

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de Technologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux des Télécommunications

Par :

HADJAZI Bilal

Sujet

***Conception et Réalisation d'un Système MIMO à
Polarisation Circulaire pour les Applications Wi-Fi***

Soutenu publiquement, en Juin 2025, devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|
| Mr N. BOUKLI HACEN | Professeur | Univ de Tlemcen | Président |
| Mme N. BELGACEM | Maître de conférences B | Univ de Tlemcen | Examinatrice |
| Mme H. BENOSMAN | Maître de conférences A | Univ de Tlemcen | Encadrante |

Année Universitaire: 2024-2025

Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord à ALLAH tous puissant pour nous avoir donné la volonté, la patience et le courage nécessaire pour mener ce modeste travail à bout.

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Télécommunication (LTT) du Département de télécommunications de la Faculté de Technologie de L'Université de Tlemcen, sous la direction de Mme **BENOSMAN Hayet**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen.*

Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour l'encadrement spécifique, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire.

*Je remercie vivement Mr **BOUKLI HACENE Nouredinne**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je remercie respectueusement Mme **BELGACEM Nassima**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.*

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous nos proches et amis, qui nous ont constamment encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mon père, qui a été ma première école de vie, un vrai exemple de courage et de persévérance.

À ma mère, qui m'a toujours poussée à avancer avec ses prières et son soutien. Aucun mot ne peut vraiment exprimer toute ma gratitude pour les sacrifices de mes parents.

À mes sœurs Fadia et Nadira, pour leur amour, leur soutien et leur présence rassurante.

À mon frère Oussama et à sa femme, pour leur bienveillance, leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

À mes beaux-frères et à mes neveux, qui m'ont toujours entourée de leur affection et de leurs encouragements tout au long de ce chemin. À mes amis fidèles, surtout Oussama, pour leur présence, leurs mots justes, leur patience et leur réconfort dans les moments les plus difficiles. À toutes les personnes qui m'ont inspirée, encouragée ou simplement aidée de près ou de loin sur mon chemin, je vous remercie sincèrement.

Ce travail est le résultat de mes efforts, mais aussi de tout le soutien que j'ai reçu.

Résumé

Ce travail présente la conception, la simulation et la validation expérimentale d'un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour les applications sans fil dans la bande Wi-Fi à 2.4 GHz. Le système repose sur un système MIMO à deux ports intégrant une structure à patch triangulaire fendu, permettant l'obtention d'une polarisation circulaire.

Les simulations électromagnétiques, effectuées à l'aide de CST Microwave Studio, ont permis d'analyser les performances de l'antenne en termes de bande passante, gain, paramètres S, rapport axial et isolation. Un prototype physique a été fabriqué, puis caractérisé expérimentalement pour valider les résultats obtenus en simulation. L'étude comparative a montré une bonne concordance entre les résultats simulés et mesurés, confirmant son aptitude au fonctionnement MIMO. Cette solution offre un bon compromis entre compacité, performance et coût de fabrication, ce qui la rend adaptée à une intégration dans des systèmes Wi-Fi modernes nécessitant une communication robuste et efficace.

Mots clés : Antenne patch triangulaire, système MIMO, polarisation circulaire, rapport axial, coefficient d'isolation, CST MWS.

Abstract

This paper presents the design, simulation, and experimental validation of a Multiple Input Multiple Output (MIMO) antenna system intended for wireless applications in the 2.4 GHz Wi-Fi band. The proposed design employs a compact two-port MIMO configuration based on a slotted triangular patch structure, which enables circular polarization.

Electromagnetic simulations were performed using CST Microwave Studio to evaluate key performance parameters such as impedance bandwidth, gain, S-parameters, axial ratio, and mutual isolation. A physical prototype was fabricated and experimentally tested to validate the simulated results. The comparative analysis between simulation and measurement shows strong agreement, confirming the antenna's effectiveness in MIMO operation. The proposed antenna achieves a good balance between compactness, performance, and manufacturing cost, making it a viable solution for integration into modern Wi-Fi systems that require reliable and efficient communication.

Keywords: Triangular patch antenna, MIMO, circular polarization, axial ratio, mutual coupling, CST Microwave Studio.

ملخص

يقدم هذا العمل تصميمًا ومحاكاة واختبارًا تجريبيًا لنظام متعدد المدخلات والمخرجات (MIMO) للتطبيقات اللاسلكية في نطاق واي فاي 2.4 جيجا هرتز. يعتمد النظام على هوائي MIMO ثنائي المنفذ، يتضمن بنية رقعة مثلثية منقسمة، مما يتيح استقطابًا دائريًا.

أجريت عمليات محاكاة كهرومغناطيسية باستخدام برنامج CST Microwave Studio ، وحلت أداء الهوائي من حيث عرض النطاق الترددي، والكسب، ومعلمات S ، والنسبة المحورية، والعزل. صُنِعَ نموذج أولي مادي، ثم وُصِفَ تجريبيًا للتحقق من صحة نتائج المحاكاة. أظهرت الدراسة المقارنة توافقًا جيدًا بين نتائج المحاكاة والقياسات، مما يؤكد ملاءمته لتشغيل MIMO. يوفر هذا الحل توازنًا جيدًا بين الاكتناز والأداء وتكلفة التصنيع، مما يجعله مناسبًا للدمج في أنظمة واي فاي الحديثة التي تتطلب اتصالات قوية وفعالة .

الكلمات المفتاحية: هوائي رقعة مثلثي، نظام MIMO ، الاستقطاب الدائري، النسبة المحورية، معامل العزل، CST MWS.

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Remerciements | I |
| Dédicace | II |
| Résumé | III |
| Abstract..... | IV |
| ملخص | V |
| Table des matières | VI |
| Liste des figures..... | X |
| Liste des tableaux | XIV |
| Liste des abréviations | XV |
| Introduction générale..... | 1 |
| bibliographie..... | 4 |
| Chapitre I : Théorie de la technologie MIMO et des antennes imprimées..... | 5 |
| I.1 Introduction | 6 |
| I.2 La technologie MIMO..... | 6 |
| I.2.1 La technologie MIMO dans les systèmes de communication sans fil..... | 6 |
| I.2.2 Principes fondamentaux de la technologie MIMO..... | 7 |
| I.2.2.a Définition..... | 7 |
| I.2.3 Topologies des systèmes MIMO..... | 9 |
| I.2.3.1 Système SISO (Single Input, Single Output)..... | 9 |
| I.2.3.2 Système SIMO (Single Input, Multiple Output) | 9 |
| I.2.3.3 Système MISO (Multiple Input, Single Output)..... | 10 |
| I.2.3.4 Système MIMO (Multiple Input, Multiple Output) | 11 |
| I.2.4 Avantages et limites de la technologie MIMO..... | 12 |
| I.2.5 Domaine d'utilisation de la technologie MIMO | 13 |
| I.3 Les antennes imprimées | 14 |

| | |
|--|----|
| I.3.1 Historique | 14 |
| I.3.2 Description d'une antenne imprimée | 14 |
| I.3.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée..... | 15 |
| I.3.4 Techniques d'alimentation des antennes imprimées | 16 |
| I.3.4.1 Alimentation par contact direct | 16 |
| I.3.4.2 Alimentation sans contact | 17 |
| I.3.5 Les caractéristique de rayonnement des antennes imprimée..... | 19 |
| I.3.5.1 L'impédance d'entrée..... | 19 |
| I.3.5.2 La bande passante..... | 19 |
| I.3.5.3 Gain | 20 |
| I.3.5.4 Le diagramme de rayonnement | 20 |
| I.3.6 Domaine d'application des antennes imprimée..... | 21 |
| I.3.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées..... | 21 |
| I.3.8 Défis dans la conception MIMO à base d'antennes imprimées | 22 |
| I.3.9 Techniques spécifiques pour améliorer les performances MIMO..... | 22 |
| I.4 Conclusion..... | 22 |
| Bibliographies..... | 24 |
| Chapitre II : Les antennes imprimées à polarisation circulaire | 26 |
| II.1 Introduction..... | 27 |
| II.2 la Polarisation..... | 27 |
| II.2.1 Définition | 27 |
| II.2.2 Le rapport axial (AR : Axial Ratio) | 27 |
| II.2.3 Types de polarisation | 28 |
| II.2.3.a Polarisation linéaire..... | 29 |
| II.2.3.b Polarisation circulaire | 29 |
| II.2.3.c Polarisation elliptique..... | 29 |

| | | |
|---|--|----|
| II.3 | Technique d'obtention d'un rayonnement circulaire | 29 |
| II.3.1 | Alimentation à un accès | 30 |
| II.3.1.a | Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant légèrement rectangulaire | 30 |
| II.3.1.b | Troncature des coins de l'antenne..... | 31 |
| II.3.1.c | Gravure d'un motif sur le toit métallique..... | 31 |
| II.3.2 | Configurations à deux accès | 32 |
| II.3.2.a | Ajout d'une ligne quart d'onde | 33 |
| II.3.2.b | Utilisation du diviseur de Wilkinson avec une ligne de retard | 33 |
| II.4 | Applications des antennes à polarisation circulaire | 34 |
| II.4.1 | Communication par satellite | 34 |
| II.4.2 | Les réseaux locaux sans fil (WLAN)..... | 34 |
| II.4.3 | Systèmes GPS et Satellites..... | 35 |
| II.4.4 | Les lecteurs d'identifications Radio Fréquence (RFID) | 35 |
| II.5 | Les limitations de la polarisation circulaire | 35 |
| II.6 | Techniques d'amélioration des performances d'une antenne polarisée circulairement..... | 36 |
| II.6.1 | Insertion de fentes | 36 |
| II.6.2 | Influence du substrat diélectrique | 37 |
| II.7 | Conclusion | 38 |
| | Bibliographies..... | 39 |
| Chapitre III : Conception et simulation d'un système MIMO à polarisation circulaire | | 41 |
| III.1 | Introduction..... | 42 |
| III.2 | Description du Logiciel de Simulation CST..... | 42 |
| III.3 | Conception du système MIMO à polarisation circulaire | 43 |
| III.3.1 | Définition des spécifications..... | 43 |
| III.3.2 | Conception de l'antenne unitaire..... | 43 |

| | |
|--|----|
| III.3.2.a Résultats de simulation | 44 |
| III.3.3 Conception de l'antenne unitaire polarisée circulairement | 48 |
| III.3.4 Conception du système MIMO polarisé circulairement | 50 |
| III.3.4.1 Modification de la distance (d) entre les patches | 53 |
| III.3.5 Conception du système MIMO polarisé circulairement avec une fente au niveau du plan de masse | 54 |
| III.3.5.a Etude paramétrique sur la longueur de la fente | 54 |
| III.3.5.b Etude paramétrique sur le largeur de la fente (d_1) | 56 |
| III.3.5.c Etude paramétrique sur la position de la fente..... | 57 |
| III.3.5.d Etude paramétrique sur la position de la fente au niveau du patch | 58 |
| III.3.5.e Coefficient de corrélation (ECC), gain de diversité (DG) | 61 |
| III.3.6 Prototype et mesure de l'antenne MIMO triangulaire à PC..... | 63 |
| III.4 Conclusion | 67 |
| Bibliographie | 68 |
| Conclusion générale | 71 |

Liste des figures

CHAPITRE I : Théorie de la technologie MIMO et des antennes imprimées

Figure I.1: Structure du réseau MIMO

Figure I.2 : Système SISO.

Figure I.3 : Système SIMO.

Figure I.4 : Système MISO.

Figure I.5 : Système MIMO.

Figure I.6 : Structure d'une antenne imprimée.

Figure I.7 : Les différentes formes d'une antenne imprimée.

Figure I.8 : Fonctionnement d'une antenne imprimée.

Figure I.9 : Alimentation par ligne micro-ruban.

Figure I.10 : Alimentation par sonde coaxiale.

Figure I.11 : Alimentation par couplage d'ouverture.

Figure I.12 : Alimentation par couplage à proximité.

Figure I.13 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement.

Figure I.14 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

CHAPITRE II : Les antennes imprimées à polarisation circulaire

Figure II.1 : Variation temporelle de la rotation d'une onde plane et de son ellipse de.

Figure II.2 : Différents types de polarisation.

Figure II.3 : Antenne patch classique alimentée sur la diagonale.

Figure II.4 : Antenne avec : (a) coins tronqués, (b) encoches et coins tronqués

Figure II.5 : Antenne patch avec fente (a) en forme de C, (b) en forme de F, (c) en forme de S et (d) en forme de croix.

Figure II.6 : Alimentation à double accès a) Insertion d'une ligne quart-d'onde, b) : utilisation du diviseur de puissance Wilkinson.

Figure III.7: La gravure de fentes sur le patch.

Chapitre III : Conception et simulation d'un système MIMO à polarisation circulaire

Figure III.1 : antenne patch triangulaire

Figure III.2 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne initiale.

Figure III.3 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne adaptée.

Figure III.4: Le rayonnement 3D de l'antenne patch triangulaire optimisée

Figure III.5: Géométrie de l'antenne avec la couche d'air.

Figure III.6 : Variation du paramètre S_{11} en fonction de la fréquence après l'ajout de la couche d'air

Figure III.7: Le rayonnement 3D de l'antenne patch triangulaire avec la couche d'air.

Figure III.8 : Antenne triangulaire avec une fente (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

Figure III.9 : Coefficient de réflexion de l'antenne avec fente.

Figure III.10 : Variation du RA en fonction de la fréquence.

Figure III.11 : Diagramme de rayonnement en 3D.

Figure III.12 : Geometrie du système MIMO à PC.

Figure III.13 : Paramètres S en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC.

Figure III 14 : RA en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC.

Figure III.15 : Rayonnement en 3D de l'antenne MIMO à PC.

Figure III.16 : Variation des Paramètres S pour les différentes valeurs (d).

Figure III.17 : Variation du RA pour les différentes valeurs (d).

Figure III.18 : Géométrie de l'antenne MIMO à PC avec fente.

Figure III.19 : Paramètre S en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_2).

a: S_{11} , b: S_{21}

Figure III.20 : Rapport axial en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_2).

Figure III.21: Paramètre S en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_1).

a: S_{11} , b: S_{21}

Figure III.22 : Rapport axial en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_1).

Figure III.23 : Paramètre S pour différentes positions de la fente. a) S_{11} , b) S_{21} .

Figure III.24: RA en fonction de la fréquence pour les différentes positions de la fente.

Figure III.25 : Parametre S en fonction de la fréquence pour différentes positions de la fente

au niveau du patch. a) S_{11} , b) S_{21}

Figure III.26 : Rapport axial pour différentes positions de la fente au niveau du patch.

Figure III.27: Géométrie finale du système MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

Figure III.28 : Paramètres S de l'antenne MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

Figure III.29 : RA et gain de l'antenne MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

Figure III.30 : ECC en fonction de la fréquence du système MIMO à PC.

Figure III.31 : DG en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC proposée.

Figure III.32 : Prototype de l'antenne MIMO à PC fabriqué. (a) vue de face. (b) vue d'arrière.

(c) vue de côté.

Figure III.33: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO réalisée.

Figure III.34: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO réalisée.

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch initiale.

Tableau III.2 : Dimensions de l'antenne patch initiale optimisée.

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne après l'ajout de la couche d'air.

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne avec fente.

Tableau III.5 : Comparaison des performances des configurations MIMO sans et avec fente au niveau du plan de masse.

Tableau III.6 : Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature.

Liste des abréviations

AR : Axial Ratio.

CST : Computer Simulation Technology

DG : Gain de diversité.

ECC : Envelop coefficient correlation (Coefficient de corrélation)

MIMO : Multiple input Multiple output

PC : Polarisation circulaire

RFID: Radio Frequency Identification readers

SISO: single input single output

WLAN: Wireless Local Area Network, ou réseau local sans fil

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Au cours des deux dernières décennies, les systèmes de communication sans fil ont connu une croissance fulgurante, motivée par l'essor des technologies mobiles, de l'Internet des objets (IoT) et de la connectivité universelle. Parmi ces technologies, les réseaux locaux sans fil (WLAN), basés sur la norme IEEE 802.11, sont devenus omniprésents dans les environnements domestiques, professionnels et industriels. La bande de fréquence de 2,4 GHz, en particulier, est l'une des plus exploitées dans le monde pour les communications Wi-Fi en raison de sa large disponibilité, de son faible coût d'implémentation et de sa bonne portée de transmission. Cependant, l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de dispositifs connectés entraîne une congestion croissante du spectre radioélectrique, générant des interférences, des pertes de signal, et une dégradation des performances. Pour répondre à ces défis, les chercheurs et ingénieurs se sont tournés vers les technologies MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), qui exploitent plusieurs antennes au niveau des émetteurs et des récepteurs pour augmenter la capacité du canal, améliorer la fiabilité du lien, et optimiser l'efficacité spectrale sans élargir la bande passante [1].

Dans le même temps, les antennes à polarisation circulaire (PC) suscitent un intérêt croissant dans les applications sans fil. Contrairement aux antennes à polarisation linéaire, les antennes à PC sont moins sensibles à l'orientation de l'émetteur et du récepteur, et permettent de réduire les effets du multi trajet et les pertes dues aux désalignements de polarisation, ce qui améliore considérablement la robustesse du signal dans les environnements urbains denses [2][3]. L'intégration de la polarisation circulaire dans les architectures MIMO représente ainsi une avancée significative, combinant les avantages des deux approches : l'augmentation de la capacité par le MIMO et la stabilité du lien par la polarisation circulaire. Cependant, cette intégration soulève de nouveaux défis technologiques, notamment en matière de compacité, de couplage mutuel entre les ports, de largeur de bande, et de complexité de conception. Ces défis sont particulièrement critiques dans les applications embarquées ou les dispositifs portables, où l'espace est restreint et les coûts de production doivent être minimisés.

De ce fait, la conception d'une antenne MIMO à polarisation circulaire, capable de fonctionner efficacement dans la bande Wi-Fi à 2,4 GHz, tout en offrant une faible isolation inter-éléments, une bande passante suffisante et des paramètres MIMO optimaux (tels que le

coefficient de corrélation et le gain de diversité, constitue une problématique technologique de grande actualité. La réalisation d'un prototype physique à des fins de validation expérimentale est également indispensable pour démontrer la faisabilité et l'efficacité de la solution proposée.

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir, simuler et réaliser un système MIMO à deux ports, à polarisation circulaire, destinée aux applications Wi-Fi dans la bande de 2,4 GHz. Pour atteindre cet objectif, plusieurs axes ont été explorés. Il s'agit tout d'abord de développer une structure d'antenne compacte basée sur un patch triangulaire fendu, compatible avec un substrat FR4 couramment utilisé. L'optimisation des performances constitue un enjeu central, notamment en ce qui concerne la bande passante, l'isolation entre les ports, le gain de rayonnement et la stabilité de la polarisation circulaire. Une attention particulière est portée à la réduction du couplage mutuel entre les éléments rayonnants, à travers l'intégration de fente dans le plan de masse. Pour mener à bien cette tâche, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio comme outil principal de conception. Notre approche consiste à exploiter les fonctionnalités de ce logiciel pour calculer divers paramètres cruciaux des antennes. Par la suite, un prototype physique de l'antenne est fabriqué et soumis à une caractérisation expérimentale afin de valider les performances obtenues en simulation. Enfin, une étude comparative est menée entre les résultats expérimentaux et ceux de la littérature, dans le but d'évaluer la pertinence de la structure proposée.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre est dédié aux notions théoriques fondamentales. Il présente un aperçu des technologies sans fil modernes, notamment les réseaux WLAN, ainsi que le rôle clé des antennes dans ces systèmes. Une attention particulière est accordée aux systèmes **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)**, en soulignant leurs avantages en matière de capacité, de fiabilité et de diversité. Le chapitre se termine par une introduction aux antennes micro rubans, en abordant leurs structures de base, les techniques d'alimentation et leurs avantages pour les dispositifs compacts.

Le deuxième chapitre se concentre sur le concept de polarisation circulaire, un paramètre crucial pour les antennes utilisées dans des environnements multipath. Après avoir défini la polarisation et ses types, le chapitre décrit les différentes techniques permettant de générer une polarisation circulaire à partir d'antennes micro rubans. Les applications pratiques, les avantages en termes de robustesse de transmission, ainsi que les défis liés à la réalisation de cette polarisation dans une configuration MIMO sont également abordés.

Le troisième chapitre constitue le cœur du mémoire. Il détaille le processus de conception de l'antenne MIMO à deux ports basés sur une structure à patch triangulaire fendu. La méthodologie de conception est présentée étape par étape : définition des paramètres géométriques, choix des matériaux (comme le substrat FR4), intégration de structures correctives (comme une fente dans le plan de masse) pour améliorer l'isolation et la polarisation circulaire. Les résultats de simulation électromagnétique obtenus à l'aide du logiciel spécialisé sont ensuite analysés, en mettant l'accent sur les paramètres clés : S_{11} , gain, diagrammes de rayonnement, coefficient d'isolation, coefficient de corrélation (ECC) et le rapport axial. La réalisation du prototype est également décrite, suivie d'une caractérisation expérimentale à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Les performances mesurées sont comparées aux résultats simulés, et une analyse comparative avec d'autres structures existantes dans la littérature est proposée pour évaluer l'originalité et l'efficacité de la solution développée.

Le mémoire se conclut par une synthèse des résultats obtenus, les limites identifiées, ainsi que des perspectives d'amélioration pour des travaux futurs, notamment en vue d'une miniaturisation accrue, d'une meilleure intégration dans des dispositifs réels ou d'une extension vers des configurations multi-bandes.

Bibliographie

- [1] **Goldsmith, A.** "*Wireless Communications*". Cambridge University Press 2005.
- [2] **Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing,** "Recent advances in circularly polarized microstrip antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 1, pp. 22-36, 2018.
- [3] **Bait-Suwailam, M.M. Siddiqui, O.F. Ramahi, O.M.** Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2010, 9, 876–878.

CHAPITRE I

Théorie de la Technologie MIMO et des Antennes Imprimées

I.1 Introduction

L'évolution des systèmes de communication sans fil vers des débits plus élevés, une meilleure robustesse aux interférences et une exploitation plus efficace du spectre radiofréquence a conduit à l'adoption de la technologie **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*). Cette technique repose sur l'utilisation simultanée de plusieurs antennes à l'émission et à la réception, permettant d'exploiter les multi-trajets du canal pour améliorer la capacité, le débit et la fiabilité du lien sans fil.

