

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : Réseaux et **Télécommunications**

---

**Etude Et Conception D'une Antenne MIMO**  
**Reconfigurable**

---

Présenté par :

**LAHEG Cherifa**

Sous la direction de :

**Pr. BOUALLEG Ahcene**

Juin 2022

## *REMERCIEMENTS*

*Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir aidé à poursuivre mes études et pour la force et le courage qu'il m'a donné tout au long de mon parcours d'études*

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur Pr. BOUALLEG Ahcene pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion*

*Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mes très chers parents et mes sœurs pour leurs encouragements.*

*Je tiens également à témoigner ma gratitude et mes remerciements à tous les collaborateurs du Département Electronique et Télécommunications, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire. Surtout Mlle Boukharouba Soraya*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

## Résumé

Les systèmes de communications sans fil poussés par les besoins en débit, utilisent des bandes de fréquence de plus en plus importantes. Les exigences en matière de débit de données élevé peuvent être satisfaites par un fonctionnement à large bande passante, une meilleure efficacité spectrale et l'incorporation d'un système d'antennes à entrées multiples et sorties multiples (MIMO). Une antenne reconfigurable est une antenne qui peut modifier ses propriétés de fréquence et de rayonnement de manière dynamique, de manière contrôlée et réversible donc elle peut être aussi une solution satisfaisante. C'est dans ce sens que nous avons effectué ce travail qui consiste à la conception et à la réalisation d'une antenne MIMO reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement qui fonctionne dans la gamme de 2.9 GHz jusqu'au 16GHz. La reconfigurabilité est effectuée par l'ajout de deux diodes PIN dans chaque antenne d'émission, tout en conservant le diagramme de rayonnement et la polarisation. L'étude paramétrique de cette antenne était faite par l'utilisation du simulateur CST Studio 2019.

## Abstract

Wireless communications systems, driven by throughput requirements, use increasingly large frequency bands. High data rate requirements can be met by high bandwidth operation, improved spectral efficiency and the incorporation of a multiple-input multiple-output (MIMO) antenna system. A reconfigurable antenna is an antenna that can modify its frequency and radiation properties dynamically, in a controlled and reversible way, so it can also be a satisfactory solution. It is in this sense that we carried out this work which consists in the design and the realization of a reconfigurable MIMO antenna in frequency and in radiation diagram which functions in the range of 2.9 GHz up to 16GHz. Reconfigurability is achieved by adding two PIN diodes in each transmit antenna, while maintaining the radiation pattern and polarization. The parametric study of this antenna was made using the CST Studio 2019 simulator.

## ملخص

تستخدم أنظمة الاتصالات اللاسلكية ، مدفوعة بمتطلبات الإنتاجية ، نطاقات تردد كبيرة بشكل متزايد. يمكن تلبية متطلبات معدل البيانات العالية من خلال تشغيل النطاق الترددي العالي ، وتحسين الكفاءة الطيفية وإدماج نظام هوائي متعدد المدخلات (MIMO) ، والهوائي القابل لإعادة التشكيل هو هوائي يمكنه تعديل خصائص التردد والإشعاع بشكل ديناميكي ، في بطريقة خاضعة للرقابة وقابلة للعكس ، لذلك يمكن أن تكون أيضًا حلاً مرضياً. بهذا المعنى ، قمنا بتنفيذ هذا العمل الذي يتمثل في تصميم وتنفيذ هوائي MIMO قابل لإعادة التكوين في التردد وفي مخطط الإشعاع الذي يعمل في نطاق 2.9 جيجا هرتز حتى 16 جيجا هرتز. يتم تحقيق إعادة التشكيل عن طريق إضافة اثنين من ثنائيات PIN في كل هوائي إرسال ، مع الحفاظ على مخطط الإشعاع

والاستقطاب. تم إجراء الدراسة البارامترية لهذا الهوائي  
باستخدام محاكي CST Studio 2019

### Remerciements

### Résumé

### Sommaire

### Introduction Générale

### Chapitre I : Les Antennes Imprimées, MIMO Et Ultra Large Bande

<b>Introduction</b>	<b>04</b>
I.1 Définition et historique des antennes imprimées	04
I.2 Description de l'antenne imprimée	05
I.3 Les différentes formes d'antennes imprimées	05
I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées	06
I.4.1 L'impédance d'entrée d'une antenne	06
I.4.2 Le coefficient de réflexion (S11)	06
I.4.3 La bande passante (BW)	07
I.4.4 Le diagramme de rayonnement	07
I.4.5 La directivité	07
I.4.6 Rendement de l'antenne	08
I.4.7 Gain d'une antenne	08
I.4.8 Polarisation d'une onde	08
I.5 Techniques d'alimentations	09
I.5.1 Alimentation par ligne microbande	09
I.5.2 Alimentation coaxiale directe	10
I.5.3 Alimentation par couplage électromagnétique	11
I.5.4 Alimentation couplée par ouverture dans le plan de masse	11
I.6 Mise en réseau d'antennes imprimées	12
I.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	13
I.8 Méthodes d'analyse	14
I.8.1 Méthodes analytiques	14
I.8.1.1 Modèle de la ligne de transmission	14
I.8.1.2 Modèle de la cavité	14
I.8.2 Méthodes numériques	15
I.8.2.1 Méthode des éléments finis	15
I.8.2.2 Méthode des différences finies	16
I.8.2.3 Méthode des moments	16
I.9 Systèmes MIMO (Entrées Multiples Sorties Multiples)	17

## Table de matière

---

I.9.1 Architecture MIMO	18
I.9.1.1 Système SISO	18
I.9.1.2 Système MISO	19
I.9.1.3 Système SIMO	20
I.9.1.4 Système MIMO	20
I.9.2 Principe De La Diversité	21
I.9.2.1 La micro diversité	22
I.9.2.2 La macro diversité	22
I.9.3 performances des antennes MIMO en diversité	22
I.9.3.1 Couplage mutuel	22
I.9.3.2 Efficacité totale	22
I.9.3.3 Coefficient de corrélation d'enveloppe	23
I.9.3.4 Gain de Diversité (DG)	24
I.10 La technique de l'Ultra Large Bande	25
I.10.1 Définition	25
I.10.2 La bande de fréquence de 3.1GHz à 10.6GHz	25
I.10.3 Les antennes ultra large bande	25
I.10.4 L'antenne monopôles	26
<b>Conclusion</b>	
<b>Chapitre II : Les Antennes Reconfigurables</b>	<b>30</b>
<b>Introduction</b>	
II.2 Qu'est-ce qu'une antenne reconfigurable ?	
II.3 Comment s'effectue la reconfigurabilité ?	31
II.4 Utilisation des antennes reconfigurables	31
II.5 Techniques de reconfigurabilité	32
II.5.1 Diode varicap	32
II.5.2 Diode PIN.	33
II .5.3 MEMS (Système Micro électromécanique)	34
II.5.4 Matériaux agiles	36
II.6 Classification des antennes reconfigurables	37
II.6.1 Antennes reconfigurables en fréquence	37
II.6.1.1 La modification géométrique	37
II.6.1.2 Court-circuit commutable	38
II.6.1.3 Fente ou ligne commutables	38

## Table de matière

---

II.6.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement	39
II.6.2.1 Utilisation des diodes PIN	39
II.6.2.2 Utilisation de MEMS	40
II.6.2.3 Utilisation de photoconducteurs	41
II.6.3 Antenne reconfigurable en polarisation	42
<b>Conclusion</b>	
<b>Chapitre III : Etude et conception d'une Antenne MIMO reconfigurable</b>	
<b>Introduction</b>	
III.1 Choix D'outil De Simulation	45
III.2 Présentation Du Logiciel Microwave Studio De CST	45
III.3 Modélisation De La Diode PIN	46
III.3.1 Modélisation par un plot métallique	46
III.3.2 Modélisation par un circuit RLC équivalent	47
III.3.3 Modélisation via l'utilisation d'un commutateur commandé en tension	47
III.4 Conception Et Réalisation D'une Antenne MISO Reconfigurable	47
III.4.1 La géométrie de l'antenne de base :	47
III.5 Résultats De Simulation	49
III.5.1 Structure de base (Antenne MISO 3x1)	49
III.5.2 création des fentes et modification de la géométrie	50
III.6 La Reconfigurabilité En Fréquences	52
III.6.1 Utilisation de la diode PIN	52
III.6.2 Utilisation d'un plot métallique	54
III.7 Les Performance De L'antenne MIMO Reconfigurable	56
III.7.1 Le coefficient d'isolation	56
III.7.2 Le coefficient de corrélation d'enveloppe	56
III.8 La Reconfigurabilité En Diagramme De Rayonnement	56
III.9 Validation Expérimentale	58
III.9.1 Description de la machine LPKF ProtoMat S103	58
III.9.2 Appareil de mesure analyseur de réseaux	59
III.9.3 -Le prototype réalisé	60
III.9.4 Mesures expérimentales	62
III.9.4.1 Mesure du coefficient de réflexion :	62
III.10 Comparaison De L'antenne MIMO Avec D'autres Antennes De Références	64
<b>Conclusion</b>	

**Chapitre I**

**Figure I.1 :** Structure d'une antenne imprimée.....5

**Figure I.2 :** types d'éléments rayonnants.....6

**Figure I.3 :** Le diagramme de rayonnement.....7

**Figure I.4 :** Alimentation par ligne microbande. ....10

**Figure I.5 :** Alimentation par une ligne microbande (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche (d) adapté par ligne quart d'onde (e) couplée par un écart.....10

**Figure I.6:** Alimentation coaxiale directe.....11

**Figure I.7:** Alimentation par couplage électromagnétique.....11

**Figure I.8:** Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.....12

**Figure I.9:** L'alimentation par proximité de l'antenne imprimée.....13

**Figure.I.10 :** Principe du MIMO.....18

**Figure I.11:** Dispositif MISO.....20

**Figure I.12:** Dispositif SIMO.....21

**Figure I.13:** Dispositif MIMO.....21

**Figure I.14 :** Les différentes formes d'antennes monopôle imprimées.....26

**Chapitre II**

**Figure II.1 :** Différents niveaux de reconfigurabilité : (a) Système adaptatif par traitement numérique ; (b) Réseau d'antennes phasés et (c) antennes reconfigurables.....31

**Figure II.2 :** Les différentes techniques de reconfigurabilité.....32

**Figure II.3 :** Schéma équivalent d'une diode Varicap.....33

**Figure II.4 :** Schéma équivalent simplifié d'une diode PIN (a) Polarisation directe ; (b) Polarisation inverse.....34

**Figure II.5 :** Exemples de composants MEMS.....35

**Figure II.6 :** Prototype de l'antenne proposée : (a) Vue de dessus et (b) Vue de dessous.....36

**Figure II.7:** Antenne fractale reconfigurables en fréquence des commutateurs RF MEMS.....37



## Liste Des Figures

---

<b>Figure II.8 :</b> Exemple d'antenne patch à court-circuit commutables.....	38
<b>Figure II.9 :</b> Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence : (a) Géométrie de l'antenne ; (b) Position des diodes PIN sur le dipôle replié.....	39
<b>Figure II.10 :</b> Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF.....	40
<b>Figure II.11:</b> Diagrammes de rayonnement à 3,5 GHz selon les trois modes de configuration.	40
<b>Figure II.12 :</b> Antenne à spirale reconfigurable en diagramme.....	41
<b>Figure II.13 :</b> Photographie de l'antenne dipôle commutée.....	42
<b>Figure II.14 :</b> (a) Antenne patch à bord commuté et (b) Antenne PASS de l'UCLA.....	43
<b>Chapitre III</b>	
<b>Figure III.1:</b> l'interface du CST studio.....	46
<b>Figure III.2:</b> Schéma équivalent du commutateur.....	47
<b>Figure III.3:</b> Structure de l'antenne de base.....	48
<b>Figure III.4 :</b> le coefficient de réflexion de l'antenne proposée (a)-S <sub>22</sub> de l'antenne de réception ultra large bande (b)-S <sub>11</sub> , S <sub>33</sub> , S <sub>44</sub> des éléments rayonnants.....	50
<b>Figure III.5 :</b> Structure de l'antenne modifiée (a)- Création des fentes (b)- Insertion des diodes PIN (c)- insertion des plots métalliques.....	52
<b>Figure III.6 :</b> comparaison entre le plot métallique et la diode PIN à l'état OFF.....	53
<b>Figure III .7 :</b> comparaison entre le plot métallique et la diode PIN à l'état ON.....	53
<b>Figure III.8 :</b> les deux courbes de l'états OFF et ON des diodes.....	55
<b>Figure III.9 :</b> Isolation entre les différents ports de l'antenne MISO.....	56
<b>Figure III.10 :</b> Coefficients de corrélation d'enveloppe (ECC) simulés de l'antenne MIMO à 3 éléments.....	57
<b>Figure III.11:</b> Diagrammes de rayonnement de l'antenne MIMO à la fréquence 9.41GHz (état OFF).....	58
<b>Figure III.12:</b> Diagrammes de rayonnement de l'antenne MIMO à la fréquence 8.24GHz (état ON).....	58

## Liste Des Figures

---

<b>Figure III.13 :</b> La machine à gravure LPKF Protomat S103.....	60
<b>Figure III.14:</b> Analyseur de réseau vectoriel.....	61
<b>Figure III.15:</b> prototype réalisé (a) l'antenne MISO avec plots métalliques, (b) l'antenne MISO sans plots métalliques, (c) vue de dessous .....	62
<b>Figure III.16:</b> Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S11 à l'État ON.....	63
<b>Figure III.17:</b> Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S11 à l'État OFF.....	64
<b>Figure III.18:</b> Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S22.....	64

**Chapitre II**

**Tableau II.1:** Comparaison de différents composants de commutation.....35

**Chapitre III**

**Tableau III.1:** les différents paramètres de l'antenne proposée.....49

**Tableau III.2:** L'antenne MISO modifiée et son coefficient de réflexion.....51

**Tableau III.3:** Les résultats de simulation de l'état ON et OFF par l'utilisation d'un plot métallique.....55

**Tableau III. 4 :** comparaison des résultats obtenus.....65

**Tableau III. 5 :** étude comparative de l'antenne MISO conçue avec d'autres antennes réalisées précédemment.....66

## Liste Des Abréviations

---

**MIMO:** Multiple-input and multiple-output

**MSA :** Microstrip Antenna

**CST:** computer large bande

**Bw :** La bande passante

**MEMS:** Micro Electro Mechanical Systems

**F.D.T.D :** Finit Différence Time Domain

**FIT :** la méthode d'intégration finie

**FEM :** la méthode des éléments finie

**MLT :** Le modèle de la ligne de transmissions

**MoM :** La méthode des moments

**SISO:** single-input single-output

**MISO:** Multiple-input and single-output

**SIMO:** Single-input and multiple-output

**SNR :** le rapport signal sur le bruit

**MG :** gain moyen

**ECC :** Enveloppe Corrélation Coefficient

**DG :** Gain de Diversité

**DSG :** Gain de Diversité du système

**DARPA:** The Defense Advanced Research Project Agency

**ULB :** Ultra large bande

## Liste Des symboles

---

**S11** : Le coefficient de réflexion

**R**: La résistance de l'antenne.

**X**: Reactance de l'antenne.

**f<sub>s</sub>**: La fréquence maximale.

**f<sub>i</sub>**: La fréquence minimale.

**f<sub>c</sub>**: La fréquence centrale.

**P (θ, φ)**: Puissance rayonnée dans une direction quelconque.

**P<sub>o</sub> (θ, φ)**: Puissance rayonnée max.

**P (θ, φ)**: La puissance rayonnée par une antenne.

**P<sub>r</sub>**: La puissance totale rayonnée.

**G**: Le gain de l'antenne.

**P (θ, φ)**: La puissance rayonnée par une antenne.

**P<sub>a</sub>**: Puissance d'entrée.

**P**: La puissance.

**No**: la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz,

**W**: la bande pass ante donnée en Hz.

**P**: le rapport signal sur bruit.

**C**: La capacité du canal

**N<sub>r</sub>**: le nombre d'antenne réceptrice.

**G<sub>θ</sub>(θ,φ) et G<sub>φ</sub> (θ,φ)**: les gains des antennes dans les directions θ et φ.

**F<sub>i</sub>** : est le champ lointain rayonné par le port numéro.

# **Introduction**

## **Générale**

Les télécommunications sans fils connaissent une évolution très rapide dans tous les domaines de la vie quotidienne, cette évolution remarquable dans les réseaux de communication sans fil nécessite l'utilisation des nouvelles technologies pouvant améliorer les performances des échanges de l'information, d'augmenter la couverture, d'améliorer la qualité de service pour les abonnés et d'augmenter le nombre d'utilisateurs. Les antennes imprimées sont plus utilisées dans les systèmes des télécommunications car ils sont implémentés dans de nombreux dispositifs électroniques tels que les téléphones portables, les tablettes .....etc. [1] Grâce à leurs faibles poids, leurs coûts de réalisation et leurs capacités d'intégration aux différentes applications. Plusieurs techniques sont utilisées pour dépasser les limitations des antennes imprimées classiques. Parmi ces techniques on peut citer les techniques de diversité MIMO en utilisant les antennes imprimées reconfigurables [2].

Récemment les antennes reconfigurables ont connu un intérêt énorme grâce à leur capacité à être adaptées à n'importe quel environnement, avec en plus un encombrement réduit. L'adaptation d'antennes reconfigurables à leur environnement radio est réalisée en modifiant l'un ou plusieurs de ses paramètres, tels que la fréquence de résonance, la bande passante, le diagramme de rayonnement, ou la polarisation.

Aussi La technologie entrée multiples et sorties multiples (MIMO) est un sujet important et d'actualité car elle permet d'augmenter la capacité des systèmes sans fil par l'augmentation de nombre d'antennes [3]. Malgré ces nouvelles technologies et leurs avantages elles restent toujours insuffisantes pour arriver à la satisfaction aux exigences croissante. Afin de trouver une solution plus mieux et satisfaisante par apport au précédemment nous allons concevoir une antenne MIMO reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement c'est dans ce sens que nous allons mener ce sujet.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier et de concevoir une antenne MIMO (3x1) reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio version 2019.

Pour atteindre notre objectif, le présent travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les antennes imprimées, les différentes techniques d'alimentation ainsi que les avantages, les inconvénients de ce type d'antennes. Nous avons donné quelques définitions sur les antennes MIMO. Terminant ce chapitre par une petite présentation de la technologie ultra large bande, leurs principales applications ainsi que les différentes antennes ULB.

Dans le deuxième chapitre, nous avons défini au début les antennes reconfigurables. Ensuite, nous avons expliqué les techniques de reconfigurable pour chaque type de reconfigurations (en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation) ainsi nous avons présenté les différents dispositifs de commutations.

Le dernier chapitre est consacré à la conception et à la réalisation d'une antenne MISO (3x1). Dans la première partie de ce chapitre nous avons défini l'outil de simulation utilisé ensuite nous avons présenté les différents types de modélisation de la diode PIN et leur influence sur la reconfigurabilité en fréquence et en diagramme de rayonnement. Dans la dernière partie nous avons réalisé et caractérisé le modèle précédemment simulé.

[1] ADJILA FATIMA, MELATI NADIA, « *Etude Et Conception D'une Antenne Fractale Reconfigurable En Frequence* », Université 8 Mai 1945 Guelma,2019.

[2] M. ANWAR Oualid, Mlle. BENAHMED Hayet, « *Systèmes Multi-Antennes PIFA Pour Des Applications En Diversité* », Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem,2020.

[3] ALLEL MONCEF, AMRAOUI ZAKARIA, « *Conception de nouveau système d'antennes MIMO pour le standard 5G* », Université 8 Mai 1945 Guelma,2021.



**Chapitre I**  
**Généralités sur les**  
**antennes imprimées, les**  
**antennes MIMO et ultra**  
**large bande**

### Introduction

Le développement des télécommunications est devenu important par rapport au passé les contrôles, les commandes à distance, les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes sont miniaturisées. Ce développement a ouvert un large champ concernant l'application et l'utilisation des antennes imprimées en réseau, l'utilisation des techniques ultra large bande pour augmenter la bande passante et l'apparition de la technologie MIMO afin d'améliorer le débit.

