

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8 Mai 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 : **Systemes des Télécommunications**

---

---

**ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE  
EN FREQUENCE ET EN DIAGRAMME DE RAYONNEMENT**

---

---

Présenté par :

**CHOUHBANE Maroua**

Sous la direction du :

**Pr. BOUALLEG Ahcene**

Juillet 2021

# 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 frères et ma sœur, 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 Mme Medjaldi Houria et Mlle Boukharouba Soraya*

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

## *Dédicace*

*A mes chers parents*

*A ma sœur et mes frères*

*A mes chères amies*

*A tous qui m'aiment*

## **Résumé**

Le développement rapide des communications sans fil entraîne une limitation des ressources de fréquence et une diminution des débits et de l'efficacité de transmission. Une antenne reconfigurable est une antenne qui peut modifier ses propriétés de fréquence et de rayonnement de manière dynamique, de manière contrôlée et réversible. Pour y parvenir, les antennes reconfigurables intègrent un mécanisme interne qui permet la redistribution intentionnelle des courants RF sur la surface de l'antenne, entraînant des modifications réversibles de ses propriétés. Dans ce travail, nous avons étudié une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement qui fonctionne dans la gamme de 4,8358 GHz jusqu'au 5.0383GHz. La reconfigurabilité est effectuée par la création de deux fentes sur le plan masse et par la modification géométrique à l'aide d'une diode PIN, tout en conservant la polarisation. L'étude paramétrique de cette antenne était faite par l'utilisation du simulateur CST

## **Abstract**

The rapid development of wireless communications results in the limitation of frequency resources and a decrease in transmission rates and efficiency. A reconfigurable antenna is one that can change its frequency and radiation properties dynamically, in a controlled and reversible manner. To achieve this, reconfigurable antennas incorporate an inner mechanism that allows for the intentional redistribution of RF currents over the antenna surface, resulting in reversible changes in its properties. In this work, we studied a triangular antenna reconfigurable in frequency and radiation pattern that operates in the range from 4.8358 GHz up to 5.0383GHz. Reconfigurability is achieved by creating two slots on the ground plane and by geometric modification using a PIN diode, while maintaining polarization. The parametric study of this antenna was made using the CST simulator

## **ملخص**

يؤدي التطور السريع للاتصالات اللاسلكية إلى الحد من موارد التردد وانخفاض معدلات الإرسال وكفاءته. الهوائي القابل لإعادة التشكيل هو هوائي يمكنه تغيير خصائص تردده وإشعاعه بطريقة مضبوطة وقابلة للانعكاس. لتحقيق ذلك، ديناميكي تشتمل الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل على آلية داخلية تسمح بإعادة التوزيع المتعمد لتيارات التردد اللاسلكي عبر سطح، مما يؤدي إلى تغييرات قابلة للانعكاس في خصائصه. في هذا العمل، درسنا هوائيًا ثلاثيًا يمكن إعادة تشكيله في مخطط التردد والإشعاع الذي يعمل في النطاق من 4.8358 جيجا هرتز وحتى 5.0383 جيجا هرتز. إعادة التشكيل الهوائي تمت عن طريق انشاء شقين على مستوى الارض و عن طريق التعديل الهندسي باستخدام صمام ثنائي الاقطاب مع الحفاظ على نمط الاستقطاب. تم اجراء هذه الدراسة باستخدام المحاكات الكهرومغناطيسي

# *Sommaire*

**Remerciements**

**Résumé**

**Sommaire**

**Introduction Générale ..... 1**

## **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES IMPRIMEES**

I.1	-Introduction .....	4
I.2	-Historique des antennes imprimées .....	4
I.3	-Structure d'une antenne imprimée .....	4
I.4	-Choix du substrat.....	5
I.5	-Polarisation de l'antenne.....	6
I.6	-Techniques d'alimentation des antennes imprimées .....	6
I.6.1	-Alimentation par ligne microbande.....	7
I.6.2	-Alimentation par câble coaxial.....	7
I.6.3	-Alimentation par ligne coplanaire.....	8
I.6.4	-Alimentation par proximité.....	9
I.6.4.1	-L'alimentation par couplage à ouverture.....	9
I.6.4.2	-Alimentation par couplage électromagnétique .....	10
I.7	-Méthodes d'analyses des antennes.....	11
I.7.1	-Les méthodes analytiques .....	11
I.7.1.1	-Le modèle de la ligne de transmission .....	11
I.7.1.2	-Modèle de la cavité .....	11
I.7.2	-méthodes numérique exactes (full-wave).....	12
I.7.2.1	-La méthode des moments (MOM) .....	12
I.7.2.2	-Méthodes des différences finies .....	13
I.7.2.3	-Méthode des éléments finis (FEM).....	13
I.7.2.4	-La méthode de la matrice des lignes de transmissions (TLM) : .....	14
I.8	-Les caractéristiques des antennes imprimées .....	14
I.8.1	-Le coefficient de réflexion S11 .....	14
I.8.2	-La directivité :.....	15
I.8.3	-Le gain:.....	15