Dans ce chapitre, nous présenterons la définition et le principe de fonctionnement de la technologie MIMO, ainsi que ses principales architectures. Nous aborderons ensuite les avantages et les limitations de cette technologie. Enfin, nous nous intéresserons aux antennes imprimées en détaillant leur structure, les techniques d'alimentation et d'adaptation, ainsi que leurs principaux domaines d'application.

I.2 La technologie MIMO

I.2.1 La technologie MIMO dans les systèmes de communication sans fil

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a engendré une demande croissante en termes de débit, de fiabilité, de couverture et d'efficacité spectrale. Que ce soit pour les applications mobiles, le Wi-Fi, l'Internet des objets (IoT) ou les systèmes de communication avancés comme la 5G et au-delà, les exigences en performances sont de plus en plus élevées. Dans ce contexte, les techniques conventionnelles reposant sur une seule antenne à l'émission et à la réception (SISO – *Single Input Single Output*) montrent rapidement leurs limites, notamment en environnement urbain dense, où les interférences, le bruit et les phénomènes de propagation multi-trajets (fading, évanouissements) dégradent fortement la qualité de transmission.

C'est dans cette optique que la **technologie MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*) s'est imposée comme une solution clé. Elle consiste à utiliser plusieurs antennes à la fois à l'émetteur et au récepteur, afin d'exploiter l'environnement de propagation au lieu de le subir. MIMO permet ainsi d'améliorer significativement le débit de transmission, la robustesse du lien radio, et l'efficacité spectrale, sans nécessairement augmenter la bande passante ni la puissance d'émission. Au-delà de ses performances, MIMO joue également un rôle fondamental dans les standards de communication modernes tels que le LTE, le Wi-Fi (IEEE

802), et la 5G. Son intégration nécessite toutefois une architecture d'antenne adaptée, d'où l'intérêt croissant pour les antennes imprimées, qui offrent des solutions compactes, légères et facilement intégrables dans les terminaux mobiles.

I.2.2 Principes fondamentaux de la technologie MIMO

I.2.2.a Définition

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) désigne une architecture de transmission sans fil qui utilise plusieurs antennes à l'émission et à la réception afin d'exploiter la dimension spatiale du canal de communication (**Figure I.1**). Contrairement aux systèmes traditionnels SISO (Single Input Single Output) ou SIMO/MISO, MIMO permet de transmettre plusieurs flux de données en parallèle sur une même bande de fréquence, en utilisant la diversité spatiale offerte par l'environnement de propagation.

Le principe repose sur le fait que, dans un canal multi-trajets, chaque antenne transmet et reçoit des signaux affectés différemment par les réflexions, diffractions et interférences. En traitant ces signaux de manière matricielle, il devient possible de reconstruire les données initiales avec une grande précision, d'améliorer le débit et de renforcer la fiabilité des communications. MIMO est désormais une technologie clé dans les systèmes de communication modernes tels que le Wi-Fi (IEEE 802.11), la 4G LTE, la 5G NR, et les réseaux IoT avancés [1].

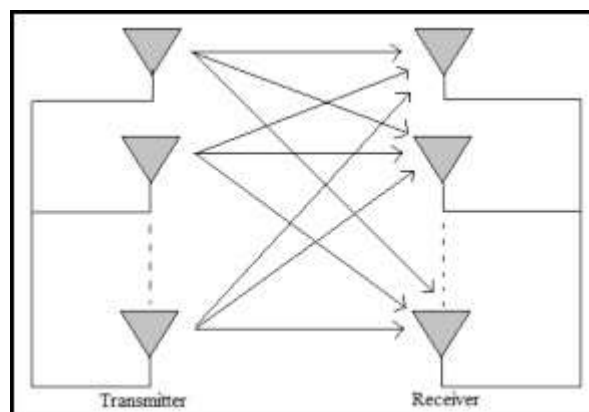


Figure I.1: Structure du réseau MIMO [1].

La technologie MIMO repose sur deux principes fondamentaux [2][3].

- 1. La diversité spatiale :** La diversité spatiale consiste à utiliser plusieurs antennes placées à différents points dans l'espace pour émettre ou recevoir des signaux. Cette

approche exploite le caractère indépendant des trajets de propagation entre les antennes, ce qui permet d'améliorer la fiabilité de la communication. En effet, comme chaque antenne suit un chemin distinct, les problèmes rencontrés sur un trajet donné (tels que l'atténuation, les interférences ou le bruit) ont moins d'impact global sur la qualité du signal reçu.

2. **Le multiplexage spatial** : Le multiplexage spatial permet la transmission simultanée de plusieurs flux de données via un même canal, en s'appuyant sur plusieurs antennes. Cette technique augmente significativement le débit du système sans élargir la bande passante utilisée. Elle constitue l'un des avantages majeurs des systèmes MIMO, en contribuant à améliorer la capacité du réseau sans consommer davantage de ressources spectrales.

La technologie MIMO repose sur l'exploitation intelligente de la diversité spatiale et du multiplexage spatial, deux concepts clés qui permettent d'améliorer les performances des systèmes de communication sans fil [1].

La diversité spatiale : elle consiste à utiliser plusieurs antennes physiquement séparées pour transmettre ou recevoir le même signal. Grâce aux chemins de propagation indépendants qu'offre l'environnement radio, les signaux subissent des atténuations différentes, ce qui réduit la probabilité d'une dégradation simultanée sur tous les trajets. Cette redondance spatiale améliore considérablement la robustesse du lien, en particulier en présence de fading sélectif ou de fortes interférences [2].

Il existe plusieurs types de diversité spatiale :

- Diversité de transmission : le même signal est transmis par plusieurs antennes [3].
- Diversité de réception : le signal est capté par plusieurs antennes, puis combiné pour maximiser le rapport signal/bruit (SNR).
- Combinaison MRC (Maximum Ratio Combining) : technique de traitement qui pondère chaque signal reçu proportionnellement à sa qualité.

Le multiplexage spatial : il permet de transmettre plusieurs flux de données indépendants en parallèle, sur le même canal de fréquence, en utilisant plusieurs antennes. Chaque antenne émet un flux différent, et grâce aux différences de trajets de propagation, le récepteur est capable de les séparer via des algorithmes de traitement spatial [4].

Ce mécanisme augmente considérablement le débit de transmission sans consommer plus de bande passante ni de puissance. Cependant, il nécessite un canal suffisamment riche en trajets multiples (environnement "riche en scattering") pour fonctionner efficacement.

L'utilisation combinée de la diversité spatiale et du multiplexage spatial dans MIMO permet :

- Une augmentation linéaire de la capacité avec le nombre d'antennes (théoriquement).
- Une meilleure robustesse aux pertes de signal et interférences.
- Une réduction du taux d'erreur binaire (BER), notamment en environnement bruité ou instable.

I.2.3 Topologies des systèmes MIMO

Les systèmes de communication sans fil peuvent être classés en fonction du nombre d'antennes utilisées à l'émetteur (Tx) et au récepteur (Rx). Cette classification permet d'identifier les différentes configurations d'architecture MIMO, allant des plus simples aux plus complexes.

I.2.3.1 Système SISO (Single Input, Single Output)

Il s'agit de la configuration la plus élémentaire, avec une seule antenne à l'émission et une seule à la réception (**Figure I.2**) typiquement utilisée dans des systèmes simples comme les communications radio classiques. Cette configuration ne permet ni diversité spatiale ni gain de capacité, ce qui la rend particulièrement sensible aux interférences et aux phénomènes de trajets multiples (multi-trajets).

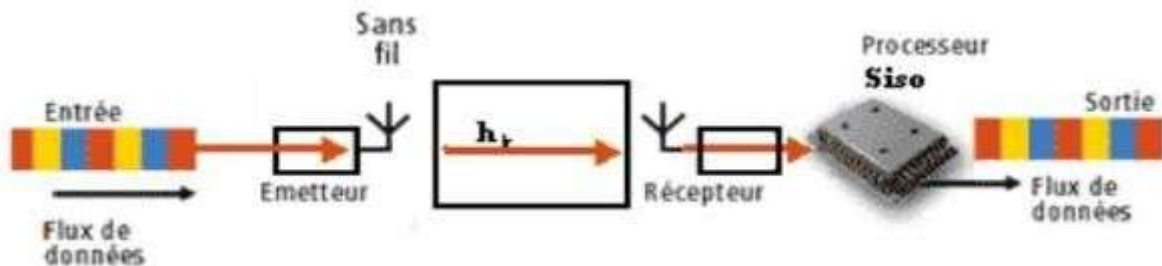


Figure I.2: Système SISO [2].

I.2.3.2 Système SIMO (Single Input, Multiple Output)

Il s'agit d'une technique qui met en œuvre plusieurs antennes à la réception afin d'atténuer les pertes de signal induites par les caractéristiques du canal de propagation, comme illustré à la **Figure I.3**. Les signaux reçus par chaque antenne sont combinés, ce qui permet d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) global : ce dernier correspond à la somme des rapports signal/bruit individuels de chaque voie [2].

Cette approche est utilisée depuis longtemps, notamment dans les stations de réception à ondes courtes, pour atténuer les effets des pertes de signal et des interférences dues aux conditions atmosphériques.

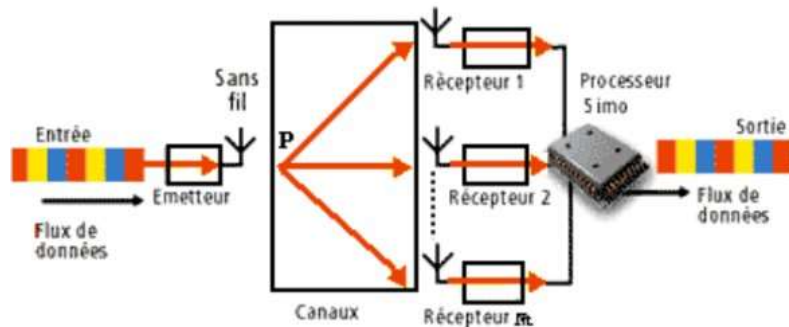


Figure I.3: Système SIMO.

I.2.3.3 Système MISO (Multiple Input, Single Output)

C'est une technique de diversité spatiale utilisée à l'émission. Cela signifie que plusieurs antennes transmettent des signaux qui sont captés par une seule antenne en réception (**Figure I.4**).

L'un des principaux avantages de la technique MISO réside dans le fait que les antennes multiples ainsi que le traitement du signal sont implémentées du côté de l'émetteur, et non du récepteur. Cela constitue un atout significatif, notamment dans le cas des téléphones portables, puisqu'il permet de réduire l'encombrement dédié aux antennes tout en allégeant la complexité du récepteur. Ainsi, les dispositifs mobiles peuvent être plus compacts, moins coûteux à produire et bénéficier d'une meilleure autonomie, grâce à une consommation énergétique réduite lors du traitement du signal.

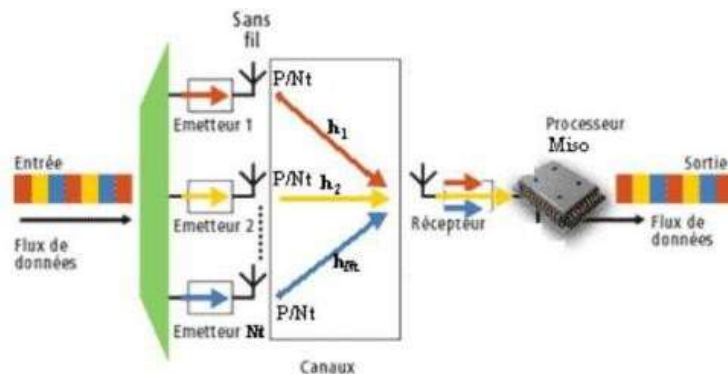


Figure I.4: Système MISO [2].

I.2.3.4 Système MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

Comme mentionné précédemment, le système MIMO repose sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien à l'émission qu'à la réception (**Figure I.5**). Chaque antenne émet des paquets de données différents sur la même fréquence, en exploitant des chemins de propagation distincts. Cette approche permet de tirer parti de la diversité des trajets du signal pour améliorer les performances du système sans nécessiter de bande passante supplémentaire.

La structure typique d'un tel système comprend [5][6] :

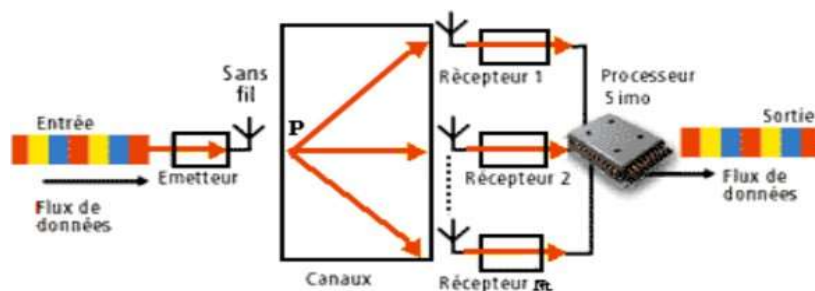


Figure I.5: Système MIMO [2].

- **L'émetteur MIMO**

Dans une architecture MIMO, plusieurs antennes sont déployées du côté émetteur, chacune transmettant un signal distinct. Cette configuration permet la génération de flux de données indépendants, ce qui augmente le débit global du système en autorisant la transmission simultanée de plusieurs informations sur une même bande de fréquence. De plus, l'utilisation de plusieurs antennes permet d'exploiter efficacement les conditions de propagation multi-trajets (multipath) en diffusant les différents flux via des chemins distincts, optimisant ainsi la robustesse et les performances de la transmission.

- **Le canal de propagation MIMO**

IL est influencé par des trajets multiples causés par la réflexion, la diffraction et la diffusion dans l'environnement. Il est modélisé par une matrice, qui relie les antennes d'émission et de réception, et permet de représenter les différentes interactions entre les signaux transmis et reçus. Cette modélisation est essentielle pour le traitement efficace des signaux dans les systèmes MIMO.

- **Le récepteur MIMO**

Le récepteur MIMO est également équipé de plusieurs antennes, chacune recevant une superposition des signaux émis par les différentes antennes de transmission. Cette redondance spatiale permet de capter l'ensemble des flux de données simultanés, tout en atténuant les effets du fading, des interférences et des trajets multiples.

Pour extraire efficacement les flux individuels, le récepteur met en œuvre des algorithmes avancés de traitement du signal, tels que le filtrage spatial, la séparation de sources (ex. : détection successive ou détection conjointe), ou encore les techniques de décodage multi-antennes. Ces méthodes permettent de reconstituer les signaux d'origine avec une meilleure précision, renforçant ainsi la fiabilité et la capacité du système de communication.

I.2.4 Avantages et limites de la technologie MIMO

La technologie MIMO représente une avancée significative dans le domaine des communications sans fil, en permettant une meilleure exploitation des ressources spectrales et une plus grande fiabilité des transmissions. Toutefois, comme toute technologie, elle présente à la fois des avantages notables et certaines limites techniques.

a) Avantages de la technologie MIMO [7][8]

- **Amélioration du débit** : Le MIMO permet d'envoyer plusieurs flux de données en même temps grâce à plusieurs antennes, ce qui rend la connexion plus rapide.
- **Diversité spatiale** : L'utilisation de plusieurs antennes aide à éviter les coupures de signal et rend la communication plus stable et plus fiable.
- **Efficacité spectrale** : En utilisant un seul canal pour plusieurs flux, MIMO utilise mieux les fréquences disponibles.
- **Portée accrue** : En améliorant la qualité du signal, MIMO permet de communiquer sur une plus grande distance, ce qui est utile dans les grandes zones.

b) Inconvénients de la technologie MIMO [9][10]

- **Complexité** : Les systèmes MIMO sont plus difficiles à concevoir et à mettre en place, ce qui peut les rendre plus coûteux.
- **Sensibilité à la configuration** : Pour bien fonctionner, il faut bien placer et configurer les antennes, ce qui demande plus de soin.

- **Besoin de canaux indépendants** : Pour profiter au maximum de MIMO, les chemins du signal doivent être différents entre les antennes, ce qui n'est pas toujours possible.
- **Consommation d'énergie** : Utiliser plusieurs antennes demande plus d'énergie, ce qui peut augmenter la consommation électrique.
- **Couplage entre antennes et corrélation spatiale** : Le couplage électromagnétique se produit lorsque les antennes sont physiquement proches les unes des autres, ce qui entraîne une interaction indésirable entre leurs champs. Cette interaction peut perturber l'impédance d'entrée des antennes, réduire l'efficacité de rayonnement ou modifier les diagrammes de rayonnement.

I.2.5 Domaines d'utilisation de la technologie MIMO

La technologie MIMO est intégrée dans de nombreux domaines grâce à sa capacité à améliorer le débit de transmission, la fiabilité des liaisons sans fil et l'efficacité spectrale. Voici les principaux domaines dans lesquels cette technologie est couramment utilisée :

- **Réseaux 4G et 5G** : Les technologies MIMO jouent un rôle central dans les réseaux 4G LTE et 5G. Notamment, le *Massive MIMO* utilisé en 5G permet l'intégration de centaines d'antennes sur une seule station de base, ce qui augmente considérablement la capacité du réseau et améliore la couverture.
- **Wi-Fi (802.11n, 802.11ac, 802.11ax)** : Grâce à MIMO, les utilisateurs peuvent accéder à plusieurs flux de données simultanément. Cela se traduit par une amélioration du débit, une meilleure stabilité des connexions et une couverture optimisée, en particulier dans des environnements à forte densité comme les immeubles ou les espaces de travail partagés.
- **Systèmes de communication par satellite** : L'intégration de MIMO dans les satellites permet d'atteindre des débits plus élevés et une meilleure résistance aux interférences. Cela est particulièrement bénéfique pour les services comme la diffusion vidéo, l'Internet à haut débit en zones isolées ou encore la connectivité en vol.
- **Communications de véhicule à véhicule** : Dans le domaine de la mobilité intelligente, MIMO améliore la qualité et la fiabilité des échanges de données entre véhicules. Cela permet des communications en temps réel, essentielles pour les systèmes de conduite autonome et la gestion avancée du trafic.

La technologie MIMO améliore les performances des communications sans fil en augmentant le débit et la fiabilité, sans nécessiter davantage de bande passante ni de puissance. Les antennes imprimées, grâce à leur compacité et leur facilité d'intégration, jouent un rôle clé dans la mise en œuvre de ces systèmes, en particulier dans les applications Wi-Fi, 5G et IoT. Un aspect qui sera abordé en seconde partie.

I.3 Les antennes imprimées

I.3.1 Historique

L'antenne imprimée, souvent désignée sous le nom d'antenne patch, est une structure plane largement utilisée dans les systèmes de communication modernes en raison de sa compacité et de sa facilité d'intégration. Bien que son utilisation se soit démocratisée à partir des années 1980, les premières recherches dans ce domaine remontent à 1953, avec les travaux pionniers de Deschamps, suivis du dépôt d'un brevet français par Gutton et Baissinot en 1955[11][12]. Les premières réalisations opérationnelles sont attribuées à Howell et Munson au début des années 1970 [13][14].

L'essor de cette technologie coïncide avec les avancées majeures en électronique, notamment la miniaturisation des composants, l'intégration croissante des circuits, et la mise au point de substrats diélectriques à faibles pertes. Ces facteurs ont permis de concevoir des antennes présentant un faible poids, un encombrement réduit, un coût de fabrication modéré, et une architecture plane compatible avec les circuits intégrés et les surfaces conformables [15]. Ces caractéristiques font des antennes imprimées une solution de choix pour de nombreuses applications dans les domaines civil (Wi-Fi, IoT), militaire (radars, systèmes embarqués) et médical (télémédecine, capteurs corporels).

I.3.2 Description d'une antenne imprimée

L'antenne imprimée, également appelée antenne patch, est une structure plane dont l'élément rayonnant est constitué d'un conducteur métallique placé sur un substrat diélectrique, lui-même séparé d'un plan de masse conducteur. Cette configuration permet un rayonnement principalement dirigé perpendiculairement à la surface de l'antenne, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications directionnelles [15]. La figure ci-dessous illustre un exemple typique d'antenne imprimée.

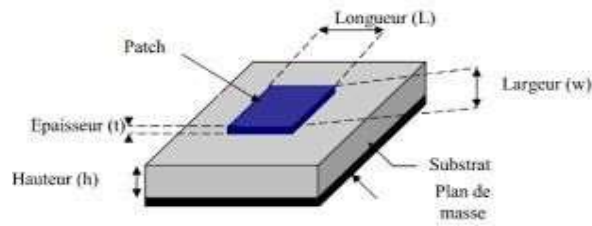


Figure I.6 : Structure d'une antenne imprimée [15].

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle (**Figure I.17**) [16].

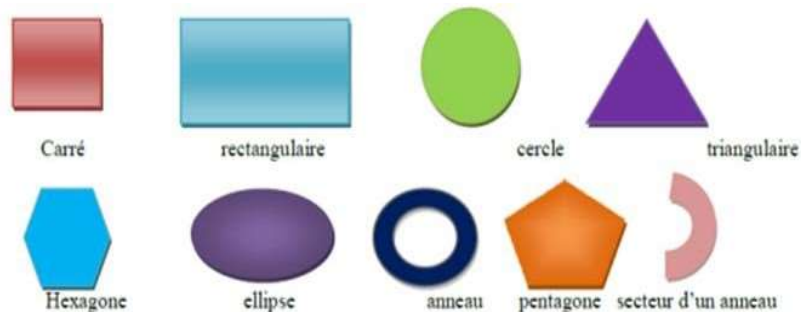


Figure I.7 : Les différentes formes d'une antenne imprimée.

Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

I.3.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée

Le fonctionnement d'une antenne imprimée peut être assimilé à celui d'une cavité résonante. Dans ce modèle, les ondes électromagnétiques sont confinées entre le plan de masse et le patch métallique, et subissent des réflexions successives, générant ainsi des modes de résonance caractéristiques. Le patch joue le rôle d'un résonateur où les ondes sont principalement guidées le long du substrat diélectrique selon des modes transverses magnétiques TM_{mn} [16].

Le rayonnement de l'antenne résulte de pertes d'énergie localisées principalement au niveau des bords du patch, où les champs électromagnétiques se détachent. Ce rayonnement est dû aux discontinuités aux extrémités du patch, où le champ est réfléchi alternativement entre le plan de masse et le conducteur supérieur. La distribution spatiale et l'orientation des lignes de

champ entre les bords rayonnants et le plan de masse déterminent les directions principales de rayonnement.