L'antenne est l'élément utilisé pour diffuser les ondes électromagnétiques par rayonnement. Elle joue deux rôles réciproques : la transmission et la réception. Ainsi dans une chaîne de communication, elle est toujours le premier élément d'une chaîne de réception ou le dernier élément d'une chaîne d'émission. Il y a une grande variété de technologie utilise les antennes imprimées telle que la technique ultra large bande et la technologie MIMO, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée.

Dans ce chapitre nous avons présenté la technologie des antennes imprimées d'une manière générale, la technologie MIMO et des notions de base sur les antennes ultra large bande. Commencant par une définition et historique des antennes imprimées, leurs caractéristiques et leurs avantages et inconvénients. Ainsi les techniques d'alimentations et les méthodes d'analyses passant par la présentation de la technologie MIMO d'une part et de la technique ultra large bande d'autre part. En fin nous avons clôturé ce chapitre par une brève conclusion.

### I.1 Définition Et Historique Des Antennes Imprimées

L'antenne imprimée (MSA : Microstrip Antenna) ou plaquée n'est pas un concept nouveau. Les premières publications apparaissent en 1953 avec DESCHAMPS et en 1955 avec le dépôt d'un brevet français par GUTTON et BAISSINOT. Les premières réalisations naissent avec Howell et MUNSON en 1970. Ce n'est qu'à partir de cette date que l'on porte un grand intérêt pour ce concept. Le développement prodigieux de ces structures imprimées est lié aux progrès considérables réalisés dans les années 80 dans le domaine de la miniaturisation, de l'intégration des circuits électroniques et surtout des substrats diélectriques à faible pertes. Il convient de souligner leur faible poids, un encombrement réduit, un faible cout de revient et une configuration planaire compatible avec les circuits intégrés et éventuellement conformable.

Ainsi, les études et les réalisations s'intensifient et visent de nombreuses utilisations dans les domaines civile, militaire et médical [1].

### I.2 Description De L'antenne Imprimée

Une antenne imprimée se compose d'une pièce métallique rayonnante sur un coté du substrat diélectrique et un plan de masse de l'autre coté comme représenté sur la figure I.1. L'élément rayonnant est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et il peut prendre n'importe quelle forme possible.

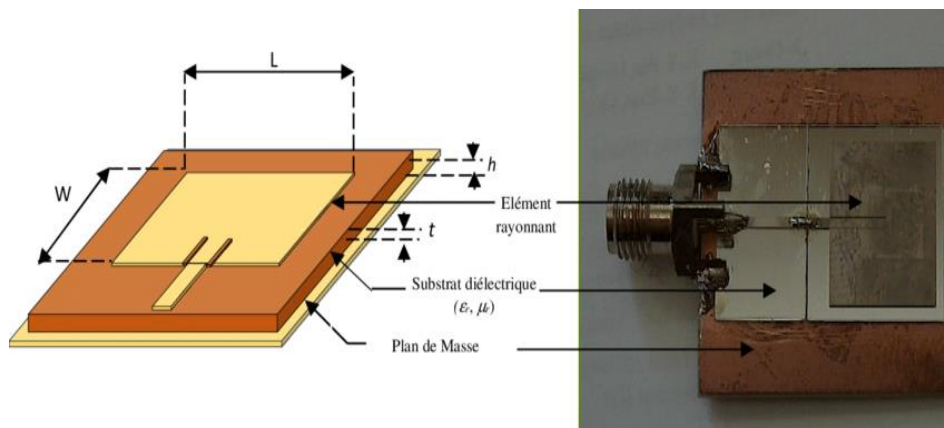


Figure I.1 : Structure d'une antenne imprimée

Le choix de substrat utilisée dans les antennes imprimées dépend de sa permittivité relative ( $1 < \epsilon_r < 12$ ) et de son épaisseur. [1]

### I.3 Les différentes formes d'antennes imprimées

Dans la pratique, les forme des éléments rayonnants peuvent être variées, mais elles influent sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antennes, et donc sur la nature du rayonnement. Dans la pratique généralement on trouve la forme carrés, rectangle et disque mais la forme anneau rarement utilisée [1].

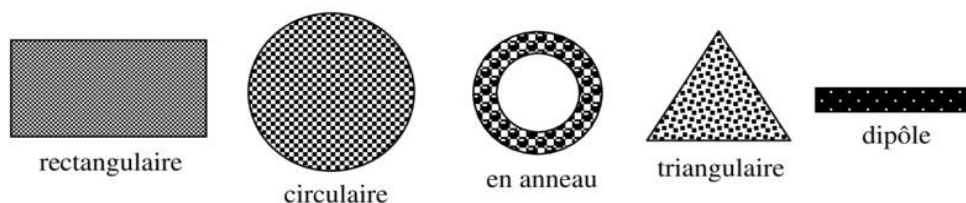


Figure I.2 : types d'éléments rayonnants.

## **I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées**

### **I.4.1 L'impédance d'entrée d'une antenne**

L'impédance d'entrée ( $Z_e$ ) est définie comme le rapport de la tension ( $V_e$ ) sur le courant présentée à l'entrée( $I_e$ ).

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jx \quad (\text{I.1})$$

**Où :**

R =la résistance de l'antenne.

X=Réactance de l'antenne.

### **I.4.2 Le coefficient de réflexion (S11)**

On dit qu'une antenne est parfaitement adapter lorsque son impédance d'entrée ( $Z_e$ ) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation ( $Z_c$ ), sinon on trouve qu'il apparait un coefficient de réflexion (ou s11).

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{I.2})$$

On peut représenter  $\Gamma$  sous la forme en décibel (dB) [5].

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log(|\Gamma|) \quad (\text{I.3})$$

### **I.4.3 La bande passante (BW)**

La bande passante est définie par la formule suivante :

$$BP = f_{\max} - f_{\min} \quad (\text{I.4})$$

Ou bien :

$$BP (\%) = \frac{f_s - f_i}{f_c} \times 100 \quad (\text{I.5})$$

$f_s$  : La fréquence maximale.

$f_i$  : La fréquence minimale.

$f_c$  : La fréquence centrale d'utilisation pour laquelle l'antenne est conçue. [3]

### I.4.4 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique des différentes variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

La fonction caractéristique de rayonnement  $r(\theta, \phi)$  est donnée comme suit :

$$r(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{p_o(\theta, \phi)} \quad (I.6)$$

Où :

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

$P_o(\theta, \phi)$  : puissance rayonnée max. [17]

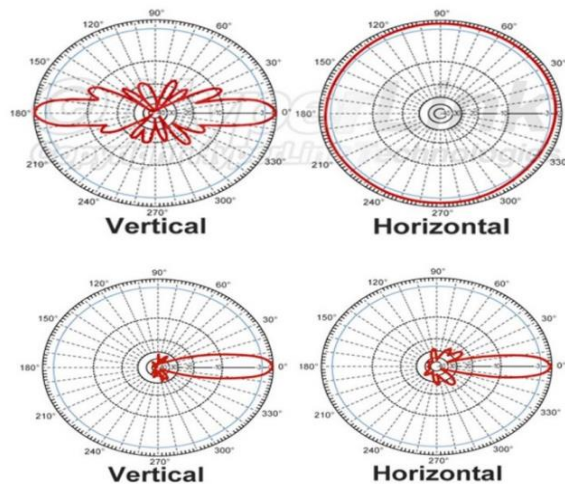


Figure I.3 : Le diagramme de rayonnement

### I.4.5 La directivité

La directivité  $D(\theta, \phi)$  est le rapport de la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée  $P(\theta, \phi)$ . Elle s'exprime par :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_r} \quad (I.7)$$

Où :

$P(\theta, \phi)$  : est la puissance rayonnée par une antenne.

$P_r$  : est la puissance totale rayonnée.

La directivité d'une antenne peut être facilement estimée à partir du diagramme de rayonnement de l'antenne. On peut dire qu'une antenne plus directive quand l'antenne admet une faible ouverture de rayonnement, par contre si elle admet une large ouverture de rayonnement on dit que c'est une antenne faiblement directive. [3]

### I.4.6 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (\text{I.8})$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne. [4]

### I.4.7 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne dans une direction donnée ( $\theta, \varphi$ ) est le rapport par unité d'angle solide entre la puissance  $P(\theta, \varphi)$  rayonnée par l'antenne et celle d'une antenne isotrope, il est exprimé par :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (\text{I.9})$$

Où :

$G$  : Le gain de l'antenne.

$P(\theta, \varphi)$  : la puissance rayonnée par une antenne.

$P_a$  : Puissance d'entrée.

Il est aussi exprimé par la directivité et la perte [3].

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (\text{I.10})$$

### I.4.8 Polarisation d'une onde

La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation. Donc si la polarisation de l'antenne de réception n'est pas accordée sur la polarisation de l'antenne d'émission, la puissance reçue ne sera pas maximale. [5]

La polarisation d'une antenne est celle du champ électrique  $E$  de l'onde qu'elle émet. Un dipôle demi-onde horizontal a donc une polarisation horizontale, d'autres antennes ont une polarisation elliptique ou circulaire. [6]

### I.5 Techniques d'alimentations

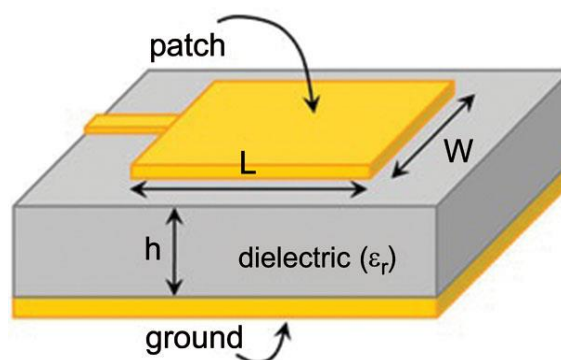
L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les principales techniques d'alimentation utilisées sont :

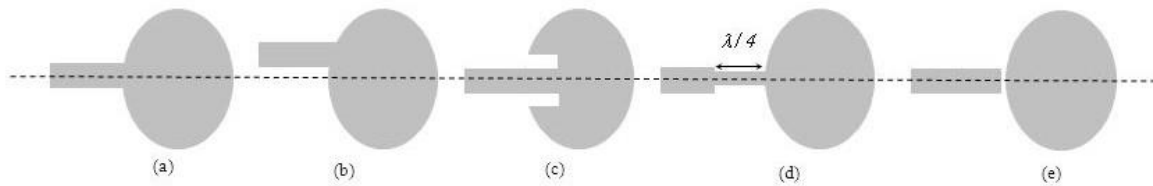
- Alimentation par une ligne microbande.
- Alimentation coaxiale directe.
- Alimentation par couplage électromagnétique.
- Alimentation par couplage à ouverture dans le plan de masse. [4]

#### I.5.1 Alimentation par ligne microbande

Dans ce type d'alimentation une bande de conduite est reliée directement au bord du patch micro-ruban. La bande de conduite est plus petite dans la largeur par rapport au patch. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'elle peut être gravée sur la même face de l'antenne, elle est facile à fabriquer et simple à adapter à la résonance. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite. [7]



**Figure I.4 :** Alimentation par ligne microbande.



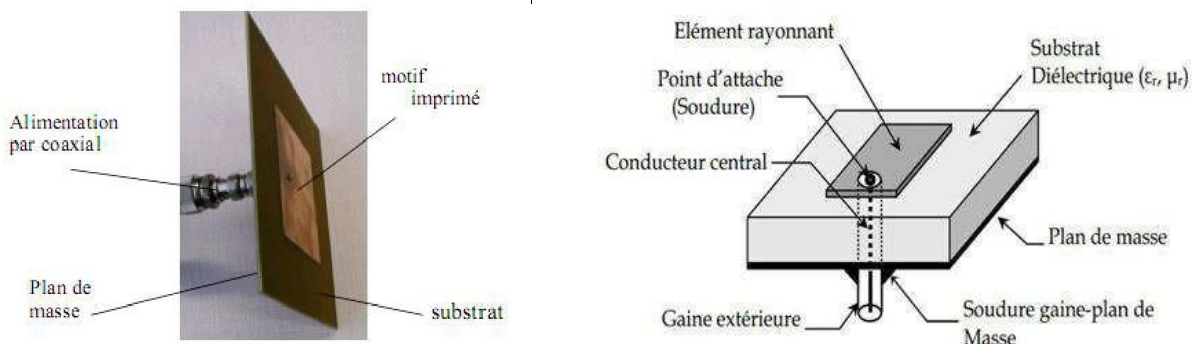
**Figure I.5 :** Alimentation par une ligne microbande (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche (d) adapté par ligne quart d’onde (e) couplée par un écart.

### I.5.2 Alimentation coaxiale directe

Elle est effectuée par connexion directe à une ligne coaxiale dont le conducteur central est connecté en un point situé sur l’axe de symétrie de l’élément, dont la distance au bord, de l’antenne permet d’adapter les impédances.

L’avantage principal de ce type d’alimentation est qu’elle peut être appliquée à n’importe quel endroit choisi à l’intérieur du patch, avec une facilité de fabrication.

Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l’élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l’élément plaqué.



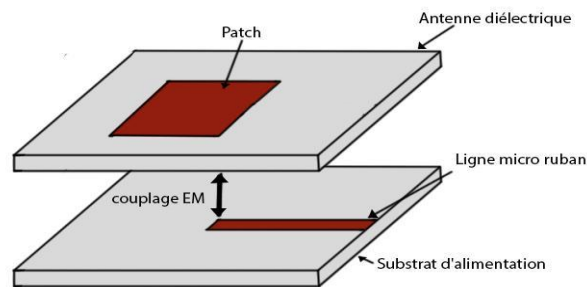
**Figure I.6 :** Alimentation coaxiale directe



### I.5.3 Alimentation par couplage électromagnétique

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur.

L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser.



**Figure I.7 :** Alimentation par couplage électromagnétique.

### I.5.4 Alimentation couplée par ouverture dans le plan de masse

L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant. Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente. Elle apporte les avantages suivants :

- Isolation du circuit d'alimentation par l'intermédiaire du plan de masse. De ce fait, un rayonnement parasite faible, en fait ce rayonnement parasite se situe au-dessous du plan de masse, ce qui n'est pas la direction de propagation.
- Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Mais cette technique présente quelques inconvénients, tels que :

- Faible bande passante, mais peut être amélioré en jouant sur l'épaisseur du diélectrique et en superposant plusieurs éléments rayonnants.
- Difficile à mettre en œuvre [4].

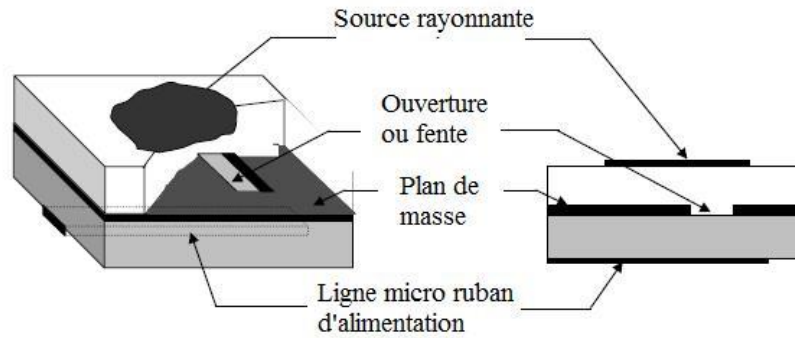


Figure I.8 : Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.

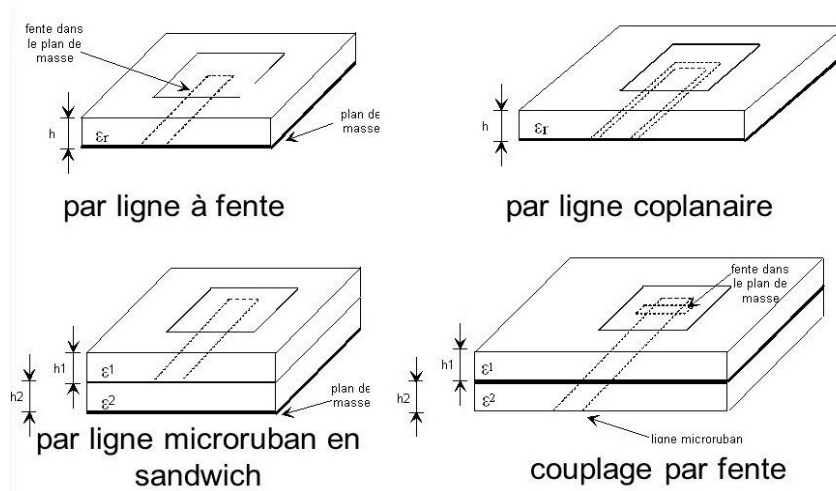


Figure I.9 : L'alimentation par proximité de l'antenne imprimée

## I.6 Mise en réseau d'antennes imprimées

L'intérêt principal des antennes imprimées réside dans la possibilité de constituer des réseaux de plusieurs éléments afin d'avoir des performances largement supérieures à celles d'un élément isolé.

L'utilisation d'une antenne unitaire s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Des caractéristiques spécifiques, un gain élevé et la formation d'un lobe principal ne peuvent généralement être obtenus que par le groupement de plusieurs sources rayonnantes pour former un réseau d'antenne. Un réseau d'antenne est un système constitué d'antennes élémentaires, réparties dans l'espace. Un dispositif d'alimentation permet de commander les amplitudes et (où) les phases relatives de ces sources. Le groupement

en réseau le plus simple est obtenu avec des sources identiques qui se déduisent les unes des autres par translation pour former des réseaux linéaires et plans. [8]

L'application de réseau d'antenne imprimée a connu un développement important depuis une vingtaine d'années car les éléments imprimés se prêtent très bien à la réalisation de réseaux de plusieurs dizaines, ou plusieurs centaines d'éléments, cela pour diverses raisons :

- Les faibles dimensions des éléments et leur simplicité de réalisation.
- Leur aptitude à être imprimés sur des surfaces planes ou incurvées, facilement intégrables, par exemple, au fuselage d'un avion ou d'une fusée.
- La possibilité de disposer les éléments rayonnants et le dispositif d'alimentation de part et d'autre d'un plan de masse commun, en une structure très compacte, légère et peu coûteuse [10].

Les réseaux d'antennes ont l'architecture de réseau linéaire et de réseau bidirectionnel. Comme une géométrie linéaire, plan et une géométrie circulaire [1].

### **I.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées**

Les antennes micro rubans sont devenues de plus en plus populaires grâce à leurs applications qui couvrent un large domaine de fréquence : 100MHz à 100 GHz. Une caractéristique qui les rend extrêmement demandées dans les téléphones portables. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids.
- Volume réduit.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- La tendance à grouper plusieurs patches identiques pour construire des antennes réseaux.
- Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro- ondes intégrés (MIC).
- Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Alors que, ce type d'antennes a également des limitations telles que :

- Bande passante étroite.
- Généralement faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi- plan.

- Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).

Ces limitations restent toujours près des modifications par les nouvelles recommandations [11].

### I.8 Méthodes d'analyses

Les antennes imprimées, habituellement constituées d'un élément rayonnant imprimé sur un substrat de faible permittivité, sont spécialement analysées par les méthodes dédiées aux circuits planaires. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes analytiques simples, telles que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité et les méthodes numériques rigoureuses, telles que la méthode des moments, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies.

#### I.8.1 Méthodes analytiques

Ces méthodes, dont les plus employées sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité, sont fondées sur la distribution du courant magnétique autour du patch.

##### I.8.1.1 Modèle de la ligne de transmission

Le modèle de la ligne de transmissions (MLT) est le plus employé pour l'analyse et la conception des antennes microruban. Initialement, dans sa forme originale, la méthode MLT ne s'appliquait que pour les antennes microruban rectangulaires planaires. Elle a ensuite été développée et allongée à d'autres structures. Le patch rectangulaire est considéré comme deux fentes rayonnantes parallèles, espacées par une distance égale à la longueur du patch et perpendiculaires au parcours dominant du courant sur le patch. Ce modèle offre un bon aperçu physique, mais moins de certitude. Dans cette méthode, les principaux paramètres de la ligne sont l'impédance caractéristique et la constante de propagation effective. [8]

##### I.8.1.2 Modèle de la cavité

Le modèle de la cavité offre la simplicité et la visibilité physique dans l'analyse des antennes micro rubans. Une antenne imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques (le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux. Une longueur et une largeur effective sont introduites pour prendre en compte les débordements des lignes des champs sur les bords de l'élément rayonnant.