I.8.4-Rendement de l'antenne : .....	16
I.8.5-Fréquence de résonance $f_r$ : .....	16
I.8.6-Diagramme de rayonnement .....	16
I.8.7-Angle d'ouverture .....	17
I.8.8-Bande passante et facteur de qualité .....	17
I.8.9-Impédance d'entrée de l'antenne .....	18
I.9-Mécanisme de rayonnement: .....	19
I.10-Les avantages et les inconvénients.....	20
I.11-Les applications des antennes imprimées.....	20
I.12-Conclusions .....	21
Bibliographie.....	22
<b>CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RECONFIGURATION DES ANTENNES</b>	
II.1 -Introductions.....	25
II.2 -Historique.....	25
II.3 - Les antennes reconfigurables .....	25
II.3.1- Antennes reconfigurables en fréquence : .....	25
II.3.1.1- La modification géométrique.....	26
II.3.1.2-Les Court-circuit commutable .....	27
II.3.1.3- Modification de matériaux .....	27
II.3.1.4- Fente ou de lignes commutables.....	28
II.3.2- La reconfiguration en diagramme de rayonnement.....	28
II.3.2.1- La modification géométrique.....	29
III.3.2.2- Les Court-circuit commutable.....	30
II.3.2.3- Fente ou de lignes commutables.....	30
II.3.3-Antennes reconfigurables en polarisations .....	32
II.4-Les dispositifs de commutations pour les antennes reconfigurables .....	33
II.4.1 -Les RF-MEMS .....	33
II.4.2 -Les Diodes Varactor.....	34
II.4.3 -Les Diodes PIN .....	34
II.4.4-Matériaux Agiles : .....	35
II.5 -Les inconvénients .....	36
II.6 -Les avantages .....	37
II.7 -Conclusion .....	38

Bibliographie.....	39
--------------------	----

### **CHAPITRE III : ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE TRIANGULAIRE RECONFIGURABLE EN FREQUENCE ET EN DAIGRAMME DE RAYOUNNEMENT**

III.1-Introduction.....	42
III.2-L'outil de simulation : .....	42
III.3- Modélisation de la diode PIN : .....	43
III.3.1-Modélisation par un plot métallique: .....	43
III.3.2-Modélisation par un circuit RLC équivalent : .....	43
III.4- Conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence .....	44
III.4.1- La géométrie de l'antenne proposée : .....	44
III.4.2-Résultats de simulation .....	45
III.4.2.1 - Structure de base.....	45
III.4.2.2 -Création des fentes et insertion des diodes PIN et des plots sur le plan de masse.....	45
III.5-Conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en diagramme derayonnement.....	50
III.6-Validation expérimentale .....	53
III.6.1-Description de la machine LPKF ProtoMat S103 : .....	53
III.6.2-Appareil de mesure analyseur de réseaux.....	54
III.6.3-Le prototype réalisé .....	55
III.6.4-Mesures expérimentales.....	56
III.7-Conclusion.....	57
Bibliographie.....	58
Conclusion générale.....	60

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I.1: Structure d'une antenne imprimée .....	5
Figure I.2: Les différentes formes d'une antenne imprimée .....	5
Figure I.3 : Alimentation par ligne microban .....	7
Figure I.4 Alimentation par ligne microban . .....	7
Figure I.5: Alimentation par câble coaxial.....	8
Figure I.6 : Vue en coupe d'une ligne coplanaire .....	8
Figure I. 7 : Alimentation par proximité par couplage à ouverture .....	9
Figure I.8 : Alimentation par proximité par couplage électromagnétique .....	10
Figure I.9 : Modèle de la ligne de transmission .....	11
Figure I.10 : Modèle de la cavité .....	12
Figure I.11 : Distribution des charges et création de courant dans une antenne patch .....	12
Figure I.12 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture .....	17
Figure I.13 : Bande passante et coefficient de réflexion .....	17
Figure I.14 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission. ....	18
Figure I.15 : Mécanisme de rayonnement .....	19

## Chapitre II

Figure II.1 : Illustration de l'agilité fréquentielle .....	26
Figure II.2 : Antenne fractale reconfigurables en fréquence des commutateurs RF MEMS. ..	27
Figure II.3 : Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables. ....	27
Figure II. 4 : Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence : (a) Géométrie de l'antenne ; (b) Position des diodes PIN sur le dipôle replié .....	28
Figure II.5 : Diagrammes de rayonnement à 3.5 GHz selon les trois modes de configuration .....	29
Figure II.6 : Exemple d'antenne fractale reconfigurable en rayonnement. ....	29
Figure II.7 : Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme : a) Topologie de l'antenne ; b) Diagrammes NS : configuration initiale ; GO : diodes activées .....	30
Figure II.8 : Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation. ....	31
Figure II.9 : Antenne patch à bord commuté en (a) et Antenne PASS de l'UCLA en (b) .....	32
Figure II.10 : : RF MEMS. Circuit équivalent et modèle de commutateur RF MEMS. (a) Modèle de circuit équivalent, exemple de commutateur MEMS RF intégré (b) .....	33
Figure II.11 : Circuit équivalent de diode varactor .....	34
Figure II.12 : Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF. ....	35
Figure II.13 : Commande par changement de matériau . ....	36