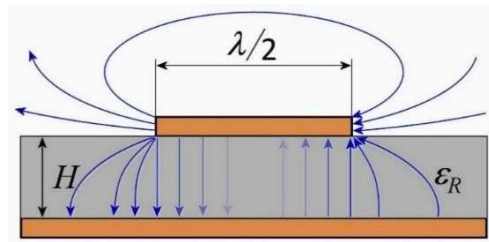


Figure I.8 : Fonctionnement d'une antenne imprimée.

En pratique, le mode fondamental, généralement le mode TM_{10} est le plus utilisé, car il transporte l'essentiel de l'énergie rayonnée. Ce mode présente une répartition bien définie du champ électrique sous le patch, avec une dimension typique égale à une demi-longueur d'onde (**Figure 1.8**). De plus, les courants de surface induits sur le patch sont principalement dirigés selon l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [17].

I.3.4 Techniques d'alimentation des antennes imprimées

L'alimentation des antennes micro-rubans peut être effectuée de deux manières principales : par contact et par couplage.

I.3.4.1 Alimentation par contact

Ici, l'alimentation est connectée directement à la couche métallique de l'antenne. Cela peut se faire via une sonde coaxiale ou une ligne micro-ruban qui est directement connectée à la structure radiante de l'antenne.

1. Alimentation par ligne micro ruban

Cette méthode consiste à connecter directement une ligne microruban, généralement d'impédance caractéristique de 50Ω , à l'élément rayonnant, comme illustré à la Figure I.9. La longueur de cette ligne d'alimentation est typiquement inférieure aux dimensions du patch. Grâce à sa simplicité de mise en œuvre, cette technique permet de réaliser facilement une structure planaire sur un substrat diélectrique. Ce caractère pratique a largement contribué à l'adoption généralisée de l'alimentation par ligne microruban dans de nombreuses configurations de réseaux d'antennes imprimées [18].

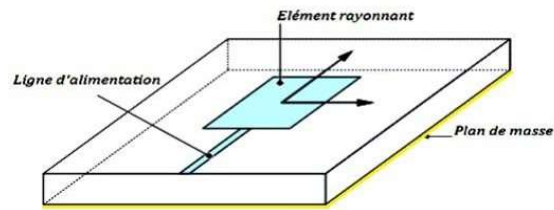


Figure I.9: Alimentation par ligne micro-ruban [18].

2. Alimentation par sonde coaxiale

Dans cette méthode d'alimentation (**Figure I.10**), le conducteur externe du connecteur coaxial est connecté au plan de masse, tandis que le conducteur central est relié directement à l'élément rayonnant (patch). L'un de ses principaux avantages réside dans la flexibilité de positionnement du point d'alimentation, qui peut être choisi librement sur la surface du patch pour optimiser l'adaptation d'impédance [18]. Toutefois, cette technique présente certains inconvénients, notamment une bande passante relativement étroite et une modélisation complexe, en particulier lorsque des substrats épais sont utilisés.

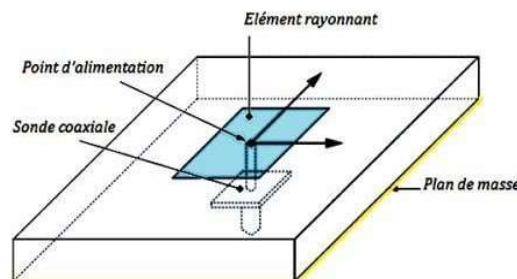


Figure I.10 : Alimentation par sonde coaxiale [18].

I.3.4.2 Alimentation sans contact

L'alimentation sans contact utilise le couplage de champ électromagnétique pour transférer la puissance au patch [18], dans cette catégorie il y a deux types d'alimentation :

- **Alimentation par fente :** L'antenne alimentée par fente (Figure I.11) est constituée de deux substrats ayant des permittivités diélectriques différentes. La face inférieure du premier substrat comporte une ligne de transmission, tandis que sa face supérieure intègre

un plan de masse percé d'une fente. Un second substrat est ensuite placé au-dessus, avec le patch positionné sur sa face supérieure.

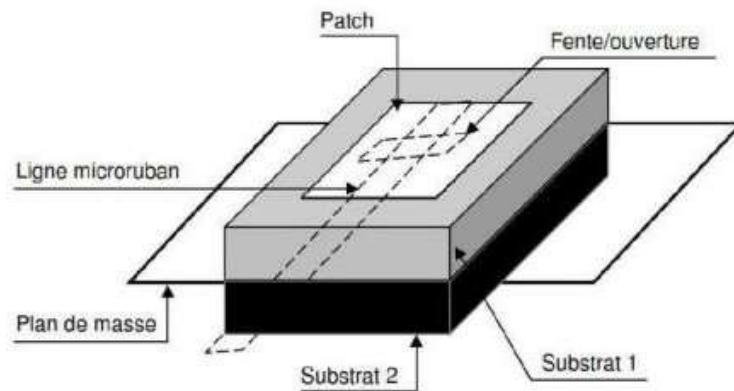


Figure I.11: Alimentation par couplage d'ouverture.

Cette configuration permet d'alimenter le patch par couplage électromagnétique à travers la fente, qui est centrée sous le patch. Bien que cette méthode d'alimentation [18] soit facile à modéliser, elle présente l'inconvénient d'offrir une bande passante relativement étroite.

- **Alimentation par couplage à proximité :** Dans ce type d'alimentation (Figure I.12), la ligne micro-ruban est placée entre deux substrats. Le patch est situé sur la face supérieure du substrat supérieur, tandis que le plan de masse se trouve sur la face inférieure du second substrat.

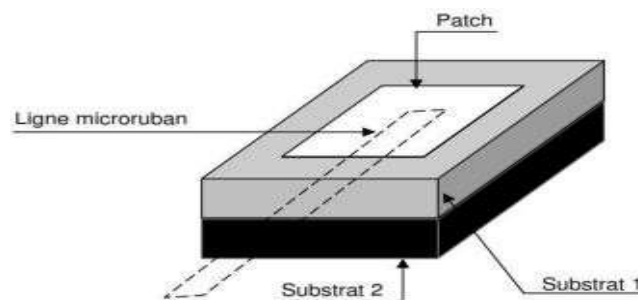


Figure I.12: Alimentation par couplage à proximité.

Le transfert d'énergie s'effectue par couplage entre la ligne d'alimentation et le patch. Un processus qui peut être optimisé en ajustant les dimensions de la ligne. L'un des principaux avantages de cette technique est la réduction du rayonnement parasite. En revanche, son principal inconvénient réside dans la complexité de sa mise en œuvre [18].

I.3.5 Caractéristiques de rayonnement des antennes imprimées

Les antennes imprimées présentent de nombreuses caractéristiques qui diffèrent en fonction de l'application visée. Parmi ces caractéristiques, on peut citer les suivantes :

I.3.5.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule [19] :

$$Z_e = Z_c \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (\text{I.1})$$

Où : Z_c : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S_{11} : le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne.

I.3.5.2 Bande passante

La bande passante d'une antenne désigne l'intervalle de fréquences pour lequel l'antenne fonctionne de manière efficace, c'est-à-dire où ses performances (telles que l'adaptation d'impédance, le gain ou le rayonnement) répondent à des critères acceptables.

Elle est généralement définie comme la plage de fréquences dans laquelle le taux de réflexion est inférieur à **-10 dB**, ce qui correspond à une perte par réflexion inférieure à 10 % du signal incident. La **Figure I.13** présente la courbe coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la largeur de bande de fonctionnement (bande passante à -10 dB).

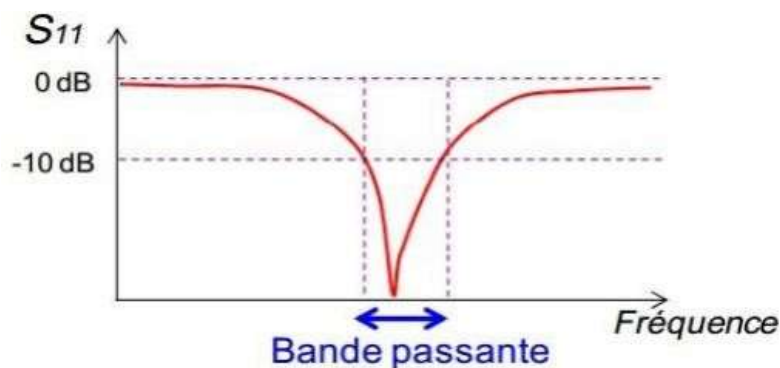


Figure I.13: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement [19].

I.3.5.3 Gain

Le gain est défini comme le rapport entre l'intensité du rayonnement dans une certaine direction et l'intensité du rayonnement obtenue si la puissance d'entrée acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope. La relation est donnée par [19] :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \left(\frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \right) \quad (\text{I.2})$$

G(θ, φ): Le gain directionnel de l'antenne dans la direction spécifiée par les angles θ(élévation) et φ(azimut).

P(θ, φ): La densité de puissance rayonnée par l'antenne dans la direction

P_a : est la puissance totale acceptée par l'antenne (puissance d'entrée).

I.3.5.4 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente la répartition de la puissance qu'elle émet dans l'espace selon différentes directions. En général, il est possible d'identifier une direction privilégiée, correspondant au maximum de rayonnement, autour de laquelle se concentre l'essentiel de l'énergie émise.

Les diagrammes de rayonnement sont souvent analysés dans les plans de symétrie de l'antenne, lorsqu'ils existent, ou dans les plans principaux, appelés plan E (champ électrique) et plan H (champ magnétique). Ces deux plans, dans lesquels les champs atteignent leurs intensités maximales, sont toujours orthogonaux l'un par rapport à l'autre. Les différentes zones d'un diagramme de rayonnement sont désignées sous le terme de lobes, qui peuvent être classés en lobes principaux et lobes secondaires [19]. La représentation graphique peut être réalisée en 3D dans l'espace pour permettre une visualisation plus précise du rayonnement de l'antenne, ou en 2D à l'aide d'un système de coordonnées polaires ou cartésiennes (**Figure I.14**).

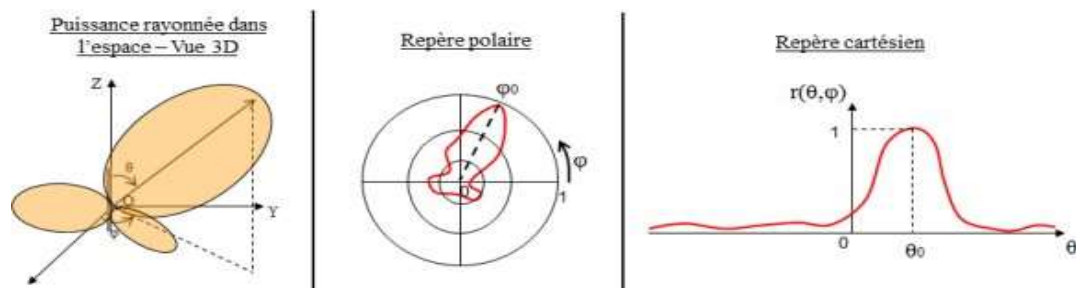


Figure I.14: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

I.3.6 Domaines d'application des antennes imprimées

Avec les progrès en télécommunications, les antennes imprimées sont devenues très utiles pour répondre aux besoins de plusieurs applications micro-ondes, qui sont :

- Les radiocommunications avec les mobiles terrestres
- Les systèmes GPS (Global Positioning System)
- Le domaine médical dans les maladies chroniques dans des problèmes (cardiaques, d'hypertension, diabète et d'Alzheimer) « la médecine sans fil »
- Les applications biomédicales
- Télévision et radio diffusion FM
- Les systèmes militaires de haute technologie, tels que : missiles, roquettes, fusées, avions et satellites....
- Les résonateurs spatiaux et radar embarqué

I.3.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées [20]

Les antennes patches sont largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leurs caractéristiques uniques. Elles offrent plusieurs avantages, notamment :

- Faible poids et facile à fabriquer
- Possibilité d'être intégré dans des appareils électroniques transportables tels que téléphone mobile, récepteur portable GPS et ordinateur personnel PC
- Conforme sur les surfaces planes et non planes (avec des substrats minces)
- Simples, robustes et non encombrantes
- Polarisation linéaire et circulaire possible

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les antennes patches présentent également des inconvénients, tels que :

- Faible efficacité de rayonnement
- Faible pureté de Polarisation
- Faible gain et faible bande passante (1 à 5 %)
- Sensibilité aux variations de l'environnement et leur faible efficacité de rayonnement à des fréquences élevées.

I.3.8 Défis dans la conception MIMO à base d'antennes imprimées

Malgré leurs avantages, l'intégration d'antennes imprimées dans un système MIMO pose plusieurs défis techniques [15]

- **Isolation entre antennes** : Il est crucial de minimiser le couplage mutuel entre antennes pour garantir l'indépendance des canaux.
- **Diversité de polarisation** : Pour exploiter pleinement la diversité spatiale et améliorer la robustesse, des configurations à polarisation circulaire sont souvent employées.
- **Espacement optimisé** : L'espace physique entre les antennes doit être suffisant (souvent $> \lambda/2$) pour éviter la corrélation excessive, tout en restant compact.
- **Techniques d'adaptation** : Chaque antenne doit être correctement adaptée à l'impédance du système (généralement 50Ω) pour éviter les pertes par réflexion.

I.3.9 Techniques spécifiques pour améliorer les performances MIMO [21]

a) Conception de structures découplantes :

La conception de structures découplantes vise à réduire le couplage mutuel entre les éléments d'un système MIMO, afin d'améliorer l'isolation et les performances globales de l'antenne. Lorsque les antennes sont proches les unes des autres, comme dans les dispositifs compacts, des interférences peuvent apparaître, dégradant l'efficacité du système. Pour y remédier, on introduit des structures découplantes (par exemple : fentes, murs en EBG, DGS, ou éléments parasites) qui perturbent le chemin de couplage électromagnétique entre les antennes. Ces structures permettent ainsi de maintenir une bonne isolation, d'assurer une diversité spatiale efficace et de préserver la bande passante et le gain des antennes.

b) Utilisation de la polarisation circulaire (CP)

La polarisation circulaire en MIMO améliore la réception du signal en réduisant la sensibilité à l'orientation et les effets du multipath, tout en augmentant la capacité du canal grâce à la diversité de polarisation.

I.4 Conclusion

Ce chapitre a exposé les fondements des antennes imprimées et de la technologie MIMO, deux piliers essentiels des communications sans fil modernes. Les antennes imprimées,

appréciées pour leur compacité, leur faible coût et leur adaptabilité, s'imposent dans de nombreuses applications à haute fréquence. Parallèlement, la technologie MIMO permet d'accroître significativement le débit et la fiabilité des transmissions en exploitant la transmission simultanée de multiples flux via plusieurs antennes. Néanmoins, les environnements multi-trajets peuvent introduire des interférences, limitant les performances. L'intégration de la polarisation circulaire dans les systèmes MIMO constitue une solution prometteuse à cette problématique, et sera explorée dans le chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] **K.A. Abd. Rashid, M.N. Husain, A.R. Othman, M.Z.** "A Review on Circular Polarization Antenna for Wireless MIMO Application" 2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET 2014), May 27 - 29, 2014, Bandung, Indonesia.
- [2] **Tse, D., & Viswanath, P.** "*Fundamentals of Wireless Communication*". Cambridge University Press, 2005.
- [3] **Goldsmith, A.** "*Wireless Communications*". Cambridge University Press 2005.
- [4] **Alamouti, S. M.** "A simple transmit diversity technique for wireless communications". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8), 1451–1458, 1998.
- [5] **Biglieri, E., Calderbank, A., Constantinides, A., et al.** "MIMO Wireless Communications". Cambridge University Press (2007).
- [6] **Paulraj, A. J., Nabar, R., & Gore, D.** Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge University Press (2003).
- [7] **Telatar, E.** *Capacity of multi-antenna Gaussian channels*, "European Transactions on Telecommunications", 1999.
- [8] **Foschini, G.J.** Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas, Bell Labs Technical Journal, 1996.
- [9] **S. Blanch, J. Romeu, and I. Corbella**, "Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description," *Electronics Letters*, 2003.
- [10] **A. Goldsmith**, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005, chapter 7 (Spatial Multiplexing and Channel Correlation).
- [11] **Deschamps, G. A.** "Microstrip Microwave Antennas." *Symposium on Microwave Technology 1953*.
- [12] **Gutton, H. & Baissinot, G.** *French Patent No. 1,147,651* (1955).
- [13] **Howell, J. Q.** "Microstrip Antennas." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 1972.

- [14] **Munson, R. E.** "Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(1), 74–78. 1974.
- [15] **Balanis, C. A.** "*Antenna Theory: Analysis and Design*". 4th Ed., Wiley 2016.
- [16] **Garg, R.** *Microstrip antenna design handbook*. Artech house. (2001).
- [17] **Paul F. Combes**, "Micro-ondes, circuits passifs, propagation, antennes", pp 299-323, Série Dunod, Paris 1997.
- [18] **A. Brahim** « Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales » Université des Sciences et de Technologie d’Oran. Thèse de Magister 2009.
- [19] **L. CHOUTI** " Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [20] **R. Ghatak et al** "Recent Trends in Printed MIMO Antennas for 5G and Beyond," *IEEE Access*. (2021)
- [21] **Nasimuddin et al.** "Compact MIMO Antennas with Enhanced Isolation for WLAN Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012.

Chapitre II

Les Antennes Imprimées à Polarisation Circulaire

II.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse aux antennes imprimées à polarisation circulaire, une solution avancée pour améliorer la robustesse des communications sans fil, notamment dans les environnements à trajets multiples. Contrairement à la polarisation linéaire, la polarisation circulaire permet de réduire les pertes dues à l'orientation relative entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que les effets de rotation de polarisation causés par les réflexions. L'intégration de cette technique dans les antennes imprimées offre une meilleure immunité aux interférences, une stabilité directionnelle accrue et une performance optimisée dans les systèmes MIMO. Ce type d'antenne se révèle particulièrement pertinent pour les applications nécessitant une large bande passante, une miniaturisation et une intégration facile dans des dispositifs compacts.

II.2 La polarisation

II.2.1 Définition

La polarisation d'une onde électromagnétique rayonnée est définie par l'orientation et l'évolution temporelle du vecteur champ électrique en un point fixe de l'espace. Elle correspond à la trajectoire décrite, au cours du temps, par l'extrémité de ce vecteur, ainsi qu'au sens de rotation observé dans la direction de propagation de l'onde [1].

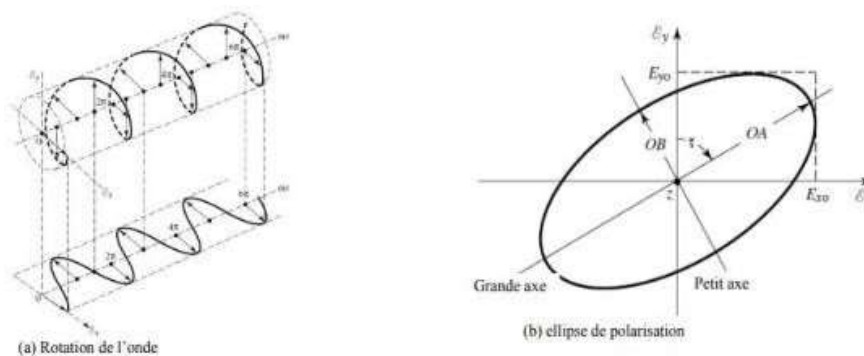


Figure II.1: Variation temporelle de la rotation d'une onde plane et de son ellipse de [2].

II.2.2 Le rapport axial (AR : Axial Ratio)

Pour caractériser la polarisation d'une onde électromagnétique, on utilise le rapport axial (ou taux d'ellipticité), qui constitue un paramètre clé. Selon la définition du standard IEEE, il s'agit du rapport entre les longueurs des axes majeur et mineur de la trajectoire

elliptique décrite par le vecteur champ électrique dans le cas d'une polarisation elliptique (voir figure II.1.b). Ce rapport peut être exprimé de la manière suivante [3] :

$$AR = \frac{\text{axe majeur}}{\text{axe mineur}} = \frac{OA}{OB} \quad \text{Avec } 1 \leq AR < \infty \quad (\text{II.1})$$

Idéalement, une polarisation circulaire parfaite correspond à un rapport axial égal à 1, soit 0 dB. Toutefois, en pratique, cette condition est difficile à atteindre en raison des limitations liées à la fabrication et aux tolérances des matériaux. Ainsi, une polarisation est considérée comme circulaire tant que le rapport axial reste inférieur ou égal à 3 dB. Cette plage de tolérance est généralement utilisée pour définir la bande passante en polarisation circulaire, mesurée à partir du seuil de 3 dB. Le rapport axial peut être exprimé en dB comme suit :

$$AR(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{OA}{OB} \right) \quad \text{Avec } 0 \leq AR < \infty \quad (\text{II.2})$$

II.2.3 Types de polarisation [4][5] :

Les antennes peuvent adopter différents modes de polarisation selon les conditions environnementales et les caractéristiques de leur conception (**Figure II.2**). Chaque type de polarisation présente ses propres avantages et inconvénients, ce qui influence leur choix dans les divers systèmes de communication sans fil. On distingue principalement trois types de polarisation d'antenne.

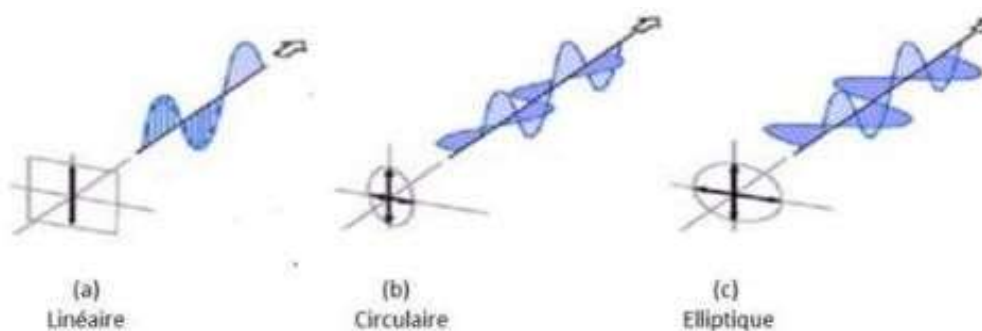


Figure II.2: Différents types de polarisation.

II.2.3 a La polarisation linéaire

La polarisation linéaire est le type de polarisation le plus courant qu'on retrouve dans les applications pratiques (**Figure II.2.a**). Dans ce cas, toute l'onde transmise reste dans un seul plan. En d'autres termes, le champ électrique ne bouge que dans une seule direction.

