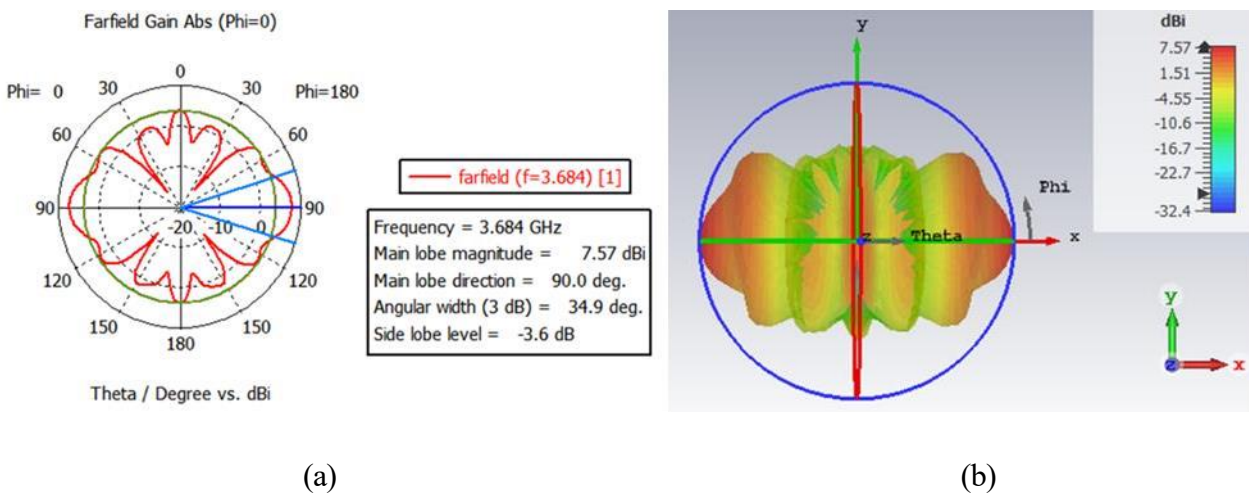
| Etat de la diode | Résistance (R) | Inductance (L) | Capacité(C) |
|------------------|----------------|----------------|-------------|
| <b>ON</b>        | 4.1 $\Omega$   | 0.15nH         | 0           |
| <b>OFF</b>       | 7k $\Omega$    | 0.15nH         | 0.017pF     |

Les résultats de simulation des diagrammes de rayonnement sont donnés sur les figures IV.16 IV.17 et IV.18 avec les trois modes de fonctionnement.

**CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT**

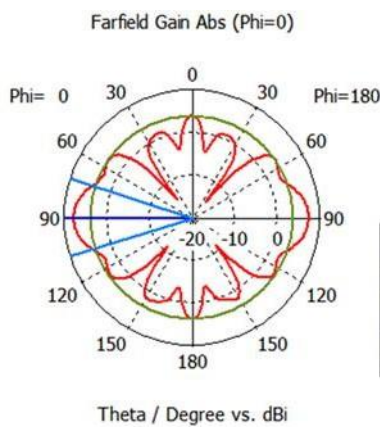


**Figure IV.16:** Diagramme de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN Schottky pour le mode M1

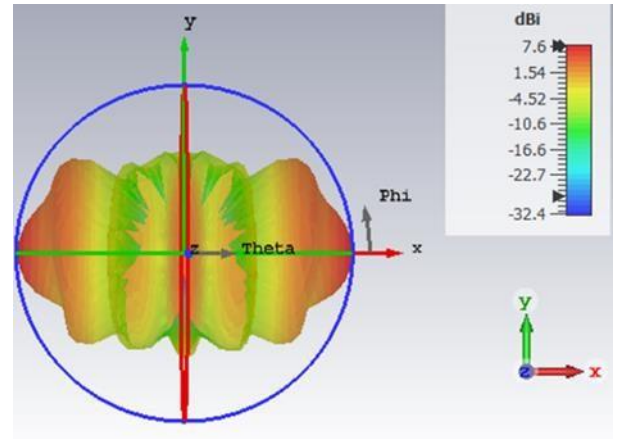
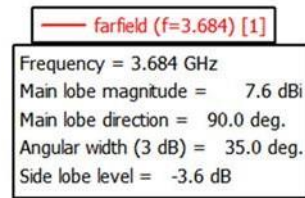


**Figure IV.17 :** Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN Schottky pour le mode M2

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT



(a)



(b)

**Figure IV.18:** Diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN Schottky** pour le mode M3

Nous avons obtenu des diagrammes de rayonnement stable ainsi qu'une fréquence stable avec l'utilisation du deuxième type de diode **PIN Schottky**, comme les montrent les figures IV.16, IV.17 et IV.18. Cependant, nous n'avons pas pu atteindre notre objectif. Dans la section suivante nous allons essayer la famille **PIN BAR** pour atteindre notre objectif :

### IV.5.2.3 Résultats de simulation avec deux diodes PIN BAR63/64-06

Nous allons présenter sur les figure IV.19, IV.20, IV.21, IV.22, IV.23 et IV.24 les résultats d'agilité en diagramme de rayonnement selon trois modes de fonctionnement des diodes **PIN BAR63-06** et **PIN BAR64-06** : mode M1 (ON, ON), Mode M2 (ON,OFF) et Mode M3(OFF,ON) :

#### a) PIN BAR 63-06

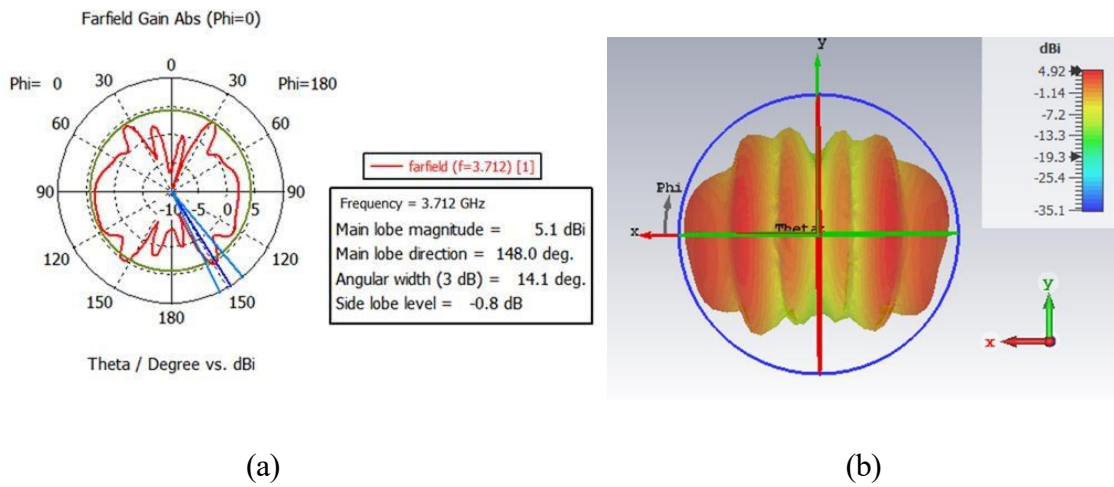
Les valeurs des paramètres de la diode **PIN BAR 63-06** ainsi que leurs modes de fonctionnement dans notre antenne proposée sont données sur le tableau IV.5:

**Tableau IV.5 :** Mode de fonctionnement des diodes **PIN BAR63**

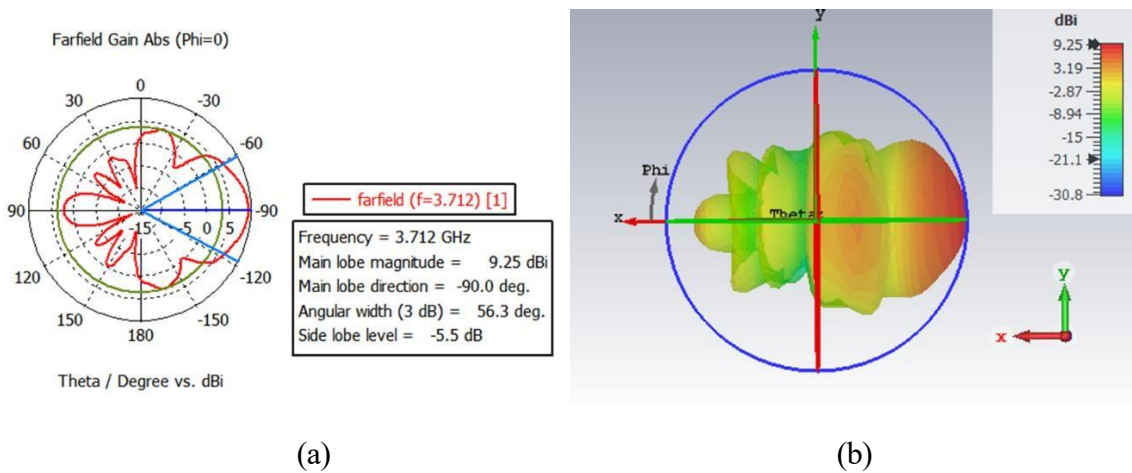
| Etat de la diode | Résistance (R) | Inducteur (L) | Capacité(C) |
|------------------|----------------|---------------|-------------|
| ON               | 0.15Ω          | 0.5 nH        | 0.15pF      |
| OFF              | /              | 0.5 nH        | 0.15pF      |

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

Comme le montrent les figures IV.19, IV.20 et IV.21, nous avons atteint l'agilité du diagramme de rayonnement, grâce à l'insertion des diodes de types **BAR63-06** :