## Chapitre III

Figure III.1 : Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN .....	43
Figure III.2 : Schéma équivalent du commutateur .....	43
Figure III.3 Structure de l'antenne Triangulaire : (a) vue de dessus (b) vue de dessous.....	44
Figure III.4 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée.....	45
Figure III.5 : a) Géométrie du plan masse ;b) Coefficient de réflexion S11 .....	45
Figure III.6 : a) Géométrie du plan masse ;b) Coefficient de réflexion S11 .....	46
Figure III. 7 : antenne triangulaire avec une diode (element1) insérée sur la fente .....	47
Figure III.8 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne triangulaire avec une seule diode ...	47
Figure III.9 : a) Insertion de deux plots métalliques sur les deux fentes ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (ON-ON).....	48
Figure III.10 : a) Insertion d'un plot métallique sur la première fente ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (ON-OFF) .....	49
Figure III.11 : a) insertion de deux plots métalliques sur les deux fentes ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (OFF-OFF).....	49
Figure III.12 : a)insertion d'un plot métallique sur la deuxième fente ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (OFF-ON) .....	50
Figure III.13 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.1415 GHz ;a)en coordonnée polaire, b) en 3D.....	51
Figure III.14 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 4.5559 GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure III.15 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.3874 GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D.....	51
Figure III. 16 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 4.665 GHz ;a) coordonnée polaire, b) en 3D. ....	52
Figure III.17 : Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.8124 GHz ;a) coordonnée polaire, b) en 3D. ....	52
Figure III.18 : La machine à gravure LPKF Protomat S103.....	54
Figure III.19 : Analyseur de réseau vectoriel.....	55
Figure III.20 : Prototype réalisé .....	55
Figure III.21 : Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11 à l'État ON OFF .....	56
Figure II.22 : Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11 à l'État ON ON .....	56

## **LISTE DES TABLAUX**

Tableau III. 1 : Les dimensions de l'antenne triangulaire proposée .....	44
Tableau III.2 : Les résultats de simulation des trois états correspondants.....	46
Tableau III.3 : Les résultats de simulation des trois états correspondants.....	48
Tableau III.4: Les résultats de simulation des quatre états correspondants.....	50
Tableau III. 5 : Comparaison des résultats obtenus.....	57

## **LISTE DES ABRIVIATION**

**CPW : CoPlanar Waveguide**

**Full-wave : Méthodes numérique exactes**

**MOM : La méthode des moments**

**FDTD : Finit Time Différence Domain**

**FEM : Méthode des éléments finis**

**TLM : La méthode de la matrice des lignes de transmissions**

**CST: Computer Simulation Technology**

**MEMS: Micro Eletco Mechanical system (Système Micro Electromécanique)**

**PIN: Positive Intrinsic Negative**

**Varicap : Variable capacitor**

**3D : Trois dimensions**

# **Introduction**

## **Générale**

Les télécommunications sont définies comme la transmission d'informations à distance en utilisant des technologies électronique, informatique, de transmission filaire, optique ou électromagnétique. Ce terme a un sens plus large que son acception équivalente officielle « communication électronique ». Elles se distinguent ainsi de la poste qui transmet des informations ou des objets sous forme physique et sont considérées comme des technologies et techniques appliquées et non comme une science. On entend par télécommunications toute transmission, émission et réception à distance, de signes, de signaux, d'écrits, d'images, de sons ou de renseignements de toutes natures, par fil électrique, radioélectricité, liaison optique, ou autres systèmes électromagnétiques.[1]

Les antennes imprimées de formes simples présentent des limitations telles qu'une faible bande passante, une directivité et un gain moyens, une taille de l'ordre de la demi-longueur d'onde, peu de flexibilité en termes de reconfiguration de polarisation, fréquence ou dépointage du faisceau rayonné, etc [2]. La reconfiguration de l'antenne est obtenue par la modification de la distribution du courant électrique, et par conséquent des propriétés du champ électromagnétique et de l'impédance [3]. Selon la fonction de reconfigurabilité il existe trois types de reconfigurations : reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement et de polarisation. Pour obtenir une reconfiguration en fréquence et en diagramme de rayonnement trois techniques sont présentées à savoir : la modification géométrique de l'antenne, l'utilisation de court circuits commutables et l'insertion de fentes ou de lignes commutables. Ces techniques dans la reconfigurabilité en fréquence permettent à l'antenne de fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences, et dans la reconfigurabilité en diagramme de rayonnement de modifier la forme du diagramme de rayonnement de l'antenne, afin de privilégier ou non certaines directions de rayonnement de l'antenne. [3]

Ce travail de mémoire de fin d'étude présenté pour objectif d'étudier, et de concevoir une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio. Pour atteindre cet objectif, le présent travail est réparti sur trois chapitres, dont nous donnons une brève description dans les lignes suivantes :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les antennes imprimées. Tout d'abord nous présentons la structure et les techniques d'alimentation ensuite les méthodes d'analyse de ces antennes et on clôture le chapitre par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients des antennes imprimées.