Les champs à l'intérieur de la cavité peuvent être exprimés en fonction de modes discrets satisfaisant individuellement des conditions aux limites appropriées. Une fois ces champs connus, le champ rayonné, la puissance totale et l'impédance d'entrée seront alors déduits. Ce

modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage [9].

### I.8.2 Méthodes numériques

Les techniques numériques sont basées sur la détermination de la distribution du courant sur la surface de l'élément conducteur et le plan de masse, dans le domaine fréquentiel ou temporel. Elles peuvent étudier les structures les plus arbitraires et les multicouches. Toutefois, elles requièrent un temps de calcul et un espace mémoire importants et ne permettent que très peu d'explications physiques.

#### I.8.2.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis, très utilisée dans le domaine fréquentiel, consiste à discrétiser les équations de Maxwell en amont, au niveau de la formulation aux dérivées partielles des équations de propagation. La première étape consiste à discrétiser le domaine de calcul grâce à des motifs géométriques adaptés, les triangles pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels. A chacun de ces motifs géométriques, on réunit un certain nombre de nœuds, auxquels on donne des fonctions de base linéairement indépendantes, les unes des autres, et composant une estimation continue de la solution du problème.

La deuxième étape consiste à choisir une allocation de fonctions de test, respectant les conditions de dérivabilité et de continuité au bord du domaine de calcul. Cela permet alors de reformuler l'équation d'onde et d'exclure les dérivées d'ordre un, pour achever à une formulation vibrationnelle. L'intérêt d'une telle formulation réside dans le fait qu'elle assemble, en une seule formule, l'équation d'onde et les conditions aux limites tout en ne faisant intervenir que des dérivées d'ordre un. Le cas spécifique où les fonctions de test et d'essai sont semblables est appelé procédure de Galerkin. L'avantage de cette méthode réside dans la simplicité de traitement des structures les plus compliquées et des matériaux inhomogènes tout en tenant compte des dispersions. Cependant, en comparaison à la méthode des moments, elle reste inefficace pour le traitement des conducteurs rayonnants.

#### I.8.2.2 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies, dans le domaine temporel F.D.T.D (Finit Différence Time Domain), est une technique numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temporel dans une structure uniformément discrétisée. La

méthode consiste à approximer les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles, qui apparaissent dans les équations de Maxwell, par des différences finies centrées. Les composantes des champs électrique et magnétique sont déplacées d'une demi-cellule spatiale et calculées d'une façon alternative et itérative, à des multiples pairs et impairs du demi-pas temporel. La méthode FDTD est employée avec réussite dans la conception des simples antennes microruban jusqu'aux réseaux d'antennes composés en phase. Les primordiaux avantages de cette méthode sont :

- Ses expressions sont relativement simples.
- Elle permet la caractérisation de la structure en une seule simulation et dans une large bande de fréquence. Les paramètres de propagation et l'impédance caractéristique peuvent être résolus en utilisant la transformée de Fourier.
- Elle permet la modélisation des sources d'excitation, la simulation de l'espace libre, l'étude des problèmes géométriques liés aux structures (interface, fil mince...) et l'utilisation de divers types de matériaux (dispersifs, anisotropes...). Elle offre donc une simulation rigoureuse de l'antenne et de son environnement proche.
- Elle ne demande pas la résolution de systèmes linéaires (inversion de matrice).
- Elle peut prédire la réponse transitoire d'un système électromagnétique.
- Le perfectionnement des performances des calculateurs a rendu possible le traitement numérique des problèmes à l'aide de cette méthode. La robustesse de la méthode a été démontrée par Taflove en 1975.

### I.8.2.3 Méthode des moments

La méthode des moments (MoM), est une approche numérique qui transforme une fonctionnelle (équation différentielle, intégrale ou intégro différentielle) en un système d'équations linéaires. Cette méthode globale peut admettre à d'autres approches numériques, telles que la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies, d'être expliquées en termes de procédures MoM. Elle a été utilisée par la première fois en 1967 par Harrington, pour la résolution des problèmes liés aux antennes. En électromagnétisme, la méthode des moments, employée particulièrement dans le domaine fréquentiel, consiste à résoudre les expressions intégrales des équations de Maxwell.

Elle est basée sur le principe d'équivalence surfacique ou volumique entre la réponse de la structure et une distribution de courant similaire à la surface ou dans le volume d'une hétérogénéité. Elle conduit alors aux expressions intégrales des équations du champ électromagnétique déporté par un conducteur parfait. Cette technique offre un traitement avantageux des surfaces conductrices et la plupart des grandeurs d'une antenne peuvent être directement retenus de la densité de courant.

La méthode des moments est une des méthodes les plus employées dans le domaine fréquentiel pour les problèmes de rayonnement et de diffusion comprenant des surfaces ou des fils conducteurs. Elle est très précise et très utile. Elle peut étudier un seul élément ou plusieurs éléments en réseau ou empilés ainsi que les formes arbitraires et le couplage.

Cependant cette méthode reste très compliquée, elle requiert un temps de calcul important et ne permet pas une bonne interprétation physique. En plus, si le problème contient des diélectriques inhomogènes, la méthode n'est plus vraiment adaptée. Une hybridation avec la méthode des éléments finis pourrait alors être une solution efficace [8].

### **I.9 Systèmes MIMO (Entrées Multiples Sorties Multiples)**

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Elle exploite le comportement par trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée. MIMO permet à plusieurs antennes d'envoyer et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps.

Grâce à MIMO, les antennes fonctionnent plus intelligemment en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins et à différents moments pour augmenter efficacement la puissance de capture du signal du récepteur. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de la diversité spatiale, qui permet de tirer le meilleur parti des antennes excédentaires. S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires peuvent ajouter de la diversité aux récepteurs et augmenter la portée [12].

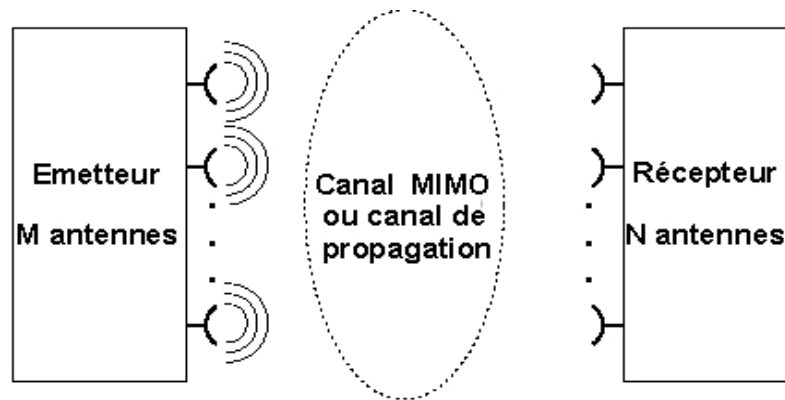


Figure.I.10 : Principe du MIMO

## I.9.1 Architecture MIMO

### I.9.1.1 Système SISO

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception. La capacité du canal SISO est :

$$C = w \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{p}{N_{0w}} \right) \text{ bps} \quad (\text{I.11})$$

Où :

P : la puissance du signal utile en Watt,

No : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz,

W : la bande passante donnée en Hz.

Avec  $P$  est le rapport signal sur bruit.

En normalisant la capacité par la bande utile W, on obtient :

$$C = \log_2(1 + p) \quad (\text{I.12})$$

### I.9.1.2 Système MISO

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception. Dans ce mode de



transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les  $N_t$  antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie  $E_s/N_t$ . C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$p = \sum_{i=1}^{N_t} p_i \tag{I.12}$$

Avec  $P_i$  est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes :

$$P = N_t \cdot P_i \tag{I.13}$$

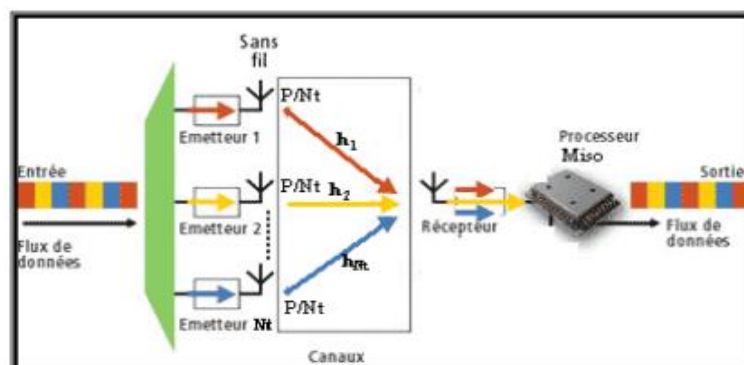
La capacité du canal MISO :

$$C = w \cdot \log_2 \left( 1 + N_t \frac{p_i}{N_0 w} \right) = w \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{p}{N_0 w} \right) \tag{I.14}$$

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , on obtient :

$$C = \log_2(1 + p) \tag{I.15}$$

L'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est dans le fait que dans les multi trajets ; la probabilité d'évanouissement dans  $N_t$  antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne.



**Figure I.11 : Dispositif MISO**

### I.9.1.3 Système SIMO

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception. La capacité du canal SIMO :

$$C = w \cdot \log_2 \left( 1 + N r^2 \frac{p}{N_0 w} \right) \quad (\text{I.16})$$

$N_r$  : le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité en par la bande utile  $W$ , on obtient :

$$C = \log_2(1 + N r^2 p) \quad (\text{I.17})$$

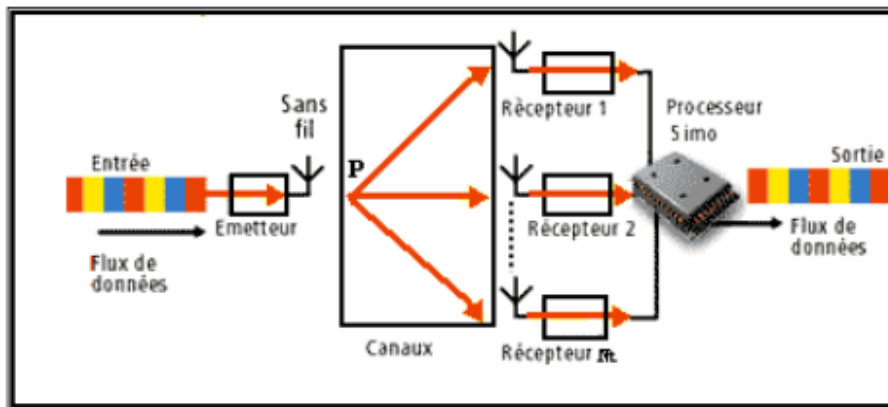


Figure I.12 : Dispositif SIMO

### I.9.1.4 Système MIMO

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception et de contrer l'évanouissement du canal. Ainsi, elle permet de minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal.

La différence entre un système MISO et un système MIMO est que ; le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence. Tandis que, le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence [16].

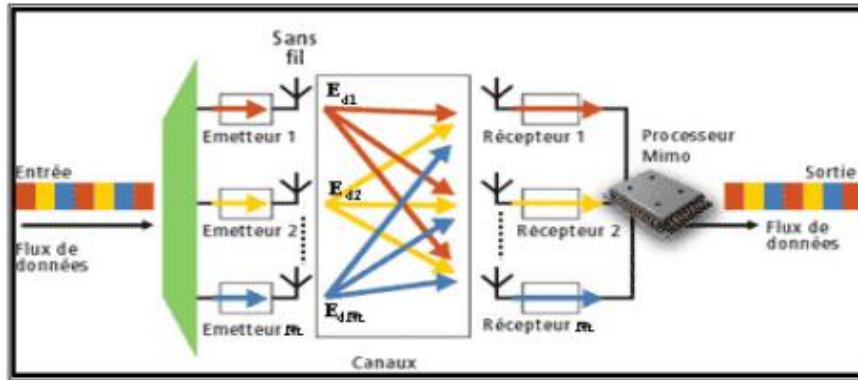


Figure I.13 : Dispositif MIMO

### I.9.2 Principe De La Diversité

Pour lutter contre les effets des multi-trajets qui sont à la base des phénomènes d'évanouissements du signal émis et augmenter le rapport signal sur le bruit (SNR), il convient d'augmenter la puissance d'émission ou d'utiliser les techniques de diversité.

La première solution étant soumise à des réglementations, les techniques de diversité sont très utilisées. Les techniques de diversité sont basées sur le principe selon lequel, plusieurs versions statistiquement décorrélées du signal émis arrivent sur un récepteur, chacune portant en son sein la même information. Elles sont ensuite combinées de façon adéquate de façon à ce que le signal résultant soit moins évanouissant. Ces systèmes permettent d'obtenir de la diversité sans toutefois compenser le problème des interférences. Il y a deux types de diversités : la micro diversité et la macro diversité.

#### I.9.2.1 La micro diversité

C'est la technique de diversité utilisée pour atténuer les effets d'évanouissement multi trajets, on a plusieurs micros diversité.

- La Diversité De Polarisation
- La Diversité Spatiale
- Diversité De Diagramme De Rayonnement
- La Diversité Angulaire
- La Diversité Temporelle
- La Diversité Fréquentielle

### **I.9.2.2 La macro diversité**

C'est la méthode la plus efficace pour lutter contre ces types d'évanouissement. Elle consiste à émettre et/ou recevoir le même signal par des stations de base différentes. Elle permet d'atteindre de débits élevés [17].

### **I.9.3 performances des antennes MIMO en diversité**

#### **I.9.3.1 Couplage mutuel**

Le couplage mutuel est l'échange d'énergie quand deux antennes sont près l'une de l'autre, et que l'une ou les deux sont excitées, une partie de l'énergie se dissipe dans l'autre antenne et plus particulièrement dans son impédance de charge. Il dépend des caractéristiques de rayonnement des antennes, de la distance entre les antennes, de leur orientation et de leur nature.

#### **I.9.3.2 Efficacité totale**

Dans les systèmes de communication entre mobiles, le diagramme de rayonnement de l'antenne joue très souvent un rôle mineur, c'est surtout l'efficacité totale de l'antenne (ou gain moyen (MG) de l'antenne) qui est le paramètre le plus important. Elle nous renseigne sur les performances de la liaison sans fil. Ceci est aussi valable pour les systèmes SIMO (diversité) et MIMO. L'efficacité totale d'une antenne est définie comme étant le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance incidente sur son port d'alimentation. Elle prend en compte aussi bien les pertes de réflexion dues à la désadaptation entre le câble coaxial et le port d'alimentation de l'antenne que les pertes ohmiques et diélectriques de l'antenne. Elle peut être calculée à partir de l'intégration des diagrammes de rayonnement dans tout l'espace (Eq. I.18) ou bien à partir des paramètres S et de l'efficacité rayonnée  $\eta_{ray}$  de l'antenne (Eq.I.19.).

$$\eta_{tot} = MG = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (G_{\theta}(\theta,\varphi) + G_{\varphi}(\theta,\varphi)) \sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \quad (I.18)$$

Où  $G_{\theta}(\theta,\varphi)$  et  $G_{\varphi}(\theta,\varphi)$  sont les gains des antennes dans les directions  $\theta$  et  $\varphi$ .

$$\eta_{tot} = \eta_{ray}(1 - |s_{11}|^2) \quad (I.19)$$

**I.9.3.3 Coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)**

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (Enveloppe Corrélation Coefficient (ECC)) est considéré comme un indicateur clé de la performance. Une valeur faible de ECC entre deux ports signifie une diaphonie faible lors d'une opération simultanée. Cela signifie également une meilleure performance en termes de diversité dans le cas d'une utilisation en MIMO. Le ECC peut être calculé à partir des diagrammes de rayonnement de l'antenne par la formule (I.20).

$$\rho_{ij} = \frac{|\iint F_i - F_j^* d\Omega|^2}{\iint |F_i|^2 d\Omega \cdot \iint |F_j|^2 d\Omega} \quad (\text{I.20})$$

Où  $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi$  et  $F_i$  est le champ lointain rayonné par le port numéro  $i$ . Dans le cas d'antennes sans perte, et en supposant que les ondes entrantes soient uniformément réparties, le ECC peut être calculé à partir des paramètres S de l'antenne à l'aide de la formule

(I.21), qui se simplifie dans le cas d'une antenne à deux ports, à la formule (I.22).

$$\rho_{ij} = \frac{|\sum S_{in} S_{nj}|^2}{\prod_{m=i,j} (1 - \sum |S_{nm}|^2)} \quad (\text{I.21})$$

$$\rho_{ij} = \frac{|s_{11} s_{12} + s_{21} s_{22}|^2}{(1 - |s_{11}|^2 - |s_{21}|^2)(1 - |s_{22}|^2 - |s_{12}|^2)} \quad (\text{I.22})$$

**I.9.3.4 Gain de Diversité (DG)**

Une approximation du gain de diversité par sélection dans le cas d'une antenne à 2 ports  $i, j$ , à un niveau de probabilité d'interruption de 1% peut être calculé à partir du ECC par la formule (I.23)

$$G_{ij} = 10\sqrt{(1 - |\rho_{ij}|^2)} \quad (\text{I.23})$$

Où, l'hypothèse des ondes entrantes uniformément réparties n'est pas toujours garantie, ni l'hypothèse que les antennes sont sans perte.

Ce gain de diversité n'est vraiment significatif que si toutes les antennes du système ont une efficacité totale égale à 100% ce qui est loin d'être évident en pratique. Ainsi le gain en diversité réaliste d'un système (DSG : Gain de Diversité du système) doit également prendre en compte l'efficacité totale de chaque antenne. En supposant que toutes les antennes du système sont identiques, le DSG sera alors [17] :

$$DSG = \eta_{\text{tot}} \cdot DG \quad (\text{I.24})$$

### I.10 La technique de l'Ultra Large Bande

#### I.10.1 Définition

La DARPA a fourni la définition initiale de l'Ultra Wide Band (The Defense Advanced Research Project Agency). L'antenne vaut plus de 0,25. De plus la FCC définit une antenne UWB comme ayant une bande passante de plus de 500 MHz. Selon la FCC, les fréquences les plus hautes et les plus basses de la bande passante sont définies comme les fréquences auxquelles la puissance rayonnée est de -10 dB de sa valeur maximale.

#### I.10.2 La bande de fréquence de 3.1GHz à 10.6GHz

La bande de fréquence 3.1 GHz à 10.6 GHz contenir plusieurs bandes comme

- WiMax de 3.3 GHz à 3.6 GHz.
- WLAN en Etats-Unis (5.15 - 5.35 GHz, 5.725 - 5.825 GHz).
- Hiper LAN/2 en Europe (5.15 - 5.35 GHz, 5.725 - 5.825 GHz).
- Les bandes de service par satellite comme la bande ITU de 8 GHz.

#### I.10.3 Les antennes ultra larges bande

Une antenne peut être décrit comme un capteur qui convertit l'énergie électromagnétique guidée dans une ligne de transmission en énergie électromagnétique, mais une définition plus spécifique pour une antenne ultra large bande(ULB) est un élément rayonnant dont les caractéristiques désirées restent inchangeables sur une large bande de fréquence de fonctionnement [15].

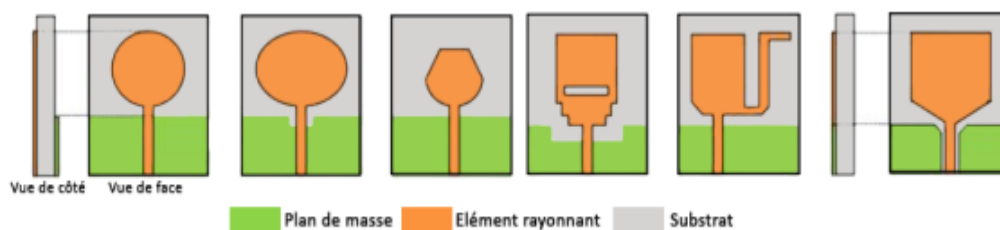
Généralement, pour concevoir une antenne ULB, les antennistes doivent prendre en compte plusieurs paramètres tels que :

- La fréquence de fonctionnement et la bande passante allouée.
- La forme de diagramme de rayonnement (omnidirectionnelle, directionnelle...).
- La polarisation des ondes rayonnées.
- Le gain ou la directivité.
- L'efficacité de rayonnement.
- La puissance d'émission ou la sensibilité de la réception.