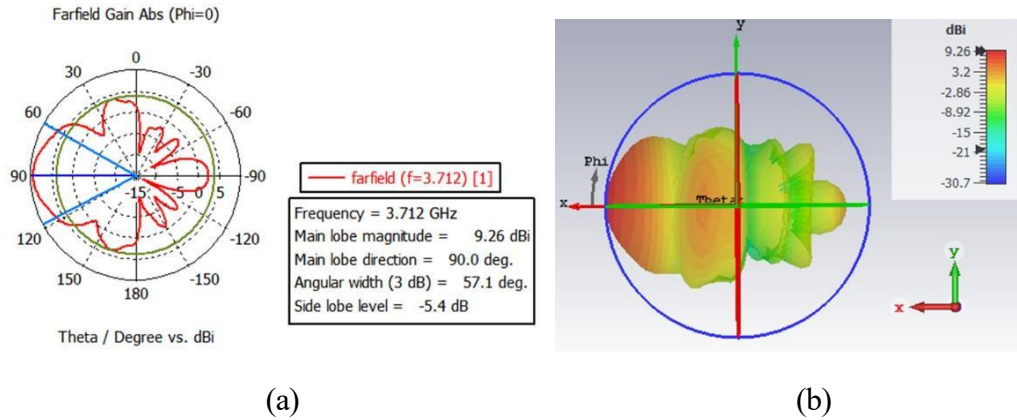


**Figure IV.19** : Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR63-06** pour le mode M1



**Figure IV.20**: Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR63-06** pour le mode M2

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT



**Figure IV.21:** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR63-06** pour le mode M3

### ➤ Discussion des résultats

Le tableau IV.6 résume tous les résultats des simulations obtenus dans les figures IV.19, IV.20 et IV.21 avec deux éléments d'antenne imprimée Yagi et trois modes de fonctionnement des diodes **PIN BAR63-06** (M1, M2 et M3) :

**Tableau IV.6:** Résumé des résultats de la simulation pour les trois modes de fonctionnement avec l'utilisation de la diode **BAR63-06**

| Etat de la diode | Angle d'inclinaison (°) | Gain(dB) |
|------------------|-------------------------|----------|
| <b>ON-ON</b>     | $\pm 148$               | 5.1      |
| <b>ON-OFF</b>    | -90                     | 9.25     |
| <b>OFF-ON</b>    | +90                     | 9.26     |

- **Mode M1 (ON-ON) :** Ce mode génère un faisceau étroit avec une largeur angulaire de  $14.1^\circ$  et un gain modéré de 5.1 dBi. Ce diagramme focalisé est particulièrement adapté aux communications ciblées, comme les connexions point à point ou les scénarios nécessitant une forte concentration du signal dans une direction précise.
- **Mode M2 (ON-OFF) :** Dans ce mode, le gain augmente considérablement 9.25 dBi par rapport au mode M1, mais le faisceau devient plus large avec une largeur angulaire de  $56.3^\circ$ . Ce mode offre une couverture plus étendue et est idéal pour les déploiements multipoints, tels que les réseaux WiMAX, où une meilleure couverture sur une zone est prioritaire.
- **Mode M3 (OFF-ON) :** Ce mode présente les mêmes caractéristiques que le mode M2, avec un gain de 9.26 dBi et une largeur angulaire de  $57.1^\circ$ , mais oriente le faisceau dans la direction

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

opposée. Il est particulièrement utile pour les scénarios nécessitant une distribution uniforme du signal ou un balayage directionnel, comme les connexions backhaul 5G.

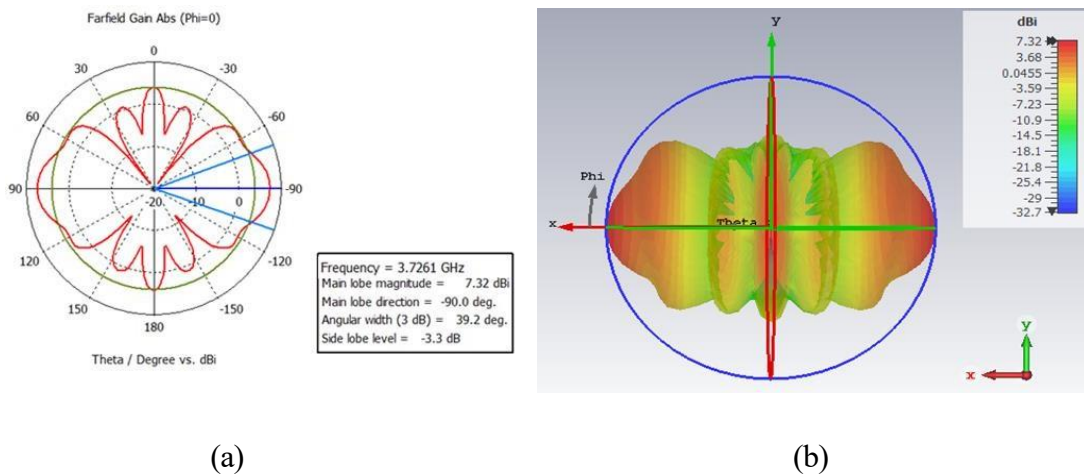
Chaque mode offre une combinaison spécifique entre la largeur de faisceau et le gain, permettant de s'adapter à différents scénarios de communication. Cela offre la flexibilité nécessaire pour répondre aux exigences variées en termes de couverture de zone et de concentration du signal.

### b) PIN BAR 64-06

Le tableau IV.7 présente les valeurs de la diode **PIN BAR 64-06** utilisée sur le réseau d'antenne l'antenne Yagi imprimée :

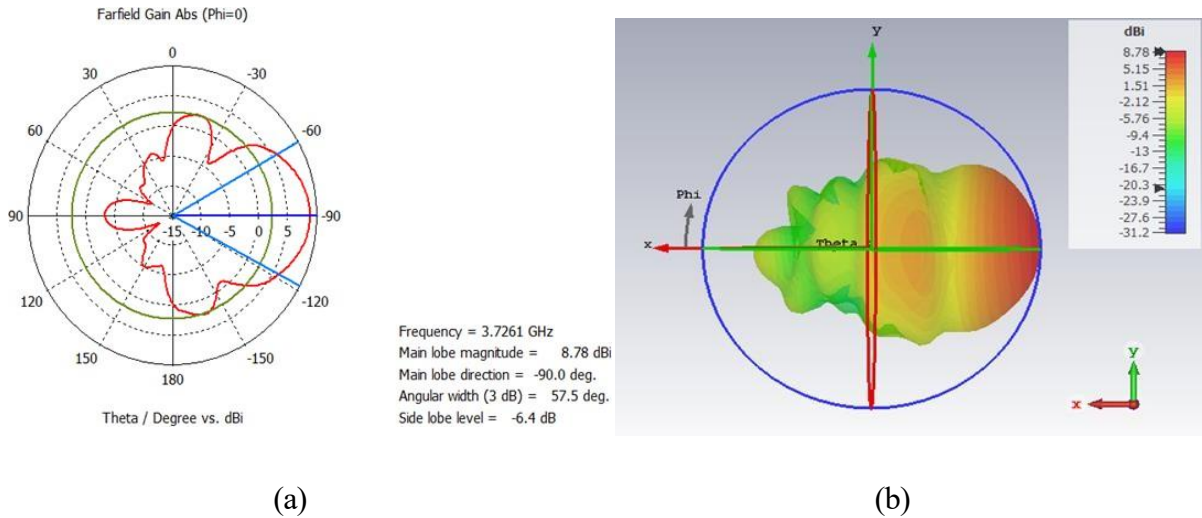
**Tableau IV.7:** Modes de fonctionnement de la diode **PIN BAR64-06**

| Etat de la diode | Résistance (R)     | Inductance (L)               | Capacité (C)                |
|------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ON               | $3\Omega$          | $2.6 \text{ e-}13 \text{ H}$ | 0                           |
| OFF              | $20\text{k}\Omega$ | 0 H                          | $0.04 \text{ e-}12\text{F}$ |

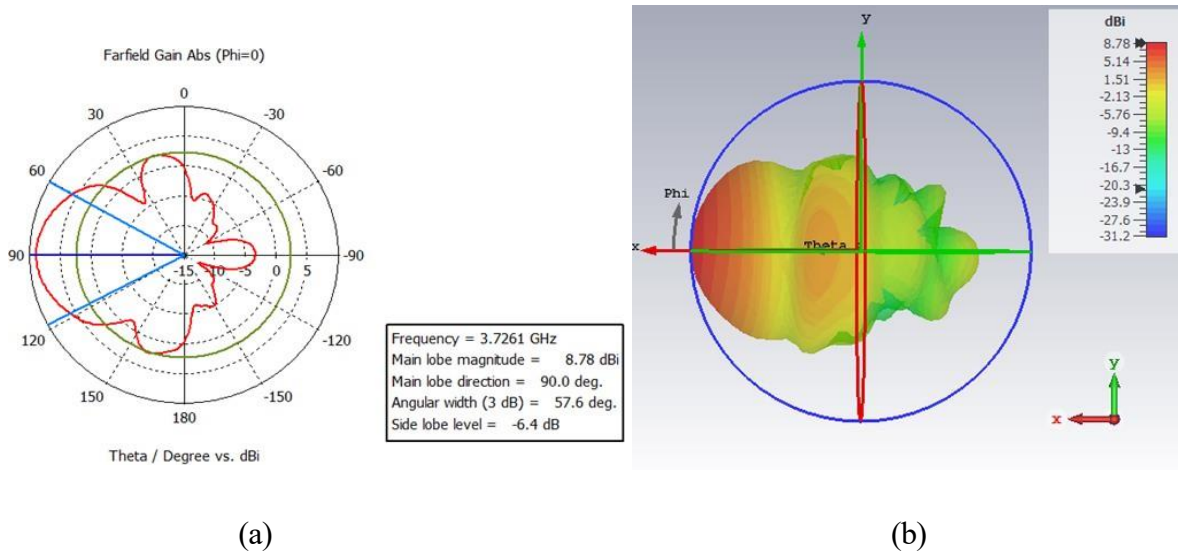


**Figure IV.22 :** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR64-06** pour le mode M1

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT



**Figure IV.23:** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR64-06** pour le mode M2



**Figure IV.24:** Reconfigurable en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes **PIN BAR64-06** pour le mode M3

Comme le montrent les figures IV.22, IV.23 et IV.24, nous avons atteint notre objectif, à savoir l'agilité du diagramme de rayonnement, grâce à l'insertion des diodes de types **BAR 64-06**. Les résultats seront présentés dans la partie suivante.