## Introduction générale

---

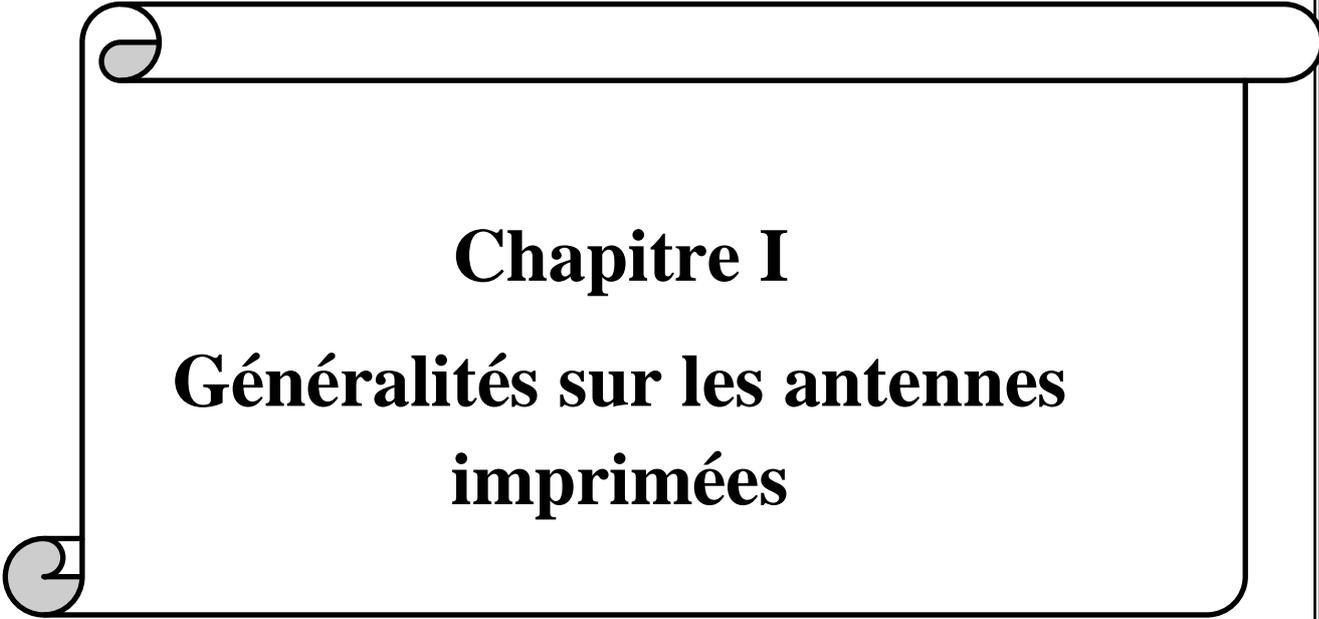
Dans le deuxième chapitre, nous allons au début définir les antennes reconfigurables. Ensuite, nous allons expliquer les techniques de reconfigurabilité pour chaque type de reconfigurations (en fréquence, diagramme de rayonnement et polarisation) ainsi nous présenterons les différents dispositifs de commutations, et on clôture le chapitre par quelques avantages et inconvénients des antennes reconfigurables.

Le dernier chapitre est consacré à la conception et à la réalisation d'une antenne imprimée triangulaire. Dans la première partie nous allons au début définir l'outil de simulation ensuite nous présentons les différents types de modélisation de la diode PIN et leur influence sur l'antenne. Dans la dernière partie nous allons réaliser et caractériser le modèle précédemment simulé et présenterons les différents instruments utilisés dans cette partie

[1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Télécommunications>

[2] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/antennes-42280210/antennes-imprimees-e3311/>

[3] Sabre Dakhli « Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par méta matériaux : conception d'antennes, inspirée par méta matériaux » Université Rennes 1, 2015.



**Chapitre I**  
**Généralités sur les antennes**  
**imprimées**

### I.1 –Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières. [1]

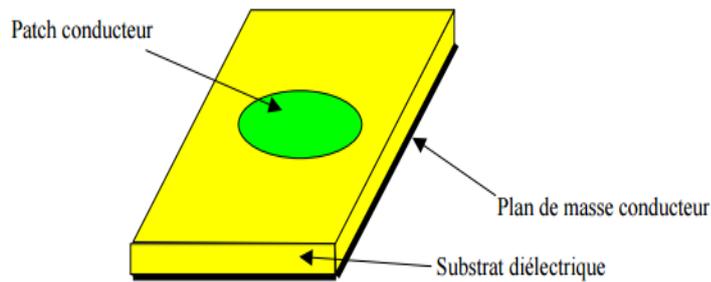
Ce chapitre sera consacré à la présentation de la technologie imprimée de manière générale. On commence tout d'abord par la structure et les techniques d'alimentation déployées, ensuite, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière et les méthodes d'analyse de ce type de structure et on clôture le chapitre par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients des antennes imprimées.