II.2.3 b La polarisation circulaire

Ici, le champ électrique effectue une rotation pendant la propagation du signal (**Figure II.2.b**). C'est une forme de polarisation plus complexe que la polarisation linéaire. Elle est couramment utilisée dans les systèmes de communication par satellite. Pour qu'une polarisation circulaire ait lieu, trois conditions doivent être réunies.

- Le champ E doit avoir deux composantes vectorielles orthogonales
- Ces composantes vectorielles doivent être déphasées de 90 degrés
- Ces composantes vectorielles doivent être égales en amplitude

Selon le sens de rotation du champ électrique, on distingue deux types de polarisation circulaire :

- Polarisation circulaire droite (RHCP)
- Polarisation circulaire gauche (LHCP)

II.2.3 c Polarisation elliptique

La polarisation elliptique (**Figure II.2.c**) est une combinaison de polarisation linéaire et circulaire. Elle apparaît lorsque les composantes orthogonales du champ électrique n'ont pas la même amplitude, contrairement au cas idéal de la polarisation circulaire. Tout comme cette dernière, la polarisation elliptique est couramment utilisée dans les communications par satellite et dans les systèmes radar.

II.3 Techniques d'obtention de la polarisation circulaire

Les méthodes de génération de polarisation circulaire dans les antennes imprimées se divisent en deux grandes catégories :

Alimentation par un seul accès : La polarisation circulaire est obtenue en perturbant l'élément rayonnant de l'antenne, par des modifications structurelles telles que l'ajout de fentes, d'encoches, de troncatures ou de stubs.

Alimentation par plusieurs sources : Cette approche repose sur l'utilisation de plusieurs points d'alimentation, accompagnée d'un réseau d'alimentation qui introduit un déphasage de 90° entre les ports d'excitation, permettant ainsi de générer la polarisation circulaire.

II.3.1. Alimentation à un seul accès

Une antenne imprimée alimentée en un seul point est une structure rayonnante conçue pour générer une polarisation circulaire en excitant deux modes orthogonaux dégénérés, de même amplitude et en quadrature de phase. Cette polarisation est obtenue en modifiant la géométrie de l'élément rayonnant et/ou en positionnant précisément le point d'alimentation. L'utilisation d'une alimentation unique facilite l'intégration de l'antenne dans les dispositifs électroniques, tout en assurant une conception compacte et efficace. Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour obtenir une polarisation circulaire à partir d'une seule source d'excitation.

3.1.1 Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant légèrement rectangulaire

La technique la plus classique est de considérer un patch légèrement rectangulaire avec d'exciter deux modes [6][7]. La différence de phase est obtenue en introduisant une petite différence entre la longueur et la largeur du patch, ce qui fait que les deux modes résonnent à des fréquences légèrement différentes (**Figure II.3**).

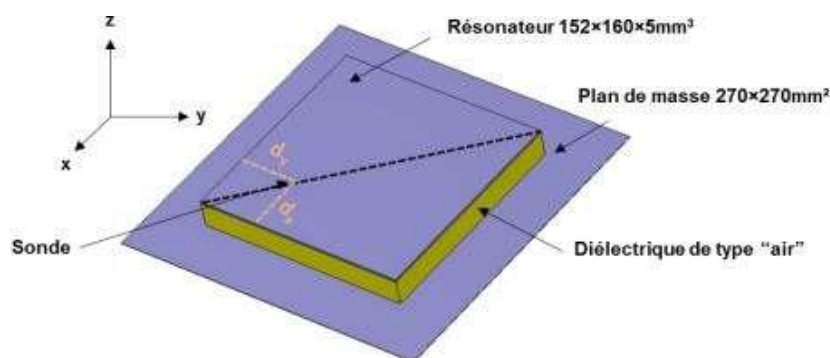


Figure II.3: Antenne patch classique alimentée sur la diagonale [7]

3.1.2 Troncature des coins de l'antenne

L'une des méthodes les plus couramment utilisées pour générer une polarisation circulaire consiste à tronquer deux des quatre coins du patch de l'antenne. Cette troncature perturbe légèrement la symétrie du champ électromagnétique, ce qui permet d'exciter deux modes orthogonaux dégénérés avec une différence de phase de 90° , condition nécessaire à l'obtention d'une polarisation circulaire.

Les travaux présentés dans [8] à [11] exploitent cette approche en modifiant la géométrie du patch afin de créer la condition de quadrature de phase nécessaire. Dans [8], une fente en forme de U est intégrée au patch afin d'élargir la bande passante du rapport axial, tandis que les articles [9], [10] et [11] utilisent une architecture empilée pour obtenir un fonctionnement à large bande tout en conservant la polarisation circulaire. Bien que les techniques d'optimisation diffèrent, l'obtention de la polarisation circulaire repose, dans tous les cas, sur la troncature des coins. La **Figure II.4** présente des exemples de ces configurations.

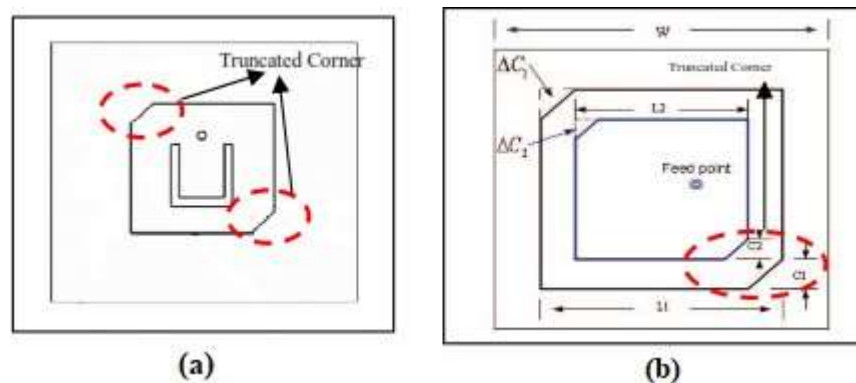


Figure II.4: Antenne avec : (a) coins tronqués [8], (b) encoches et coins tronqués [9].

3.1.3 .c Gravure d'un motif sur le toit métallique

La dégénérescence de deux modes orthogonaux permettant l'obtention d'un rayonnement à polarisation circulaire est possible à travers la création d'ouvertures au niveau du pavé métallique de l'antenne.

L'ajout de fentes dans un patch micro-ruban est une méthode efficace pour obtenir une polarisation circulaire (**Figure II.5**). Placées le long des diagonales d'un patch carré, ces fentes perturbent la symétrie du champ, permettant l'excitation de deux modes orthogonaux en quadrature de phase. La forme, la position et les dimensions des fentes influencent directement

la qualité de la polarisation circulaire. En plus de générer cette polarisation, elles peuvent contribuer à l'élargissement de la bande passante. Certaines géométries permettent également de miniaturiser l'antenne. Ce procédé est largement utilisé pour les antennes compactes à haute performance [10].

Dans le cadre d'applications sans fil compactes telles que le Wi-Fi ou l'IoT, plusieurs formes de fentes ont été développées pour générer une polarisation circulaire tout en réduisant l'encombrement de l'antenne. Parmi les géométries courantes figurent les fentes en **C**, **F**, **S** et en **croix** (**Figures II.5.a-d**) [11–14]. Ces découpes modifient la distribution du champ sur le patch, permettant l'excitation de modes orthogonaux nécessaires à la polarisation circulaire. Il a également été démontré que le périmètre des fentes influence directement la bande passante et les performances de rayonnement de l'antenne.

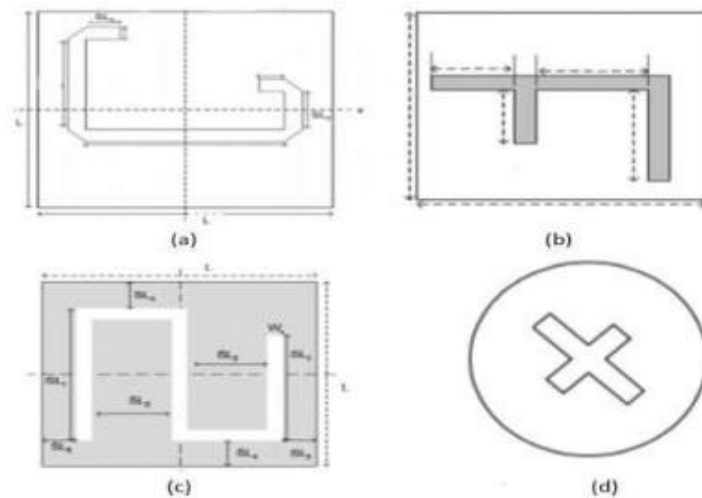


Figure II.5: Antenne patch avec fente (a) en forme de C, (b) en forme de F, (c) en forme de S et (d) en forme de croix.

II.3.2 Configurations à deux accès

La configuration à deux accès est basée sur le principe de déphasage entre les deux ports de l'antenne permettant ainsi l'excitation simultanée des deux modes orthogonaux générant le rayonnement à polarisation circulaire. En la comparant avec la méthode d'alimentation avec un accès unique, cette technique offre généralement une plus large bande passante. Cependant son inconvénient majeur est la taille du plan de masse nécessaire pour abriter le réseau d'alimentation et les pertes engendrées par celui-ci. Ainsi, un compromis entre les performances et la compacité de l'antenne doit être dressé.

Les techniques les plus évoquées dans la littérature permettant d'avoir deux modes d'amplitudes égales avec un déphasage de 90° sont, l'ajout d'une ligne quart d'onde (Figure II.6 (a)) [15] et l'utilisation du diviseur de puissance Wilkinson (Figure II.6 (b)) [16].

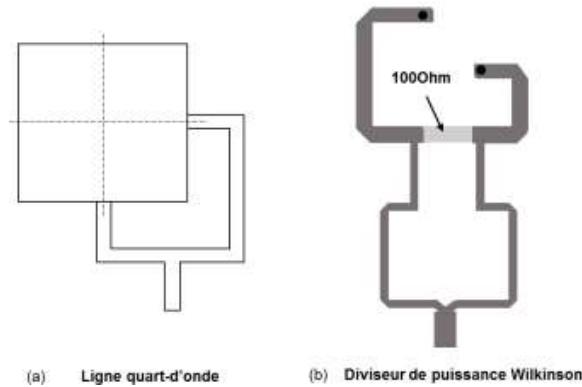


Figure II.6 : Alimentation à double accès **a)** Insertion d'une ligne quart-d'onde, **b)** : utilisation du diviseur de puissance Wilkinson.

II.3.2.a Ajout d'une ligne quart d'onde

Une méthode efficace pour générer une polarisation circulaire consiste à introduire une ligne de déphasage d'un quart d'onde $\lambda/4$ entre deux points d'alimentation d'un patch. Cette ligne crée un déphasage de 90° entre les deux signaux, permettant d'exciter deux modes orthogonaux en quadrature de phase, ce qui génère une polarisation circulaire. Cette technique a été expérimentée avec succès par Mak *et al.* [15], qui ont démontré son efficacité pour améliorer la pureté de la polarisation et la stabilité du rayonnement. Malheureusement ce type d'alimentation présente une mauvaise isolation entre les ports d'excitation et la bande passante du rapport axial AR sera dans ce cas limitée et très étroite [17].

II.3.2.b Utilisation du diviseur de Wilkinson avec une ligne de retard

Le diviseur de puissance de Wilkinson, représenté en Figure II.6.b, est un circuit à trois ports largement utilisé dans les systèmes d'alimentation d'antennes à polarisation circulaire. Il permet de répartir un signal injecté au port d'entrée (port 1) en deux signaux de même amplitude et de même phase sur les ports de sortie (ports 2 et 3), tout en assurant une adaptation optimale et une isolation élevée entre ces derniers. En raison de la symétrie du circuit, les extrémités de la résistance d'isolation sont au même potentiel lors d'une excitation en entrée, empêchant tout courant de circuler à travers elle ; la résistance reste donc inactive dans ce cas. Pour générer une

polarisation circulaire, il suffit d'introduire une ligne de déphasage de $\lambda/4$ sur l'un des deux bras, créant ainsi un décalage de phase de 90° entre les deux signaux alimentant le patch. Cette configuration garantit une excitation en quadrature de phase, nécessaire à la génération d'une polarisation circulaire, bien que la bande de fonctionnement reste relativement étroite dans les architectures classiques [16].

II.4 Applications des antennes à polarisation circulaire

Les antennes à polarisation circulaire (PC) sont particulièrement prisées dans les systèmes de communication sans fil exposés à des environnements complexes, où la direction et l'orientation du signal peuvent varier de manière aléatoire. Grâce à leur capacité à minimiser les pertes dues aux décalages d'alignement de polarisation, elles sont largement utilisées dans les applications **satellitaires**, **GNSS (GPS, Galileo, etc.)**, **RFID**, **Wi-Fi**, **aéronautiques** et **spatiales**. Elles sont également efficaces dans les systèmes **MIMO** et **IoT**, où la robustesse aux réflexions multiples et la stabilité du lien radio sont cruciales. Voici quelques-unes de leurs applications principales :

II.4.1 Communication par satellite [18][19]

Dans les systèmes de communication par satellite, l'utilisation d'antennes à polarisation circulaire (PC) est devenue essentielle pour garantir la fiabilité du lien de transmission, notamment dans les environnements où l'orientation relative entre l'émetteur (le satellite) et le récepteur (station sol ou terminal mobile) varie constamment. Contrairement à la polarisation linéaire, la polarisation circulaire permet de maintenir une bonne réception quel que soit l'angle de rotation ou d'inclinaison de l'antenne réceptrice. Cela est particulièrement important dans les systèmes où les terminaux ne peuvent pas être parfaitement orientés, comme les satellites en orbite basse (LEO) ou les récepteurs GPS embarqués sur des véhicules.

De plus, la polarisation circulaire offre une meilleure résistance aux effets de multi-trajets, aux réflexions atmosphériques et à la dépolarisation causée par l'ionosphère ou la pluie, ce qui améliore la qualité du signal.

II.4.2 Les réseaux locaux sans fil (WLAN) :

La polarisation circulaire (PC) présente plusieurs avantages significatifs pour les réseaux locaux sans fil (WLAN), notamment ceux basés sur les standards Wi-Fi. Elle permet

tout d'abord de réduire les pertes de signal dues aux variations d'orientation entre les antennes émettrices et réceptrices, ce qui est particulièrement utile dans les environnements domestiques et professionnels où les appareils mobiles changent fréquemment de position.

De plus, la PC est moins sensible aux effets du multi-trajet, typiques des environnements intérieurs, car elle atténue les interférences causées par les réflexions sur les murs et objets. Dans les architectures MIMO utilisées par les dernières générations de Wi-Fi (telles que Wi-Fi 6), elle contribue également à réduire la corrélation entre les canaux, améliorant ainsi le débit et la fiabilité de la transmission.

Par ailleurs, la polarisation circulaire facilite la communication avec des équipements en mouvement ou en rotation, tels que les objets connectés, les drones ou les robots, assurant une liaison stable même en conditions dynamiques. Ainsi, l'intégration d'antennes à polarisation circulaire dans les réseaux WLAN permet d'améliorer la qualité du signal, la couverture et la robustesse des connexions sans fil.

II.4.3 Systèmes GPS et Satellites : Elles assurent une localisation précise en minimisant les interférences dues aux réflexions, comme dans les villes denses ou les zones montagneuses. Ces antennes sont utilisées dans les smartphones, les véhicules et l'aviation.

II.4.4 Les lecteurs d'identifications Radio Fréquence (RFID) :

Dans le cas des étiquettes RFID et des dispositifs portables, il est essentiel de garantir une réception de signal robuste, quelles que soient les variations d'orientation entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice. La polarisation circulaire répond parfaitement à cette exigence, en éliminant les pertes de signal liées aux désalignements de polarisation, fréquents avec les antennes linéaires. Elle permet ainsi d'assurer une communication stable et fiable, même lorsque les équipements sont en mouvement ou positionnés de manière aléatoire comme c'est souvent le cas pour les montres intelligentes, bracelets connectés ou étiquettes RFID fixées à des objets ou produits. Cette propriété s'avère particulièrement avantageuse dans des contextes dynamiques, tels que les applications mobiles ou les véhicules en déplacement, où l'orientation du récepteur ne peut être maîtrisée.

II.5 Les limitations de la polarisation circulaire

Bien que les antennes à polarisation circulaire présentent de nombreux avantages, leur conception reste complexe. Parmi leurs principaux inconvénients figurent une bande passante

généralement limitée, un gain modéré, ainsi que l'excitation d'ondes de surface, qui peut entraîner une réduction de l'efficacité de rayonnement et affecter les performances globales de l'antenne.

L'un des paramètres clés caractérisant une antenne patch à polarisation circulaire est le rapport axial, qui définit le type de la polarisation. En général, une antenne est considérée comme circulairement polarisée lorsque $AR \leq 3$ dB, ce qui constitue la valeur de référence acceptée dans la majorité des applications. Pour satisfaire ce critère, deux conditions doivent être respectées : soit une différence d'amplitude inférieure à 3 dB avec un déphasage de 90° entre les deux composantes orthogonales, soit un écart de phase inférieur à 20° avec une amplitude équilibrée. Cela implique que le maintien d'un bon rapport axial est particulièrement sensible, notamment aux fréquences élevées, où les imperfections de fabrication ou les déséquilibres de l'alimentation peuvent facilement détériorer la polarisation circulaire [20].

Il est bien établi que la bande passante effective d'une antenne à polarisation circulaire correspond à la plage de fréquences où se chevauchent la bande d'adaptation d'impédance ($S_{11} \leq -10$ dB) et la bande du rapport axial ($AR \leq 3$ dB). Cependant, un inconvénient notable réside dans le fait que cette bande se réduit considérablement lorsque les fréquences minimales de S_{11} et d'AR ne sont pas alignées, ce qui limite la performance de l'antenne dans les applications à large bande.

II.6 Techniques d'amélioration des performances d'une antenne polarisée circulairement

Plusieurs approches ont été proposées pour élargir la plage de fonctionnement des antennes microrubans à polarisation circulaire, en réponse aux limitations inhérentes à leur conception.

II.6.1 Insertion de fentes

Parmi les techniques permettant de générer une polarisation circulaire, l'introduction de fentes dans le patch constitue une approche largement utilisée, comme présenté au paragraphe § II.3.1.c. Cette méthode est également reconnue pour favoriser la miniaturisation de l'antenne en modifiant efficacement le courant de surface. Toutefois, l'insertion de fentes s'accompagne généralement d'une détérioration des performances électromagnétiques, notamment par une

réduction de la bande passante et une baisse du gain rayonné, ce qui impose un compromis entre compacité et efficacité.

L'introduction de fentes dans le patch rayonnant ne se limite pas à l'allongement du trajet des courants de surface ; elle permet également de générer de nouvelles résonances, ce qui peut être exploité pour concevoir des antennes multibandes à polarisation circulaire. Cette approche contribue à l'élargissement de la bande passante et à l'amélioration du rapport axial, tout en préservant la compacité de la structure, contrairement à d'autres techniques plus volumineuses. Il convient toutefois de souligner que seules certaines formes spécifiques de fentes permettent une amélioration effective des performances électromagnétiques de l'antenne patch [21]. Quelques exemples représentatifs sont présentés dans la **Figure II.7**.

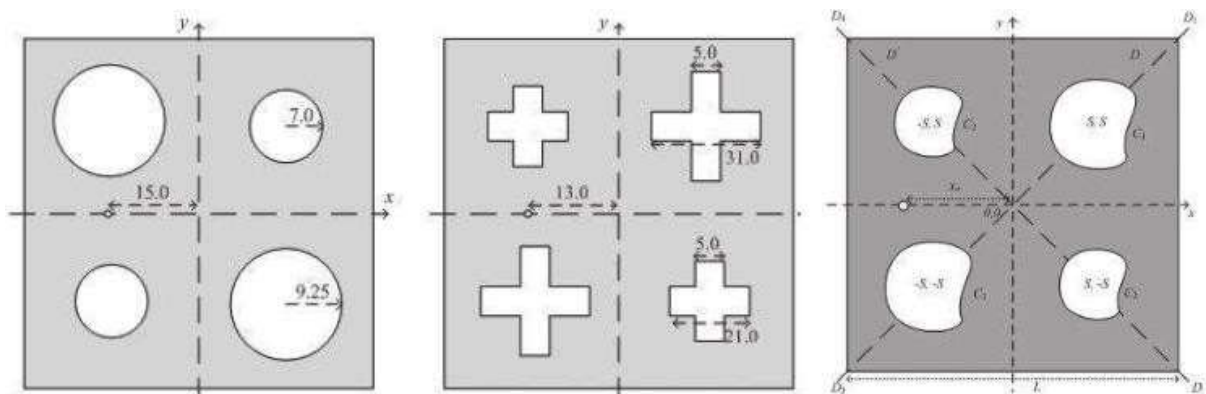


Figure III.7: La gravure de fentes sur le patch.

II.6.2 Influence du substrat diélectrique

Dans les antennes patch à polarisation circulaire, l'un des principaux inconvénients réside dans leur bande passante étroite. Celle-ci peut toutefois être améliorée en agissant sur certains paramètres du substrat diélectrique, notamment : L'augmentation de l'épaisseur du substrat, La réduction de sa permittivité relative (ϵ_r).

Cependant, la première approche est peu privilégiée, car une trop grande épaisseur tend à favoriser l'excitation d'ondes de surface, ce qui nuit à l'efficacité du rayonnement. De plus, les substrats disponibles commercialement présentent généralement des dimensions et caractéristiques normalisées, difficiles à modifier librement.

La solution optimale consiste alors à choisir un substrat de hauteur modérée, afin de préserver le profil bas de l'antenne, tout en optant pour une permittivité diélectrique

relativement faible, ce qui permet de favoriser une bande passante plus large tout en maintenant de bonnes performances électromagnétiques.

II.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les antennes imprimées à polarisation circulaire, reconnues pour leur compacité et leur robustesse dans des environnements complexes. Leurs nombreuses applications, telles que les communications satellites, les réseaux Wi-Fi ou les systèmes RFID, témoignent de leur pertinence dans le domaine des technologies sans fil.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception d'un système MIMO à polarisation circulaire (PC). Il détaillera les différentes étapes de développement, depuis le choix de la topologie des antennes jusqu'à l'optimisation des performances en termes d'isolation, de rapport axial, de gain et de diversité. L'objectif est de concevoir une architecture MIMO compacte, performante et adaptée aux exigences des communications sans fil modernes, en particulier pour les applications Wi-Fi à 2,4 GHz.