D'autres paramètres secondaires peuvent s'ajouter à cette liste, comme les caractéristiques temporelles à savoir le retard de phase, la réponse impulsionnelle, le facteur de fidélité, etc. [15].

### I.10.4 L'antenne monopôles

Les antennes mono polaires sur les plans de masse, ainsi que leurs versions imprimées, nous intéressent. Différents types de monopôles sur les plans de masse sont représentés sur la figure 1. En termes de bandes passantes, les monopôles de formes circulaires et triangulaires fonctionnent bien. Nous ne regardons que les constructions parallèles au plan de masse. En effet, il a été démontré que l'inclinaison de ces structures limite considérablement la bande passante.



**Figure I.14 :** Les différentes formes d'antennes monopôle imprimées.

Le but de l'antenne monopôle imprimée (monopolistiques) imprimées c'est pour combiner les performances des antennes monopolistiques avec les avantages des antennes imprimées. C'est-à-dire avoir des structures compactes, légères, peu coûteuses et simples à construire.

Des lignes coplanaires ou micro-ruban peuvent être utilisées pour alimenter les antennes grâce à la technologie imprimée. De ce fait, l'antenne peut être montée sur le même support que la source d'alimentation. Enfin, l'impédance d'entrée est réduite de moitié, permettant aux systèmes d'être plus adaptables [16].

### **Conclusion**

Le concept général et l'essentiel de la théorie des antennes imprimées ont été introduits brièvement dans ce chapitre, nous y avons détaillé les différentes techniques d'alimentation de ce type d'antennes et leurs méthodes d'analyse. Nous avons parlé aussi de la technologie MIMO et ces différentes architectures. Nous avons clôturé ce chapitre par la technique ultra large bande des antennes afin d'enrichir notre bagage théorique. Dans le prochain chapitre nous avons présenté les différentes antennes reconfigurables.



## **Bibliographie**

- [1] MOHAMMED FAWZI BENDAHMANE, FATHI TARIK BENDIMERAD ; « *Etude du Couplage Entre Antennes Imprimées* », Editions universitaires européennes, Tlemcen,2014.
- [2] AINAOUI SIHAM, YOUSFI IKRAM « *Conception et réalisation d'une antenne imprimée large bande [1-3 GHz]* », Mémoire du master, Université de Blida,2014.
- [3] TOUKALI SAMIRA, YAALAOUI KHADRA « *Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées* », Mémoire du master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj,2020.
- [4] ZEMAM Youssouf, FOUKIA Aimad Eddine, « *Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs* », Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen,2017.
- [5] Odile Picon, coll.<<*LES ANTENNES « Théorie, conception et application »*>> Maurice Bellanger, Paris, vol 386, 2009.
- [6] Dr Youssef DAHER, „„Antenne – Cours““, Université Libanaise – Faculté de Génie – Branche 1.
- [7] BENABADJI Selma, LALLAM Chafika « *Conception et modélisation d'une antenne microruban compacte pour une utilisation dans les terminaux mobiles.* » Mémoire du master, Université de Aboubakr Belkaïd– Tlemcen,2011.
- [8] Yamina TIGHILT « *Identification Des Antennes Micorubans Multicouches Par La Méthode Spectrale Et Les Réseaux De Neurones* », Thèse Du Doctorat, Université Ferhat Abbas -Sétif-Ufas (Algérie),2011.
- [9] CHAABANE Abdelhalim, « *Conception D'une Antenne Bip Large Bande A Fort Gain* », Thèse Du Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif-1,2017.
- [10] AISSAOUI Djelloul, « *Analyse A L'aide De Modèles Equivalents D'antennes Imprimées Alimentées Par Lignes Adaptées.* » Thèse de Magister, Université Abou Baker Belkaid–Tlemcen,2007.
- [11] FADHEL Choayb, REDJeL Islam « *Conception et réalisation d'une antenne multi-bande pour des applications GPR.* », Université 8 Mai 1945 Guelma,2021.

[12] Bachir sadou, DHEYA ALHAQ ALQUDAMI, « *étude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G et 6G de nouvelle génération.* », Université de Jijel ,2020.

[13] Melle BENOSMAN Radia, Melle SIDHOUM Amel, « *Etudes et simulation des performances des systèmes MIMO en configurations STBC et V-BLAST* », université de Tlemcen,2013.

[14] AYAICHA KHAWLA, BEN ZEKRI AMINA, « *Conception d'une Nouvelle Antenne pour la Détection des Objets Enfouis* », Université 8 Mai 1945 Guelma,2021.

[15] Hamza NACHOUANE, « *Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération* », Institut National des Postes et Télécommunications- MAROC,2017.

[16] G. Le Ray C. Marchais A. Sharaiha, « *Stripline slot antenna for uwb Communications* », IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett, 5, 2006.

[17] M. ANWAR Oualid, Mlle. BENAHMED Hayet, « *Systèmes Multi-Antennes PIFA Pour Des Applications En Diversité* », Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2020.



**Chapitre II**  
**Les techniques de**  
**Reconfigurabilité**

### II.1 Introduction

La nécessité d'augmenter les performances de transmission en termes de débit et d'efficacité a créé plusieurs chemins pour trouver des solutions liées à ce problème, parmi ces derniers, la reconfigurabilité des systèmes de télécommunication a trouvé car leur fonctionnement peut être modifié dynamiquement et permet à l'antenne d'offrir plus de fonctionnalités.

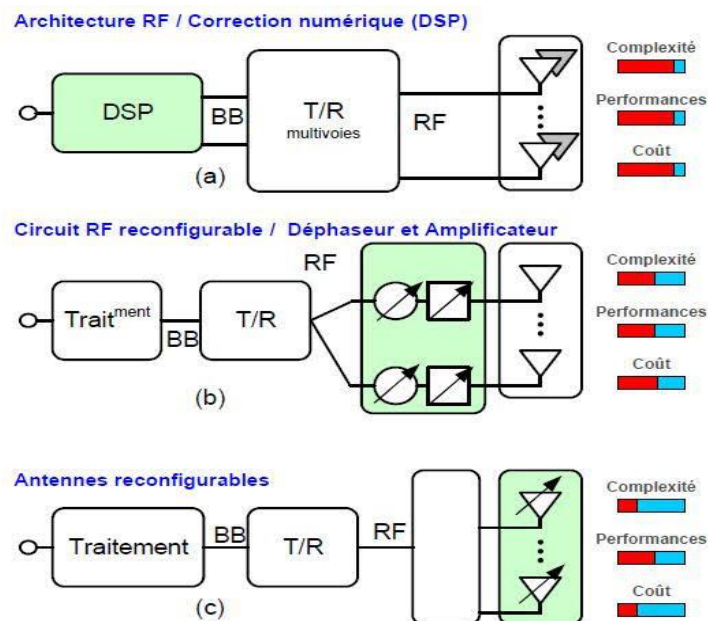
Dans ce chapitre, nous avons une partie consacrée aux antennes reconfigurables, nous nous intéresserons à définir la reconfigurabilité, l'utilisation des antennes reconfigurable, leur classification et nous détaillerons les techniques utilisées pour obtenir la reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation. La dernière partie de ce chapitre contiendra une conclusion pour fermer la fenêtre de ce chapitre.

### II.2 Qu'est-ce qu'une antenne reconfigurable ?

Le terme antenne reconfigurable a été introduit pour la première fois en 1998 [1]. Au niveau antennaire la reconfigurabilité peut se définir comme la modification dynamique d'une ou plusieurs propriétés fondamentales de l'antenne en termes de fréquence, de polarisation et de diagramme de rayonnement. Elle permet de s'adapter à la variabilité de l'environnement et aux contraintes liées au système de communication. L'agilité des paramètres peut être envisagée par l'utilisation de composants discrets commutables ou accordables (diodes PIN, RF MEMS, diodes varicap, commutateurs photoconducteurs...), l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) ou par une modification de la structure physique de l'antenne [2]. Il existe une très large variété d'antennes reconfigurables et donc plusieurs façons de les classer. Cette catégorisation peut être faite selon la propriété physique qui les rend reconfigurables (modifications des lignes de champ, modification de propriétés diélectriques ou diamagnétiques d'éléments de l'antenne, déformation géométrique, etc.), du type de composants reconfigurables employés (diodes, transistors, MEMS – Micro Electro Mechanical Systems -, etc.), ou encore de leur structure géométrique. Une autre façon de les classer est de les distinguer selon les fonctions de reconfigurabilité qu'elles offrent, la technologie apparaissant ainsi comme le résultat d'un besoin : reconfiguration en fréquence ; reconfiguration du rayonnement ; reconfiguration de la polarisation ; et toute combinaison des trois configurations précédentes [1].

### II.3 Comment s'effectue la reconfigurabilité ?

La reconfiguration de l'antenne peut être obtenue par diverses approches. Certaines techniques ont recours à des composants localisés actifs qui permettent de modifier de façon quasi-punctuelle les lignes de courant ou l'impédance, d'autres s'appuient sur une altération mécanique de la structure constituant l'antenne, tandis que d'autres utilisent des substrats à caractéristiques accordables. D'autres approches (non traitées ici) s'appuient sur la reconfigurabilité des réseaux d'alimentation, ou encore excitent de façon appropriée les réseaux d'antennes [1].



**Figure II.1 :** Différents niveaux de reconfigurabilité : (a) Système adaptatif par traitement numérique ; (b) Réseau d'antennes phasés et (c) antennes reconfigurables.

### II.4 Utilisation des antennes reconfigurables

Une antenne reconfigurable a la capacité de s'adapter à son environnement en modifiant son diagramme de rayonnement, sa polarisation ou bien sa fréquence. De nombreuses études ont montré une amélioration significative des performances du système lorsque de telles antennes sont utilisées. Pour cette raison, il est possible de trouver diverses antennes reconfigurables dans la littérature [3].

## II.5 Les techniques de reconfigurabilité

Une antenne reconfigurable est une antenne dans laquelle au moins l'une de ces caractéristiques est modifiable après sa fabrication (fréquence, polarisation et diagramme de rayonnement). Il existe diverses techniques pour adopter la reconfigurabilité.

Dans ces techniques, on doit modifier les caractéristiques de l'antenne en utilisant des composants actifs tels que, les diodes PIN et les RF-MEMS et les Varactors pour les types électriques. Dans le domaine optique, on doit utiliser des éléments de commutations optiques tels que les photoconducteurs. De même, la reconfigurabilité peut être réalisée par une modification mécanique dans la structure de l'antenne. Ce type est connu par la reconfigurabilité physique. Il y a une autre technique de reconfigurabilité présentée dans l'utilisation des matériaux intelligents tels que les ferrites et les liquides cristaux [4].

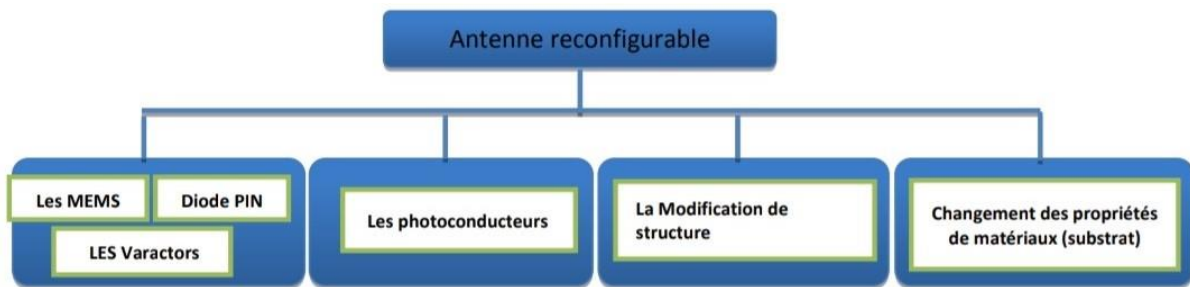


Figure II.2 : Les différentes techniques de reconfigurabilité

### II.5.1 Diode varicap

La diode varicap est l'un des composants actifs les plus utilisés pour réaliser le pilotage continu en fréquence. La modélisation du comportement électrique de la diode varicap peut être faite en première approximation par le schéma équivalent de la figure II.3 [5].

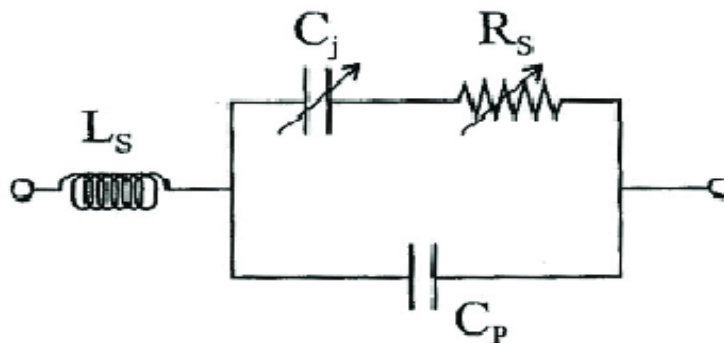
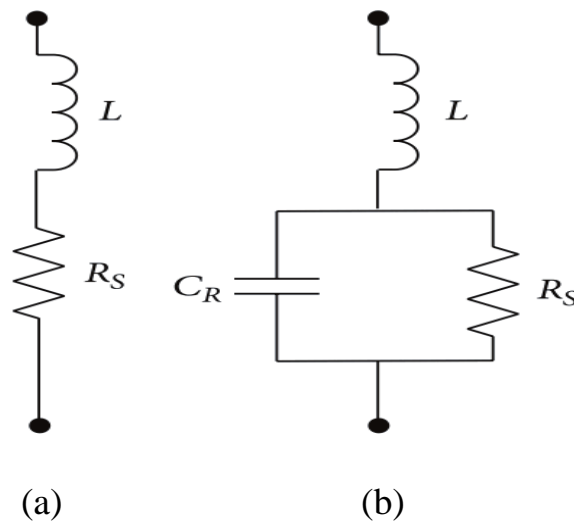


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une diode Varicap.

En augmentant la tension inverse aux bornes de la diode, la valeur de la capacité variable diminue. Cette relation est cependant non linéaire. La plage de variation des capacités employées est de l'ordre de 10 pf à 1 pf. En composant discret, la longueur de la diode est de l'ordre de 1 mm. L'un des inconvénients majeurs de la diode Varicap est la diminution de l'efficacité et du gain de l'antenne qu'elle peut engendrer. Une partie importante de l'énergie fournie n'est pas rayonnée, mais dissipée par effet Joule. Il est important, dès lors, de ne pas multiplier le nombre de diodes et de trouver le meilleur compromis possible tension-courant pour leur placement [5].

### II.5.2 Diode PIN

La diode PIN est l'un des composants les plus répandus en commutation RF car son temps de commutation est très court. Dans le cas d'antennes actives, ce composant est généralement utilisé en interrupteur. Les deux états de fonctionnement fermés (a) et (b) peuvent être représentés respectivement par les schémas équivalents suivant (figure II.4) [5].



**Figure II.4 :** Schéma équivalent simplifié d'une diode PIN.

(a) Polarisation directe ; (b) Polarisation inverse.

### II.5.3 Les MEMS

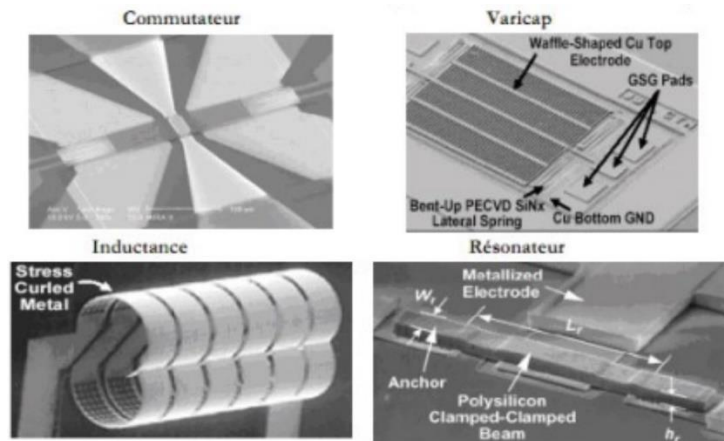
Les MEMS (MicroElectroMechanical Systems) de type "switches RF" ont été développés au début des années 1970 et leur première commercialisation remonte aux années 1980 [6]. Les antennes reconfigurables avec commutateurs MEMS ont suscité un énorme intérêt dans la recherche. Les commutateurs MEMS sont des dispositifs qui fonctionnent en utilisant un

mouvement mécanique pour réaliser un court-circuit ou un circuit ouvert dans les circuits RF. Les commutateurs MEMS peuvent être conçus dans différentes configurations en fonction du chemin du signal (série ou shunt), du mécanisme d'actionnement (électrostatique, thermique ou magnétostatique), du type de contact (ohmique ou capacitif) et du type de structure (porte-à-faux ou pont). Les commutateurs RFMEMS capables de gérer jusqu'à 20 W et fonctionnant à un cycle de 1012 on les trouve dans les systèmes radar, les analyseurs de réseau, les systèmes de communication par satellite et les stations de base. Les commutateurs MEMS pour les applications RF fonctionnent via des circuits courts et ouverts pour transmettre des signaux. Une comparaison des différents composants de commutation est fournie dans le Tableau 1 [7].

Technique de reconfiguration	Avantages	Inconvénients
Diodes PIN	<ul style="list-style-type: none"><li>• Très fiable</li><li>• Extrêmement peu coûteux</li><li>• Choix courant pour la reconfiguration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vitesse de réglage élevée</li><li>• Polarisation CC élevée à l'état ON</li><li>• Capacité de gestion de puissance élevée</li></ul>
Varactors	<ul style="list-style-type: none"><li>• Petit flux de courant</li><li>• Réglage continu</li><li>• Facilité d'intégration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Non linéaire</li><li>• Plage dynamique faible</li><li>• Circuit de polarisation complexe</li></ul>
MEMS RF	<ul style="list-style-type: none"><li>• Isolation et linéarité élevées</li><li>• Large bande passante d'impédance</li><li>• Faibles pertes de puissance et faible facteur de bruit</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tension de commande élevée</li><li>• Vitesse de commutation lente</li><li>• Durée de vie limitée</li></ul>

**Tableau II.1:** Comparaison de différents composants de commutation.



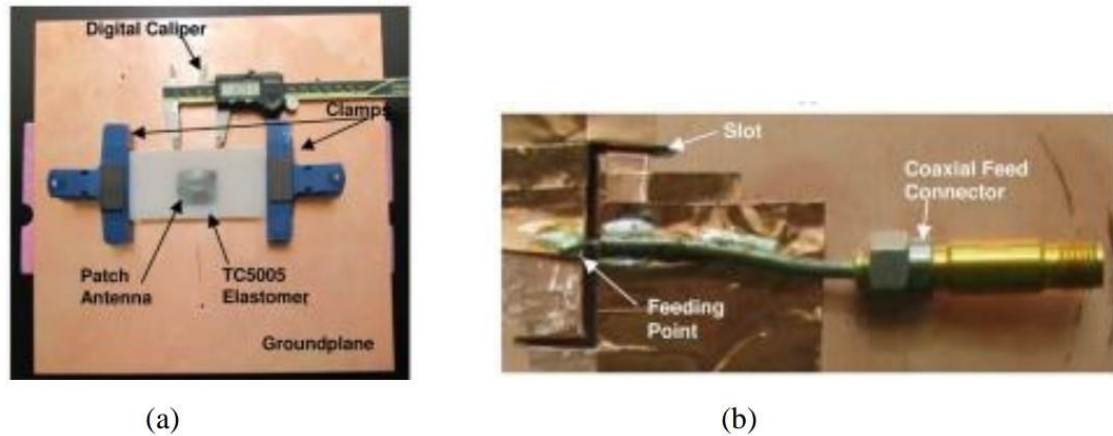


**Figure II.5 :** Exemples de composants MEMS.

### II.5.4 Matériaux Agiles

Les matériaux dits « agiles » ou encore « intelligents » sont utilisés le plus souvent comme substrat dont les propriétés électromagnétiques (permittivité et/ou perméabilité) peuvent être modifiées via une commande externe (par l'application d'un champ électrique et/ou magnétique) assurant ainsi l'agilité des antennes. Ils offrent l'avantage d'être peu encombrants et de plus en plus facilement intégrables. Néanmoins, rendre ces matériaux agiles n'est pas une tâche facile ; la commande est difficilement intégrable, de grandes tensions doivent être appliquées sur les matériaux, les dispositifs d'alimentation sont complexes, les pertes sont assez importantes et les temps de réponse sont élevés.