### I.2 -historique des antennes imprimées

Le concept d'antennes imprimées est apparu dans les années 1950, mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antenne : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes. [2]

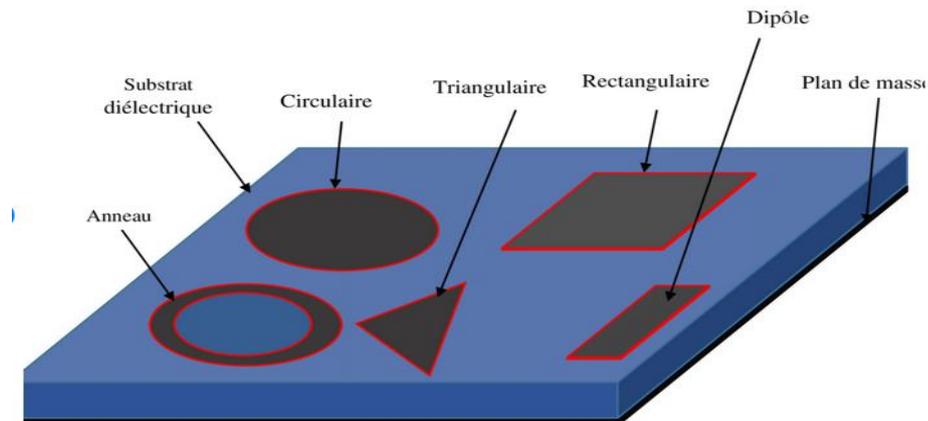
### I.3 -Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'une ou plusieurs plaques métalliques de fine épaisseur de forme géométrique appropriée (carré, rectangle, disque ou d'autres formes plus complexes) formant l'élément rayonnant, déposée sur une face d'un substrat diélectrique caractérisé à la fois par une permittivité électrique  $\epsilon_r$ , et une perméabilité magnétique  $\mu_r$ , tandis que l'autre face est déposée sur une métallisation complète constituant le plan de masse. [3]



**Figure I.1:** Structure d'une antenne imprimée. [2]

Les antennes imprimées utilisant généralement une seule couche de substrat, et sont très répandues dans le domaine des micro-ondes et des ondes millimétriques. Elles se présentent sous une forme géométrique quelconque (voir Figure I.2) et sont disposées sur un substrat diélectrique et un plan de masse. Ces éléments rayonnants présentent différentes formes : carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire, elliptique ou d'autres formes plus complexes. [1]



**Figure I.2:** Les différentes formes d'une antenne imprimée. [1]

### I.4 -Choix du substrat [4]

Les substrats possèdent aussi des qualités en tant que métaux, leurs propriétés électromagnétiques sont caractérisées essentiellement par trois grandeurs physiques: conductivité, constante diélectrique relative, angle de perte. Les substrats exploités dans la conception des antennes imprimées sont nombreux et doivent être compatibles avec le matériau de patch. Dans le cas où le matériau du patch de l'antenne est normal comme le cuivre, la permittivité relative du substrat varie de 1 à 12. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques de grande épaisseur et de basse permittivité dans le but d'avoir une grande efficacité et une bande passante large. Mais dans ce cas, les pertes par onde de surface

augmentent et l'antenne devient de plus en plus encombrante. Au contraire, l'utilisation de minces substrats de permittivités élevées est conseillée pour les circuits micro-ondes permettant la minimisation des ondes de surfaces et des radiations non désirées. Toutefois, l'efficacité et la bande passante diminuent à cause de la grande perte dans le substrat.

Dans le cas où le matériau de patch est supraconducteur, le substrat doit être monocristallin, de préférence isotrope pour permettre de limiter les défauts lors de la croissance du supraconducteur. Ainsi que les pertes diélectriques doivent être les plus faibles possibles. Les tangentes de pertes des substrats employés sont généralement inférieures à  $10^{-5}$  à  $T=77K$ .

### I.5 -Polarisation de l'antenne

La polarisation de l'antenne est déterminée par la polarisation de l'onde rayonnée dans une direction spécifique. La pointe du vecteur de champ électrique instantané trace une forme dans le temps. Si le chemin du vecteur champ électrique suit une ligne, l'antenne est dite polarisée linéairement. Si le vecteur champ électrique reste constant en longueur, mais tourne en cercle, alors la polarisation est dite circulaire. Dans le cas de l'antenne enrobée de l'émetteur-récepteur (émetteur), nous avons adopté une polarisation linéaire. La polarisation circulaire de l'antenne du lecteur est préférée. [4]

### I.6 -Techniques d'alimentation des antennes imprimées

L'excitation est un point très important lors de l'étude des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant de telle manière qu'il peut affecter directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la façon dont l'antenne est intégrée dans l'appareil. [5]

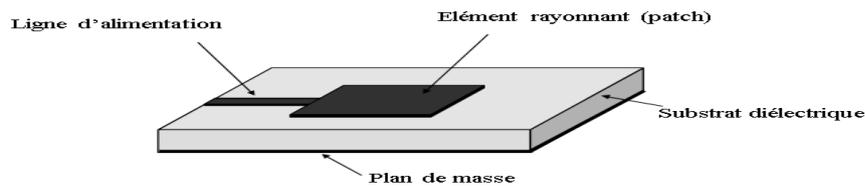
Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories : [5]

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

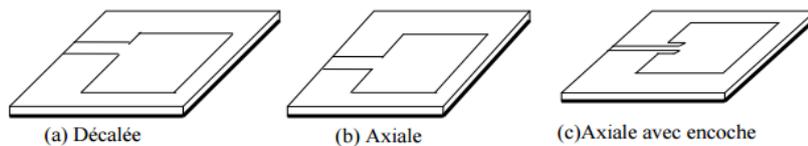
### I.6.1-Alimentation par ligne microbande

Une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la figure (I.3), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance comme le montre la figure (I.4).[6]

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5%. [6].Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [4].