Bibliographie

- [1] **Marwa Shakeeb** “Circularly Polarized Microstrip Antenna” thèse de doctorat de Concordia University Montreal Quebec Canada, December 2010.
- [2] **Anne Claire LEPAGE** “Caractéristiques des antennes” rapport, Le Doaré Pascal, 1999.
- [3] **A. Balanis**, “Antenna theory: analysis and design” livre, third edition, ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
- [4] **TrueRC Canada** “RHCP or LHCP” rapport, 20 juillet 2021
- [5] <https://www.tesswave.com/what-is-antenna-polarization/>
- [6] **P. Sharma and K. Gupta**, "Analysis and Optimized Design of Single Feed Circularly Polarized Microstrip Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 31, no. 6, pp. 949-955, Nov. 1983.
- [7] **P. Vaudon, T. Aubreton, P. Dufrane and B. Jecko**, “Influence of the Ground Plane Structure on the Radiation Pattern of Microstrip Antennas”, Annals of Telecommunications, vol. 48, no. 5-6, pp. 319-329, May 1993.
- [8] **J. Leon Valdes, L. Huitema, E. Arnaud, D. Passerieux, A. Crunteanu** “Antenne reconfigurable en polarisation dans la bande millimétrique en utilisant l’activation optique des matériaux à changement de phase”, *XXIèmes Journées Nationales Microondes*, Caen, 14-17 mai 2019.
- [9] **W. S. Chen, C. K. Wu and K. L. Wong**, “Novel Compact Circularly Polarized Square Microstrip Antenna”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 49, no. 3, March 2001.
- [10] **Nasimuddin, Y. Yong, Z.N. Chen, A. Alphones**, “Circularly Polarized F-Shaped Slot Microstrip Antenna with Wide Beamwidth,” in proceedings of the European Microwave Conference, EuMC, 2009, pp. 1531–1534.
- [11] **Nasimuddin, Z.N.Chen, Xianming Qing**, “Single Fed Circularly Polarized Microstrip Antenna with C-Slot,” in proceedings of the Microwave Conference, 2008, pp. 1-4.

- [12] **Nasimuddin, Y. Yong, Z.N. Chen, A. Alphones**, “Circularly Polarized F- Shaped Slot Microstrip Antenna with Wide Beamwidth,” in proceedings of the European Microwave Conference, 2009, pp. 1531–1534.
- [13] **H. Iwasaki**; “A Circularly Polarized Small-Size Microstrip Antenna with a Cross Slot”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, issue. 10, 1996, pp. 1399-1401.
- [14] **J.-S. Row, C.-Y. Ai** “Compact Design of Single-Feed Circularly Polarized Microstrip Antenna” *IEEE Electronics Letters*, vol.40, issue: 18, 2004, pp. 1093-1094.
- [15] **M. Khan, Z. Yang, S. Member and K. Warnick**, “Dual -Circular-Polarized High-Efficiency Antenna for Ku-Band,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, pp. 1225-1236, January 2014.
- [16] **A. Hassan, F. Elhefnawi, A. Z. Elsherbeni, M. Hendi and S. Elramly**, “Compact Dual Circularly-Polarized Microstrip Antennas,” *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1-4, Toronto, 2010.
- [17] **C.-L. Mak, K.-M. Luk, K.-F. Lee, and Y. L. Chow**, "Experimental study of a microstrip patch antenna with a circular polarizer," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 336–338, Dec. 1998.
- [18] ***Antenna Theory: Analysis and Design***, 4th Edition, Wiley, 2016.
- [19] **Ghogho, M., & Swami, A.** "Circular polarization in wireless communications: A review." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 132–138, 2013.
- [20] **S.Shichang, Qi Luo and FuguoZhu**, "Circularly Polarized Antennas," *University of Kent*, UK, 2014.
- [21] **Nasimuddin, Zhi Ning Chen, and Xianming Qing** " Slotted Microstrip Antennas for Circular Polarization with Compact Size", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 55, No. 2, April 2013.

Chapitre III

Conception et Simulation d'un Système MIMO à Polarisation Circulaire

III.1 Introduction

Face à la croissance rapide des besoins en transmission de données à haut débit, les systèmes MIMO se sont imposés comme une solution performante pour surmonter les limites des antennes conventionnelles, notamment en matière de directivité et de capacité de canal. En intégrant plusieurs éléments rayonnants, ces systèmes permettent d'augmenter le rendement spectral et la fiabilité des liaisons sans fil. L'association de la polarisation circulaire aux architectures MIMO renforce encore leurs performances, en réduisant les interférences, en améliorant la robustesse aux environnements multi-trajets, et en assurant une transmission plus stable, ce qui en fait une technologie clé pour les communications de prochaine génération [1].

Ce chapitre est consacré à la conception, à la simulation et à la réalisation d'un système MIMO à polarisation circulaire destiné aux applications sans fil. Dans un premier temps, une antenne unitaire à polarisation linéaire a été conçue et simulée. L'analyse de ses performances, notamment en termes de coefficient de réflexion et de gain, a révélé une directivité limitée. Pour y remédier, un substrat en vide a été ajouté, ce qui a permis d'améliorer significativement le gain. Par la suite, une fente a été introduite dans le patch afin de générer une polarisation circulaire, ce qui a nécessité une phase d'optimisation. Les résultats obtenus ont montré des performances satisfaisantes en termes de coefficient de réflexion, de rapport axial et de gain. L'antenne optimisée a ensuite été intégrée dans une configuration MIMO à deux éléments. Pour améliorer l'isolation entre les antennes et les performances globales du système, une fente a été implémentée au niveau du plan de masse de la structure. Enfin, l'antenne a été réalisée, mesurée et comparée aux résultats de simulation, afin de valider le concept proposé.

III.2 Description du Logiciel de Simulation CST

CST Studio Suite (Computer Simulation Technology) est un logiciel de simulation électromagnétique largement utilisé dans la recherche pour la conception, l'analyse et l'optimisation de dispositifs RF, micro-ondes, antennes, composants haute fréquence et systèmes électromagnétiques complexes. Il permet de modéliser précisément les phénomènes électromagnétiques dans différentes bandes de fréquences grâce à plusieurs solveurs basés sur des méthodes numériques comme la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) ou la méthode des moments (MoM).

CST offre une interface intuitive et une grande polyvalence, facilitant la conception et la simulation d'antennes, circuits intégrés, filtres, guides d'ondes, et autres dispositifs électromagnétiques, avec des résultats fiables et détaillés, notamment les paramètres S, les diagrammes de rayonnement, la distribution du champ électrique/magnétique, et les performances en conditions réelles [1].

III.3 Conception du système MIMO à polarisation circulaire

III.3.1 Définition des spécifications

Dans le cadre de ce travail, un système MIMO est conçu pour fonctionner dans la bande Wi-Fi à 2,4 GHz (bande ISM), avec une bande passante qui s'étale de **2,4 à 2,5 GHz**. Le système intègre deux antennes identiques (configuration MIMO 2×2) assurant une polarisation circulaire, afin de garantir une meilleure robustesse aux effets de multi-trajets, aux interférences et aux variations d'orientation.

Chaque antenne doit présenter un coefficient de réflexion S_{11} inférieur à **-10 dB** sur toute la bande, un rapport axial (AR) inférieur à **3 dB** pour valider la polarisation circulaire, et un gain supérieur à **3 dB**.

L'isolation mutuelle entre les antennes, exprimée par le paramètre S_{21} , doit être supérieure à **20 dB**, tandis que le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) doit être idéalement en dessous de **0,1**, afin de garantir une bonne diversité spatiale. Le **gain de diversité** visé est proche de **10 dB**.

III.3.2 Conception de l'antenne unitaire

La structure proposée est un patch triangulaire équilatérale (**Figure III.1**), reconnu pour sa compacité et sa capacité à générer une polarisation circulaire lorsqu'il est correctement modifié et alimenté

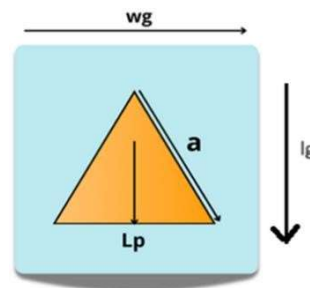


Figure III.1 : Antenne patch triangulaire.

Le substrat utilisé est le FR-4 ayant une constante diélectrique (ϵ_r) égale à 4.3, une tangente de perte ($tg\delta$) de 0,02 et une hauteur h de 1.6mm. Ce substrat est et à faible coût et très répandu sur le marché, ce qui justifie notre choix. Un plan de masse total de dimensions $W_g \times L_g$ recouvre entièrement la face arrière du substrat.

L'antenne est alimentée par une sonde coaxiale connectée depuis la face inférieure du substrat, traversant le plan de masse pour exciter le patch conducteur. La position de l'alimentation a été ajustée de manière optimale afin d'assurer une adaptation d'impédance à 50Ω .

Le calcul des dimensions du patch, notamment la longueur du côté, repose sur des formules simplifiées faisant intervenir la constante diélectrique et l'épaisseur du substrat. La dimension du côté peut être estimée à l'aide de la formule suivante [3].

$$a = \frac{2c}{3f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (III.1)$$

f : fréquence du travail

ϵ_r : Permittivité du substrat

c : vitesse de la lumière dans le vide

a : longueur du coté du triangle.

L'ensemble des dimensions de cette structure se résume dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch triangulaire.

| Les paramètres | a | Lg | Wg | Lp |
|---------------------|----|-------|------|-------|
| Les dimensions (mm) | 40 | 44,24 | 49,6 | 34,64 |

III.3.2.a Résultats de simulation

La simulation réalisée avec CST MWS nous permet de définir le coefficient de réflexion S_{11} sur une plage de fréquences allant de 0 à 3 GHz, comme le montre la **Figure III.2**. On observe que l'antenne présente un coefficient de réflexion de $-2,006$ dB à la fréquence 2,4 GHz, ce qui indique une mauvaise adaptation. Afin d'améliorer l'accord à la fréquence de travail, des études paramétriques ont été réalisées, portant sur la position du point d'alimentation ainsi que sur la longueur du côté (a) du patch triangulaire.

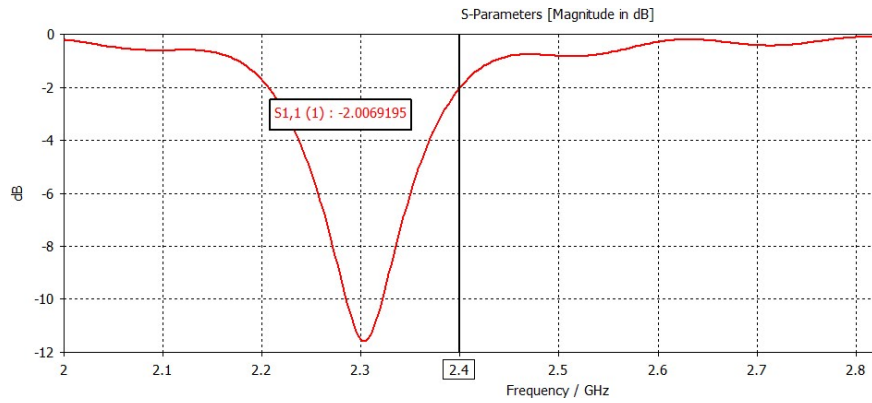


Figure III.2 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l’antenne initiale.

Les dimensions optimisées sont récapitulées dans le tableau suivant:

Tableau III.2 : Dimensions de l’antenne patch initiale optimisée.

| Les paramètres | a | Wg | Lg | Lp |
|---------------------|------|----|-------|-------|
| Les dimensions (mm) | 38.4 | 48 | 42.85 | 33.25 |

La **Figure III.3** illustre la variation du paramètre S_{11} en fonction de la fréquence de l’antenne optimisée. D’après cette courbe, une excellente adaptation a été obtenue avec un niveau de $S_{11}=-41.45$ dB à la fréquence de fonctionnement. La bande passante définie à -10 dB est de 81 MHz, s’étendant de 2,36 GHz à 2,44 GHz.

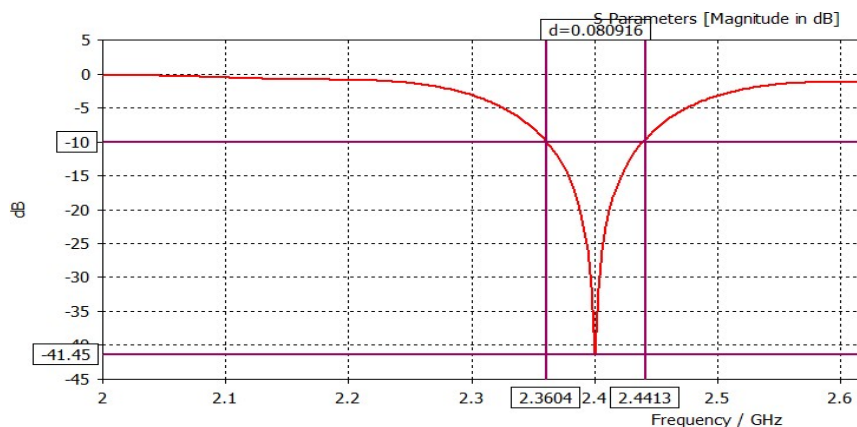


Figure III.3: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l’antenne adaptée.

La Figure III.4 présente le diagramme de rayonnement tridimensionnel de l'antenne. Celle-ci atteint un gain maximal de **1,38 dB**, ce qui confirme un comportement globalement directif dans la bande de fonctionnement. Néanmoins, ce gain reste relativement faible, ce qui justifie la nécessité de l'améliorer par l'introduction d'une couche d'air d'épaisseur (h_1) sous le substrat (**Figure III.5**).

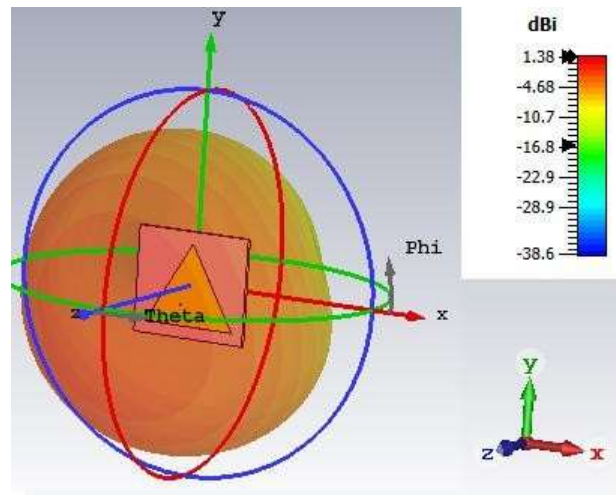


Figure III.4: Le rayonnement 3D de l'antenne patch triangulaire optimisée.

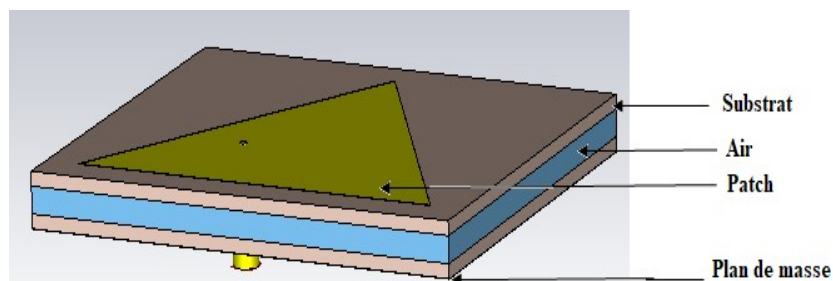


Figure III.5 : Géométrie de l'antenne avec la couche d'air.

Après l'ajout du substrat en vide, un changement notable de l'adaptation a été observé, accompagné d'un décalage de la fréquence de résonance. Une phase d'optimisation a donc été menée, consistant à ajuster certains paramètres géométriques de l'antenne afin de restaurer ces performances à la fréquence de fonctionnement souhaitée. Le tableau III.3 présente les nouvelles dimensions optimisées de l'antenne.

Suite à l'optimisation menée, l'antenne présente une excellente adaptation à la fréquence de 2,4 GHz, avec un coefficient de réflexion S_{11} bien inférieur à -10 dB (**Figure III.6**). La bande passante correspondante à -10 dB a été sensiblement élargie, atteignant **125.64 MHz**,

s'étendant de 2,34 GHz à 2,46 GHz. Cette amélioration s'accompagne d'une nette progression des performances de rayonnement, avec un gain maximal accru à **6,1 dB (Figure III.7)**.

Tableau III.3 : Dimensions de l'antenne après l'ajout de la couche d'air.

| Les paramètres | a | Wg | Lg | Lp | h ₁ |
|---------------------|----|------|--------|--------|----------------|
| Les dimensions (mm) | 52 | 61.6 | 54.632 | 45.032 | 3 |

L'utilisation de l'air en tant que substrat, caractérisé par une permittivité relative proche de l'unité ($\epsilon_r=1$), entraîne une diminution significative de la constante diélectrique effective de la structure. Cette réduction contribue à limiter les pertes diélectriques ainsi que le confinement de l'énergie électromagnétique dans le substrat, favorisant ainsi une meilleure efficacité de rayonnement et une amélioration du gain global de l'antenne [4].

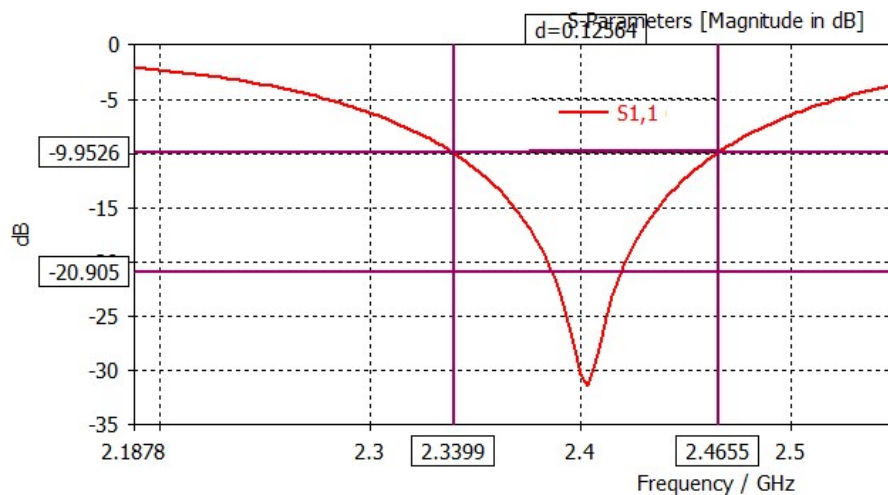


Figure III.6 : Paramètre S₁₁ en fonction de la fréquence après l'ajout de la couche d'air.

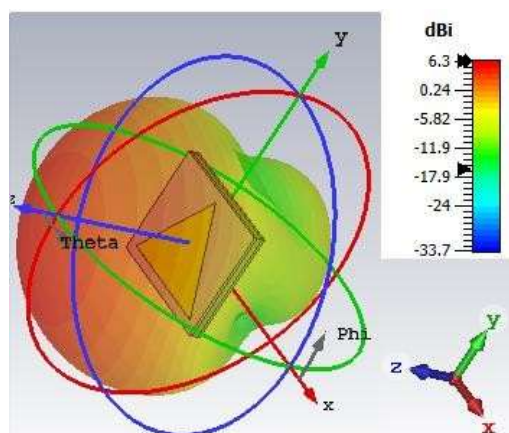


Figure III.7: Le rayonnement 3D de l'antenne patch triangulaire avec la couche d'air.

III.3.3 Conception de l'antenne unitaire polarisée circulairement

Dans le but de conférer à l'antenne patch triangulaire étudiée précédemment une polarisation circulaire, on introduit une fente, généralement placée selon une diagonale ou en bordure du triangle (**Figure III.8**). Cette perturbation modifie la distribution des courants de surface, permettant ainsi le couplage de deux modes quasi-dégénérés. La forme, les dimensions et la position de cette fente sont soigneusement optimisées afin de générer un décalage de phase d'environ 90° entre les deux modes. Par conséquent, au lieu d'une polarisation linéaire classique, la superposition de ces deux modes orthogonaux donne naissance à un champ électrique rotatif dans le plan du patch, caractéristique d'une polarisation circulaire.

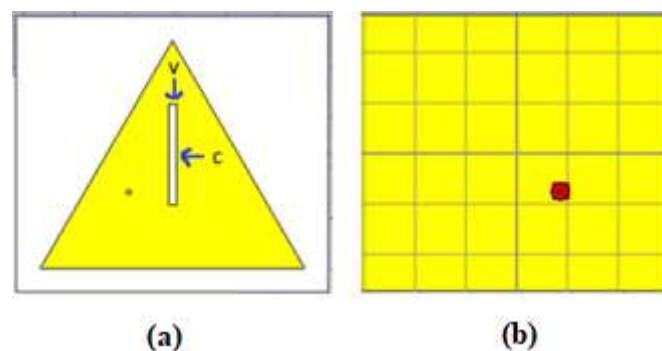


Figure III.8 : Antenne triangulaire avec une fente (a) vue de face, (b) vue d'arrière.

Suite aux résultats de simulation, un décalage de la fréquence de résonance vers des valeurs plus basses a été observé. Afin de recentrer la résonance autour de la fréquence cible de 2,4 GHz, une réduction des dimensions de l'antenne a été nécessaire. Les nouveaux paramètres géométriques sont illustrés sur le tableau III.4.

Tableau III.4 : Dimensions de l'antenne avec fente.

| Les paramètres | a | Wg | Lg | Lp | h ₁ | c | v |
|---------------------|------|------|--------|--------|----------------|------|-----|
| Les dimensions (mm) | 49.5 | 59.1 | 52.467 | 42.867 | 3 | 21.6 | 1.5 |

Il est à noter qu'une étude paramétrique a été effectuée sur les dimensions de la fente, ainsi que sur sa position, afin d'aboutir à une configuration optimale répondants aux spécifications suivantes :

- $S_{11} < -10$ dB.
- Bande passante >100 MHz Pour couvrir toute la bande ISM 2,4 GHz.
- AR (Axial Ratio) < 3 dB autour de la fréquence centrale Pour garantir une bonne polarisation circulaire.
- Gain satisfaisant (≥ 3 dB) Pour assurer un bon rayonnement.

Les **Figures III.9** et **III.10** illustrent respectivement l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} et du rapport axial (AR) en fonction de la fréquence. Un minimum de S_{11} de -50 dB est observé, avec une bande passante à -10 dB de 175 MHz, s'étendant de $2,32$ GHz à $2,49$ GHz. Quant au rapport axial (RA), sa bande passante à 3 dB est de $23,83$ MHz, allant de $2,389$ GHz à $2,413$ GHz, plage de fréquence au sein de laquelle l'antenne génère un rayonnement à polarisation circulaire.