L'antenne reconfigurable en fréquence présentée dans la Figure II.6 est mise en œuvre en utilisant un substrat de silicone extensible TC5005. Le patch extensible est fabriqué par l'injection d'un alliage de métal liquide dans un réservoir Galinstan carré fabriqué dans le substrat en élastomère de silicone. La longueur électrique de l'antenne patch varie en fonction de l'étirement. Un réglage de fréquence de 1.3 à 3 GHz et une efficacité maximale de rayonnement mesurée de 80 % sont obtenus [6].



**Figure II.6 :** Prototype de l'antenne proposée : (a) Vue de dessus et (b) Vue de dessous.

### II.6 Classification des antennes reconfigurables

Parmi les critères de classification des antennes reconfigurables il existe le critère de fonctionnalité qui divise les antennes en trois grandes familles :

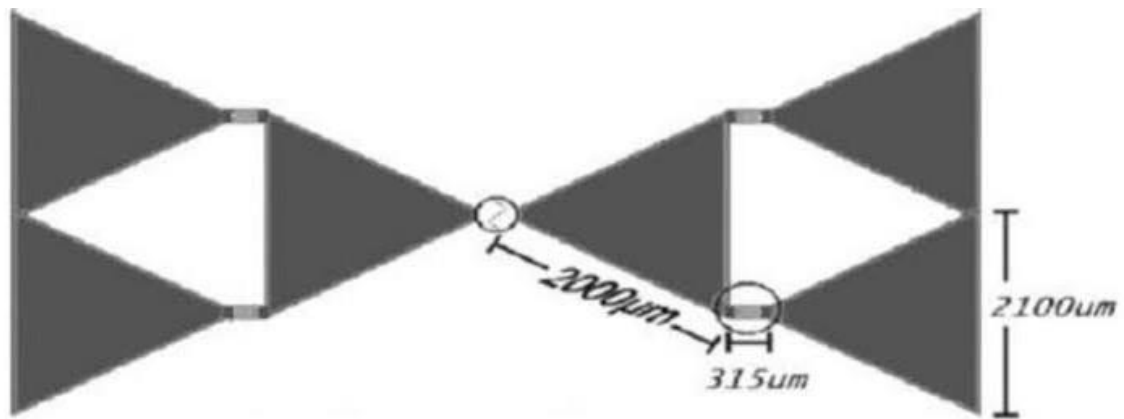
- Antennes agiles en fréquence.
- Antennes agiles en diagramme de rayonnement
- Antennes agiles en polarisation

#### II.6.1 Antennes reconfigurables en fréquence

Trois techniques utilisées pour obtenir une reconfiguration en fréquence sont : la modification géométrique de l'antenne, l'utilisation de court circuits commutables et l'insertion de fentes ou de lignes commutables. Ces techniques permettent à l'antenne de fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences.

##### ❖ II.6.1.1 La modification géométrique

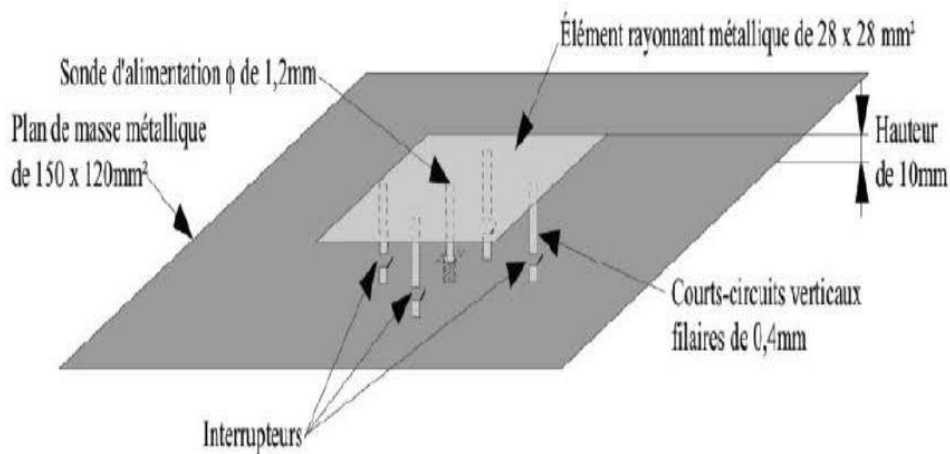
De nombreuses antennes reconfigurables utilisent la modification géométrique. Le principe de fonctionnement est basé sur la modification de la longueur électrique de l'élément rayonnant, ceci entraîne un changement de la fréquence de résonance. Cette technique peut être appliquée à différentes formes d'antennes. Ce type d'antennes comporte des motifs avec des tailles différentes. Le placement judicieux de commutateurs sur la structure fractale permet d'obtenir une taille spécifique correspondant à une fréquence de résonance. La figure II.7 illustre un exemple d'antenne reconfigurable en fréquence utilisant la modification géométrique.



**Figure II.7:** Antenne fractale reconfigurable en fréquence des commutateurs RF MEMS.

### ❖ II.6.1.2 Court-circuit commutable

Une deuxième technique dans le domaine des antennes reconfigurables consiste en l'utilisation de court-circuit commutables. En effet, l'activation d'un court-circuit commutable permet de modifier la circulation des courants sur l'antenne et en conséquence sa fréquence de fonctionnement. La Figure II.8 représente un exemple simple d'antenne patch intégrant des court-circuit commutables. La commutation de ces interrupteurs permet dans ce cas d'obtenir deux fréquences de résonance différentes.

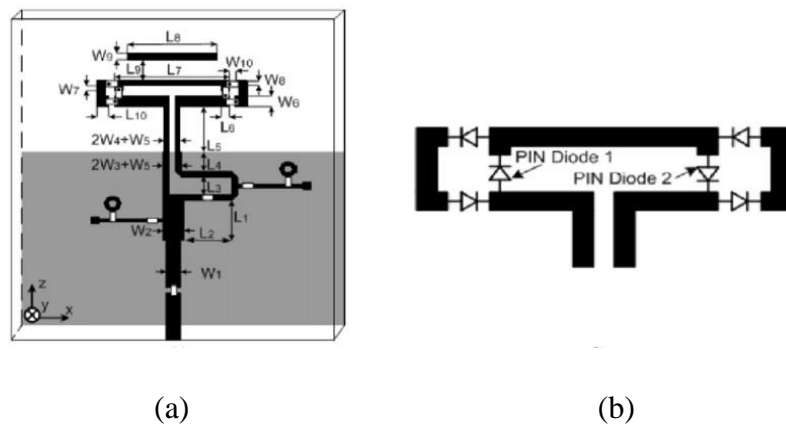


**Figure II.8 :** Exemple d'antenne patch à court-circuit commutables.

### ❖ II.6.1.3 Fente ou ligne commutables

Les fentes et les lignes commutables sont utilisées dans la reconfiguration en fréquence. En effet l'ajout de fentes ou des lignes chargées par des composantes (Diode PIN, Varactors ...etc.) entraîne la perturbation de courant sur l'élément rayonnant permettant ainsi d'accorder l'antenne à différentes fréquences de fonctionnement. Un exemple d'antennes reconfigurables en

fréquence à diodes PIN utilisant la ligne commutable est présenté par la Figure II.9. La structure consiste en une antenne quasi-Yagi munie d'un dipôle replié. La fréquence de fonctionnement de l'antenne est commandée électroniquement par des diodes PIN afin de modifier la longueur électrique du dipôle replié. Lorsque les diodes 1 et 2 sont passantes (les autres diodes étant bloquées), la longueur du dipôle est réduite, et l'antenne fonctionne dans la bande de fréquences 6.4 à 8 GHz. Dans le cas inverse (diodes 1 et 2 bloquées, et diodes 3 à 6 passantes), la bande passante de l'antenne s'étend de 5.3 à 6.6 GHz. [8]



**Figure II.9 :** Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence : (a) Géométrie de l'antenne ; (b) Position des diodes PIN sur le dipôle replié.

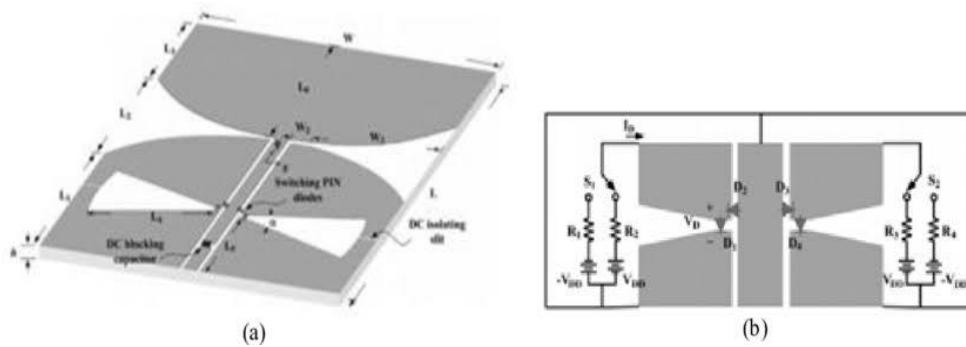
### II.6.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Une antenne reconfigurable en rayonnement est une structure rayonnante dont le diagramme de rayonnement peut être changé dynamiquement. Celui-ci peut être modifié en termes de forme, de direction ou de gain. Il existe plusieurs concepts de reconfiguration de diagramme, parmi ces derniers, on trouve l'utilisation de diode PIN, de MEMS et des photoconducteurs.

#### • II.6.2.1 Utilisation des diodes PIN

Une solution possible pour concevoir une antenne reconfigurable en diagramme est d'utiliser des antennes filaires. La variation du diagramme s'accompagne d'un changement de la fréquence de résonance qu'il faut minimiser. Un exemple pour obtenir une antenne reconfigurable en diagramme à partir de fentes sur l'élément rayonné est proposé dans Figure II.10 Cette antenne reconfigurable est une antenne large bande qui se compose d'une entrée coplanaire (reliée à un connecteur SMA), de deux transitions coplanaires vers les lignes à fente,

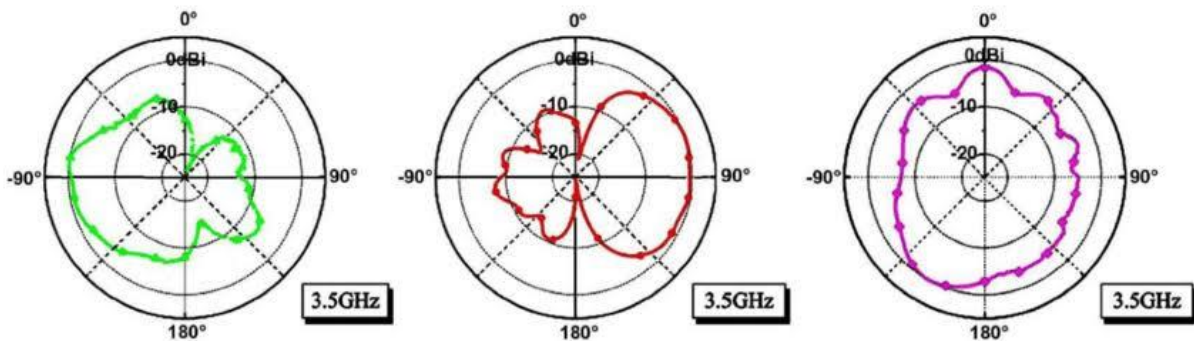
d'une paire de lignes coniques (de type Vivaldi) et de quatre diodes PIN (Macom MA4AGBL912). Sa géométrie et le positionnement des diodes sont illustrés par la Figure II.10.



**Figure II.10 :** Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF.

Selon l'état des diodes PIN, l'antenne est alimentée selon trois configurations dites mode coplanaire, mode droit, et mode gauche selon la fente (droite ou gauche) est court-circuitée.

La Figure II.11 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne selon ces trois configurations pour la fréquence 3,5 GHz. Le substrat utilisé est un substrat Roger RO4003 d'épaisseur 1,524mm et de constantes diélectriques 3,38.



**Figure II.11:** Diagrammes de rayonnement à 3,5 GHz selon les trois modes de configuration.

### • II.6.2.2 Utilisation de MEMS

Une antenne reconfigurable en diagramme en forme de spirale rectangulaire dans laquelle sont intégrés quatre MEMS dans la figure II.12 [9].

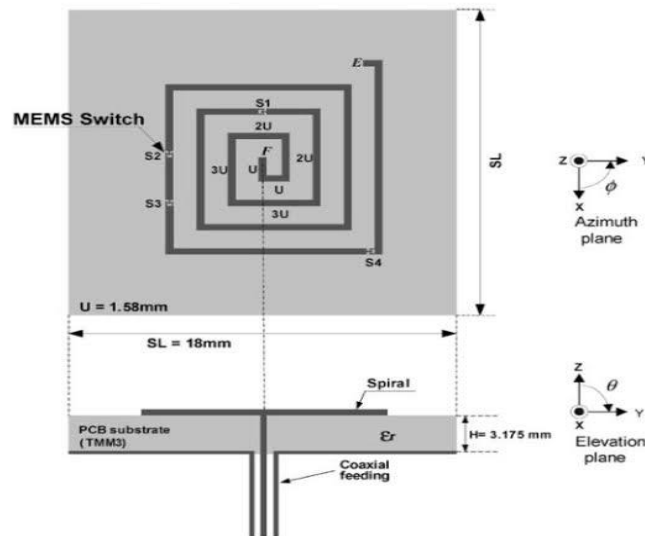


Figure II.12 : Antenne à spirale reconfigurable en diagramme.

• II.6.2.3 Utilisation de photoconducteurs

L'antenne reconfigurable en fréquence offre également la possibilité de reconfiguration en diagramme selon l'état des photoconducteurs on peut trouver des différents diagrammes de rayonnement. Dans le cas où une seule diode est passante, la fréquence de résonance est égale à 2,7 GHz. Quand le commutateur de gauche est activé, le diagramme de rayonnement subit une rotation à gauche dans le plan du champ électrique ; et inversement quand celui de droite est passant [9].

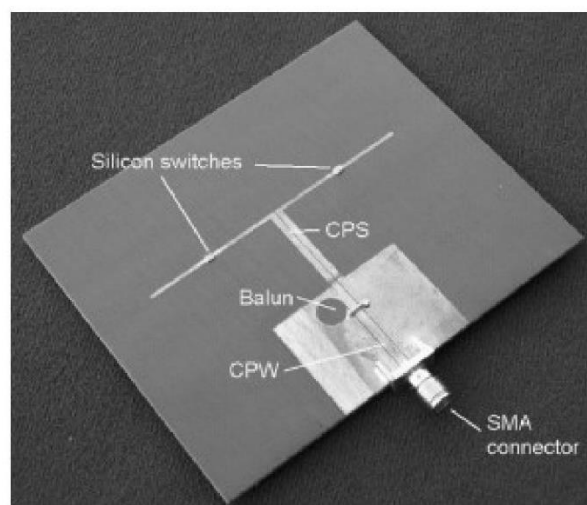


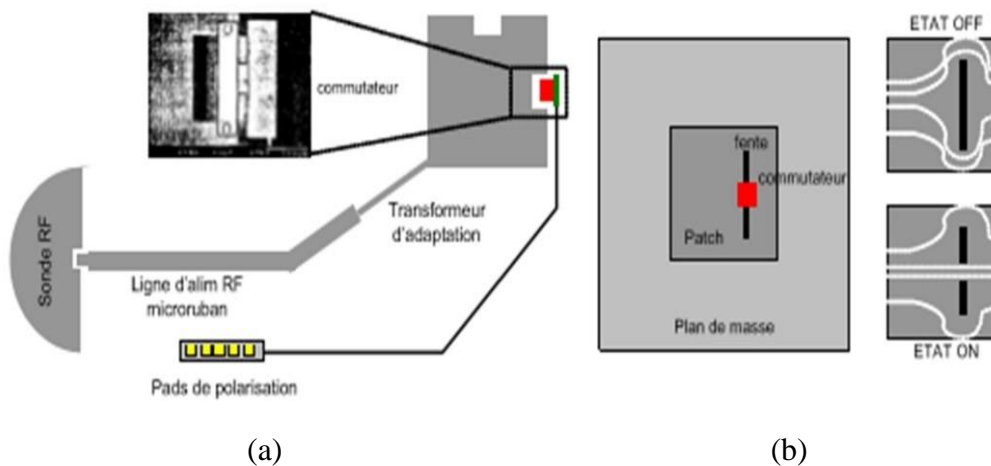
Figure II.13 : Photographie de l'antenne dipôle commutée.

### • II.6.3 Antenne reconfigurable en polarisation

Les antennes reconfigurables en polarisation sont capables de commuter entre différents modes de polarisation. La capacité de commutation entre les polarisations horizontale, verticale et circulaire peut être utilisée pour réduire les pertes de décalage de polarisation dans les dispositifs portables. La reconfigurabilité de la polarisation peut être fournie en modifiant l'équilibre entre les différents modes d'une structure multimode [10].

Proprement dit cette reconfiguration permet de modifier la polarisation de l'élément rayonnant (verticale/horizontale, droite/gauche pour la polarisation circulaire...) en gardant les mêmes caractéristiques de l'antenne (fréquence, diagramme de rayonnement...). Elle assure une bonne fiabilité et une bonne communication (immunité aux interférences).

On doit altérer la polarisation de l'antenne en agissant sur la phase et le sens du courant d'alimentation. L'antenne patch avec des fentes commutables, ou "PASS" développée par l'UCLA est une antenne reconfigurable en polarisation. On l'obtient par l'insertion d'un commutateur (diode PIN ou FET) au centre de la fente, en contrôlant le comportement du courant sur le patch par l'utilisation d'un circuit biaisant qui permet de commuter la diode PIN de l'état On vers l'état OFF et vice versa comme montre la figure II.14. On peut atteindre une polarisation différente en utilisant deux fentes orthogonales sur le patch II.14 [11].



**Figure II.14 :** (a) Antenne patch à bord commuté et (b) Antenne PASS de l'UCLA.

### Conclusion

On a abordé dans ce chapitre des initiations de base sur les antennes reconfigurables ainsi que les composants diodes Varactors, les diodes PIN et les RF-MEMS puis on a passé aux différents détails sur les techniques de reconfigurabilité en fréquence, diagramme de rayonnement et en polarisation. Alors la reconfigurabilité des antennes est une solution très efficace dans le domaine des télécommunications.