**Figure I.3 :** Alimentation par ligne microbande. [1]



**Figure I.4** Alimentation par ligne microbande. [4]

Les antennes microbande ont une large implémentation dans de nombreuses applications où la taille, le poids, le coût, les performances et la facilité d'installation sont des contraintes. En tant qu'antennes à profil bas, elles représentent une solution durable pour les applications exigeantes, telles que les communications sans fil, la radio mobile, les applications aéronautiques et satellites, etc. Ces antennes sont simples à fabriquer et, selon les exigences de conception, elles peuvent fournir diverses solutions, en termes de fréquence de résonance, diagramme de rayonnement, polarisation, impédance. [7]

### I.6.2-Alimentation par câble coaxial

L'alimentation par câble coaxial ou s'appelle l'alimentation de seconde coaxiale est également largement utilisée. Dans ce type d'alimentation le conducteur intérieur du câble coaxial est attaché au patch de rayonnement tandis que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse comme le montre dans la figure I.5. [8]

Ce type d'alimentation caractérisé par la facilité de fabrication et à assortir, et elle a un faible rayonnement supérieur, cependant, il a également une bande passante étroite et il est plus difficile à la fois le microruban pour les substrats épais ( $h > 0.02 \lambda_0$ ). [8]

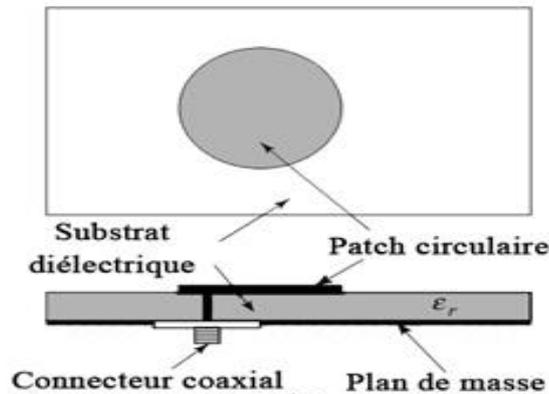


Figure I. 5 : Alimentation par câble coaxial. [8] [9]

### I.6.3-Alimentation par ligne coplanaire.

La technologie coplanaire (CPW, CoPlanarWaveguide en anglais), comme son nom l'indique, présente le plan de masse au même niveau que la ligne de transmission [9]. Un CPW conventionnel sur un substrat diélectrique se compose d'un conducteur à bande centrale avec des plans de masse semi-infinis de chaque côté, comme illustré à la figure 1.6. Cette structure supporte un mode de propagation quasi-TEM. Le CPW offre plusieurs avantages par rapport à la ligne microruban conventionnelle : Premièrement, il simplifie la fabrication ; deuxièmement, il facilite le shunt ainsi que le montage en surface en série de dispositifs actifs et passifs ; troisièmement, il élimine le besoin de trous enveloppants ET via et quatrièmement, il réduit la perte de rayonnement. De plus, l'impédance caractéristique est déterminée par le rapport  $a/b$ , de sorte que la réduction de taille est possible sans limite, la seule pénalité étant des pertes plus élevées. [10]

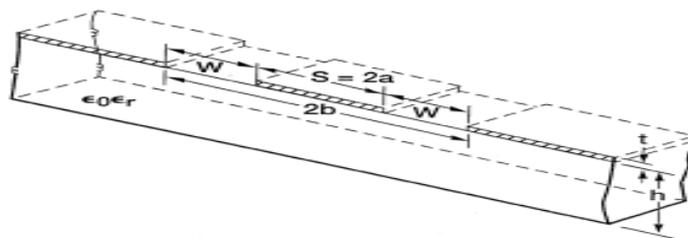


Figure I.6 : Vue en coupe d'une ligne coplanaire [10]

De Plus, un plan de masse existe entre deux lignes adjacentes, d'où les effets de diaphonie entre les lignes adjacentes sont très faibles. En conséquence, les circuits CPW peuvent être rendus plus denses que les circuits microruban conventionnels. Ceux-ci, ainsi que plusieurs autres avantages, font du CPW un outil idéal pour les applications MIC et MMIC. [10]

### I.6.4-Alimentation par proximité

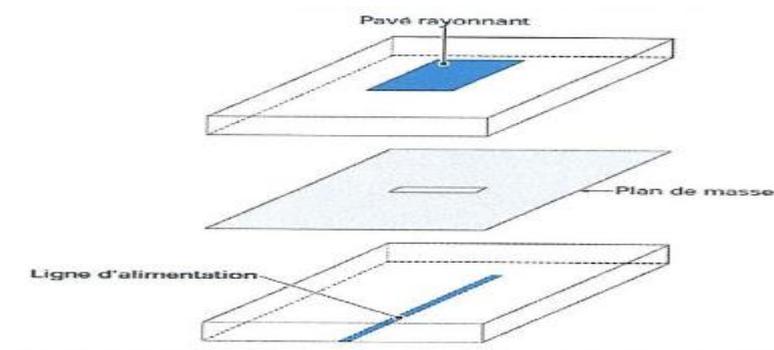
La ligne d'alimentation microruban et la sonde possèdent des asymétries inhérentes qui génèrent des modes d'ordre supérieur qui produisent un rayonnement à polarisation croisée. [8] Pour surmonter certains de ces problèmes, l'alimentation sans contact a été proposée [9].