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

### ➤ Discussion des résultats

Le tableau IV.8 résume tous les résultats des simulations obtenus dans les figures IV.22, IV.23 et IV.24 avec deux éléments d'antenne imprimée Yagi et trois modes de fonctionnement des diodes PIN (M1, M2 et M3) :

**Tableau IV.8** : Résumé des résultats de la simulation pour les trois modes de fonctionnement avec l'insertion de la diode **PIN BAR64-06**

| Etat                  | Angle d'inclinaison (°) | Gain (dB) |
|-----------------------|-------------------------|-----------|
| <b>S1: ON S2: ON</b>  | ± 90                    | 7.32      |
| <b>S1: ON S2: OFF</b> | - 90                    | 8.78      |
| <b>S1: OFF S2: ON</b> | + 90                    | 8.78      |

- **Mode M1** : Ce mode présente un faisceau étroit avec un diagramme de rayonnement focalisé ( $39,2^\circ$ ), ce qui le rend adapté aux communications ciblées, telles que les connexions point à point ou les environnements nécessitant une forte concentration du signal.
- **Mode M2** : dans ce mode, le gain augmente par rapport au mode M1, mais le faisceau devient plus large ( $57,5^\circ$ ), offrant une meilleure couverture sur une zone plus étendue, bien que le signal soit moins concentré. Ce mode est efficace pour les déploiements multipoints, tels que les réseaux WiMAX.
- **Mode M3**: Ce mode fournit le faisceau le plus large ( $57,6^\circ$ ) avec le même gain que le mode M2. Il permet une couverture de zone plus large, idéale pour les scénarios nécessitant une distribution uniforme du signal, tels que les connexions Backhaus 5G.

Chaque mode offre un équilibre différent entre la largeur de faisceau et le gain, ce qui permet de répondre à divers scénarios de communication en fonction de la zone de couverture requise et de la focalisation du signal.

#### **IV.6 Comparaison des résultats avec les travaux de recherche**

Nous allons comparer, dans le tableau IV.9, nos résultats de simulations de l'antenne Yagi à deux éléments (réseau) avec l'insertion des diodes **PIN BAR63/64**, avec les travaux de la littérature pour valider notre travail.

**Tableau IV.9:** Comparaison avec d'autres travaux de recherches

| <b>Référence</b>     | <b>Type et quantité de commutateurs</b>                          | <b>Bande de gain (dBi)<br/>Crête moyenne</b> | <b>Angles d'inclinaison du faisceau (°)</b> | <b>Bande de fonctionnement</b> |
|----------------------|--|--|---|--------------------------------|
| [139]                | Diode PIN, 4   | 4.7  | 0°, +40°, -40°, ±45°                        | WiFi6e                         |
| [140]                | Diode PIN, 2   | 3.6  | +30°, ±40°                                  | WLAN                           |
| <b>Notre travail</b> | Diode PIN, 1<br>(Yagi simple)                                    | 5.95   | 0°, +5°                                     | WIMAX                          |
|                      | Diode PIN<br>BAR 63-06, 2<br>BAR 64-06, 2<br>(Yagi à 2 éléments) | 7.87<br>8.29                                 | +90°, -90°, ±148<br>+90°, -90°, ±90         | WiMAX, 5G                      |

Le tableau IV.9 présente une comparaison entre l'antenne Yagi à deux éléments reconfigurée à l'aide des diodes PIN BAR63/64 et les résultats rapportés dans la littérature. Un gain de crête moyen de 7,87 dBi et 8,29 dBi a été respectivement obtenu. La capacité de reconfigurer le diagramme de rayonnement permet à l'antenne d'orienter dynamiquement son faisceau, la rendant particulièrement adaptée aux applications telles que les communications sans fil évolutives, où l'optimisation de la couverture du signal et la réduction des interférences sont cruciales. Elle convient également aux systèmes d'antennes intelligentes déployés dans les réseaux 5G et WiMAX, qui nécessitent une couverture adaptative dans des environnements variés.

#### **IV.7 La miniaturisation de l'antenne Yagi à deux éléments**

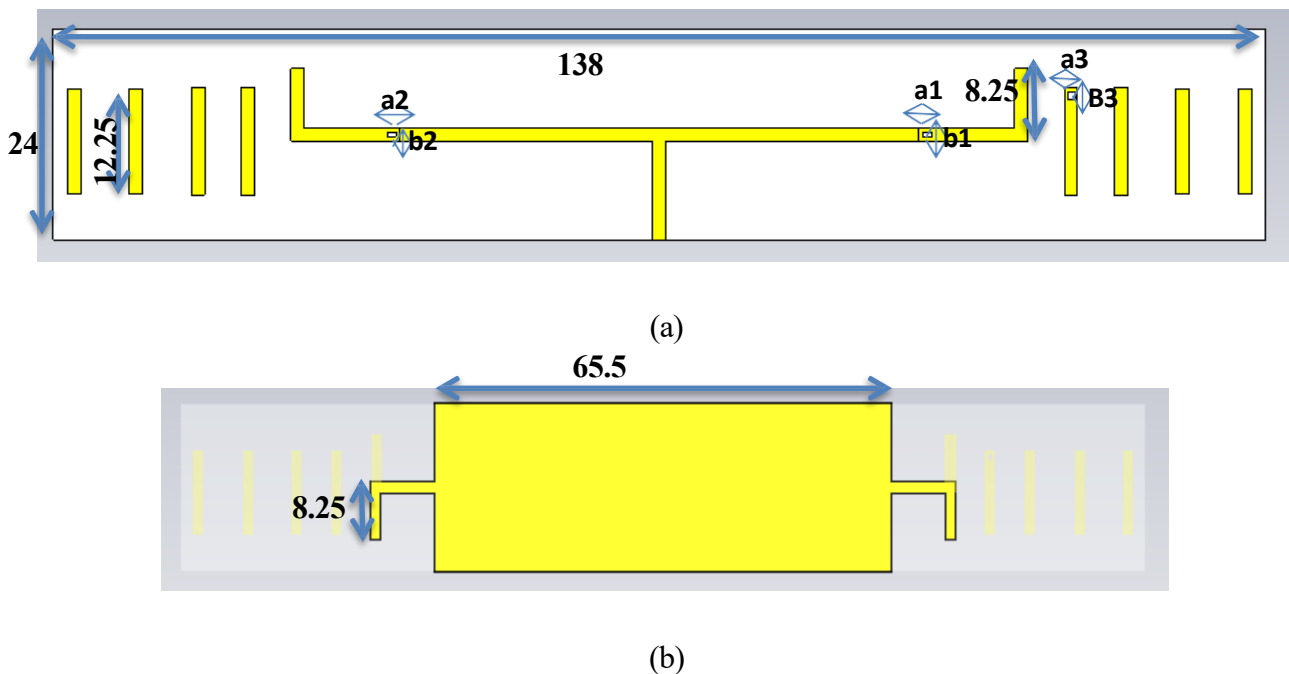
La miniaturisation vise à concevoir des dispositifs plus compacts, performants et économes en énergie, tout en réduisant les coûts de fabrication et en améliorant la portabilité. Ce principe est largement exploité dans des domaines variés tels que l'électronique, l'automobile et la médecine, où il permet de

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

développer des systèmes plus pratiques et accessibles sans compromettre leurs performances globales [141]-[143].

Dans cette section, nous abordons la miniaturisation de l'antenne Yagi à deux éléments par l'introduction de fentes. Cette stratégie permet de réduire les dimensions physiques de l'antenne tout en préservant, voire en optimisant, ses caractéristiques de rayonnement et son efficacité [1]. Les fentes, insérées dans les éléments conducteurs de l'antenne, modifient la distribution du courant et les champs électromagnétiques, ce qui permet d'obtenir une résonance à la fréquence souhaitée avec un encombrement réduit [144]. Cette approche est particulièrement adaptée aux applications modernes telles que les communications sans fil, l'Internet des objets (IoT) et les systèmes embarqués, où la compacité et la performance sont des critères déterminants [145], [146].