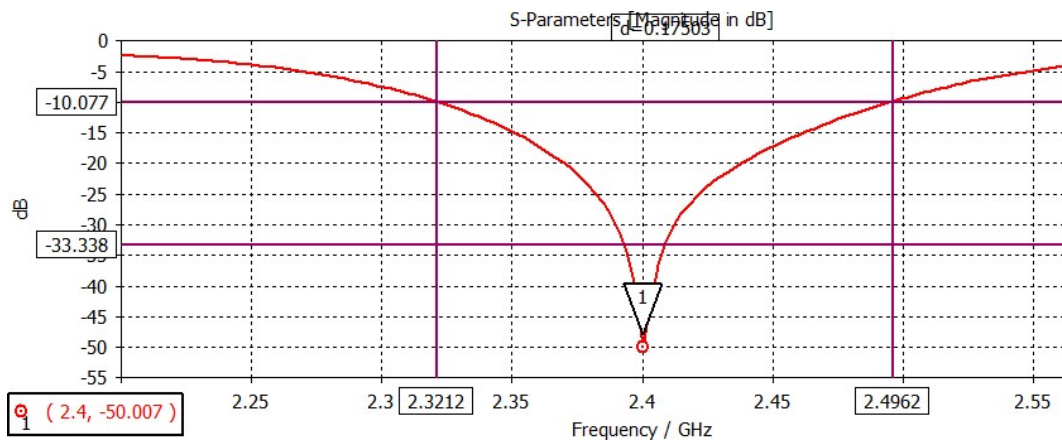


Figure III.9 : Coefficient de réflexion de l'antenne unitaire à PC.

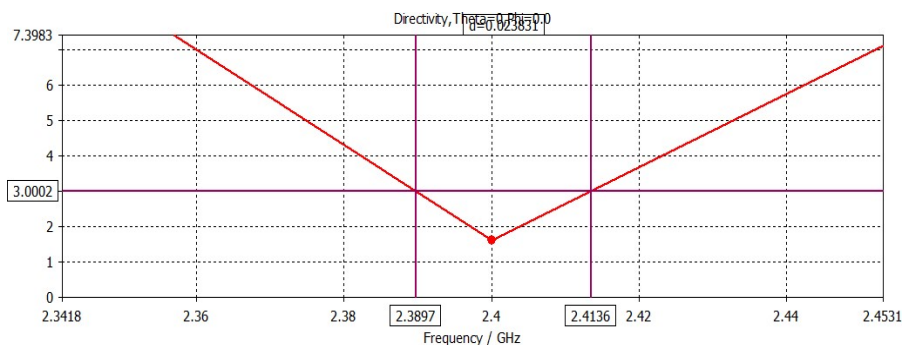


Figure III.10 : RA en fonction de la fréquence de l'antenne unitaire à PC.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne patch avec fente rectangulaire en 3D est illustré par la **Figure III.11**. Un gain maximal de 6.12 dB est réalisé avec cette antenne.

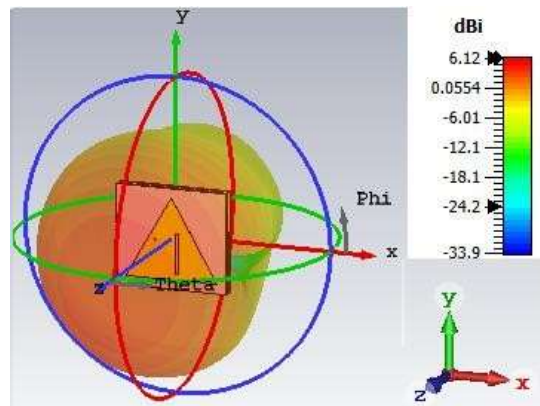


Figure III 11 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne à PC.

Les résultats obtenus confirment la conformité aux spécifications exigées, en particulier la génération d'une polarisation circulaire dans la bande souhaitée. Ces résultats permettent ainsi de valider la structure unitaire, qui constitue une base fiable pour l'intégration dans une configuration MIMO. Deux éléments identiques seront ainsi disposés de manière à optimiser l'isolation mutuelle, réduire la corrélation entre les patches et garantir des performances améliorées dans un environnement multi-antennes.

III.3.4 Conception du système MIMO polarisé circulairement

Dans cette sous-section, nous présentons un système d'antennes issu de la juxtaposition de deux antennes triangulaires précédemment étudiées identiques en termes de dimensions et de structure. Les deux antennes sont disposées de manière symétrique sur un même plan de masse. Chaque élément est alimenté indépendamment par un port dédié : le port 1 pour le premier élément rayonnant, et le port 2 pour le second, comme illustré sur la **Figure III.12**.

L'espacement entre les deux patches a été soigneusement déterminé afin de réduire le couplage mutuel tout en conservant une taille globale compacte. Un écart de l'ordre de $\lambda/2$ (où λ est la longueur d'onde) a été adopté comme compromis optimal entre isolation électromagnétique et encombrement du système. Les deux éléments rayonnants sont ainsi séparés par une distance de 62.54 mm, correspondant à une demi-longueur d'onde centrée autour de 2,4 GHz. Les dimensions globales du réseau d'antennes sont de $125 \times 52,47$ mm².

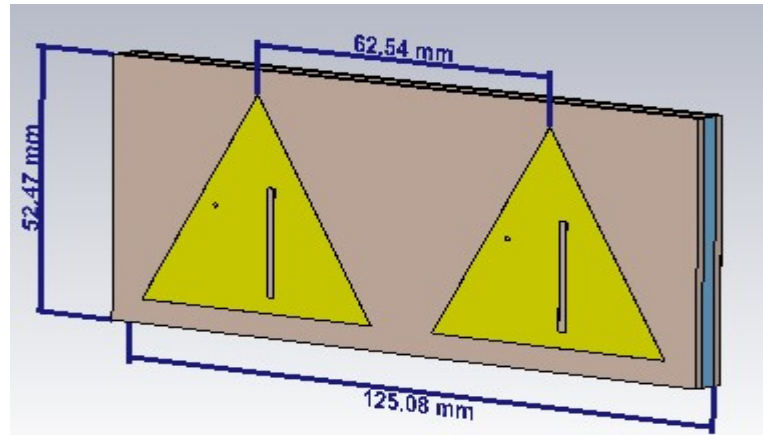


Figure III.12 : Geometrie du système MIMO à PC.

Les résultats de simulation concernant les paramètres S du système d'antennes proposé est illustré sur la **Figure III.13**.

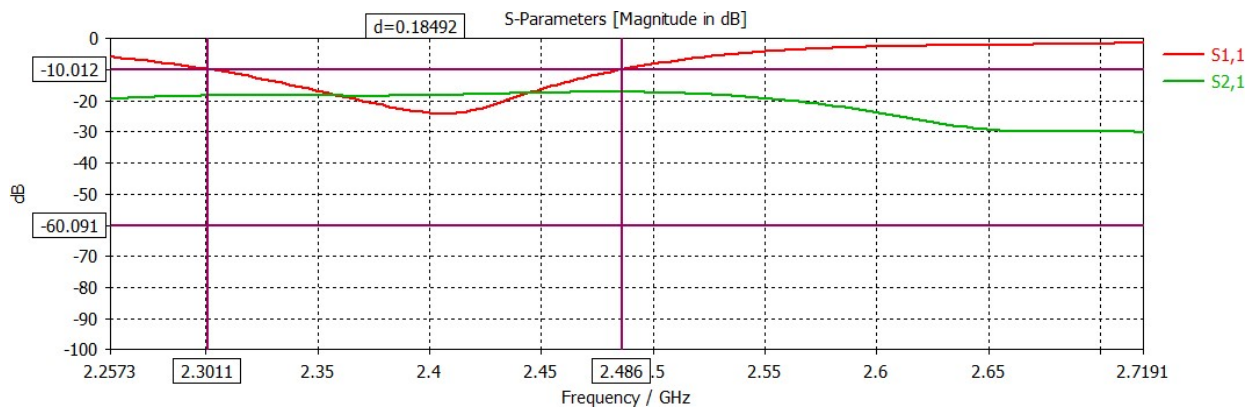


Figure III.13 : Paramètres S en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC.

Les paramètres S obtenus confirment les bonnes performances du système MIMO proposé. Le coefficient de réflexion $S_{11} = -23.86$ dB indique une bonne adaptation d'impédance, avec moins de 0,4 % de puissance réfléchi, avec une bande passante à -10 dB de **184.92 MHz**, s'étendant de 2,3 GHz à 2,486 GHz. Le couplage mutuel entre les deux éléments, caractérisé par le coefficient de transmission $S_{21} = -18.23$ dB reste acceptable, bien qu'une **amélioration** soit envisageable pour renforcer l'isolation inter-antennes dans le contexte MIMO.

En ce qui concerne le rapport axial, la bande passante à 3 dB est de **49,2 MHz**, s'étendant de 2,374 GHz à 2,424 GHz (**Figure III.14**). Cette plage de fréquence correspond à la zone dans laquelle l'antenne MIMO produit un rayonnement à polarisation circulaire efficace.

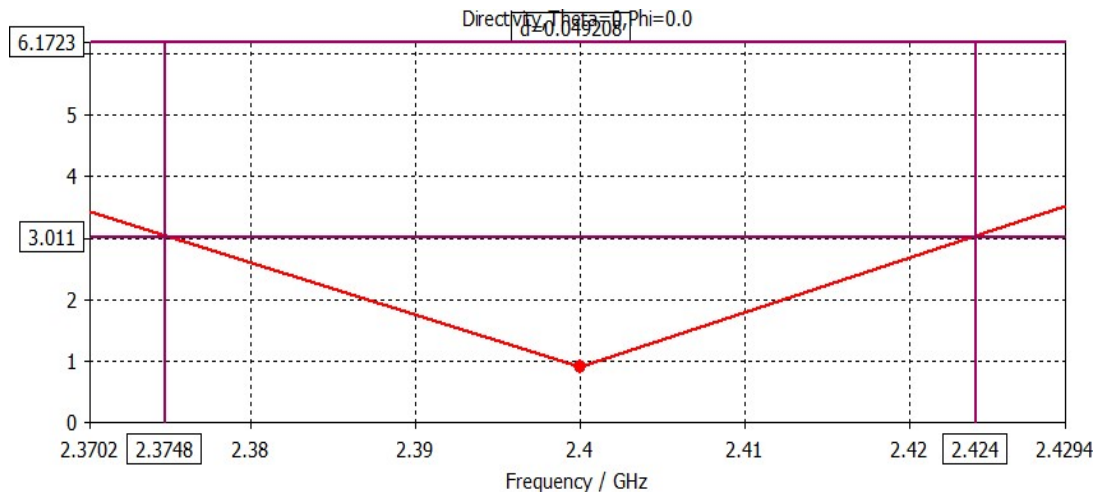


Figure III.14 : RA en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC.

Nous présentons dans la **Figure III.15** le rayonnement de l'antenne MIMO à PC. D'après la figure, nous pouvons constater un gain de **6.19 dB** autour la fréquence de 2.4 GHz. Cette valeur témoigne d'une bonne directivité et d'une efficacité de rayonnement optimisée du système.

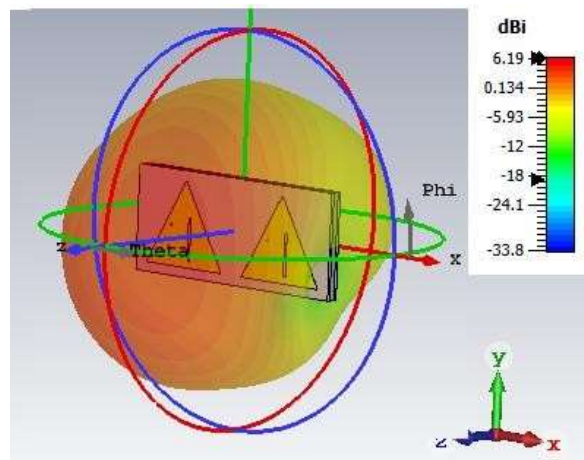


Figure III.15: Rayonnement en 3D de l'antenne MIMO à PC.

Afin d'améliorer le coefficient de transmission et de réduire davantage le couplage mutuel entre les éléments rayonnants du système MIMO, plusieurs approches peuvent être envisagées. Une première solution consiste à augmenter légèrement l'espace entre les antennes, afin de réduire l'interaction électromagnétique directe [4].

III.3.4.1 Modification de la distance (d) entre les patches

La distance (d) entre les patches a été modifiée afin d'évaluer son effet sur les performances de l'antenne. Les valeurs analysées sont : 62,54 mm, 63 mm, 64,7 mm, 67,9 mm et 70,3 mm, comme le montre la **Figure III.16**.

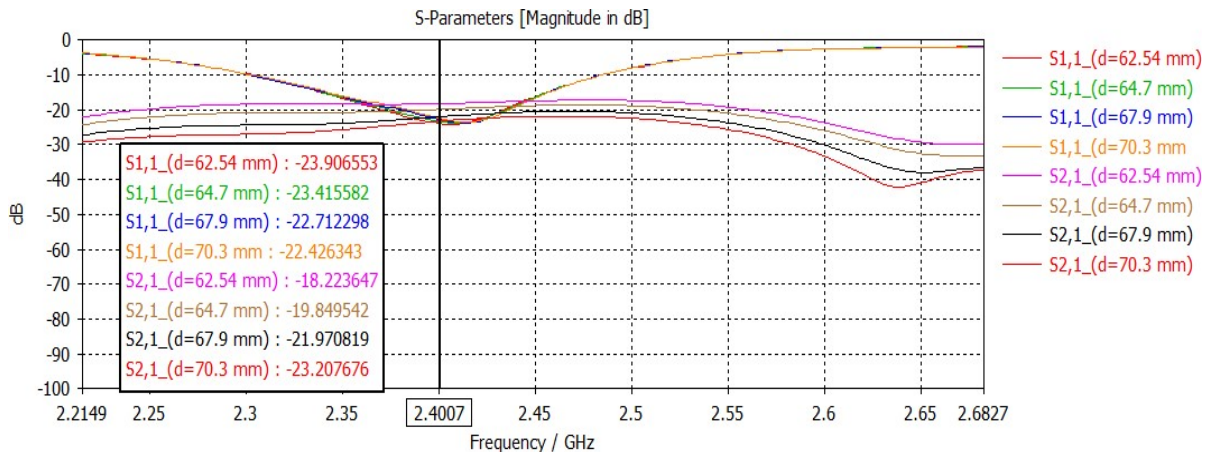


Figure III.16: Variation des Paramètres S pour les différentes valeurs (d).

Cette variation influence les paramètres S, en particulier l'isolation (S21). Une distance trop faible accentue les interférences entre les éléments, tandis qu'un espacement plus important améliore l'isolation et la stabilité du rayonnement. La distance optimale, offrant un bon compromis entre isolation et rapport axial, est atteinte pour **d = 70,3 mm**, comme illustré dans la **Figure III.17**.

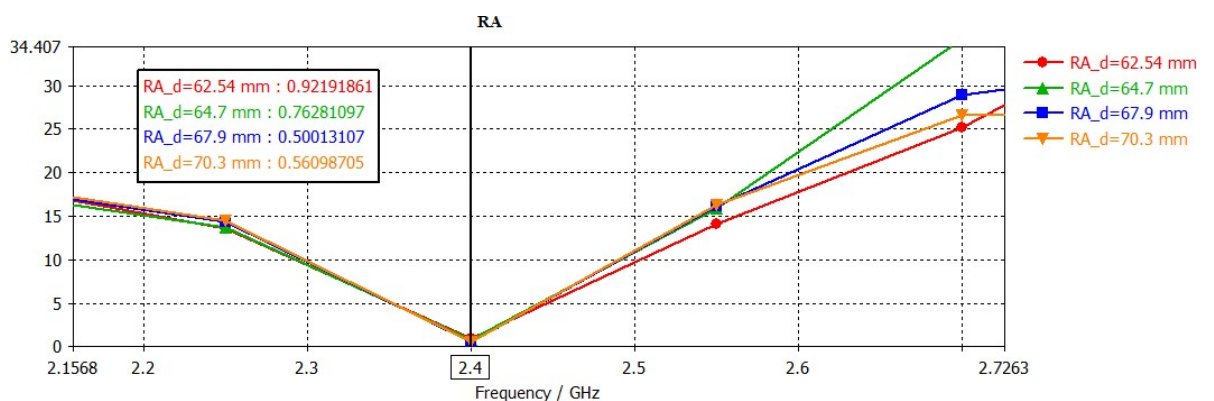


Figure III.17: Variation du RA pour les différentes valeurs (d).

Alternativement, l'intégration de structures de découplage telles que defected ground structure (DGS) [5,6], les lignes de neutralisation [7], les métamatériaux [8,9], et des fentes au niveau du plan de masse peuvent considérablement améliorer l'isolation sans augmenter la taille du système [10]. Cependant, cette dernière a été adoptée dans ce travail pour améliorer nettement l'isolation entre les antennes du système MIMO.

III.3.5 Conception du système MIMO polarisé circulairement avec une fente au niveau du plan de masse

Afin de limiter le couplage mutuel entre les deux éléments rayonnants, une fente rectangulaire transversale de dimensions $d_1 \times d_2$ mm² a été introduite au centre du plan de masse, entre les deux antennes (**Figure III.18**). Des études paramétriques ont été menées sur la longueur, la largeur et la position de la fente, dans le but d'optimiser son effet sur la réduction du couplage électromagnétique, tout en préservant les autres performances du système telles que l'adaptation d'impédance, la polarisation circulaire et le gain.

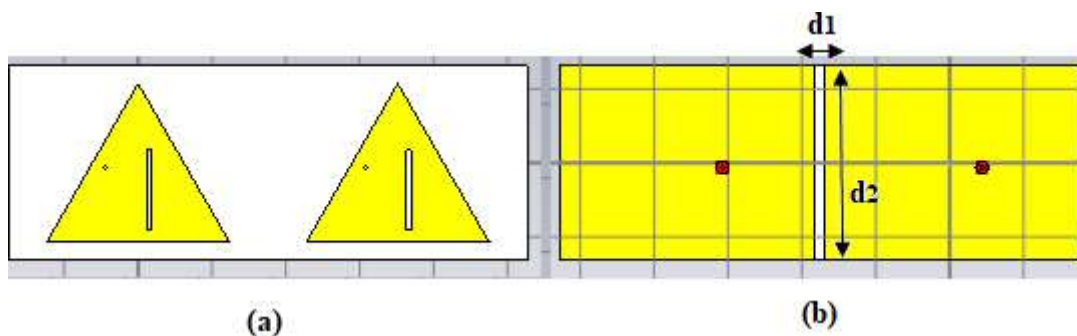
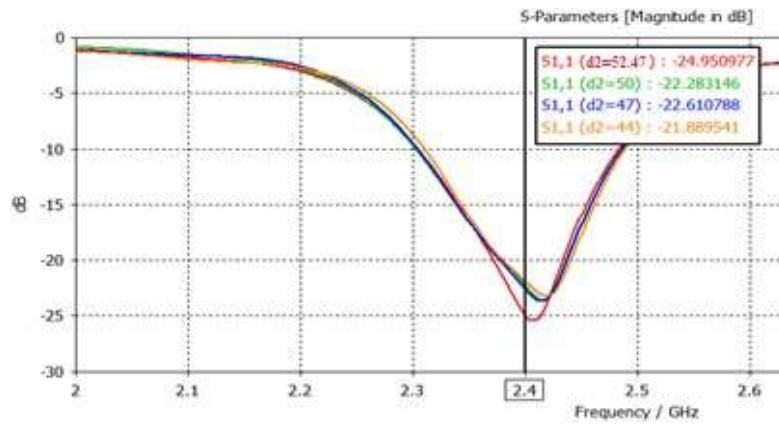


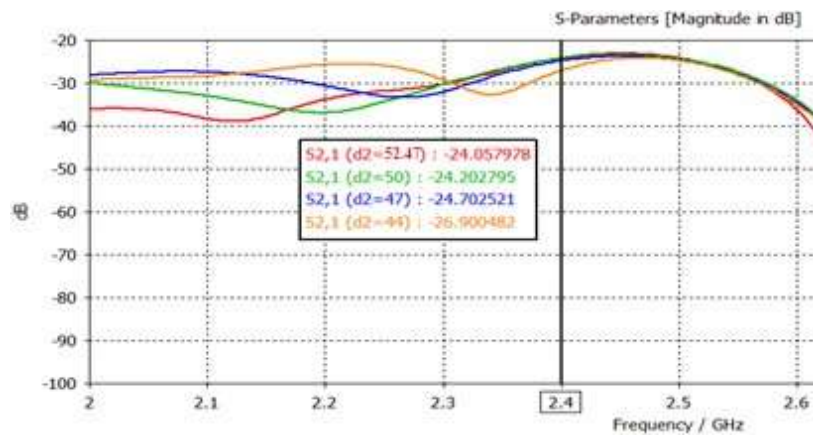
Figure III.18 : Géométrie de l'antenne MIMO à PC avec fente.

II.3.5.a Etude paramétrique sur la longueur de la fente

Dans un premier temps, l'influence de la longueur d_2 de la fente rectangulaire a été analysée en maintenant constante sa largeur ainsi que sa position centrale entre les deux antennes. Les résultats des paramètres S et du rapport axial (RA), présentés respectivement dans les **Figures (III.19 - III.20)**, montrent que la réduction de la longueur de la fente améliore l'isolation entre les deux ports, atteignant une valeur de $S_{21} = -26,9$ dB, tout en maintenant une bonne adaptation d'impédance $S_{11} < -10$ dB et un rapport axial inférieur à 3 dB à la fréquence de fonctionnement. En perturbant les courants de couplage via des ouvertures dans le plan de masse, cette solution simple et peu encombrante permet de réduire le couplage sans compromettre les performances de rayonnement ni la polarisation circulaire.