La source d'alimentation de proximité est divisée en deux type d'alimentation : alimentation à couplage EM (proximité) et alimentation à couplage ouvert. [12]

#### I.6.4.1-L'alimentation par couplage à ouverture

Le couplage d'ouverture est le plus difficile à fabriquer de tous les quatre méthodes et il a également une bande passante étroite. Cependant, il est un peu plus facile à modéliser et a un rayonnement parasite modéré. Le couplage à travers la fente peut être modélisé en utilisant la théorie de Bethe. [8]

Dans ce type de technique d'alimentation, le patch rayonnant et la ligne d'alimentation microruban sont séparés par le plan de masse comme le montre la figure I.7. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation se fait à travers une fente ou une ouverture dans le plan de masse. [11]



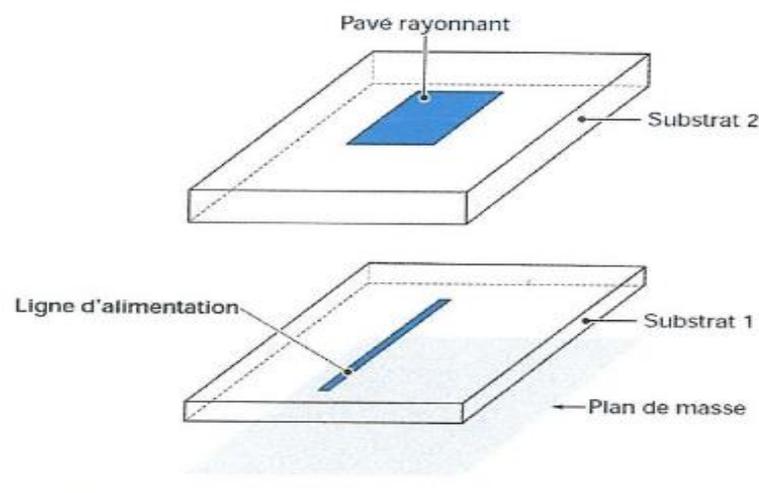
**Figure I.7:** Alimentation par proximité par couplage à ouverture. [12]

Cette structure est constituée de deux substrats superposés et séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure du substrat inférieur, une ligne micro ruban est percée qui sert de source d'alimentation, dont l'énergie est couplée au patch à travers une ouverture gravée dans le

plan de masse séparant les deux substrats. Cette disposition permet une optimisation indépendante du mécanisme d'alimentation et de l'élément rayonnant (voir figure I.7). Habituellement, le substrat inférieur utilise un matériau à haute constante diélectrique, tandis que le substrat supérieur utilise un matériel épais avec un faible constant diélectrique [9].

### I.6.4.2-Alimentation par couplage électromagnétique

La source d'alimentation utilise un couplage électromagnétique (couplage de proximité), moins courant, couplage direct d'une ligne microruban située entre l'élément rayonnant et le plan de masse et placée entre deux couches de substrats diélectriques (voir fig.1.8). [12]



**Figure I.8:** Alimentation par proximité par couplage électromagnétique. [12]

L'avantage présentée par cette technique est peut alors être considérablement réduit le rayonnement parasite due à l'alimentation par l'utilisation d'un substrat assez fin et de permittivité élevée, à cause de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne micro ruban ce fournit une largeur de bande très élevée (plus que 13%). [12] [9]

Alors que le rayonnement de l'élément est privilégié par l'utilisation d'un substrat plus épais à constante diélectrique faible. L'épaisseur et la permittivité du conditionnement diélectrique total pour le fonctionnement du patch peuvent être approximées par la somme des épaisseurs et des moyennes pondérées des permittivités diélectriques et des tangentes de pertes. L'estimation de l'impédance ramenée est légalement plus complexe que dans les cas précédents .elle dépend aussi de la position relative de la ligne d'alimentation par rapport au

centre de l'élément .un cas limite consiste à avoir une épaisseur nulle pour le second substrat et la ligne positionnée dans le plan de l'élément. [12]

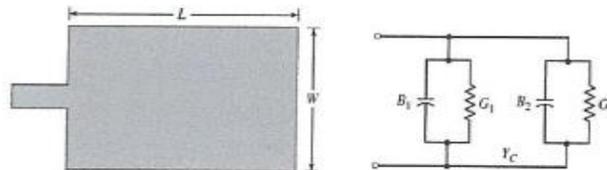
### I.7 -Méthodes d'analyses des antennes

Il existe plusieurs méthodes pour analyser les antennes imprimées, et elles peuvent être classées en deux méthodes, **les méthodes analytiques** et **les méthodes numériques**. Lorsque les antennes à analyser ont des formes géométriques simples, elles peuvent être facilement modélisées par des méthodes analytiques mais lorsque leur forme devient complexe et intuitif, alors il faut utiliser des méthodes numériques. [12]