Dans la figure IV.25, nous allons présenter la géométrie de l'antenne yagi à deux éléments miniatures :

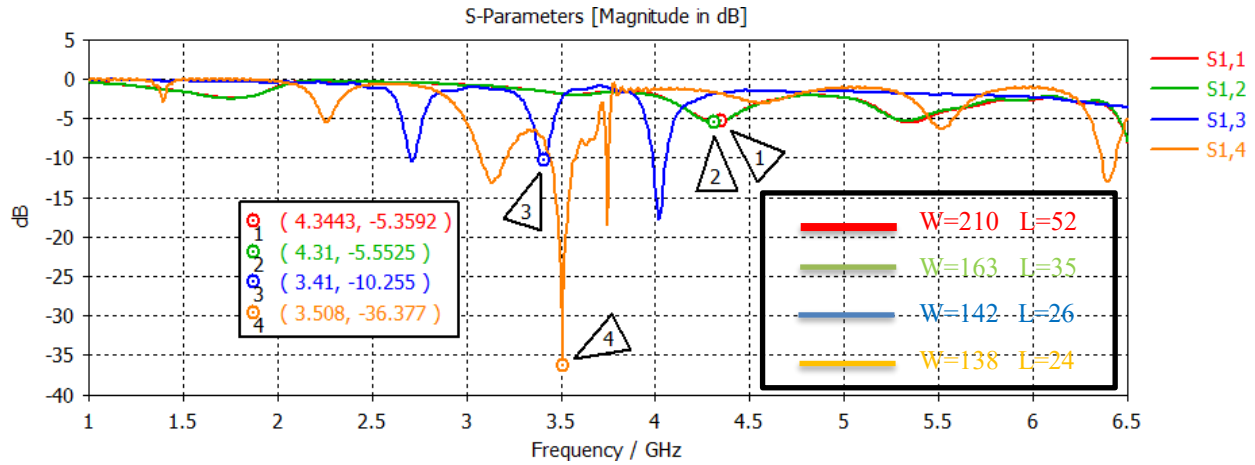


**Figure IV. 25** : Réseau d'antenne yagi à deux éléments miniature avec fentes  
(a) Vue de face, (b) Vue d'arrière

Pour valider les performances de l'antenne miniature proposée, plusieurs études paramétriques ont été menées, portant sur la largeur et la longueur des fentes intégrées dans le réseau de l'antenne. L'introduction de ces fentes a permis une miniaturisation efficace tout en maintenant les performances électromagnétiques. La figure IV.26 présente l'impact de ces variations dimensionnelles sur les caractéristiques du réseau d'antenne, notamment sur le coefficient de réflexion de l'antenne Yagi à deux

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

éléments miniaturisés. Cette analyse a permis d'ajuster précisément la fréquence de résonance à 3,5 GHz, malgré la réduction significative des dimensions de l'antenne. Les dimensions finales optimisées sont résumées dans le tableau IV.10. On remarque d'après la figure IV.26 que le coefficient de réflexion atteint un pic d'environ -36,377 dB à la fréquence de résonance de 3,508 GHz, avec  $w=138$  mm et  $L=24$  mm.



**Figure IV. 26:** Le coefficient de réflexion S11 de notre réseau d'antenne miniature avec différentes études paramétriques

**Tableau IV. 10 :** L'étude paramétrique menée pour le réseau d'antennes miniatures à deux éléments

| Les simulations           | Les dimensions de l'antenne (mm) | Les dimensions choisies pour l'étude paramétrique  | Résultats de simulations       |
|---------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| <b>Simulation 1</b>       | <b>W=210</b><br><b>L =52</b>     | $a_1=a_2=1.5$ $b_1=b_2=1$<br>$a_3=1$ $b_3=1.35$    | $f=4.3443$<br>$S_{11}=-5.3592$ |
| <b>Simulation 2</b>       | <b>W=163</b><br><b>L =35</b>     | $a_1=a_2=0.5$ $b_1=b_2=1$<br>$a_3=0.6$ $b_3=1$     | $f=4.31$<br>$S_{11}=-5.5525$   |
| <b>Simulation 3</b>       | <b>W=142</b><br><b>L =26</b>     | $a_1=a_2=0.75$ $b_1=b_2=0.25$<br>$a_3=0.5$ $b_3=1$ | $f=3.41$<br>$S_{11}=-10.255$   |
| <b>Simulation finales</b> | <b>W=138</b><br><b>L =24</b>     | $a_1=a_2=1$ $b_1=b_2=0.5$<br>$a_3=0.8$ $b_3=0.9$   | $f=3.508$<br>$S_{11}=-36.377$  |

La figure IV. 27 présente le taux d'ondes stationnaires du réseau d'antenne miniature proposé. De plus, ce taux atteint une valeur d'environ 1,0308 à la fréquence de fonctionnement de 3,508 GHz. Le taux de miniaturisation obtenue est de 40%.

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

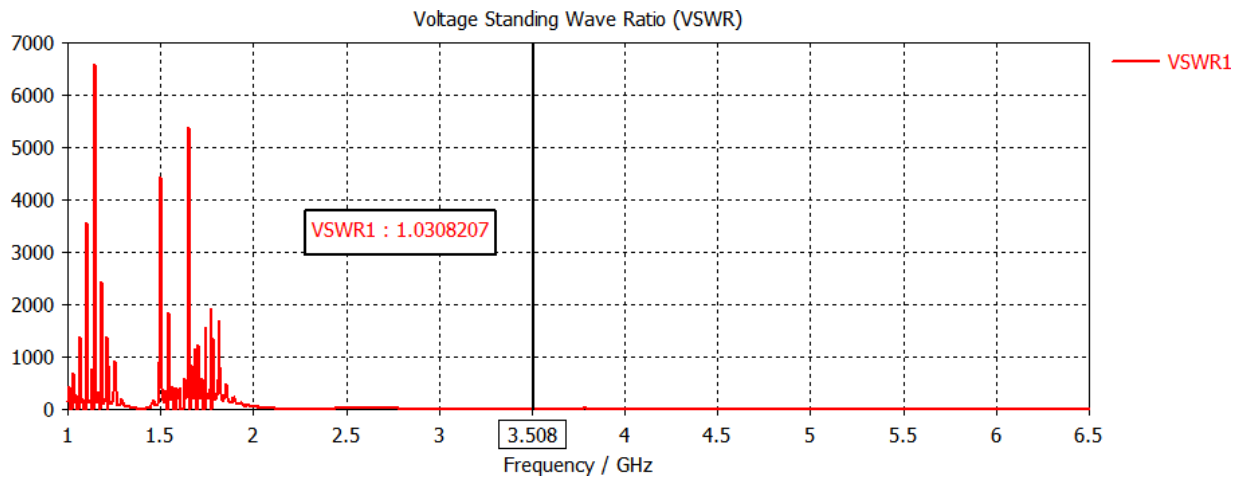


Figure IV. 27: Taux d'onde stationnaire de l'antenne yagi miniature à deux éléments

Un gain maximal de 10,392 dB a également été observé, ce qui est très satisfaisant, comme l'illustre la figure IV. 28.

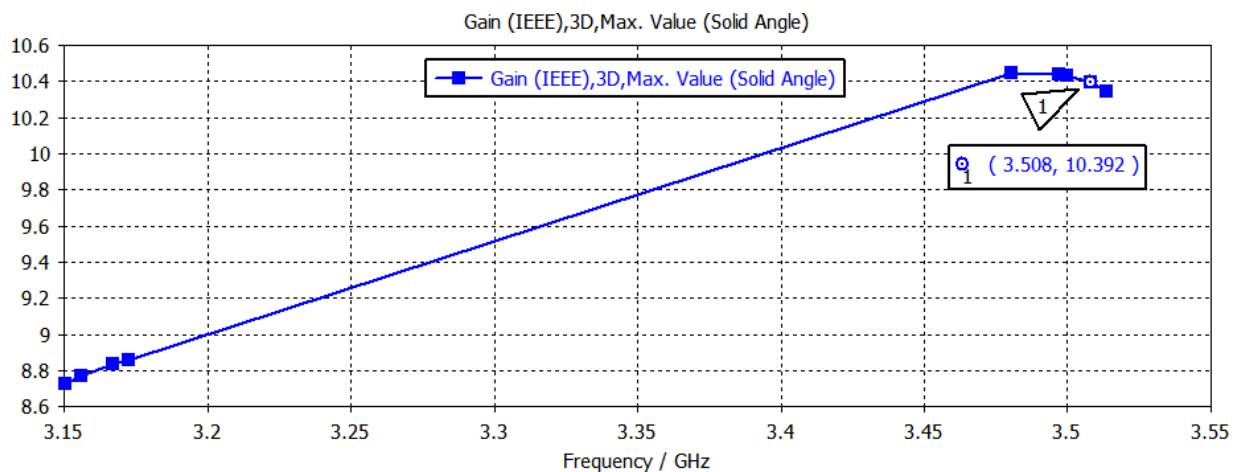
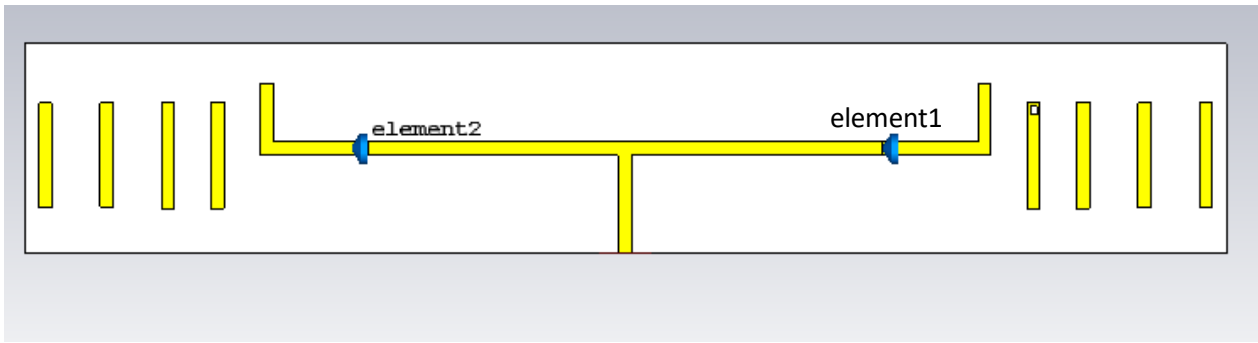


Figure IV. 28: Gain du réseau d'antennes à deux éléments

### IV.8 La reconfigurabilité de l'antenne Yagi miniature à deux éléments

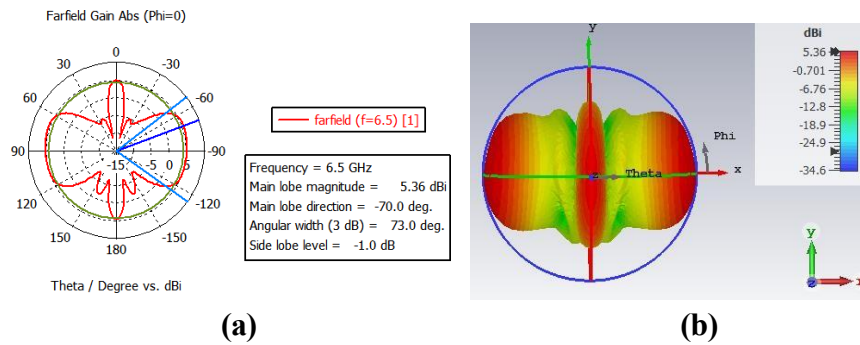
Pour assurer la reconfigurabilité de notre réseau d'antenne miniature, nous avons inséré deux diodes PIN du même type que celles utilisées précédemment (BAR 64-06) sur le dipôle de l'antenne Yagi, comme illustré dans la figure IV. 29. Nous avons ensuite testé son fonctionnement selon les trois modes de fonctionnement suivants : (ON-ON), (ON-OFF) et (OFF-ON):