(a)



(b)

Figure III.19: Paramètre S en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_2).

a: S_{11} , b: S_{21}

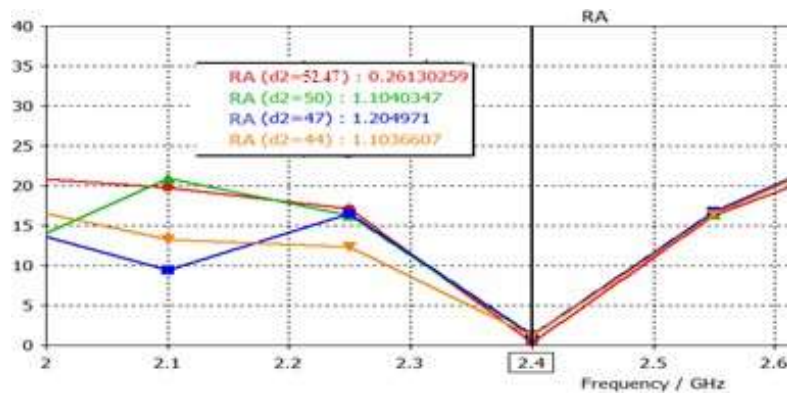
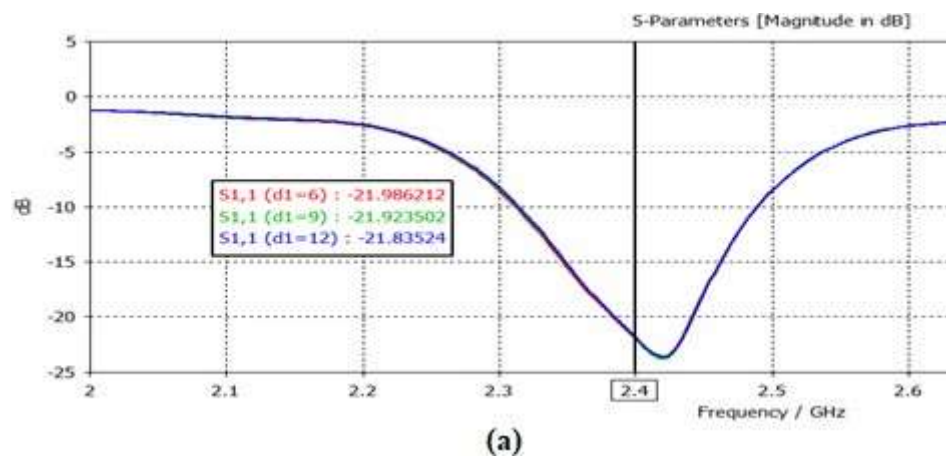


Figure III.20 : Rapport axial en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_2).

III.3.5.b Etude paramétrique sur le largeur de la fente (d_1)

Une étude paramétrique a été menée sur la largeur d_1 de la fente, tout en maintenant constante sa longueur optimale ($d_2=44$ mm). Les résultats de simulation en paramètres S présentés sur la **Figure III.21** montre que l'augmentation de cette dernière n'a qu'un effet limité sur l'adaptation, avec un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB. Le couplage mutuel entre les deux antennes diminue légèrement, comme en témoigne la baisse progressive de S_{21} , ce qui traduit une amélioration modérée de l'isolation pour une valeur $d_1=12$ mm. En parallèle, le rapport axial (RA) tend à augmenter légèrement, tout en restant inférieur à 3 dB (**Figure III.22**), ce qui confirme le maintien d'une polarisation circulaire acceptable dans la bande de fonctionnement. Ces résultats soulignent que la largeur de la fente peut être ajustée avec une certaine tolérance, à condition de surveiller son effet sur la circularité du champ rayonné.



Parametre S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents valeurs (d_1).

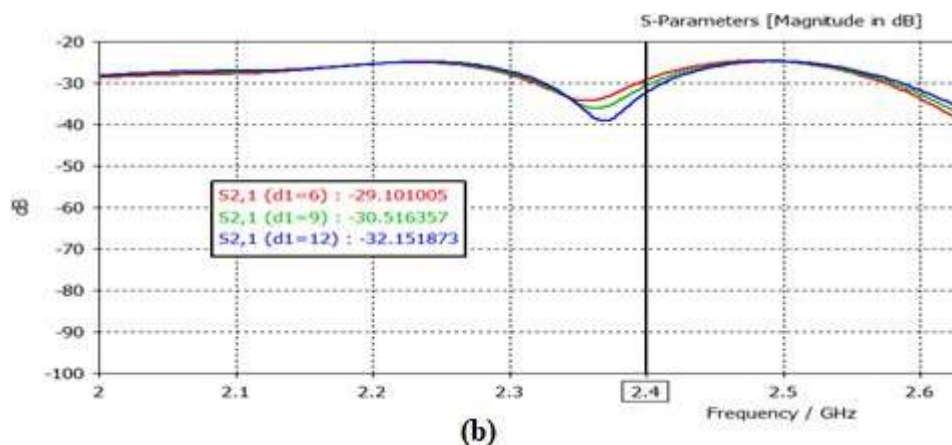


Figure III.21 : Paramètre S en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_1).

a: S_{11} , b: S_{21}

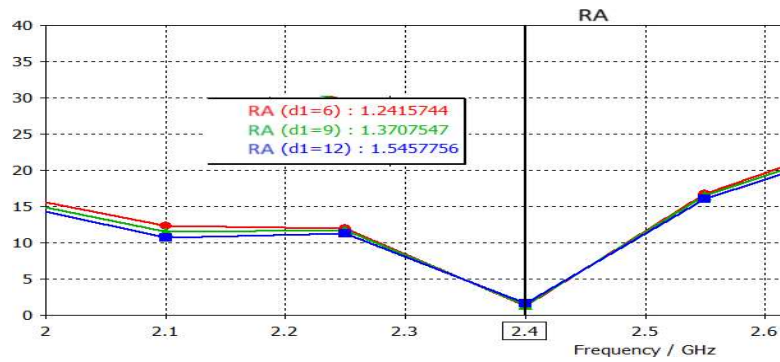


Figure III.22 : Rapport axial en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs (d_1).

III.3.5.c Etude paramétrique sur la position de la fente

Comme le montrent les Figures III.23 et III.24, le décalage latéral de la fente vers la gauche par rapport au centre permet d'améliorer l'isolation entre les deux antennes, avec une réduction de S_{21} tout en maintenant un bon S_{11} et une polarisation circulaire satisfaisante ($RA < 3$ dB). Cette configuration pour laquelle la fente est décalée de **3 mm** du centre optimise la perturbation des courants de couplage, tout en préservant les performances globales du système.

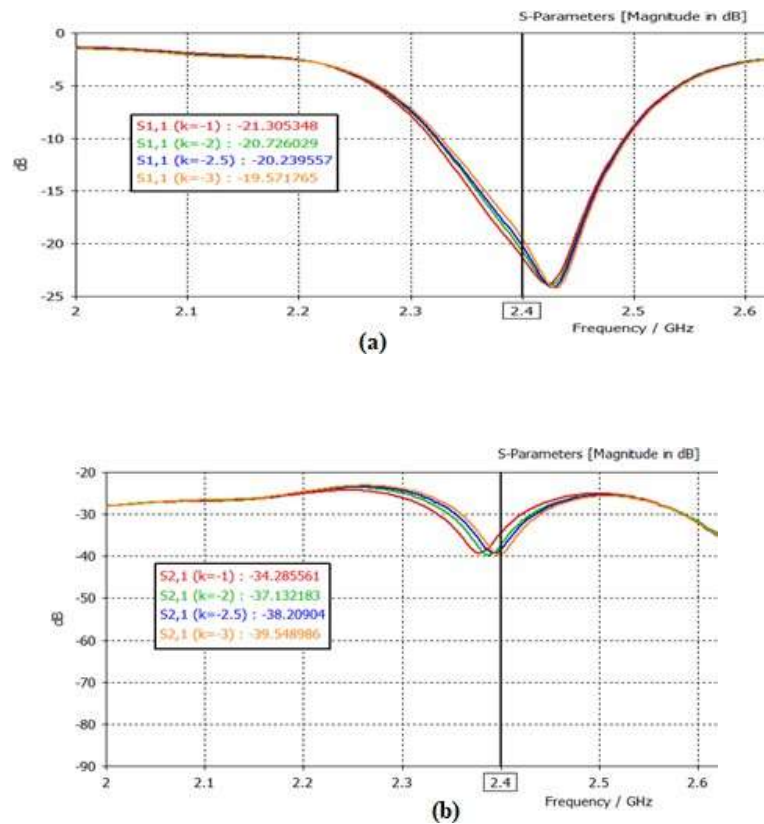


Figure III.23 : Paramètre S pour différentes positions de la fente. a: S_{11} , b: S_{21} .

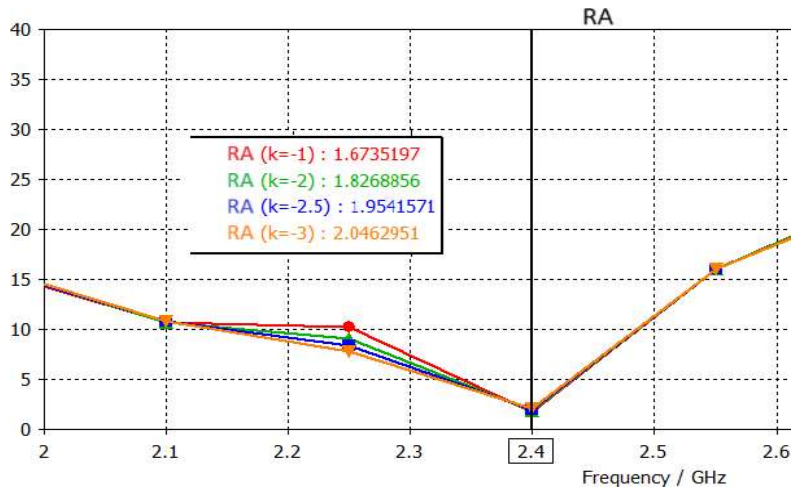
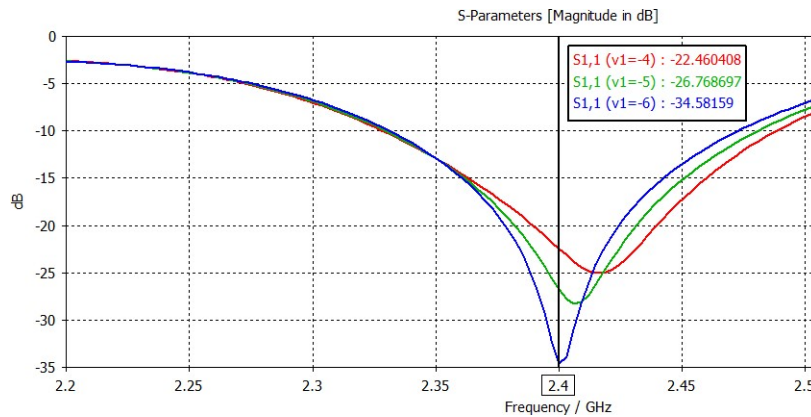


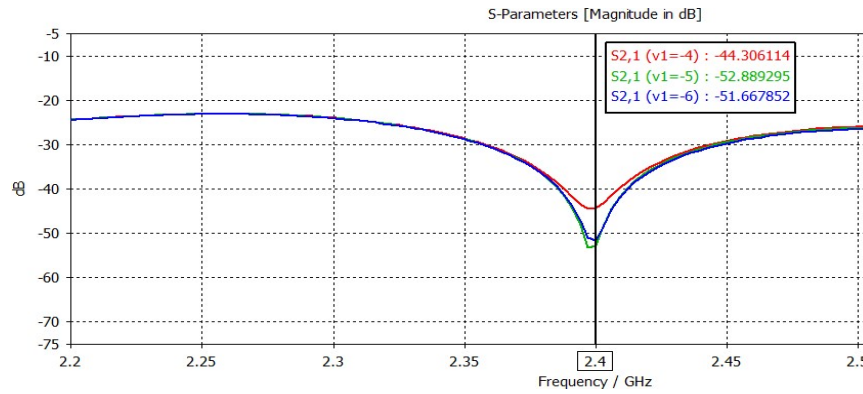
Figure III.24 : RA en fonction de la fréquence pour les différentes positions de la fente.

III.3.5.d Etude paramétrique sur la position de la fente au niveau du patch

Le positionnement optimal de la fente sur le patch triangulaire a permis d'améliorer simultanément la polarisation circulaire ($RA < 3$ dB), l'adaptation d'impédance S_{11} et l'isolation entre les ports S_{21} , Comme le montre les Figures (III.25-III.26). Ces résultats confirment l'importance de la localisation de la fente pour optimiser les performances globales du système sans compromettre sa compacité.



(a)



(b)

Figure III.25: Parametre S en fonction de la fréquence pour différentes positions de la fente au niveau du patch. a) S11, b) S21

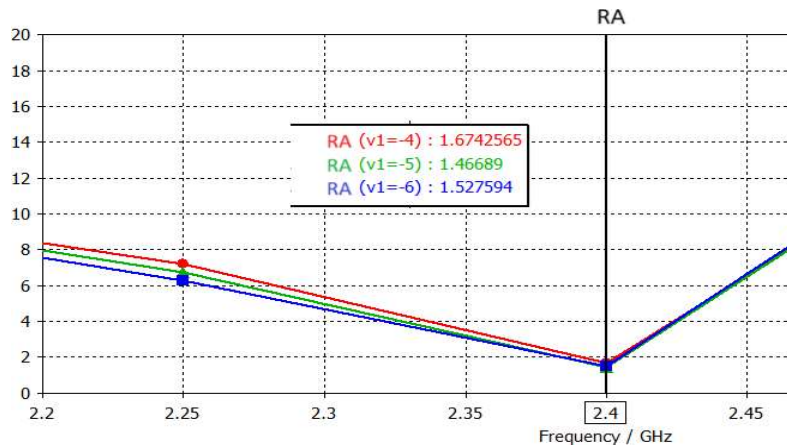


Figure III.26 : Rapport axial pour différentes positions de la fente au niveau du patch.

La structure optimale obtenue à l'issue des différentes phases d'optimisation est représentée sur la **Figure III.27**. La fente transversale, au niveau du plan de masse, permet de réduire le couplage entre les antennes. Elle agit comme une barrière électromagnétique, perturbant les courants de surface responsables du couplage. Cette configuration présente des performances remarquables avec un coefficient de réflexion $S_{11} = -34$ dB traduisant une excellente adaptation d'impédance, avec une bande passante à -10 dB de **140 MHz**, s'étendant de 2,33 GHz à 2,47 GHz. Une isolation très élevée $S_{21} = -51.19$ dB montrant un **couplage quasi inexistant** entre les deux ports (**Figure III.28**).

La bande passante du rapport axial, mesurée à 3 dB, est de l'ordre de **61 MHz**. Elle s'étend de 2,3534 GHz à 2,4145 GHz, ce qui confirme une polarisation circulaire bien maîtrisée

dans cet intervalle, favorable à la robustesse de la liaison dans les environnements à trajets multiples. Ces résultats valident l'efficacité de la conception proposée pour des systèmes MIMO compacts à polarisation circulaire, adaptés aux applications sans fil à 2,4 GHz. Le gain obtenu = **5,2 dB** comme le montre la **Figure III.29**, confirme également le respect des critères de performance attendus pour les systèmes MIMO.

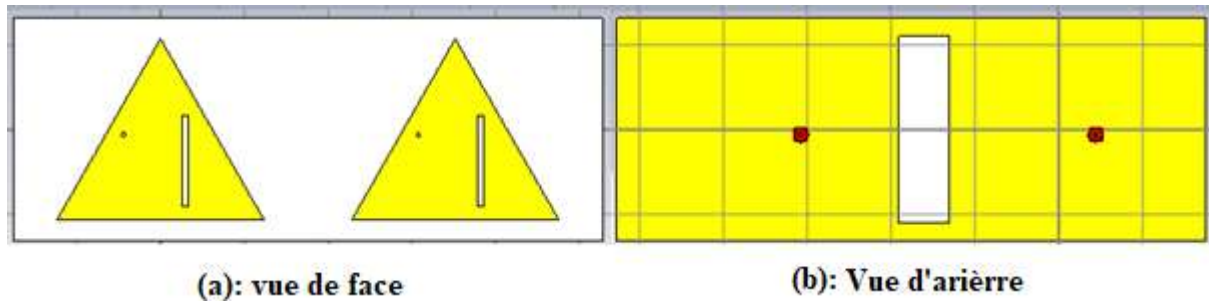


Figure III.27 : Géométrie finale du système MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

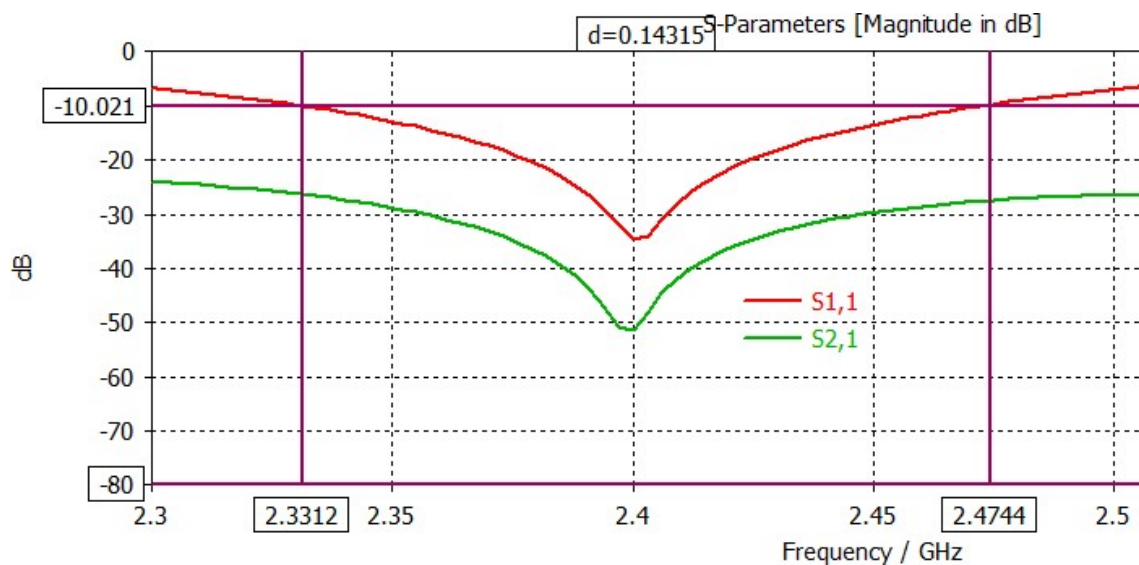


Figure III.28 : Paramètres S de l'antenne MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

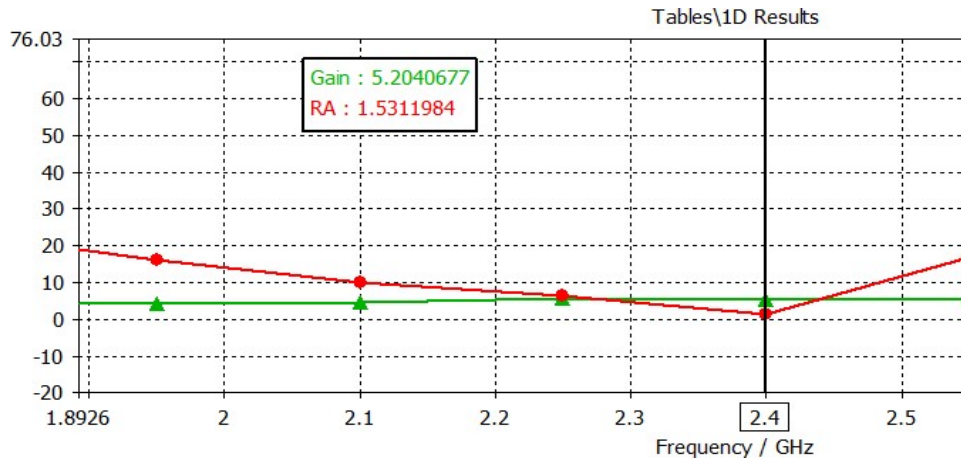


Figure III.29: RA et gain de l'antenne MIMO à PC avec fente au niveau du plan de masse.

III.3.5.e Coefficient de corrélation (ECC), gain de diversité (DG)

Le paramètre qui permet de définir l'isolation et la corrélation dans un système MIMO est le ECC (Envelop Correlation Coefficient). C'est une mesure qui évalue la corrélation entre les diagrammes de rayonnement ou les performances de deux antennes ou plus dans un système de communication sans fil. Un ECC proche de 1 indique une **forte** corrélation, ce qui signifie que les antennes ont des performances similaires et sont fortement **couplées**. En revanche, un ECC proche de 0 indique une faible corrélation, ce qui signifie que les antennes ont des performances différentes et sont relativement **indépendantes** les unes des autres.

Avoir un ECC faible est donc très important pour garantir la robustesse de l'antenne MIMO proposée. La valeur du ECC peut être calculée à l'aide de la formule suivante [11].

$$ECC = \frac{|\int \int_{4\pi} (\vec{F}_i(\theta, \phi)) \times (\vec{F}_j(\theta, \phi)) d\Omega|^2}{\int \int_{4\pi} |(\vec{F}_i(\theta, \phi))|^2 d\Omega \int \int_{4\pi} |(\vec{F}_j(\theta, \phi))|^2 d\Omega}$$

où $\vec{F}_i(\theta, \phi)$ décrit le diagramme de rayonnement en 3D lorsque l'antenne i est excitée et $\vec{F}_j(\theta, \phi)$ décrit le diagramme de rayonnement en 3D lorsque l'antenne j est excitée.

Ω représente l'angle solide.

Sur la **Figure III.30**, on représente le coefficient de corrélation de l'antenne MIMO à PC simulé à **2.4 GHz**. Le $ECC=1,2 \times 10^{-7}$ obtenu à 2,4 GHz indique une excellente indépendance entre les deux antennes du système MIMO, ce qui valide l'efficacité de la technique d'isolation utilisée. Ce résultat garantit une meilleure qualité de transmission, une réduction des interférences et une fiabilité accrue du lien radio.

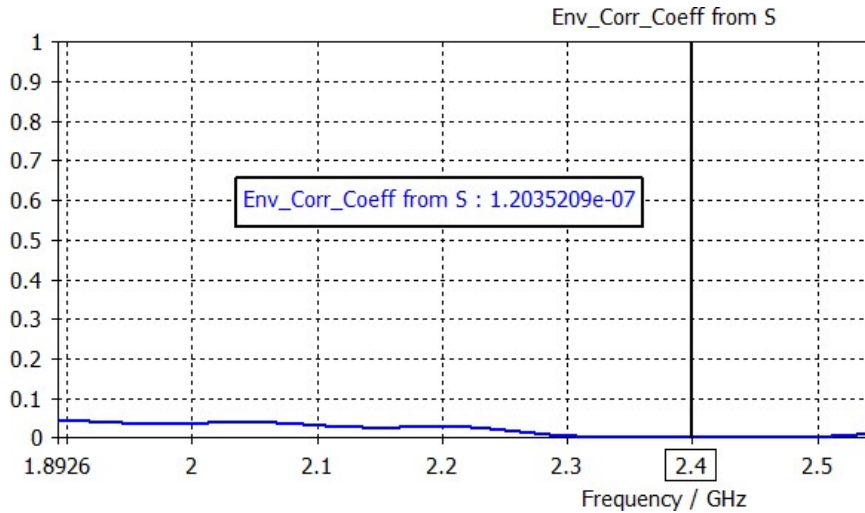


Figure III.30 : ECC en fonction de la fréquence du système MIMO à PC.