### Bibliographie

- [1] Trong Duc NGUYEN, « *Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive* », Thèse Du Doctorat, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 24/10/2012.
- [2] B Poussot, JM Laheurte, « *Antennes reconfigurables pour la radio cognitive et les systèmes MIMO* », vol. 4, no.39, pp. 39–42,26/27 mars 2013.
- [3] Xavier Kuhn, « *Technique De Reconfiguration D'antennes Par Décomposition Des Diagrammes De Rayonnement* », Mémoire Pour L'obtention Du Diplôme De Maitrise `Es Sciences Appliquées, Université De Montréal, Août 2012.
- [4] CHAIMA Amel, « *Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN* », Mémoire pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [5] François Le Chevalier ; Dominique Lesselier ; Robert Staraj, « *Antennes non-standard : nouvelles technologies pour les architectures de capteurs.* », Paris ; Hermès Science, vol.179, pp.157-158,2010.
- [6] Imen Ben Trad, « *Antennes agiles pour les télécommunications multistandards* », Thèse pour obtenir le titre de DOCTEUR DE L'INSA DE RENNES, l'Université européenne de Bretagne, 29.10.2014.
- [7] Nasser Ojaroudi Parchin, Haleh Jahanbakhsh Basherlou, Yasir I. A. Al-Yasir 1, Ahmed M. Abdulkhaleq and Raed A. Abd-Alhameed, « *Reconfigurable Antennas : Switching Techniques- A Survey* », vol. 14, no.04, pp. 01–14,2020.
- [8] Saber Dakhli, « *Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par métamatériaux : conception d'antennes, inspirée par métamatériaux* », Thèse du Docteur De L'université De Rennes 1, Université Européenne de Bretagne, Paris le 15 Juin 2015.
- [9] ZEMAM Youssouf et FOUKIA Aimad Eddine, « *Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs* », Mémoire De Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2017.
- [10] Kanak singh, Manoj Kumar Gautam, Swatantra Tiwari, « *A Review on Reconfigurable Communicating Patch Antenna* », vol.4, no.90, pp.89–92,2019.
- [11] Adjila Fatima Melati Nadia, « *Etude Et Conception D'une Antenne Fractale Reconfigurable En Fréquence* », Mémoire De Master, Université 8 Mai 1945 Guelma,2019.



**Chapitre III : Etude et  
conception d'une  
Antenne MIMO  
reconfigurable**

### Introduction

Une antenne reconfigurable a la capacité de s'adapter à son environnement en modifiant son diagramme de rayonnement, sa polarisation ou bien sa fréquence. De nombreuses ([1], [2]) études ont montré une amélioration significative des performances du système lorsque telle antenne est utilisée [3]. Pour cette raison, nous avons basé dans ce chapitre sur la conception et la réalisation d'une structure MIMO reconfigurables en fréquence et en diagrammes de rayonnement en utilisant la technique des fentes et la modification géométrique. Il est nécessaire de simuler l'antenne proposée avant de passer à la réalisation en basant sur le logiciel électromagnétique Computer Simulation Technology(CST), MicrowaveStudio TM, Version 2019. La conception, la réalisation et les mesures des différentes structures, ont été effectuées au sein du laboratoire de Télécommunications département d'Electronique et Télécommunications Université 08 mai 1945 Guelma.

### III.1 Choix D'outil De Simulation

Il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques consacrés pour la conception des antennes (les antennes imprimées, les filtres HF...). Parmi ces simulateurs, il y a le HFSS, ADS Momentum, IE3D, FEKO et CST MICROWAVE STUDIO. Dans notre étude, on a choisi le CST studio qui a la possibilité de maîtriser tous ces outils dans un bref délai et il permet de concevoir l'antenne en 3D au contraire à d'autres outils tels que le ADS [4]. Le simulateur CST est un outil spécialisé pour la simulation et la conception électromagnétique en trois dimensions (3D) des composantes hautes fréquences en basant sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant la méthode d'intégration finie(FIT)et aussi la méthode des éléments finie (FEM) [4].

### III.2 Présentation Du Logiciel Microwave Studio De CST

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, FiniteIntegrationTechnic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique,

CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateurs Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [5].

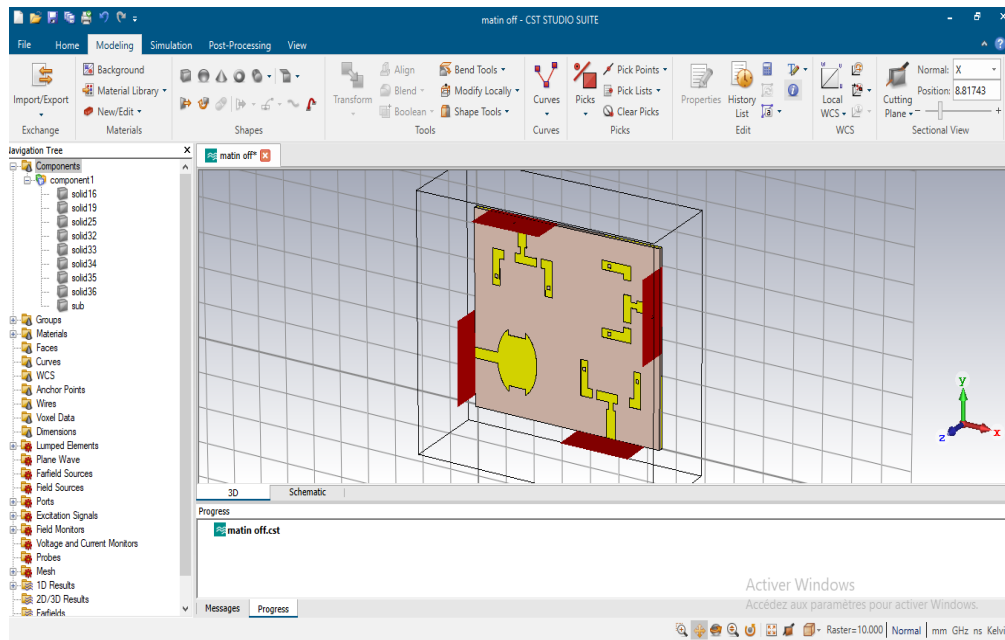


Figure III.1: l'interface du CST studio.

### III.3 Modélisation De La Diode PIN

#### III.3.1 Modélisation par un plot métallique

Plusieurs travaux basés sur des diodes PIN, comme par exemple la diode 4005HPND, ont démontré la validité de cette modélisation qui est très simple pour simuler correctement les performances de l'antenne. La présence ou l'absence (respectivement) d'un plot métallique généralement de petite taille représente le mode passant ou bloqué de la diode PIN (connexion ou déconnexion) [6].

#### III.3.2 Modélisation par un circuit RLC équivalent :

Le circuit équivalent RLC simplifié de la diode PIN explique les polarisations directe et inverse où la seule résistance en série avec une inductance dans l'état ON et une combinaison d'une résistance en parallèle avec la capacité tous en série avec une inductance à l'état OFF, la capacité n'intervient plus, quand la diode PIN est à l'état « ON » [2].

### III.3.3 Modélisation via l'utilisation d'un commutateur commandé en tension

Le schéma équivalent du commutateur est illustré par la Figure III.2. Lorsque la tension  $V_c$  est inférieure à 5 V ( $V_c = 0$  V ; 2,5 V) l'état de la diode est passant ; et dans le cas inverse,  $V_c$  supérieure à 5 V ( $V_c = 7,5$  V ; 10 V) l'état de la diode est bloqué [7].

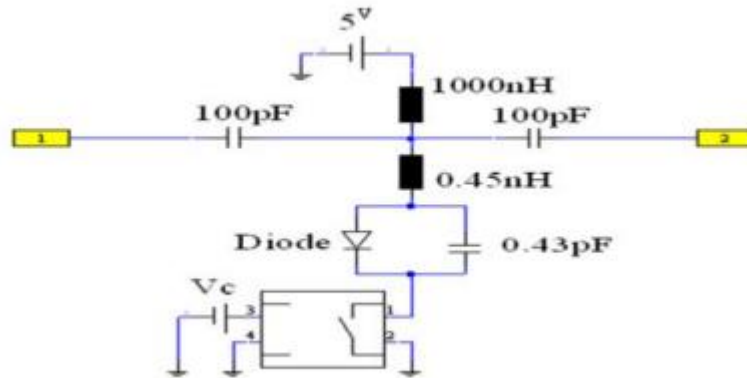


Figure III.2: Schéma équivalent du commutateur.

### III.4 Conception Et Réalisation D'une Antenne MISO Reconfigurable

La structure proposée est conçue pour une antenne MISO (Multi IN Single Out) reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement sous forme de U à 3 éléments et une seule antenne de réception ultra large bande (UWB).

#### III.4.1 La géométrie de l'antenne de base :

Après une étude paramétrique les paramètres géométriques de l'antenne MISO proposée sont définis de la façon suivante : un substrat (FR4) de dimension  $65 \times 55 \text{ mm}^2$  (largeur x longueur) avec une permittivité relative  $\epsilon_r = 4.3$ , tangente de perte  $\tan(\delta) = 0.0025$  et une épaisseur  $h = 1.5 \text{ mm}$ . L'épaisseur de cuivre  $t$  est de  $0.035 \text{ mm}$ . Les trois éléments rayonnants sont des plans de masse sous forme carrée, ils sont alimentés par des lignes micro ruban de dimension  $3 \times 10 \text{ mm}^2$  (largeur x longueur) et d'impédance caractéristique  $Z = 50 \Omega$ , comme elle est illustrée sur la Figure III.3

La structure de l'antenne de détection UWB est une antenne unipolaire imprimée de forme elliptique, comme nous montre la figure III.3. Cette antenne est constituée d'un patch de forme elliptique de type monopole de rayons (9,5 mm, 7 mm), d'une alimentation par ligne micro rubande dimension  $3 \times 8 \text{ mm}^2$ , d'impédance caractéristique  $50 \Omega$  de plus un plan de masse

demi-elliptique de rayons (15 mm,7 mm), fonctionne dans une bande de fréquences qui couvre l'UWB de (3,1-10,6) GHz.

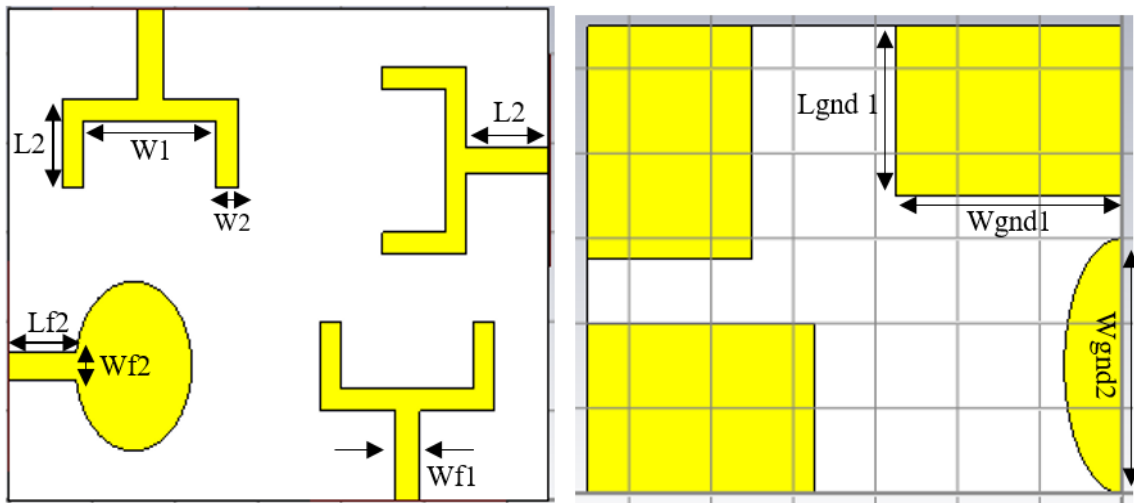


Figure III.3: Structure de l'antenne de base.

Les différents paramètres de l'antenne proposée :

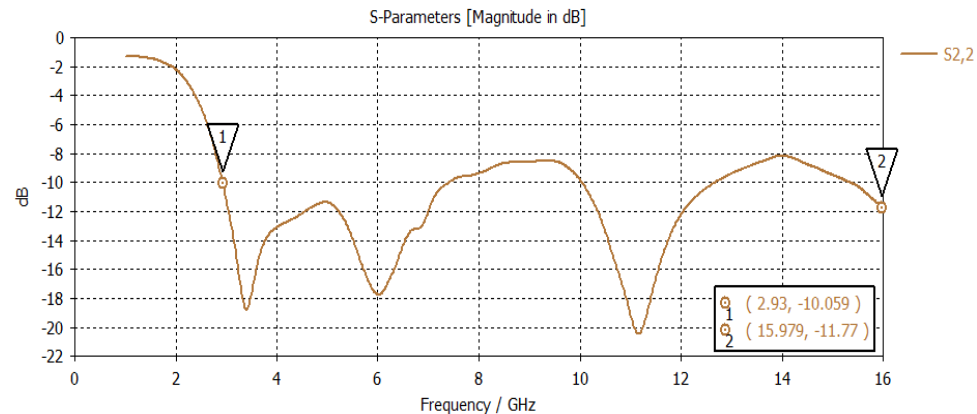
Paramètre	(mm)	Paramètre	(mm)
W	65	W1	21
L	55	W2	2.5
H	1.5	L1	2
t	0.035	Wf1	3
Lf1	8	L2	10
Wf2	3	Lf2	8
Wgnd1	27.5	W3	2.5
Lgnd1	20	L3	6
R1	9.5	R3	7
R2	7	Wslit	3
Wgnd2	30	Lslit	3
W4	4	Wf4	1
L4	6	Wf5	0.5

Tableau III.1: les différents paramètres de l'antenne proposée.

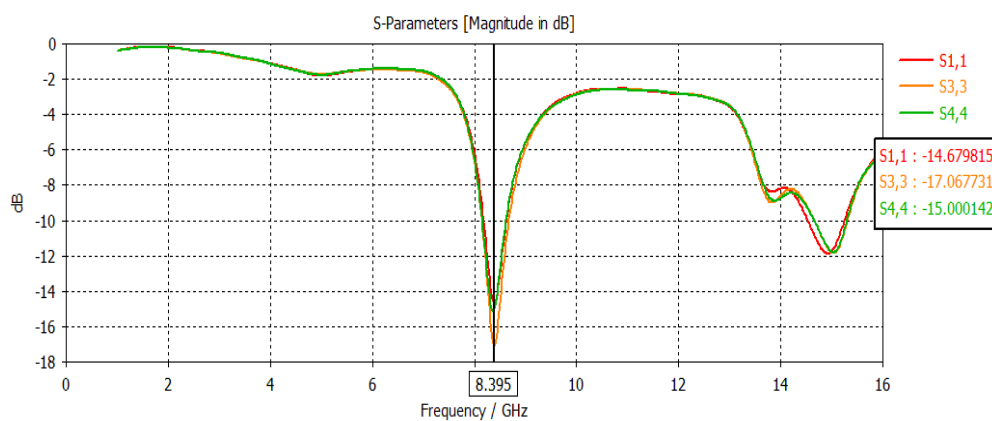
### III.5 Résultats De Simulation

#### III.5.1 Structure de base (Antenne MISO 3x1)

La structure de base est simulée par le logiciel CST. Le coefficient de réflexion obtenu est représenté par la Figure III.4



(a)



(b)

**Figure III.4** : le coefficient de réflexion de l'antenne proposée

(a)-S22 de l'antenne de réception ultra large bande

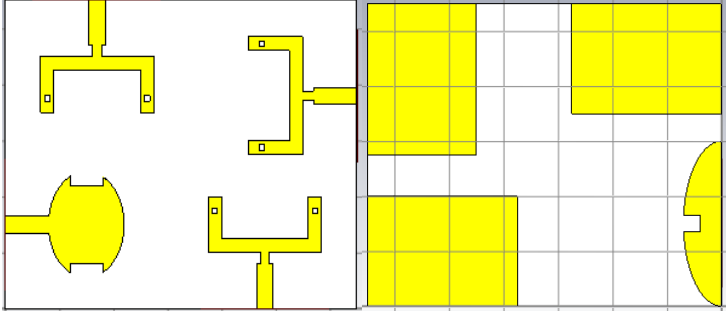
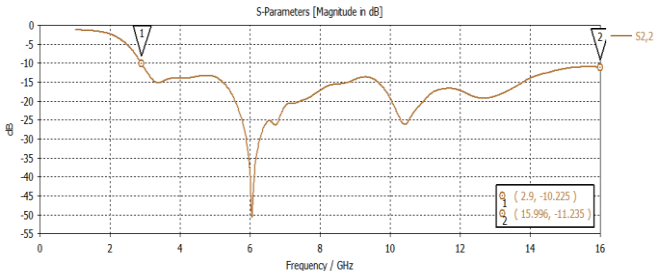
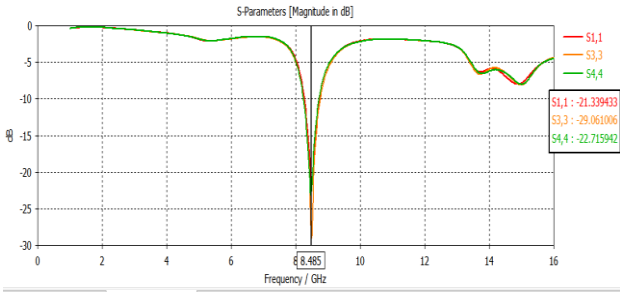
(b)-S11, S33, S44 des éléments rayonnants

La figure III.4 (a) nous montre que l'antenne ULB fonctionne dans la gamme 2.9 GHz jusqu'à 16 GHz avec un niveau du coefficient de réflexion plus faible de l'ordre de -21dB. La figure III.4 (b) nous montre que les trois coefficients de réflexion des éléments rayonnants

(antennes d'émission) sont de l'ordre de 8.39 GHz et les niveaux des coefficients de réflexion correspondants sont respectivement -14 dB, -17 dB et -15 dB.

**III.5.2 création des fentes et modification de la géométrie**

Afin d'améliorer le niveau du coefficient de réflexion des trois éléments rayonnants (S11, S33, S44) on a créé deux fentes de forme carrésur les barres latérales de chaque antenne d'émission. Concernant l'antenne ultra large bande nous avons introduit des modifications géométriques à travers des encoches sur l'élément rayonnantde forme elliptique d'une part et le plan de masse d'autre part. Pour les lignes d'alimentation (ligne micro-ruban) nous avons créé des fentes rectangulaires entre les éléments d'émission placés verticalement afin d'améliorer l'isolation entre les éléments d'antenne placés verticalement. Les résultats de simulations sont regroupés dans le tableau III.2.

<p><b>Structure modifiée</b></p>	
<p><b>L'antenne ultra large bande</b></p>	 <p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>Legend:          1 ( 2.9, -10.225 )          2 ( 15.996, -11.235 )</p>
<p><b>Les trois antennes d'émission de forme U</b></p>	 <p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>Frequency / GHz</p> <p>Legend:          S1,1          S3,3          S4,4</p> <p>Data points:          S1,1 : -21.339433          S3,3 : -29.061006          S4,4 : -22.715942</p>

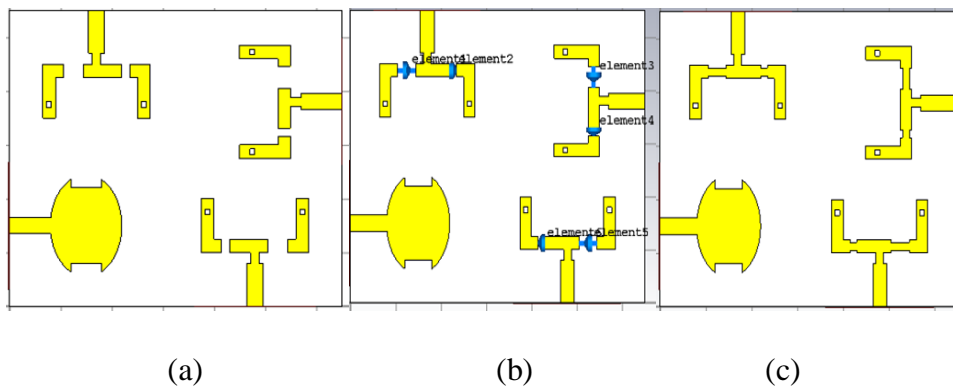
**Tableau III.2:** L'antenne MISO modifiée et son coefficient de réflexion.



D'après les résultats du tableau III.2 nous remarquons qu'il y a une amélioration importante au niveau du coefficient de réflexion S22 de l'antenne de réception qui est de l'ordre de -51dB. Pour les trois antennes d'émission on peut dire qu'il y a aussi une amélioration au niveau des trois coefficients S11, S33 et S44 qui sont -21dB, -29dB et -22.7 dB respectivement.