**Figure IV. 29:** Réseaux d'antennes Yagi reconfigurable avec PIN BAR 64-06

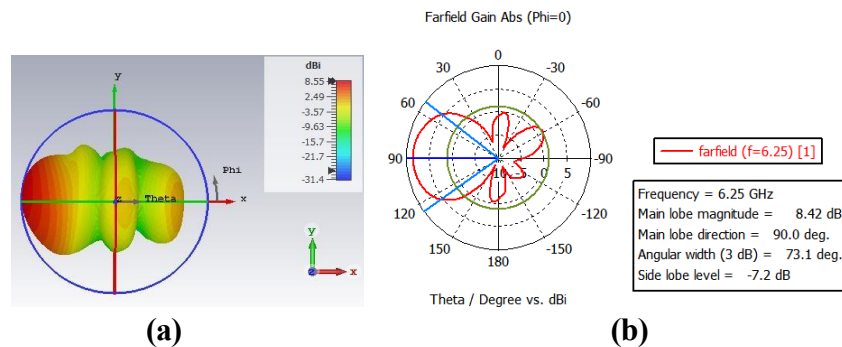
Les figures suivantes montrent clairement la reconfigurabilité du diagramme de rayonnement du réseau Yagi miniature. D'après ces figures, on peut constater que les résultats obtenus sont presque identiques à ceux de l'antenne initiale proposée lorsqu'on effectue la reconfigurabilité.

➤ **Mode ON-ON**



**Figure IV. 30:** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M1

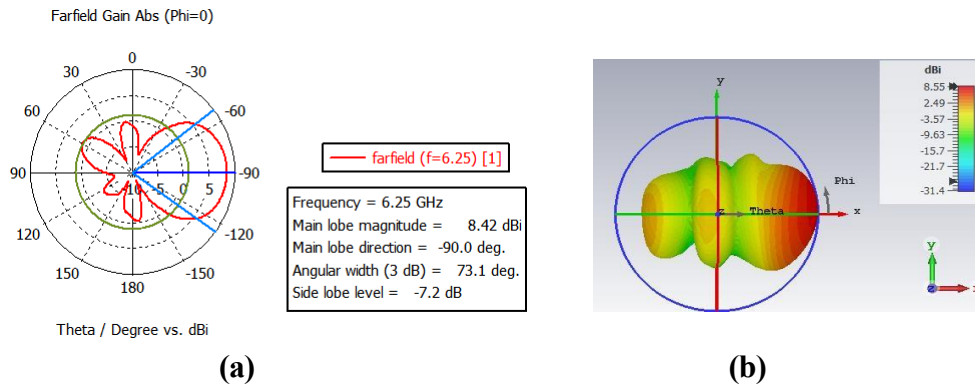
➤ **Mode ON-OFF**



**Figure IV. 31:** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M2

➤ **Mode OFF-ON**

## CHAPITRE IV CONCEPTION ET REALISATION D'ANTENNES IMPRIMEES AGILE EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT



**Figure IV. 32:** Reconfigurabilité en diagrammes de rayonnement (a) polaire et (b) 3D avec deux diodes PIN BAR64-06 pour le mode M3

### IV.9 Conclusion

En conclusion, les résultats obtenus démontrent que le réseau d'antenne Yagi à deux éléments offre une reconfigurabilité efficace grâce à l'intégration des diodes PIN BAR63-06 et BAR64-06, permettant d'ajuster dynamiquement le diagramme de rayonnement en fonction des exigences spécifiques des systèmes de communication. Cette antenne reconfigurable présente trois modes distincts (M1, M2 et M3), chacun assurant un compromis adapté entre largeur de faisceau et gain. Le mode M1 est particulièrement adapté aux communications directionnelles avec un faisceau étroit ( $39,2^\circ$ ), tandis que les modes M2 et M3 offrent une couverture plus étendue ; le mode M2 convient aux environnements multipoints tels que les réseaux WiMAX, et le mode M3 s'adapte à des scénarios nécessitant une large couverture, comme les liaisons backhaul en 5G.

Par ailleurs, une démarche de miniaturisation a été mise en œuvre sur cette antenne Yagi à deux éléments à travers l'insertion stratégique de fentes, permettant une réduction significative de ses dimensions tout en maintenant ses performances électromagnétiques. Cette optimisation renforce la polyvalence du réseau d'antenne, capable de répondre efficacement à une large variété de besoins, en alliant compacité, adaptabilité du rayonnement et efficacité du signal.

---

# **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

---

# Conclusion Générale et Perspectives

Au terme de cette thèse, nous avons exploré et développé des antennes reconfigurables adaptées aux technologies modernes de communication sans fil, notamment la 5G, WIMAX, Wi-Fi 6 et les réseaux IoT. Ce travail de recherche s'est concentré sur la conception, l'optimisation et la réalisation d'antennes imprimées miniatures reconfigurables, offrant des solutions performantes et flexibles face aux besoins croissants de connectivité dans des environnements de plus en plus diversifiés.

L'un des principaux résultats de cette recherche concerne la conception de deux types d'antennes reconfigurables en fréquence. L'antenne imprimée rectangulaire reconfigurable, avec ses modes M1 (ON-ON) et M2 (OFF-OFF), a montré une très bonne performance, avec des fréquences respectivement à 3,53 GHz et 5,0 GHz, avec des bandes passantes de 422 MHz et 209 MHz. Ces résultats illustrent la capacité de cette conception à s'adapter aux exigences des applications 5G et Wi-Fi 6, tout en garantissant une couverture fiable et une faible atténuation du signal. Parallèlement, l'antenne patch pentagonale reconfigurable, capable de couvrir un large éventail de fréquences allant de 2,438 GHz à 7,805 GHz, grâce à la permutation des états des diodes PIN, a montré sa polyvalence, couvrant ainsi une large gamme d'applications telles que les réseaux Wi-Fi, les communications LTE, les systèmes radar, les communications par satellite, ainsi que les réseaux sans fil fixes, industriels et militaires. Ces performances confirment l'aptitude de ces antennes à répondre aux besoins diversifiés des systèmes modernes de télécommunications.

Dans un autre volet de notre travail, nous avons étudié l'antenne Yagi à un et deux éléments, en mettant l'accent sur sa capacité à moduler son diagramme de rayonnement grâce aux diodes PIN. L'antenne Yagi à un élément génère un diagramme de rayonnement en mode ON et s'éteint en mode OFF, tandis que l'antenne Yagi à deux éléments, avec trois modes distincts (ON-ON, ON-OFF, OFF-ON), permet une adaptation efficace du rayonnement pour les technologies Wi-Fi, WIMAX et 5G. Les résultats obtenus tout au long de cette thèse ont non seulement montré la faisabilité et l'efficacité des antennes reconfigurables en fréquence et en diagramme de rayonnement, mais ont également mis en lumière leur flexibilité et leur capacité à s'adapter dynamiquement aux besoins spécifiques des systèmes de communication. Ces antennes permettent non seulement d'optimiser l'utilisation du spectre, mais aussi de

## Conclusion Générale et Perspectives

garantir des performances de couverture et de transmission de signal accrues, tout en réduisant la complexité des systèmes et les coûts associés à la multiplication des composants.

Au-delà des performances des antennes, cette recherche a permis de démontrer l'importance de la conception intégrée des antennes reconfigurables dans le cadre des réseaux de télécommunications de demain. L'approfondissement des concepts d'agilité en fréquence et en diagramme de rayonnement a montré que ces antennes reconfigurables sont des solutions pertinentes pour répondre aux exigences des nouvelles normes de communication sans fil, en particulier dans des applications mobiles, industrielles et militaires où la compacité, la flexibilité et l'efficacité sont primordiales.

En conclusion, cette thèse a apporté des contributions significatives dans la conception, l'optimisation et la réalisation d'antennes reconfigurables pour les réseaux de télécommunications modernes. Les travaux réalisés démontrent que ces antennes offrent des solutions pratiques et performantes pour une large gamme d'applications, tout en permettant une adaptation dynamique aux besoins spécifiques des systèmes. Elles ouvrent ainsi la voie à de nouvelles possibilités pour les systèmes de communication sans fil du futur, notamment avec l'intégration de nouvelles technologies telles que la 5G, WiMax et l'Internet des objets (IoT).