Par ailleurs, Le gain de diversité (DG) est un paramètre clé pour l'évaluation des performances d'un système MIMO. Exprimé en décibels, il reflète l'amélioration de la qualité du signal et la réduction des erreurs de transmission grâce à l'utilisation de plusieurs antennes. Plus le DG est élevé, meilleures sont les performances du système dans les environnements à trajets multiples. La diversité est donnée par la formule $DG = 10 - \sqrt{1 - (ECC)^2}$ [11].

La **Figure III.31** présente le gain de diversité en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO. Le système MIMO à PC proposé présente un gain de diversité élevé, atteignant 10 dB à 2,4 GHz et restant supérieur à 9,99 dB sur toute la bande de fonctionnement, ce qui satisfait les exigences de robustesse des applications sans fil.

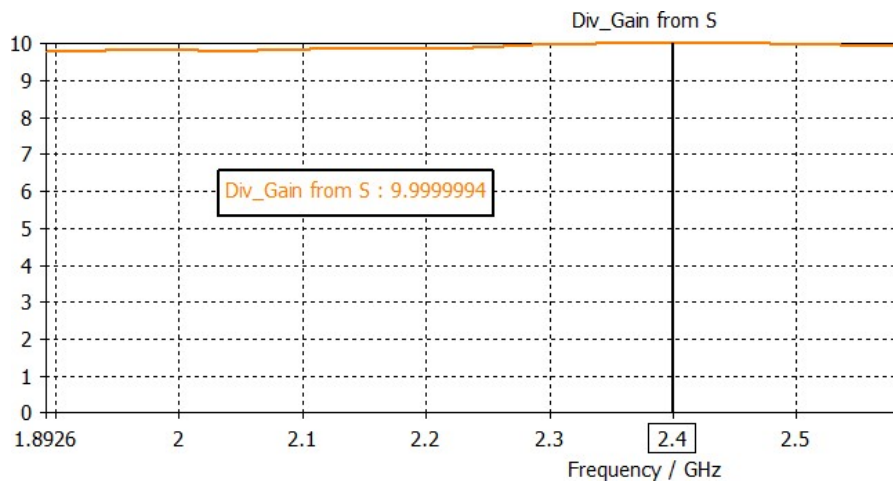


Figure III.31 : DG en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO à PC proposée.

Les performances des structures MIMO sans et avec fente sont résumées dans le **Tableau III.5**.

| Paramètres | MIMO PC | MIMO PC avec fente |
|----------------------------|-----------------------|--|
| S₁₁ (dB) | -22.52 | -34.55 |
| BP à -10 dB (MHz) | 182.58 | 143.15 |
| S₂₁(dB) | -23.2 | -51.19 |
| BP du RA à 3 dB | 45.18 | 62.16 |
| Gain (dB) | 5.72 | 5.20 |
| ECC | 2.75×10^{-5} | 1.2×10^{-7} |
| DG | 9.99 | 9.99 |

Tableau III.5 : Comparaison des performances des configurations MIMO sans et avec fente au niveau du plan de masse.

D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que La fente introduite au niveau du plan de masse agit comme un élément de découplage passif. Son rôle principal est de perturber les courants de couplage qui circulent à la surface du plan de masse et qui sont responsables de l'interaction électromagnétique entre les antennes. En rompant le chemin de ces courants, la fente permet de réduire le couplage mutuel S_{21} , d'améliorer l'adaptation, de stabiliser la polarisation circulaire (meilleur RA) et de réduire le coefficient de corrélation (ECC).

Cependant, cette perturbation n'est pas sélective : elle agit aussi sur une partie des courants utiles, responsables du rayonnement ce qui peut entraîner une légère baisse du gain global de l'antenne. Ce compromis reste généralement acceptable, en particulier dans les systèmes MIMO, où la priorité est souvent donnée à la qualité du canal à savoir une bonne isolation, une faible corrélation et une polarisation stable plutôt qu'à une légère augmentation du gain.

III.3.6 Prototype et mesure de l'antenne MIMO triangulaire à PC

Le prototype de l'antenne MIMO proposé a été réalisées chez **ALMITECH** en respectant les dimensions et les matériaux spécifiés lors des simulations, est montré sur la **Figure III.32**.

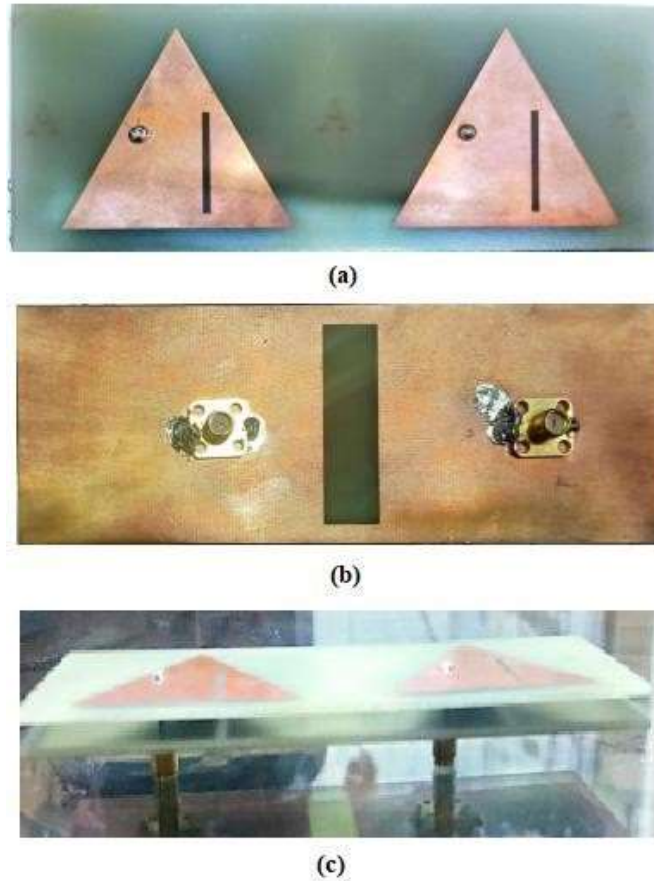


Figure III.32: Prototype de l'antenne MIMO à PC fabriqué. (a) vue de face. (b) vue d'arrière. (c) vue de coté.

Les mesures expérimentales représentées sur les figures ci-dessous ont été effectuées au sein de notre laboratoire de télécommunications, à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) couvrant la bande de 0 à 3 GHz, afin de caractériser les paramètres S de l'antenne, en particulier le coefficient de réflexion S_{11} et le coefficient de transmission S_{21} .

Le S_{11} mesuré atteint une valeur minimale de **-24,66 dB**, comme le montre la **Figure III.33** avec un léger décalage de la fréquence de résonance par rapport à la simulation, traduisant une variation dans l'accord de l'antenne. Le S_{21} illustré sur la **Figure III.34** présente une valeur de **-54,71 dB**, en accord étroit avec les résultats obtenus par simulation dans CST Studio Suite. Les écarts observés entre les données simulées et mesurées peuvent être attribués à plusieurs facteurs : les tolérances de fabrication, les variations des propriétés diélectriques du substrat, les imprécisions dans la soudure des composants RF, ainsi que la qualité et l'état des connecteurs SMA utilisés lors des tests. Ces facteurs, bien que minimes, influencent le comportement électromagnétique réel de l'antenne par rapport au modèle théorique.

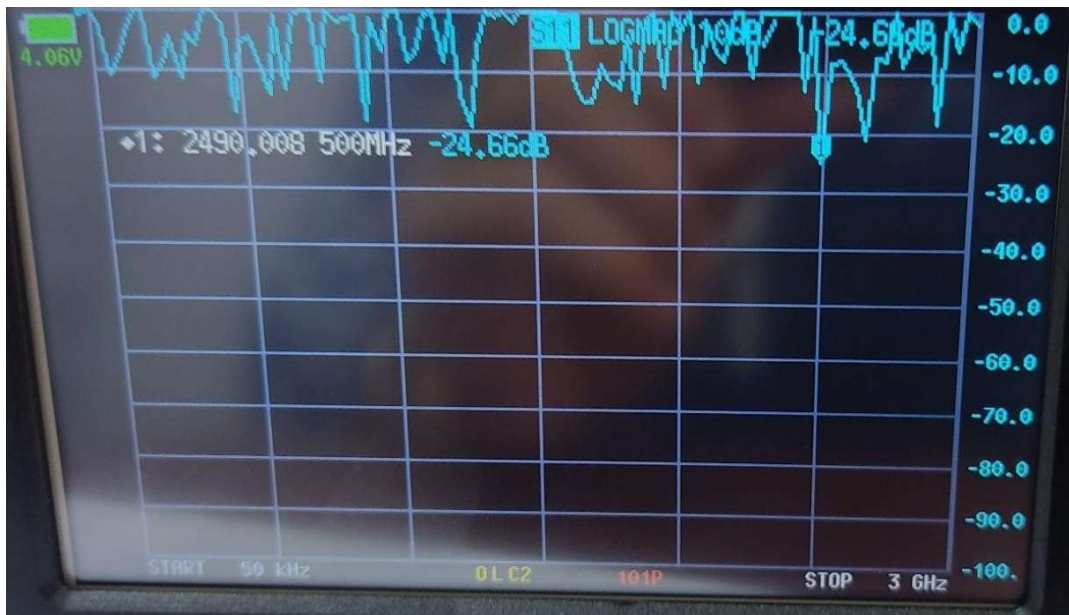
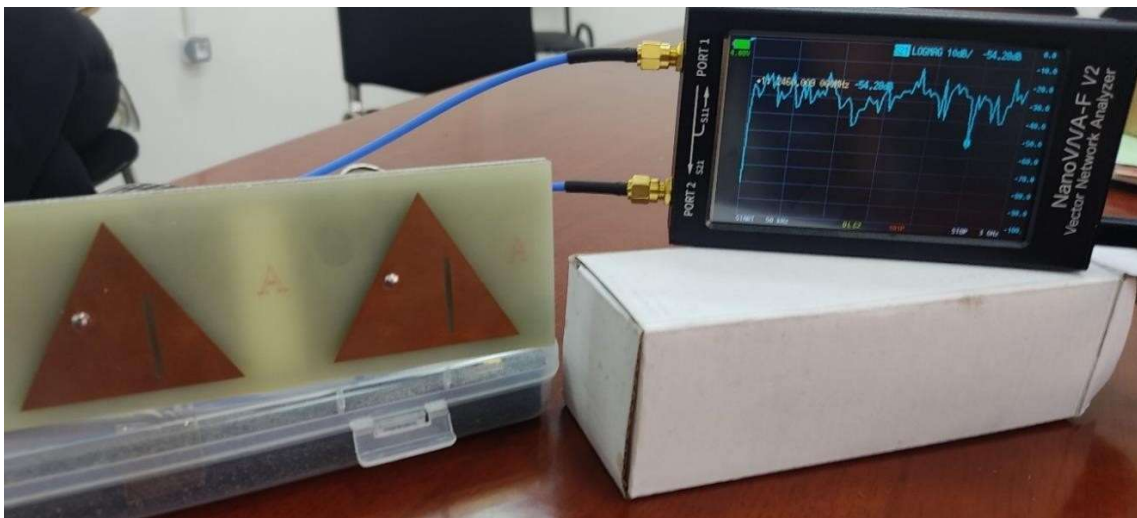
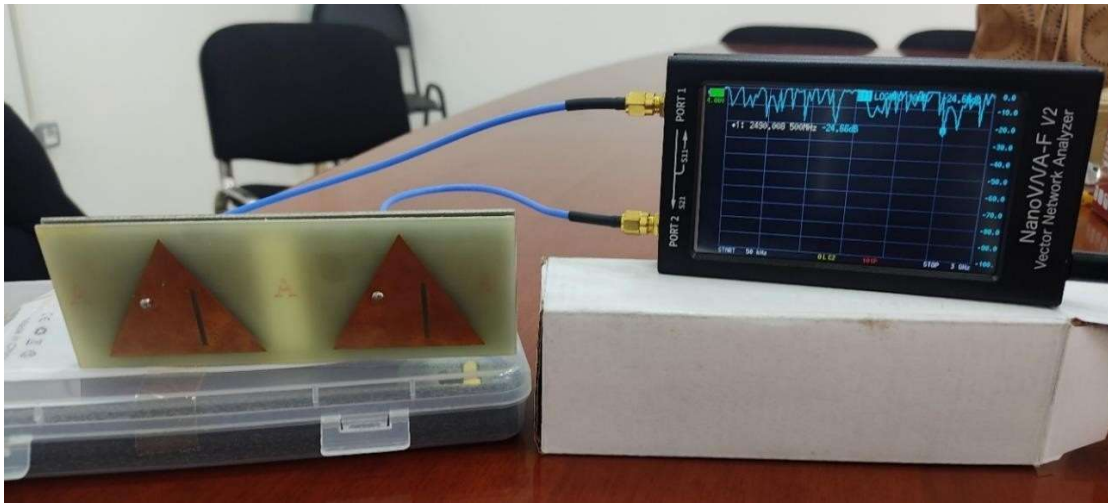


Figure III.33: S_{11} en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO réalisée.



Figure III.34: S_{21} en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO réalisée.

Les performances de l'antenne MIMO à PC développée dans ce travail sont évaluées par comparaison avec celles d'antennes de référence issues de la littérature, notamment en ce qui concerne la réduction du couplage mutuel et le rayonnement en PC. Cette analyse comparative, présentée dans le tableau ci-dessous, permet de situer l'efficacité de la solution proposée au regard des approches existantes.

| Référence | Fréquence de travail (GHz) | S_{21} (dB) | BP (GHz) | ARB CP/LP | Gain(dB) |
|----------------------|-------------------------------|---------------|-----------|-----------|----------|
| [12] | 5.7 | 18 | 5.5–6.1 | 5.52–5.64 | 2.85 |
| [13] | 2.44 | 24.6 | 2.43–2.50 | LP | 4.68 |
| [14] | 3.7 | 15 | 3.3–4.2 | 3.2–4.25 | 2.5 |
| [15] | 5.8 | 20 | 5.5–5.85 | 5.59–5.71 | 3.92 |
| Notre travail | 2.46 | 54.71 | 2.33–2.47 | 2.35–2.41 | 5.2 |

Tableau III.6: Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature.

Comme l'indiquent les données du tableau, la structure proposée se distingue par une isolation particulièrement élevée, un rapport axial bien contrôlé et un gain élevé, ce qui atteste de son efficacité par rapport aux solutions existantes dans la littérature.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception, l'optimisation et l'évaluation d'un système MIMO à deux antennes patch triangulaires équilatérales, rayonnant en polarisation circulaire et opérant dans la bande Wi-Fi de 2,4 GHz.

Après la validation des performances de l'élément unitaire, l'architecture MIMO a été conçue en intégrant deux antennes identiques disposées symétriquement, avec une attention particulière portée à la réduction du couplage mutuel. Afin d'améliorer l'isolation entre les éléments rayonnants, une fente a été introduite au niveau du plan de masse. Les études paramétriques réalisées ont permis d'identifier la configuration optimale en termes de dimensions et de position de la fente, aboutissant à une réduction significative du couplage mutuel (S_{21}), une meilleure adaptation d'impédance (S_{11}), ainsi que le maintien d'une polarisation circulaire stable avec un rapport axial (RA) inférieur à 3 dB.

Ces caractéristiques sont particulièrement adaptées aux applications Wi-Fi, où la stabilité de la polarisation et l'isolation entre éléments sont essentielles pour assurer une communication fiable. Le gain obtenu et la faible corrélation entre les ports respectent les exigences des systèmes MIMO Wi-Fi.

Un prototype a été fabriqué et des mesures expérimentales ont été réalisées pour valider la conception, avec des résultats cohérents avec les simulations, confirmant l'efficacité de l'antenne développée pour les applications sans fil dans la bande Wi-Fi à 2,4 GHz (bande ISM), avec une bande passante qui s'étale de **2,4 à 2,5 GHz**.

Bibliographie

- [1] **ZAAKRI Safa, ZENKOUAR Lahbib, BRI Seddik**, “Conception of Bi-band Rectangular Microstrip Array Antenna”, *Journal of microwaves, optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol.12, pp.23-36, No. 1, June 2013.
- [2] **Dassault Systèmes**, « CST Studio Suite – Electromagnetic Field Simulation Software », document technique interne, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France, 2025.
- [3] **Lee, K. F., Luk, K. M., & Dahele, J.** "Characteristics of the equilateral triangular patch antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 36(11), 1510–1518, 1988.
- [4] **Ijaz Khan et al ."** Designed Circularly Polarized Two-Port Microstrip MIMO Antenna for WLAN Applications" *Appl. Sci.* **2022**, 12, 1068.
- [5] **Ibrahim, A.A.; Abdalla, M.A.; Abdel-Rahman, A.B.; Hamed, H.F.** "Compact MIMO antenna with optimized mutual coupling reduction using DGS". *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* **2014**, 6, 173–180.
- [6]. **Kamal, S.; Chaudhari, A. Printed Meander Line** "MIMO Antenna Integrated with Air Gap, DGS and RIS: Low mutual coupling design for LTE Applications". *Prog. Electromagn. Res. C* **2017**, 71, 149–159.
- [7] **Yang, Y.; Chu, Q.; Mao, C.** "Multiband MIMO antenna for GSM, DCS, and LTE indoor applications". *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1573–1576.
- [8] **Jabire, A.H.; Ghaffar, A.; Li, X.J.; Abdu, A.; Saminu, S.; Alibakhshikenari, M.; Falcone, F.; Limiti, E.** "Metamaterial Based Design of Compact UWB/MIMO Monopoles Antenna with characteristic Mode Analysis. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1542".
- [9] **Raghuraman Selvaraju¹, Mohd H. Jamaluddin¹, *, Muhamad R. Kamarudin², Jamal Nasir³, and Muhammad H. Dahri¹.** "Complementary Split Ring Resonator for Isolation Enhancement in 5G Communication Antenna Array", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 83, 217–228, 2018.

- [10] **Tiwari, R.N.; Singh, P.; Kanaujia, B.K.; Kumar, P.** "Compact circularly polarized MIMO printed antenna with novel ground structure for wideband applications". *Int. J. Microw. Comput. Aided Eng.* 2021, 31, e22737.
- [11] **Sharawi, M.S.** *Printed MIMO Antenna Engineering*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2014
- [12] **Sharma, Y.; Sarkar, D.; Saurav, K.; Srivastava, K.V.** "Three-element MIMO antenna system with pattern and polarization diversity for WLAN applications". *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2016**, 16, 1163–1166.
- [13] **Sharma, K.; Pandey, G.P.** "Two port compact MIMO antenna for ISM band applications". *Prog. Electromagn. Res. C* **2020**, 100, 173–185
- [14] **Dwivedi, A.K.; Sharma, A.; Pandey, A.K.; Singh, V.** "Two Port Circularly Polarized MIMO Antenna Design and Investigation for 5G Communication Systems". *Wirel. Pers. Commun.* 2021, 120, 2085–2099.
- [15] **Sharma, Y.; Sarkar, D.; Saurav, K.; Srivastava, K.V.** "A compact two element MIMO antenna system for pattern and polarization diversity". In *Proceedings of the 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON)*, Varanasi, India, 9–11 December 2016; pp. 660–664.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un système MIMO à polarisation circulaire fonctionnant à 2,4 GHz, basé sur deux antennes patch triangulaires équilatérales. L'objectif principal était d'assurer une bonne adaptation d'impédance, une polarisation circulaire stable et surtout une isolation efficace entre les éléments rayonnants, paramètre critique dans les configurations MIMO.

Après avoir présenté dans le premier chapitre les fondements de la technologie MIMO et les antennes imprimées, puis exposé dans le deuxième chapitre les principes de la polarisation circulaire et ses techniques de génération, le troisième chapitre a été consacré à la conception d'un système MIMO à polarisation circulaire intégrant une fente dans le plan de masse.

Pour atteindre cet objectif, une technique de découplage a été mise en œuvre en introduisant une fente transversale dans le plan de masse. Une étude paramétrique approfondie a été réalisée sur les dimensions et la position de cette fente afin d'optimiser son effet sur le comportement électromagnétique du système. Les résultats obtenus ont montré une nette amélioration des paramètres clés : un coefficient de réflexion inférieur à -30 dB, une isolation inter-antennes S_{21} atteignant -51 dB, un rapport axial inférieur à 3 dB, et un coefficient de corrélation très faible, tout en maintenant un gain satisfaisant d'environ 5,2 dB.

Sur la base de la conception optimisée, un prototype du système MIMO a été réalisé, et des mesures expérimentales ont été effectuées. Les résultats obtenus se sont révélés globalement conformes aux simulations, confirmant la validité du modèle proposé et la robustesse de la méthode de conception. Ces performances confirment l'efficacité de la méthode présentée, qui permet de renforcer la qualité du canal MIMO sans compromettre la compacité ni la simplicité de fabrication.

Ce système s'avère ainsi parfaitement adapté aux applications sans fil modernes, où fiabilité, efficacité spectrale et robustesse de la liaison sont essentielles.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. Une première piste concerne la miniaturisation du système MIMO, afin de le rendre encore plus adapté aux dispositifs compacts et embarqués, sans compromettre les performances

d'isolation ni la polarisation circulaire. Cela pourrait impliquer l'utilisation de techniques telles que les substrats à haute permittivité ou les structures en métamatériaux. Par ailleurs, l'évolution vers un fonctionnement multi-bandes constituerait un atout majeur pour répondre aux besoins des systèmes de communication modernes (Wi-Fi, Bluetooth, IoT, etc.). L'intégration de bandes supplémentaires, tout en maintenant la polarisation circulaire et un bon découplage entre les éléments, représenterait un défi intéressant tant au niveau de la conception que de l'optimisation. Ces évolutions rendraient le système plus polyvalent et compatible avec des applications sans fil de plus en plus exigeantes.