### III.6 La Reconfigurabilité En Fréquences

Pour avoir la fonction de reconfigurabilité (en fréquence/en diagramme de rayonnement) d'une antenne MISO nous avons créée deux fentes sur la barre inférieure de chaque antenne d'émission où on va mettre soit des diodes PIN soit des plots métalliques comme nous montre la figure III.5



**Figure III.5** : Structure de l'antenne modifiée

(a)- Création des fentes (b)- Insertion des diodes PIN (c)- insertion des plots métalliques.

#### III.6.1 Utilisation de la diode PIN

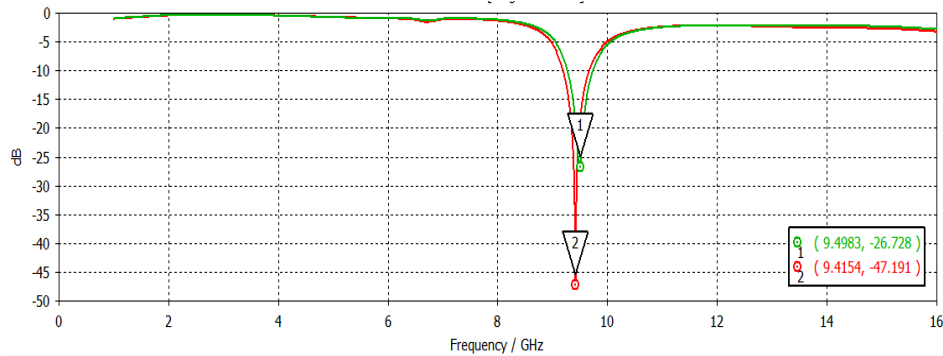
Parmi les avantages du logiciel CST la présence de l'option « Lumped Element » nous permet d'implanter des diodes PIN fonctionnant avec deux états ON (passante) et OFF (Bloquée). Ces diodes sont modélisées par un circuit RLC équivalent, le circuit série représente l'Etat ON et le circuit parallèle représente l'Etat OFF voir chapitre II.

Où la seule résistance de (3,5 ohms) en série avec une inductance de (0,15 nH) dans l'état ON et une combinaison d'une résistance de (1Kohm) en parallèle avec la capacité de (0.025 pF) tous en série avec une inductance de (0,15 nH) à l'état OFF figure III.6. Donc nous avons choisi deux cas :

- État ON, lorsque les six diodes sont en série.
- État OFF, lorsque les six diodes sont en parallèle.

Vue la non disponibilité des diodes PIN au niveau de notre laboratoire, nous avons remplacé ces diodes par des plots métalliques puisqu'elles ont le même rôle circuit série (ON) circuit parallèle (OFF) figure III.7 et figure III.8.

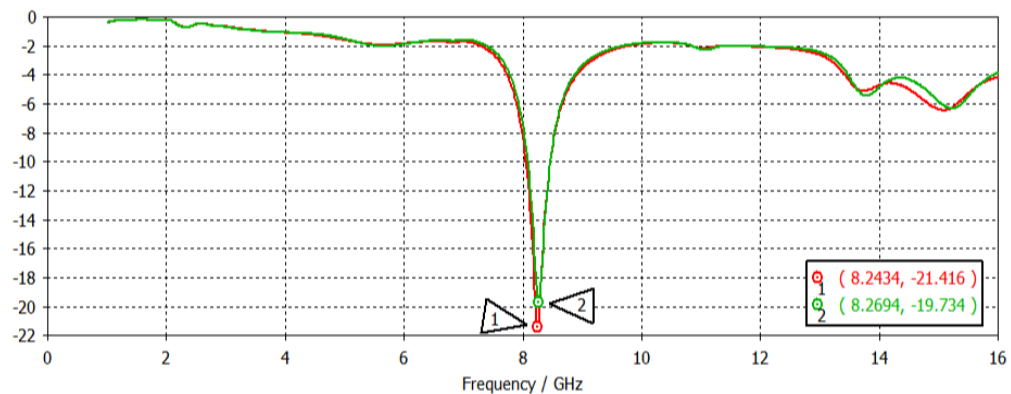
#### ❖ Etat OFF



**Figure III.6 :** comparaison entre le plot métallique et la diode PIN à l'état OFF.

La figures III.6 nous montre que la fréquence de résonance 9.49 GHz à un niveau d'adaptation de -26 dB avec la diode PIN et une fréquence de résonance 9.41 GHz à un niveau d'adaptation de -47 dB avec le plot métallique à l'état OFF.

#### ❖ Etat ON



**Figure III.7 :** comparaison entre le plot métallique et la diode PIN à l'état ON.

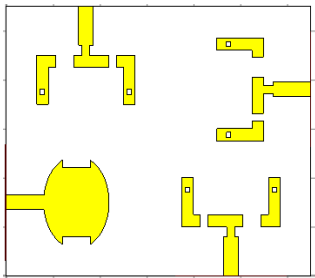
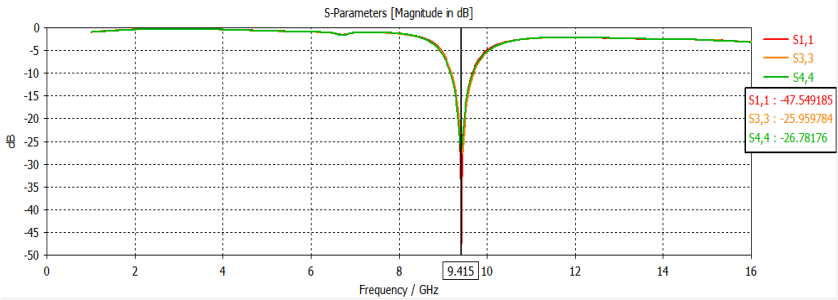
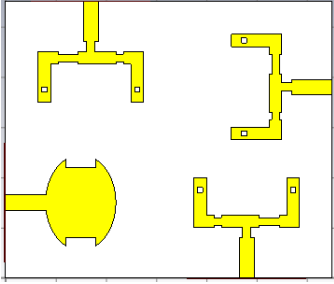
La figures III.7 nous montre que la fréquence de résonance 8.26 GHz à un niveau d'adaptation de -19 dB avec la diode PIN et une fréquence de résonance 8.24 GHz à un niveau d'adaptation de -21 dB avec le plot métallique à l'état ON.

Donc les diodes PIN et les plots métalliques fonctionnent presque de la même façon dans les deux états et l'avantage ici c'est que les plots métalliques nous donnent un niveau d'adaptation mieux qu'avec les diodes PIN.

III.6.2 Utilisation d'un plot métallique

Les résultats représentés dans le tableau III.3 nous montre que l'état OFF des six (06) diodes PIN produit une résonance à 9.41 GHz et un coefficient de réflexion de -47.5dB, -25.9dB et -26.7dB pour S11, S33 et S44 respectivement. Alors qu'à l'état ON des six (06) diodes PIN produit une résonance à 8.24 GHz avec une adaptation de S11=-21.4dB, S33=-29.7dB et S44=-21.5dB.

Ce décalage en fréquence de résonance (Etat OFF  $f_r=9.41\text{GHz}$ , Etat ON  $f_r= 8.24\text{GHz}$ ) explique que **la fonction de reconfigurabilité en fréquence de l'antenne MISO conçue est effectuée** voir figure III.8.

L'état	OFF (Sans plot)
Structure	
Résultat	
L'état	ON (avec plot)
Structure	

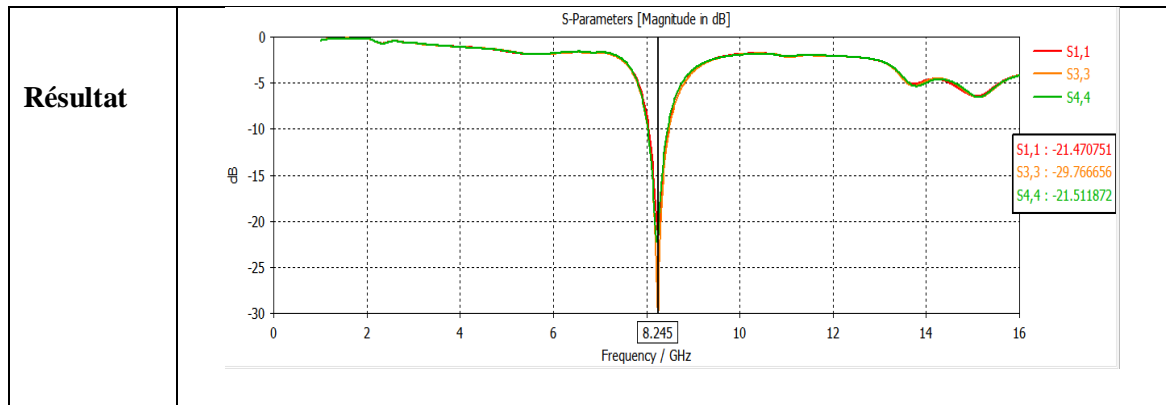


Tableau III.3: Les résultats de simulation de l'état ON et OFF par l'utilisation d'un plot métallique.

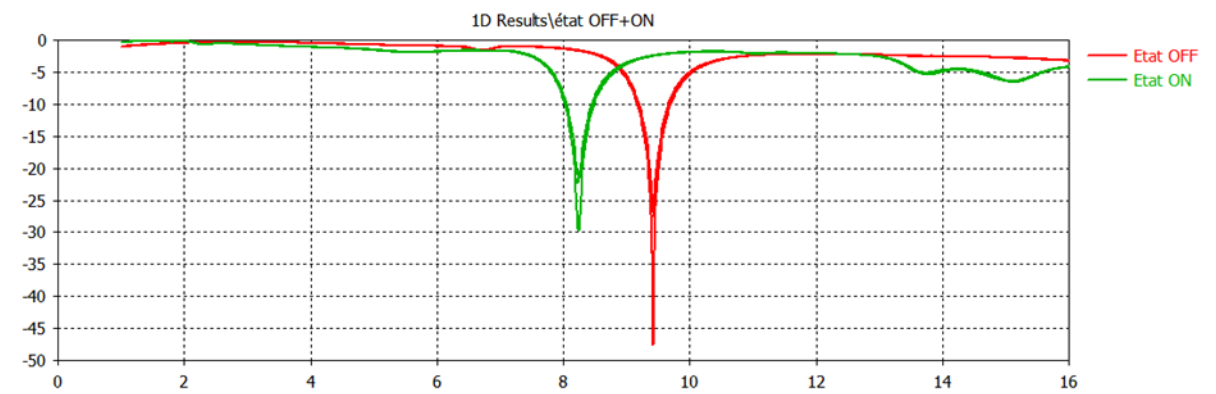


Figure III.8 : les deux courbes de l'états OFF et ON des diodes.

### III.7 Les Performance De L'antenne MIMO Reconfigurable

#### III.7.1 Le coefficient d'isolation

Le coefficient d'isolation entre les différents ports de l'antenne MISO proposée est représenté sur la figure III.9

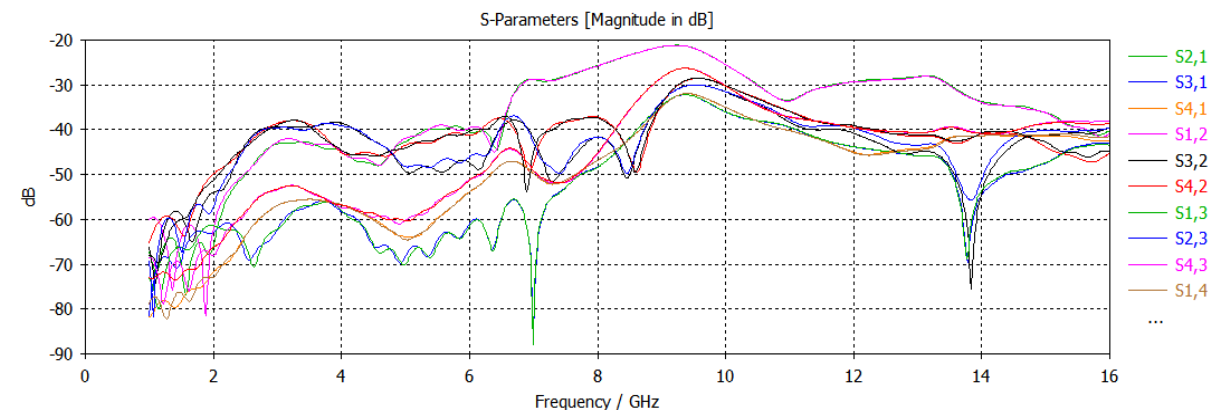


Figure III.9 : Isolation entre les différents ports de l'antenne MISO.

Les résultats de la figure III.9 montrent qu'il y a un bon isolement entre les différents ports de l'antenne proposée il est de l'ordre de -50dB à -22dB pour l'intervalle de 8 GHz à 10GHz.

#### III.7.2 Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC : Enveloppe Corrélation Coefficient)

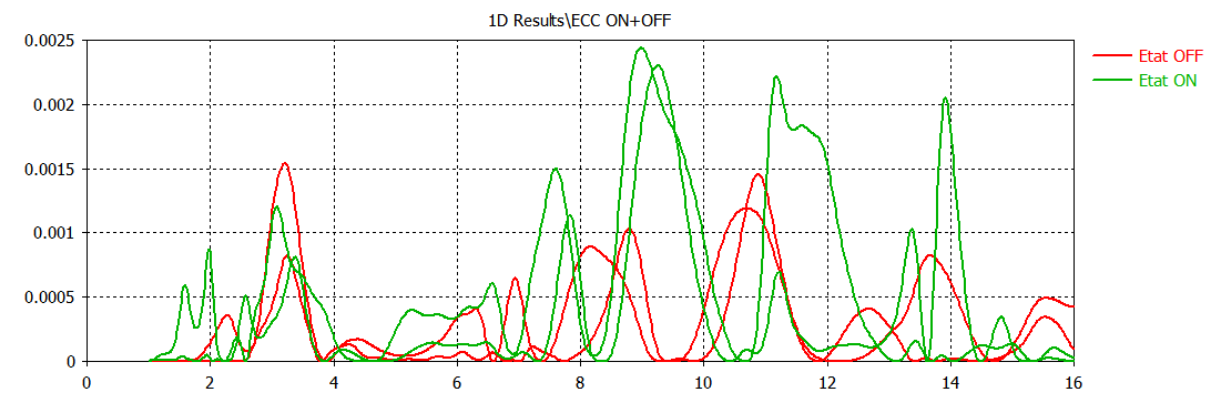
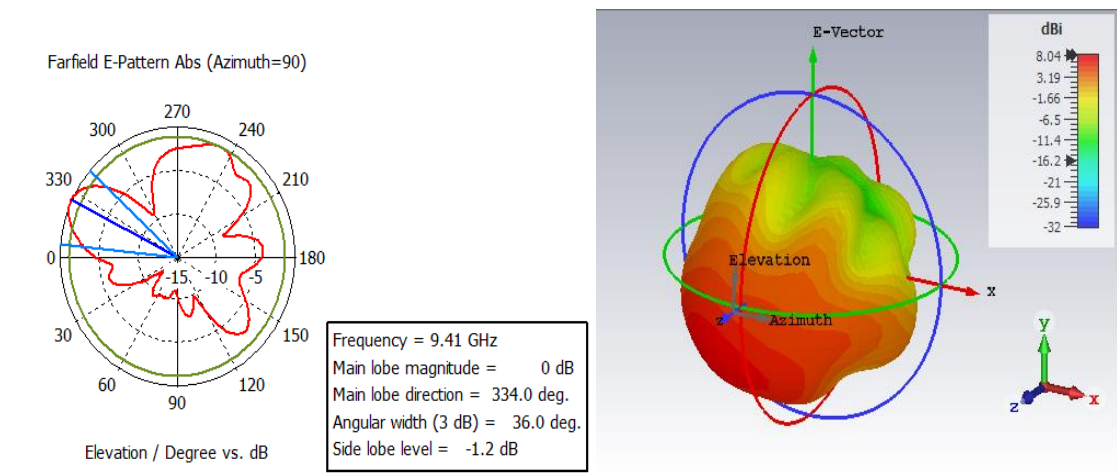


Figure III.10 : Coefficients de corrélation d'enveloppe (ECC) simulés de l'antenne MIMO à 3 éléments.

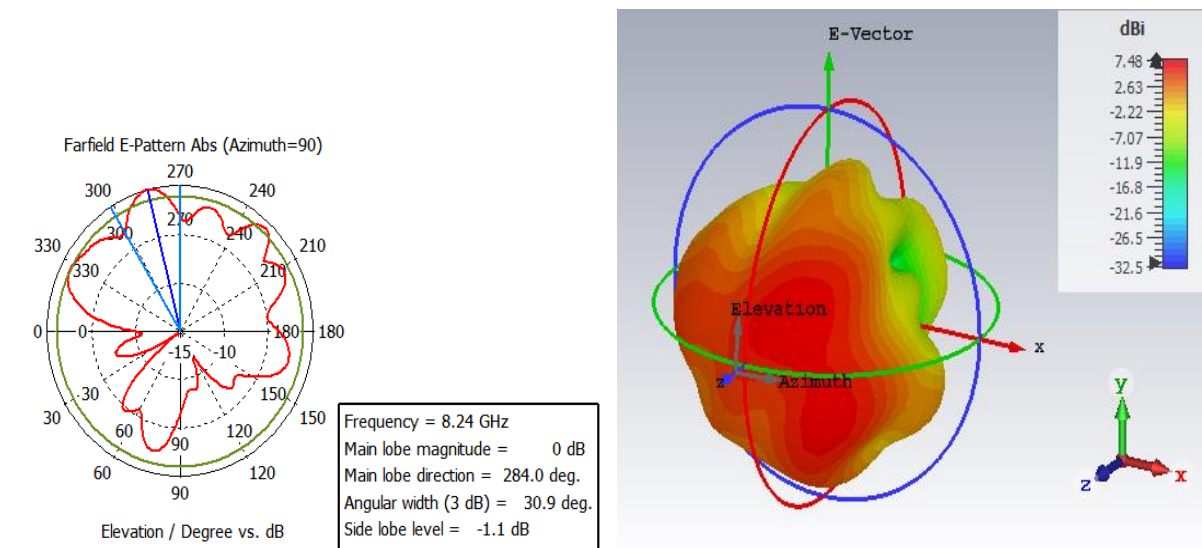
D'après le résultat de la figure III.10 nous remarquons que l'antenne MISO proposée présente un coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) inférieur à 0.0025 pour les deux états OFF et ON.

### III.8 La Reconfigurabilité En Diagramme De Rayonnement

Comme l'antenne MISO est composée d'une antenne ultra large bande et trois éléments rayonnants identiques de forme U, on va baser dans notre étude sur une seule antenne d'émission pour tracer le diagramme de rayonnement. A cet effet, nous avons utilisé des plots métalliques et avec les deux états OFF et ON (sans plot et avec plot) avec les deux fréquences de résonance correspondantes 9.41GHz et 8.24 GHz. Le diagramme de rayonnement est représenté en coordonnées polaire sur le plan vertical (xz) avec un angle d'Azimut  $\Phi=90^{\circ}$  et en 3D figures III.11 et III.12.



**Figure III.11:** Diagrammes de rayonnement de l'antenne MIMO à la fréquence 9.41GHz (état OFF).



**Figure III.12:** Diagrammes de rayonnement de l'antenne MIMO à la fréquence 8.24GHz (état ON).

Le diagramme de rayonnement représenté sur la figures III.11 (Etat OFF/sans plot) est directive et la direction du lobe principal est égal à  $334^\circ$  et l'angle d'ouverture à -3dB est de l'ordre de  $36^\circ$ .

Le diagramme de rayonnement représenté sur la figures III.12 (Etat ON/avec plot) est directive et la direction du lobe principal est égal à  $284^\circ$  et l'angle d'ouverture à -3dB est de l'ordre de  $30.9^\circ$ .

D'après ces deux résultats on remarque que le diagramme de rayonnement change sa direction avec un angle de  $50^\circ$ , donc on peut dire que **la fonction de reconfigurabilité en diagramme de rayonnement est réalisée.**

### III.9 Validation Expérimentale

Après avoir simulé notre antenne par le logiciel CST et étudié leurs caractéristiques électriques et de rayonnement, nous avons passé à l'étape de validation des résultats obtenus avec ceux de la mesure, La réalisation de la structure MISO 3x1 est effectuée en utilisant la machine de gravure mécanique LPKF ProtoMat S103. Cette procédure passe par deux phases : phase de fabrication de l'antenne par la machine à gravure mécanique et la deuxième phase de mesures qui est basée sur l'utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriel.