# Bibliographie

- [1] Balanis, C. A., “Antenna Theory: Analysis and Design,” (4th ed.). John Wiley & Sons, 2016.
- [2] Chien, J., & Lin, S, “Design of broadband microstrip patch antennas for wireless communication,” *International Journal of Antennas and Propagation*, 2011, 1-8.
- [3] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, “A reconfigurable patch antenna using switchable slots for circular polarization diversity,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 96–98, 2002, doi: 10.1109/7260.989863.
- [4] Z. Jiajie, W. Anguo, and W. Peng, “A survey on reconfigurable antennas,” *2008 Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. Proceedings, ICMMT*, vol. 3, pp. 1156–1159, 2008, doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540632.
- [5] Mitola Joseph, “Cognitive Radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” , PhD. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [6] 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 , l’Institut National des Postes et Télécommunications, To cite this version : HAL Id : tel-01712923, 2018.
- [7] K. Mohammed-Belhadj, D. Ziani-Kerarti, S. Ferouani, and F. Marouf, “A SMALL RECTANGULAR FREQUENCY RECONFIGURABLE PRINTED ANTENNA FOR 5G AND Wi-Fi 6 TECHNOLOGY,” *Telecommun. Radio Eng. (English Transl. Elektrosvyaz Radiotekhnika)*, vol. 80, no. 8, pp. 67–75, 2021, doi: 10.1615/TELECOMRADENG.2022040636.
- [8] S. Loizeau, “Conception et Optimisation d’antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande,” , Thèse de Doctorat L’UNIVERSITE PARIS-SUD XI, décembre 2009.
- [9] K. R. Shashikant and A. Kulkarni, “Reconfigurable Patch Antenna Design Using Pin Diodes and Raspberry PI for Portable Device Application,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 112, no. 3, pp. 1809–1828, 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07128-1.
- [10] I. Rouissi, J. M. Floch, and H. Rmili, “Design of a Frequency Reconfigurable Patch Antenna Using Capacitive loading and Varactor Diode,” no. February, pp. 1–5, 2015.
- [11] R. N. Lavallee and B. A. Lail, “Optically-controlled reconfigurable microstrip patch antenna,” *2008 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Natl. Radio Sci. Meet. APSURSI*, pp. 1–4, 2008, doi: 10.1109/APS.2008.4618978.
- [12] F. Alsharif, S. Safi, T. AbouFoul, M. Abu Nasr, and S. Abu Nasser, “Mechanical reconfigurable microstrip antenna,” *Int. J. Microw. Opt. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 153–160, 2016.
- [13] G.A. Deschamps, "Microstrip microwave antennas", Third USAF Symposium on antennas, USA, 1953.

## Bibliographie

- [14] A. Zanella *et al.*, “Internet of Things for Smart Cities,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [15] S. Dubal, “Mechanisms of Reconfigurable Antenna : A Review,” *2020 10th Int. Conf. Cloud Comput. Data Sci. Eng.*, pp. 576–580, 2020.
- [16] A visankar Roy, P. Kumar, S. Anand ,P. Pratim Sarkar & S. Bhunia, “A novel approach on miniaturization of micros trip patch antenna with loaded strips”, [Poster Session]. International conference on electronics, communication and instrumentation, Kolkata, India, (2014, January 16-17.
- [17] Vandenbosch, G. A. E., “Microstrip antennas: a review, ” *Proceedings of the IEEE*, 95(12), 2277-2290,2007.
- [18] GADDA, Abdelkrim,“Evaluation des caractéristiques d'un résonateur micro ruban à film mince supraconducteur par la méthode des deux fluides et les réseaux de neurones artificiels” Thèse de Magister, Université Hadj Lakhdar Batna.2015.
- [19] A. Rabia, “Télécommunications, Antennes Théorie et application ”, ellipses,2013 ISBN : 978-2-7298-83515.
- [20] K. Mohammed Belhadj, D. Ziani-Kerarti, S. Ferouani,“ Printed High-Gain Yagi Antenna for 5G Applications,” vol. 22, pp. 1–9.
- [21] Yang, F., & Rahmat-Samii, Y, “Reconfigurable Antennas: Design and Applications, ”Wiley-IEEE Press, 2009.
- [22] Afsar, M. N., & Baghery, F, “Reconfigurable Microstrip Antennas: A Review,” *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, Article ID 168042, 1-10, 2013.
- [23] Xie, L., Yang, F., & Rahmat-Samii, Y, “Reconfigurable Antennas for Mobile Communications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ” 62(5), 2287-2296,2014.
- [24] B. C. Youcef, “Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande” Thèse de doctorat 2019 Université de Mohamed El-Bachir Ellbrahimi - Bordj Bou Arreridj,2019.
- [25] C. G. Christodoulou, Y. Tawk, S. A. Lane, and S. R. Erwin, “Reconfigurable antennas for wireless and space applications,” *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2188249.
- [26] Ali, A. S., & Ghannouchi, F. M, “Reconfigurable Antennas Using RF MEMS and PIN Diodes for Wireless Communication Systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(3), 1155-1163,2012.
- [27] Cozzani, A., & L. Pierucci, “RF-MEMS for Reconfigurable Antennas: Technologies and Applications,” *IEEE Microwave Magazine*, 11(3), 89-97,2010.
- [28] B. Ghassemiparvin, S. Shah, and N. Ghalichechian, “Novel paraffin-based 100-GHz variable capacitors for reconfigurable antennas,” *2017 11th Eur. Conf. Antennas Propagation, EUCAP 2017*, pp. 3506–3510, 2017, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928379.

## Bibliographie

- [29] L. N. Pringle *et al.*, “A reconfigurable aperture antenna based on switched links between electrically small metallic patches,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 6, pp. 1434–1445, 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.825648.
- [30] C. J. Panagamuwa, A. Chauraya, and J. C. Vardaxoglou, B, “Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconductive switches,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 449–454, Feb. 2006.
- [31] M. R. Chaharmir, J. Shaker, and M. Cuhaci, “Novel Photonically-Controlled Reflectarray Antenna,” vol. 54, no. 4, pp. 1134–1141, 2006.
- [32] Y. Tawk, A. R. Albrecht, S. Hemmady, G. Balakrishnan, and C. G. Christodoulou, “Optically Pumped Frequency Reconfigurable Antenna Design,” vol. 9, pp. 280–283, 2010.
- [33] Y. Tawk, J. Costantine, S. E. Barbin, and C. G. Christodoulou, “Integrating Laser Diodes in a Reconfigurable Antenna System,” pp. 794–796, 2011.
- [34] S. J. Mazlouman, M. Soleimani, A. Mahanfar, C. Menon, and R. G. Vaughan, “Pattern reconfigurable square ring patch antenna actuated by hemispherical dielectric elastomer,” vol. 47, no. 3, pp. 10–11, 2011, doi: 10.1049/el.2010.3585.
- [35] J. Langer, J. Zou, C. Liu, S. Member, J. T. Bernhard, and S. Member, “Micromachined Reconfigurable Out-of-Plane Microstrip Patch Antenna Using Plastic Deformation Magnetic Actuation,” vol. 13, no. 3, pp. 120–122, 2003.
- [36] Y. Tawk and C. G. Christodoulou, “A cellular automata reconfigurable microstrip antenna design,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag.*, Jun. 2009, DOI: 10.1109/APS.2009.5171548.
- [37] Y. Tawk, J. Costantine, and C. G. Christodoulou, “A Frequency Reconfigurable Rotatable Microstrip Antenna Design Electrical and Computer Engineering Department , University of New Mexico ,” pp. 2–5, 2010.
- [38] W. Hu, M. Y. Ismail, R. Cahill, J. A. Encinar, V. Fusco, H. S. Gamble, D. Linton, R. Dickie, N. Grant, and S. P. Rea, “Liquid-crystal-based reflectarray antenna with electronically switchable monopulse patterns,” *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 14, Jul. 2007.
- [39] L. Liu and R. J. Langley, “Liquid crystal tunable microstrip patch antenna,” vol. 44, no. 20, pp. 1179–1180, Sep. 2008.
- [40] D. M. Pozar and V. Sanchez, “Magnetic tuning of a microstrip antenna on a ferrite substrate,” *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 729–731, Jun. 1988.
- [41] L. Dixit and P. K. S. Pourush, “Radiation characteristics of switchable ferrite microstrip array antenna,” *Inst. Electr. Eng. Proc. VMicrow. Antennas Propag.*, vol. 147, no. 2, pp. 151–155, Apr. 2000.
- [42] Kuo, H., & Chiang, P, “Design and Application of PIN Diodes in Reconfigurable Antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(8), 4456-4462, 2014.
- [43] Venkatesh, M., & Sharma, S, “High-Frequency PIN Diodes: Design and Applications,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 26(6), 415-417, 2016.

## Bibliographie

- [44] Lee, K. H., & Kim, C. H., “Design and Performance of PIN Diodes in High-Power Microwave Circuits,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(5), 2378-2385, 2015.
- [45] H. J. De Los Santos, “Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems,” Second Edition, Norwood, MA, Artech House, 2004.
- [46] J. M. Laheurte, “Switchable CPW-Fed Slot Antenna for Multifrequency Operation,” *Electronics Letters*, 37, 25, December 2001, pp. 1498-1500.
- [47] C. Luxey, L. Dussopt, J. Le Sonn, and J. Laheurte, “Dual-frequency operation of CPW-fed antenna controlled by pin diodes,” vol. 36, no. 1, 2000, pp. 2-3.
- [48] N. C. Karmakar, S. Member, and A. S. P. Pifa, “Shorting Strap Tunable Stacked Patch PIFA,” vol. 52, no. 11, pp. 2877–2884, 2004.
- [49] A. Sheta, S. F. Mahmoud, and L. S. Member, “A Widely Tunable Compact Patch Antenna,” vol. 7, pp. 40–42, 2008.
- [50] L. Huang and P. Russer, “Tunable Antenna Design Procedure and Harmonics Suppression Methods of the Tunable DVB-H Antenna for Mobile Applications,” no. 1, pp. 2–5.
- [51] I. J. Yoon, S. H. Park, and Y. E. Kim, “Frequency Tunable Antenna for Mobile TV Signal Reception,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, Honolulu, HI, July 2007, pp. 5861-5864.
- [52] M. Abdallah, L. Le Coq, F. Colombel, G. Le Ray, and M. Himdi, “Frequency tunable monopole coupled loop antenna with broadside radiation pattern,” vol. 45, no. 23, p. 2009, 2009.
- [53] G. M. Rebeiz, “RF MEMS: Theory, design, and technology,” John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [54] A. Petosa, “An overview of tuning techniques for frequency-agile antennas,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, pp.271 -296 2012.
- [55] D. E. Anagnostou *et al.*, “Design , Fabrication , and Measurements of an Reconfigurable Antenna,” vol. 54, no. 2, pp. 422–432, 2006.
- [56] N. Kingsley, D. E. Anagnostou, M. Tentzeris, S. Member, J. Papapolymerou, and S. Member, “RF MEMS Sequentially Reconfigurable Sierpinski Antenna on a Flexible Organic Substrate With Novel DC-Biasing Technique,” vol. 16, no. 5, pp. 1185–1192, 2007.
- [57] R. K. Gupta, U. C. Sharma, P. Sayanu, and G. Kumar, “MEMS BASED RECONFIGURABLE DUAL BAND ANTENNA,” vol. 50, no. 6, pp. 1570–1575, 2008, doi: 10.1002/mop.
- [58] T. Wu, S. Member, R. L. Li, S. Member, and S. Y. Eom, “Switchable Quad-Band Antennas for Cognitive Switchable Quad-Band Antennas for Cognitive Radio Base Station Applications,” no. June, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044472.
- [59] W. B. Zheng, Q. A. Huang, X. P. Liao, and F. X. Li, “RF MEMS Membrane Switches on GaAs Substrates for X-Band Applications,” vol. 14, no. 3, pp. 464–471, 2005.
- [60] G. P. Jin, D. L. Zhang, and R. L. Li, “Optically controlled reconfigurable antenna for cognitive

## Bibliographie

- radio applications,” vol. 47, no. 17, p. 2011, 2011.
- [61] I. Carraquillo-Rivera, Z. Popovic, and R. A. Rodriguez Solis, “Tunable Slot Antenna Using Varactors and Photodiodes,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, Columbus, OH, June 2003, pp. 532-535.
- [62] VALDES, Jehison Rafael Leon, “Antennes agiles reconfigurables optiquement dans le domaine millimétrique avec l’intégration de matériaux à changement de phase,” Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2020.
- [63] Djordjevic, S., & Stojanovic, J. , “Mechanical Reconfiguration of Antennas: Concepts and Techniques,” *International Journal of Antennas and Propagation*, 2011, Article ID 967652, 1-13,2011.
- [64] Liu, H., & Hsieh, M., "Mechanical reconfiguration of antenna elements for beamforming and polarization control." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6567-6574,2017.
- [65] W. Oudad, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, S. Touzain, and X. Feugas, “Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structures,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 950–954, 2009, doi: 10.1016/j.commat.2009.04.041.
- [66] Yang, X., & Zheng, X. , “Design of Reconfigurable Antennas with Switchable Frequency and Polarization for Cognitive Radio,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4), 1578-1586,2015.
- [67] Chen, Z., & Lau, B, “Reconfigurable Antenna Design for Wireless Communication Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(9), 4644-4652,2014.
- [68] Zhou, Y., & Li, J., “Antenna reconfiguration for dynamic environment adaptation in wireless communication,” *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 3(1), 23-32,2019.
- [69] ATEF, BENHAOUES, “Architectures numériques versatiles avancées pour la transmission sans fil de données à très haut débit,”Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [70] Liu, R., & Zhang, Y., “Reconfigurable Antennas for Multi-Standard Wireless Communications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ” 64(9), 3924-3933,2016.
- [71] Wang, W., & Li, T., “Multiband and Reconfigurable Antennas for Modern Wireless Communication Systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(8), 4187-4194,2017.
- [72] Kurtis, C. S., & Shih, H., “Reconfigurable Antennas for Wireless Networks." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ” 69(8), 4624-4632.DOI: 10.1109/TAP.2021.3084934,2021.
- [73] Sharma, V., & Sharma, A., "Cohabitation of Wireless Communication Standards on Single Antenna: Frequency Reconfigurability as a Solution." *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(4), 413-416,2015.
- [74] S. Ullah, S. Ullah, I. Ahmad, W. Ur Rehman Khan, T. Ahmad, U. Habib, M. A. Albreem, M. H. Alsharif, and P. Uthansakul, “Frequency Reconfigurable Antenna for Portable Wireless

## Bibliographie

- Applications,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no. 3, pp. 3015–3027, 2021.
- [75] S. Somarith, K. Hyunseong, and L. Sungjoon, “Frequency Reconfigurable and Miniaturized Substrate Integrated Waveguide Interdigital Capacitor (SIW-IDC) Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 62, pp. 1039–1045, Mar. 2014.
- [76] M. T. Ali, N. Ramli, M. K. M. Salleh, and M. N. M. Tan, “A design of reconfigurable rectangular microstrip slot patch antennas,” *Proc. - 2011 IEEE Int. Conf. Syst. Eng. Technol. ICSET 2011*, no. November 2020, pp. 111–115, 2011, doi: 10.1109/ICSEngT.2011.5993431.
- [77] G. Singh and M. Kumar, “Novel frequency reconfigurable microstrip patch antenna based on a square slot for wireless devices,” *Proc. - Int. Conf. Commun. Syst. Netw. Technol. CSNT 2012*, pp. 27–30, 2012, doi: 10.1109/CSNT.2012.15.
- [78] Trad, Imen Ben, et al. "Planar square multiband frequency reconfigurable microstrip fed antenna with quadratic Koch-Island fractal slot for wireless devices." *Microwave and Optical Technology Letters* 57.1 (2015): 207-212.
- [79] B. L. Sharma, G. Parmar, and M. Kumar, “Frequency reconfigurable microstrip patch antenna with circular slot for K-band application,” *IEEE Int. Conf. Comput. Commun. Control. IC4 2015*, no. September, 2016, doi: 10.1109/IC4.2015.7375534.
- [80] S. Ullah, S. Ahmad, B. A. Khan, and J. A. Flint, “A multi-band switchable antenna for Wi-Fi, 3G Advanced, WiMAX, and WLAN wireless applications,” *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 10, no. 8, pp. 984–990, 2018, doi: 10.1017/S1759078718000776.
- [81] J. Premalatha, D. Sheela, and M. Abinaya, “Reconfiguration of circular microstrip patch antenna for wireless applications,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 348–351, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.6.15130.
- [82] W. A. Awan, A. Zaidi, N. Hussain, S. Khalid, and A. Baghdad, “Frequency Reconfigurable patch antenna for millimeter wave applications,” *2019 2nd Int. Conf. Comput. Math. Eng. Technol.*, pp. 1–5, 2019.
- [83] B. T. P. Madhav, B. P. Nadh, T. Anilkumar, P. Pardhasaradhi, M. C. Rao, and P. Lakshman, “Frequency Reconfigurable Split Ring Antenna for LTE And WiMAX Applications,” vol. 66, no. 2, pp. 255–260, 2020, doi: 10.24425/ijet.2019.131871.
- [84] S. Datto, “Frequency Reconfigurable U-shaped and Inverted U- shaped Microstrip Patch Antenna Design using Pin Diode for S-band and C-band Applications,” no. December, 2020, doi: 10.1109/ETCCE51779.2020.9350917.
- [85] S. Errahili, A. Khabba, S. Ibnyaich, and M. M. R. Hassani, “New Frequency Reconfigurable Patch Antenna for Wireless Communication,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 15–18, 2020, doi: 10.1145/3386723.3387879.
- [86] K. Thenkumari, K. S. Sankaran, and J. M. Mathana, “Design and Implementation of Frequency Reconfigurable Antenna for Wi-Fi Applications,” *Eng. Sci.*, vol. 23, pp. 1–11, 2023, doi: 10.30919/es8d876.

## Bibliographie

- [87] M. A. Shuriji and R. H. Thaher, "A reconfigurable switching diode loaded patch antenna for S, C, X, Ku, and K bands applications," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 247–253, 2024, doi: 10.11591/eei.v13i1.5738.
- [88] T. D. Nguyen, "Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, To cite this version : HAL Id : tel-00859818, 2013.
- [89] Martinez, J., & Gonzalez, A., "Radiation Pattern Reconfigurability in Antennas for Modern Wireless Systems," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56(6), 60-72, 2014.
- [90] J Xu, K., & Lu, Y., "Reconfigurable Antenna Systems for Smart Wireless Networks: Beamforming and Pattern Control," *IEEE Communications Magazine*, 52(12), 90-98, 2014.
- [91] Jin, X., & Liu, W., "Pattern Reconfigurable Antennas for Directional Wireless Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(1), 67-74, 2017.
- [92] I. Ben Trad, J. M. Floc'h, H. Rmili, M. Drissi, and F. Choubani, "Design of reconfigurable radiation pattern dipole antenna with director and reflector elements for telecommunication systems," *2013 Loughbrgh. Antennas Propag. Conf. LAPC 2013*, vol. 1, no. November, pp. 117–121, 2013, doi: 10.1109/LAPC.2013.6711864.
- [93] I. Ben Trad, J. M. Floc'h, H. Rmili, M. Drissi, and F. Choubani, "Design of reconfigurable radiation pattern ring-dipole antenna for wireless communication," *2013 7th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2013*, no. May 2014, pp. 1252–1255, 2013.
- [94] S. K. Sharma, F. Fideles, and A. Kalikonda, "Radiation pattern reconfigurable planar Yagi-Uda antenna," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, no. Side 1, pp. 190–191, 2013, doi: 10.1109/APS.2013.6710756.
- [95] M. Jusoh, S. Member, T. Aboufoul, and S. Member, "Pattern-Reconfigurable Microstrip Patch Antenna With Multidirectional Beam for WiMAX Application," vol. 13, no. Mcmc, pp. 860–863, 2014.
- [96] M. S. Khan, A. D. Capobianco, S. M. Asif, A. Iftikhar, B. D. Braaten, and R. M. Shubair, "A pattern reconfigurable printed patch antenna," *2016 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. APSURSI 2016 - Proc.*, vol. 1, no. Patch 2, pp. 2149–2150, 2016, doi: 10.1109/APS.2016.7696781.
- [97] D. Selvaraj, D. Arulkumar, and D. Dhinakaran, "Radiation Pattern Reconfigurable Antenna for WBAN and WLAN Applications," vol. 5, no. 4, pp. 727–730, 2018.
- [98] M. S. Najjaw and K. H. Sayidmarie, "A Printed Monopole Antenna with Radiation Pattern Reconfiguration," no. 2, pp. 13–14, 2019, doi: 10.1109/ICECCPCE46549.2019.203775.
- [99] S. Iqbal and M. K. Shereen, "Radiation Pattern Reconfigurable Antenna for 5G Applications," pp. 46–52.
- [100] Lavadiya, Sunil P., et al, "Design and Verification of Novel Low-Profile Miniaturized Pattern and Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using Two PIN Diodes," *Brazilian J. Phys.*, no. August, 2021, doi: 10.1007/s13538-021-00951-2.
- [101] Martinez, J., & Gonzalez, A., "Polarization Reconfigurable Antennas for Modern Wireless