#### III.9.1 Description de la machine LPKF ProtoMat S103 :

Le ProtoMat S103 est le système de pointe de la gamme de fraiseuses pour cartes de circuits imprimés LPKF série S avec une zone de travail de 9 "x 12". Il est recommandé pour les matériaux RF et hyperfréquences plus souples à base de PTFE. Il est capable de traiter facilement des applications de PCB de pointe grâce à des fonctionnalités telles que la reconnaissance optique fiduciaire et la résolution de fraisage de 0,002 millième de pouce.

Le ProtoMat S103 fonctionne directement à partir de données CAO pour traiter les cartes. Les caractéristiques standard propres au système incluent une table à vide pour retravailler les circuits imprimés endommagés et la fixation de matériaux délicats ou flexibles, ainsi qu'un limiteur de profondeur sans contact, ou Air-foot, qui garantit que rien n'entre en contact avec le matériau de la carte sauf l'outil. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour ceux qui travaillent avec des conceptions RF et micro-ondes [8].

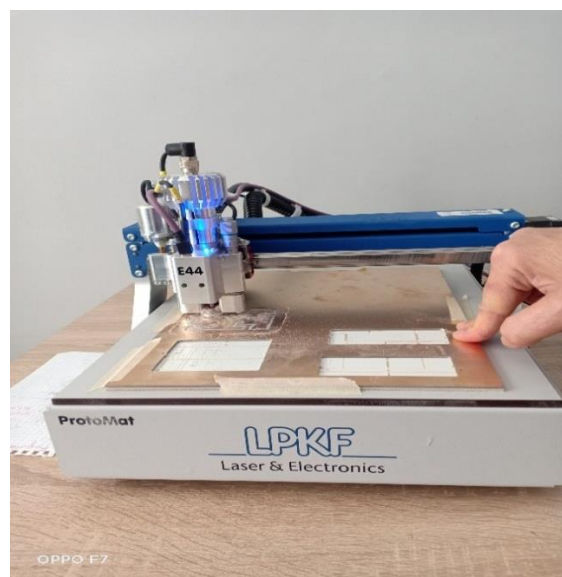


Figure III.13 : La machine à gravure LPKF Protomat S103.



### III.9.2 Appareil de mesure analyseur de réseaux

L'analyseur de réseaux (Rohde&Schwarz R&S ®ZNB20 Vector Network Analyser) de 100 KHz à 20 GHz fréquence limite de l'analyseur sert à mesurer les paramètres S et l'impédance d'entrée de l'antenne.

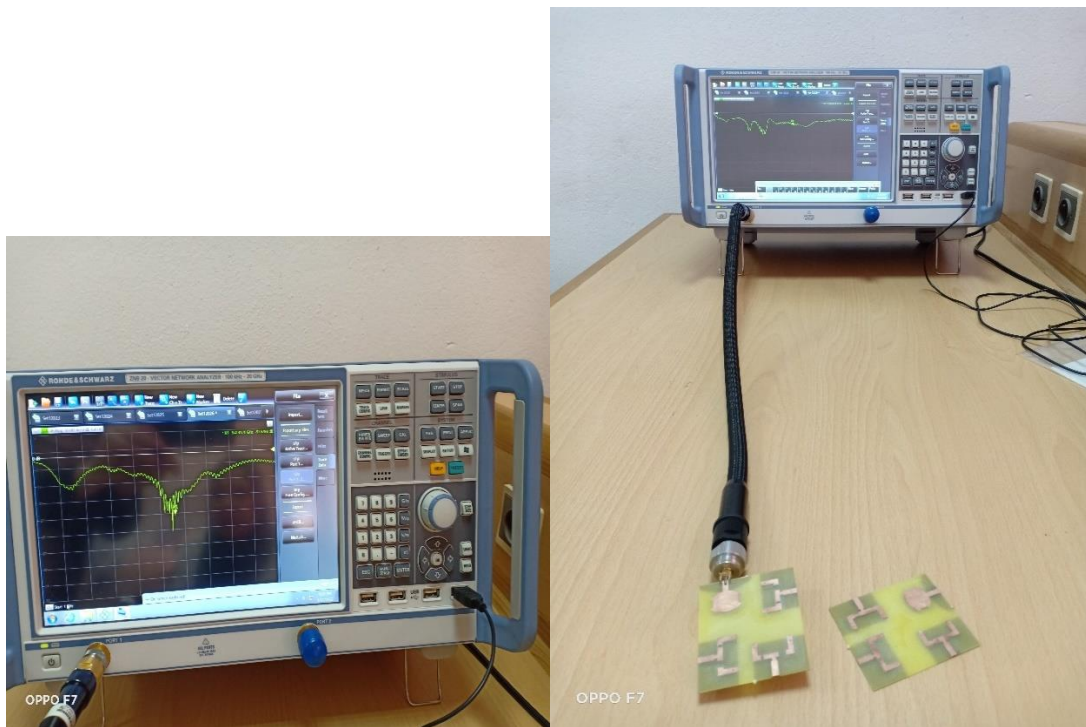
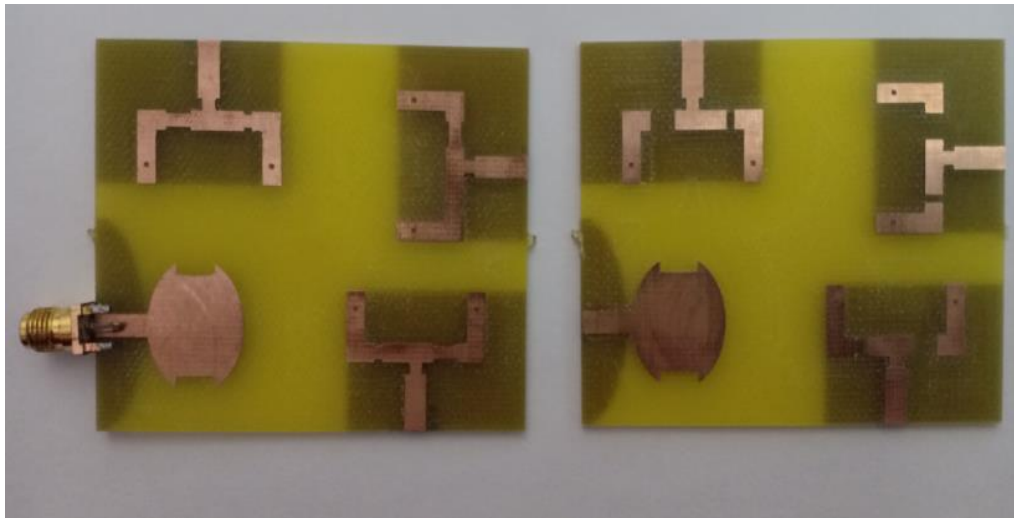


Figure III.14: Analyseur de réseau vectoriel.

### III.9.3 -Le prototype réalisé

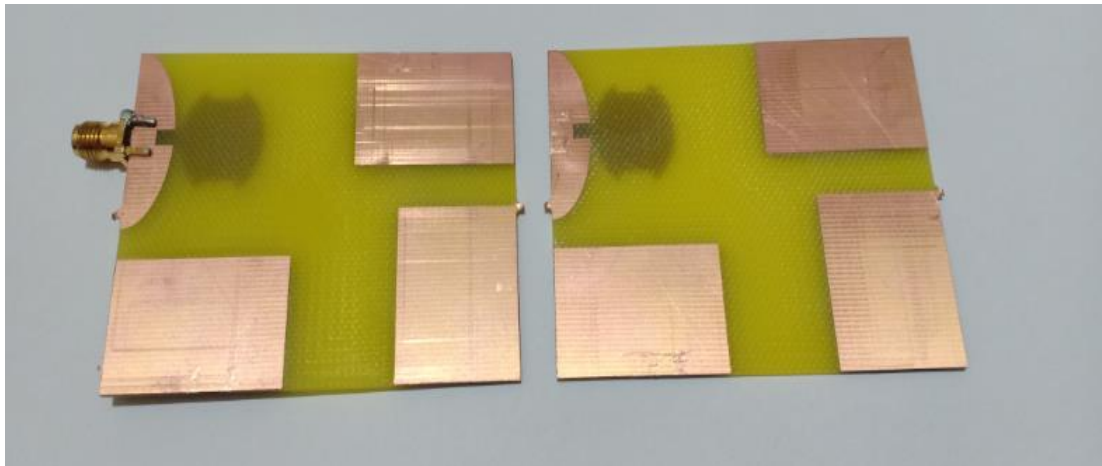
Nous avons réalisé deux prototypes :

- ❖ Le premier concerne une antenne MISO (3x1) avec plots métalliques (Etat ON).
- ❖ Le deuxième concerne une antenne MISO (3x1) sans plots métalliques (Etat OFF).



(a)

(b)



(c)

**Figure III.15:** prototype réalisé

(a) l'antenne MISO avec plots métalliques, (b) l'antenne MISO sans plots métalliques,

(c) vue de dessous

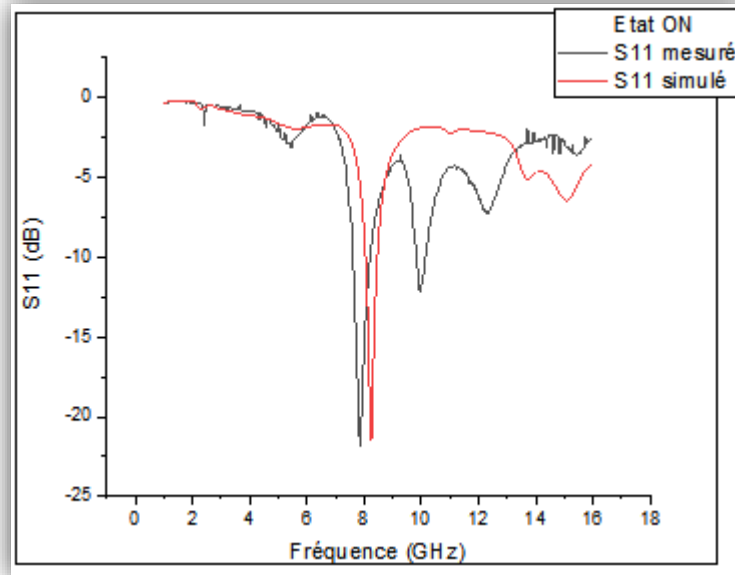
### III.9.4 Mesures expérimentales

#### III.9.4.1 Mesure du coefficient de réflexion :

À l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel (Rohde & Schwarz R&S ®ZNB20 Vector Network Analyser) nous avons mesuré Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'élément d'émission et  $S_{22}$  de l'antenne ultra large bande.

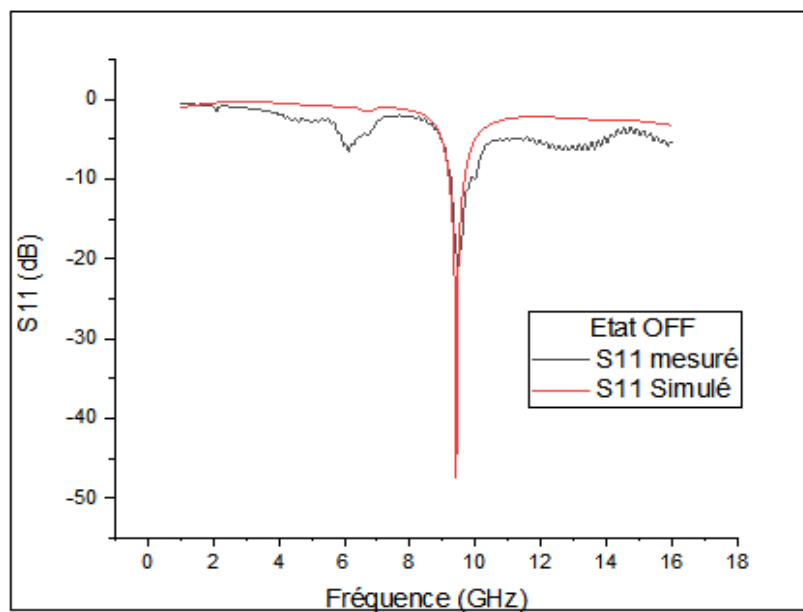
Les résultats de mesure et de simulation des deux états (ON) et (OFF) sont illustrés sur la figure III.16 et la figure III.17 respectivement.

➤ **Etat ON**



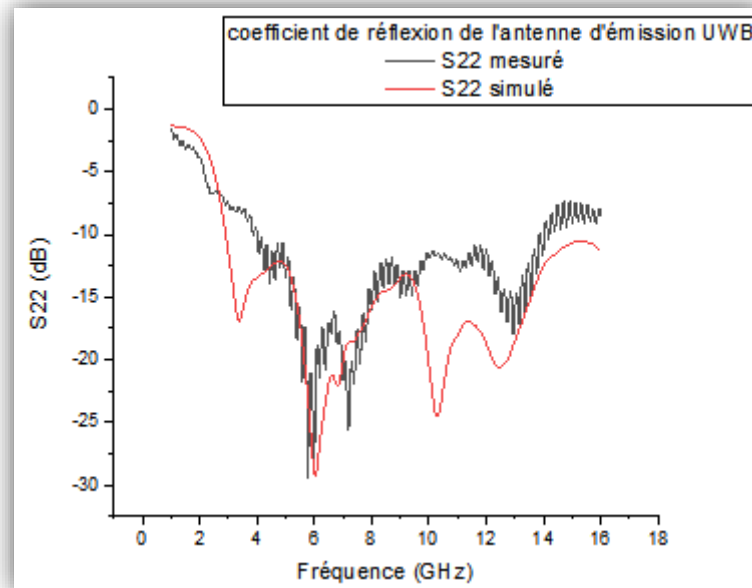
**Figure III.16:** Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S11 à l'État ON.

➤ **Etat OFF**



**Figure III.17:** Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S11 à l'État OFF.

➤ S22 del'antenne de détection ultra large bade



**Figure III.18:** Comparaison entre les résultats simulé et mesuré du S22.

Essai	Etat	Fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion S11 (dB)
Simulé	ON	8.24	-21.4
Mesuré	ON	7.95	-24
Simulé	OFF	9.41	-47.5
Mesuré	OFF	9.42	-21.9

**Tableau III. 4 :** comparaison des résultats obtenus

D'après les figures III.16, III.17 et III.18 les résultats de mesure sont presque identiques aux résultats de la simulation, la petite différence due au erreurs de mesure peut être lier (au défaut de précision de la machine de gravure, à l'emplacement du connecteur SMA ou bien à la qualité de soudure).

Ces résultats sont largement suffisamment pour dire que notre antenne MIMO (MISO) et est reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement.

### **III.10 Comparaison De L'antenne MIMO Proposée Avec D'autres Antennes De Références**

L'antenne MISO proposée est comparée avec d'autres antennes MIMO publiés dans les articles [1] et [2], comme indiqué dans le tableau III. 5 ci-dessous. Les comparaisons montrent que la conception proposée a des meilleures performances que les références utilisées dans le tableau III.6 tels qu'un ECC plus faible, une meilleure isolation.

<b>Références</b>	<b>No. of Elements</b>	<b>No. and type of switches</b>	<b>ECC (<math>\leq</math>)</b>	<b>Isolation (dB) (<math>\leq</math>)</b>
[1]	2	2-varactor	0.1815	-9.5
[2]	4	3-PIN	0.018	-17
<b>Antenne MIMO proposée</b>	<b>4</b>	<b>6-PIN</b>	<b>0.0025</b>	Dans l'intervalle de 8GHz à 10GHz L'isolation elle est entre -50dB à -22dB

**Tableau III. 5 :** étude comparative de l'antenne MISO conçue avec d'autres antennes réalisées précédemment

### Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation et à la réalisation expérimentale d'une antenne MISO (3x1) reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement, fonctionnant à la bande de fréquence 2.9 GHz jusqu'au plus de 16 GHz et utilisé pour les application radio cognitives et dans d'autres domaines de télécommunication sans fil.

Ce prototype d'antenne a été fabriqué avec succès et testés expérimentalement, afin de valider les résultats de simulation. Après l'interprétation et la discussion des résultats nous avons arrivé à un accord entre les résultats obtenus par la simulation et ceux obtenus par la mesure. D'une façon générale nous avons montré que le modèle MISO (3x1) conçu est reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement.

## Bibliographie

- [1] R. Hussain and M. S. Sharawi, « *Frequency reconfigurable MIMO slot and UWB sensing antennas for CR applications* », IEEE Antennas Propag. Soc.Int. Symp. Proc. pp. 1693–1694, Saudi Arabia,2017.
- [2] Abdullah A Jabber<sup>1</sup>, Ali Khalid Jassim, and Raad H Thaher, « *Compact 3x1 Elements Reconfigurable MIMO Antenna for Cognitive Radio Applications* », University, Hilla, Iraq,2020.
- [3] Naser Ojaroudi Parchin,Haleh Jahanbakhsh Basherlou,Yasir I. A. Al-Yasir, Ahmed M. Abdulkhaleq and Read. Abd-Alhameed« *Reconfigurable Antennas: Switching Techniques—A Survey* », University of Bradford, 15 février, 2020.
- [4] CHAIMA Amel, « *Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN* », Mémoire pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [5] [www.cst.studio.com](http://www.cst.studio.com).
- [6] Trong Duc Nguyen, « *Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive* », Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [7] Adjila Fatima Melati Nadia, « *Etude Et Conception D'une Antenne Fractale Reconfigurable En Fréquence* », Mémoire De Master, Université 8 Mai 1945 Guelma,2019.
- [8][https://www.lpkf.com/en/productfinder/?tx\\_burgproductfinder\\_productfinder%5BselectedTechnology%5D=20&tx\\_burgproductfinder\\_productfinder%5BselectedApplication%5D=#product-fin](https://www.lpkf.com/en/productfinder/?tx_burgproductfinder_productfinder%5BselectedTechnology%5D=20&tx_burgproductfinder_productfinder%5BselectedApplication%5D=#product-fin)

# **Conclusion Générale**



## Conclusion Générale

---

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous nous intéressons à l'étude et à la conception d'une antenne MIMO reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. A cet effet, une étude détaillée a été effectuée sur les techniques de reconfigurabilité. La flexibilité de reconfiguration des antennes configurables est utilisée pour optimiser les performances de l'antenne dans un scénario changeant ou pour répondre à des besoins opérationnels.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur les antennes imprimées, la technologie MIMO et la technique ultra large bande puis dans le second chapitre, nous avons cité les différentes techniques possibles pour concevoir une antenne reconfigurable par le choix d'une géométrie d'antenne convenable à l'application visée en terme de dimensions du dispositif, fréquence opérantes et par l'intégration des structures et des éléments tel que les diodes PIN, les MEMS, FET... car il n'existe pas une méthodes fixe pour arriver à une reconfiguration souhaitable.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à l'étude et la conception d'une antenne MIMO (MISO) reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. Dans une première partie de ce chapitre notre étude est basée sur l'utilisation du simulateur électromagnétique CST Studio 2019, il est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Nous avons simulé au départ une antenne MIMO composée de trois éléments rayonnants (antenne d'émission) de forme U et une antenne large bande de forme elliptique. Afin d'améliorer les performances de l'antenne de départ, nous avons introduit des modifications géométriques sur les éléments rayonnants. Pour atteindre notre objectif qui est la reconfigurabilité en fréquence et en diagramme de rayonnement, nous avons insérer deux diodes PIN dans chaque antenne d'émission. Ensuite nous avons effectué deux modélisations correspondantes à la diode PIN (circuit RLC Série/Parallèle, Plot métallique) dont le but de vérifier l'influence de ce composant actif sur la structure rayonnante. La deuxième partie est focalisée sur la simulation, la réalisation et la caractérisation du prototype étudié précédemment.

Les résultats de mesures obtenus sont semblables avec les résultats de simulation avec des petites différences qui peuvent être expliquées par l'incertitude de dimensionnement pendant la réalisation ou les problèmes provoqués par la machine LPKF.