## Bibliographie

- Communication Systems,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 458-461,2016.
- [102] M. Rammal, “Développement d ’ antennes agiles en fréquence intégrant un condensateur ferroélectrique,” ,Thèse de doctorat,Université de Limoges, To cite this version : HAL Id : tel-01709308,2018.
- [103] Y. J. Sung, T. U. Jang, and Y. Kim, “A Reconfigurable Microstrip Antenna for Switchable Polarization,” vol. 14, no. 11, pp. 534–536, 2004.
- [104] H. Su, I. Shoaib, X. Chen, and T. Kreouzis, “Optically Tuned Polarisation Reconfigurable Antenna ( Invited ),” pp. 3–4, 2012.
- [105] I. B. E. N. Trad, J. M. F. H, H. Rmili, M. Drissi, and F. Choubani, “Rectangular Bi-Loop Single-Feed Antenna with Polarization Agility Property for GPS and Iridium Applications,” no. November, pp. 10–11, 2014.
- [106] H. Begum, X. Wang, M. Lu, W. Virginia, and W. Virginia, “A Polarization-Reconfigurable Microstrip Antenna Design Based on Parasitic Pin Loading,” pp. 135–137, 2017.
- [107] Y. I. A. Al-yasir, N. O. Parchin, I. Elfergani, A. Al-jzari, and W. I. Hammed, “A New Polarization-Recon fi gurable Antenna for 5G Wireless Communications,” vol. 2, pp. 431–437, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-05195-2.
- [108] A. Sedghara and Z. Atlasbaf, “A New Reconfigurable Single-Feed Microstrip Antenna With Polarization Diversity,” no. May, 2020.
- [109] A. Sedghara and Z. Atlasbaf, “Reconfigurable single-feed antenna with switchable polarization Reconfigurable Single-Feed Antenna With Switchable Polarization,” no. May 2013, 2020, doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599839.
- [110] Karuppanan, Sakthisudhan, V. R. Vinothini, and Ezhilazhagan Chenguttuvan. "Reconfigured antenna with switchable polarization for S Band Wireless applications." *El-Cezeri* 10.2 (2023): 231-239.
- [111] Chen, G., Yang, X.L., and Wang, Y., Dual-Band Frequency-Reconfigurable Folded Slot Antenna for Wireless, *Commun. Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 1386–1389, 2012. DOI: 10.1109/ LAWP.2012.2227293.
- [112] Majid, H.A., Abd Rahim, M.K., Hamid, M.R., and Ismail, M.F., Frequency Reconfigurable Microstrip Patch-Slot Antenna with Directional Radiation Pattern, *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 144, pp. 319– 328, 2014. DOI: 10.2528/PIER13102901.
- [113] Majid, H.A., Rahim, M.K.A., Hamid, M.R., and Ismail, M.F., A Compact Frequency-Reconfigurable Narrowband Microstrip Slot Antenna, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 616–619, 2012. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2202869.
- [114] D. E. Anagnostou, M. T. Chryssomallis, and S. Goudos, “Reconfigurable Antennas,” *Electronics*, vol. 10, p. 897, Apr. 2021.
- [115] Yin, X., & Zhang, Y., "A Survey of Wireless Communication Networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), 1112-1137,2015.

## Bibliographie

- [116] P. Atelin, "Réseaux sans fil 802.11 : Technologie - Déploiement - Sécurisation," p. 224.
- [117] ZHOR, BENDAHMANE., " Contribution à la Conception, Optimisation et Réalisation d'Antennes Miniatures Reconfigurables,". Thèse de doctorat, Université de Ain Temouchent Belhadj Bouchaib.2022.
- [118] G. Pujolle and O. Salvatori, Les réseaux. Paris: Eyrolles, 2006. OCLC: 634273339.
- [119] Wu, J., & Zhang, L., "Bluetooth Technology and Applications," IEEE Communications Magazine, 53(5), 84-91,2015.
- [120] Sicari, S., Rizzardi, A., & Coen-Porisini, A., "A Survey of IoT Applications in Wireless Sensor Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1), 96-118,2015.
- [121] IEEE Std. 802.16-2004. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE 802.16-2004, October 2004.
- [122] IEEE Std. 802.16e-2005. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems -Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layer for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Band. IEEE 802.16e-2005, February 2005.
- [123] Ismail, Mohamed Amine, et al., "An Improved IEEE 802.16 WiMAX Module for the NS-3 Simulator" Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, p. 1-10, no. 4, 2010.
- [124] IEEE standard 802.16, "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," part 16, 2005.
- [125] Lemanique Fabrice, "Tout sur les Réseaux sans fil. France," , DUNOD, 2009, page 13-27.
- [126] Benmammar Badr et Amraoui Asma, "Réseaux de radio cognitive Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre," , Archive Ouvert, 2012, no86, page 19-20.
- [127] Drissi, Meriem., "Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les' smal cell,". Thèse de doctorat, Diss. Normandie Université; Université des sciences, des techniques et de médecine de Tunis, 2023
- [128] =SIDDIQUE, U., TABASSUM, H., HOSSAIN, E., et al, "Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches, " IEEE Wireless Communications, vol. 22, no 5, 2015, pp. 22-31.
- [129] M. Pant and L. Malviya, " Design, developments, and applications of 5G antennas: A review," International Journal of Microwave and Wireless Technologies, vol. 15, no. 1, pp. 1-27, 2022, doi: 10.1017/S1759078722000095.
- [130] Paragya, D. and Siswono, H., "3.5 GHz Rectangular Patch Microstrip Antenna with Defected Ground Structure for 5G, " ELKOMIKA, vol. 8, no. 1, p. 31, 2020. DOI: 10.26760/elkomika. v8i1.31.

## Bibliographie

- [131] Fang, X., Wen, G., Inserra, D., Huang, Y., and Li, J., “ Compact Wideband CPW-Fed Meandered-Slot Antenna with Slotted Y-Shaped Central Element for Wi-Fi, WiMAX, and 5G Applications, ” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 66, pp. 7395–7399, 2018. DOI: 10.1109/TAP.2018.2869254.
- [132] Fofana, S, “Design and characterization of reconfigurable antenna array in the 3.4-3.8 GHz band: contribution to the reduction of Energy consumption,”Thèse de doctorat, Université Rennes1,2020.
- [133] Pozar, D.M. and Schaubert, D., “ Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays, ” IEEE, 2005.
- [134] K. Mohammed-Belhadj, D. Ziani-Kerarti, S. Ferouani, and B. Mouffi, “PENTAGONAL MICROSTRIP ANTENNA WITH FREQUENCY RECONFIGURABILITY USING PIN DIODE FOR WIRELESS NETWORKS,” Telecommun. Radio Eng. (English Transl. Elektrosvyaz Radiotekhnika), DOI: 10.1615/TelecomRadEng.2024053455.
- [135] K. Karthika, K. Kavitha, A. Aparna, A. D. Mary, and N. Rithanya, “Design of Compact Frequency Reconfigurable Antenna for Sub-6 GHz 5G Application,” 8th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. . ICACCS 2022, no. March, pp. 793–798, 2022, doi: 10.1109/ICA.
- [136] Peter P Viezbicke, “Yagi Antenna Design, ” US Government Printing Office.vol. 688, Washington DC, 1976
- [137] M. F. Abdus Salam, S. T. Setiyono, Y. Mukhlis, and T. Sepdiansah, “Microstrip-Fed Yagi-Uda Dipole Array Antenna At 3.6 GHz Frequency For 5G
- [138] “CST MW.” Accessed: Jul. 24, 2016.
- [139] B. Saikia and K. Borah, “A Parasitic Array Based Pattern Reconfigurable Patch Antenna for Wi-Fi 6E Application, ” Progress In Electromagnetics Research M, vol. 107, pp. 119–129, 2022.
- [140] B. Saikia and K. Borah, “ Parasitic Array Based Radiation Pattern Reconfigurable Patch Antenna for WLAN Application, ” Adv.Electromagn., vol. 11, no. 4, pp. 42–50, 2022, doi: 10.7716/aem.v11i4.2033.
- [141] S. S. Rao, Engineering Optimization: Theory and Practice, 4th ed., Wiley, 2009.
- [142] G. Marrocco, “The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no. 1, pp. 66–79, 2008.
- [143] J. Volakis, C.-C. Chen, and K. Fujimoto, Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications, McGraw-Hill, 2010.
- [144] M. Ali and G. J. Hayes, “Miniaturization of printed dipole antennas using slots and shorting techniques,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 10, pp. 2676–2682, Oct. 2003.

## **Bibliographie**

- [145] Y. H. Wang and M. Y. Weng, "Compact Yagi antenna with meandered driven element and director for WLAN applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 34, pp. 111–121, 2013.
- [146] H. Oraizi and S. H. Ghaffari, "Miniaturized UWB monopole microstrip antenna design by the combination of slotting and EBG structure," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 67–70, 2011.