#### I.7.1-les méthodes analytiques

##### I.7.1.1-Le modèle de la ligne de transmission

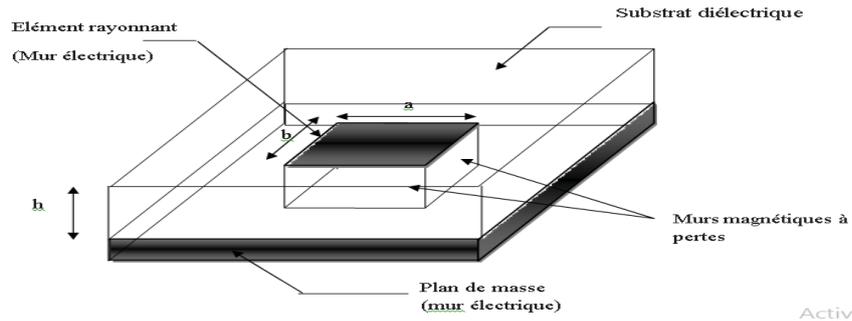
Il a été indiqué plus tôt que le modèle de ligne de transmission est le plus simple de tous, mais qu'il donne les résultats les moins précis et qu'il manque de polyvalence.une antenne microruban rectangulaire peut être représentée comme un réseau de deux ouvertures (fentes) étroites rayonnantes,chacune de largeur  $W$  et de hauteur  $h$ ,séparées par une distance  $L$  fondamentalement le modèle de ligne de transmission représente l'antenne microruban par deux fentes .separated par une basse impédance  $Z$ , ligne de transmission de longueur  $L$  .voire la figure I.9.[8]



**Figure I.9:** modèle de la ligne de transmission. [8]

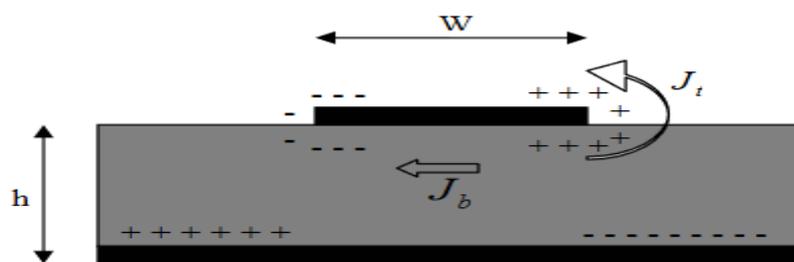
##### I.7.1.2-Modèle de la cavité

Bien que le modèle de ligne de transmission discuté dans la section précédente soit facile à utiliser, il présente certains inconvénients inhérents. Plus précisément, il est utile pour les patches de conception rectangulaire et il ignore les variations de champ le long des bords rayonnants. Ces inconvénients peuvent être surmontés en utilisant le modèle de cavité. Un bref aperçu de ce modèle est donné ci-dessous(figureI.10). Dans ce modèle, la région intérieure du substrat diélectrique est modélisée comme une cavité délimitée par des parois électriques en haut et en bas. La base de cette hypothèse est les observations suivantes pour les substrats minces ( $\lambda \ll h$ ).[11]



**Figure I.10:** Modèle de la cavité. [13]

En alimentant l'antenne, une distribution de charge apparaît sur la surface supérieure et intérieure du Patch et sur la surface supérieure du plan de masse (Figure I.11). Cette distribution de charge est contrôlée par deux mécanismes : un mécanisme attractif entre les charges opposées sur le côté inférieur du Patch et le côté supérieur du plan de masse et un mécanisme répulsif entre les charges de même nature sur la surface inférieure du patch provoquant ainsi un déplacement de charges vers la surface supérieure du Patch. En raison de ce mouvement de charges, les courants circulent sur les deux faces du patch. L'hypothèse  $L > h$  fait que le mécanisme attractif est le mécanisme dominant et par conséquent, moins de courant circulera sur la surface supérieure du Patch. [13]



**Figure I.11:** Distribution des charges et création de courant dans une antenne patch.[11][8]

### I.7.2-méthodes numérique exactes (full-wave)

#### I.7.2.1-La méthode des moments (MOM)

L'une des méthodes, qui fournit l'analyse pleine onde pour l'antenne patch microruban, est la méthode des moments. Dans cette méthode, les courants de surface sont utilisés pour modéliser le patch microruban et les courants de polarisation en volume sont utilisés pour modéliser les champs dans la dalle diélectrique. Il a été montré par Newman et Tulyathan

comment une équation intégrale est obtenue pour ces courants inconnus et en utilisant la méthode des moments, ces équations intégrales de champ électrique sont converties en équations matricielles qui peuvent ensuite être résolues par diverses techniques d'algèbre pour fournir le résultat. [11]

Malgré les avantages de cette méthode, elle souffre de quelques inconvénients tels que:[14]

- La précision exigée pour déterminer les éléments de la matrice impédance.
- Le temps de calcul qui est important.
- L'existence des solutions parasites

### **I.7.2.2-Méthodes des différences finies**

Dans la famille des méthodes aux différences finies, on trouve les FDTD (Finit Time Différence Domain) qui a pour point de départ, le discriminant direct des équations locales de Maxwell. Le développement de la puissance de calcul des ordinateurs a conduit à un regain d'intérêt pour ces méthodes aux différences finies. De plus, afin de réduire le volume de calcul, d'autres méthodes hybrides ont été développées. Parmi celles-ci, la Méthode de Ligne MoL (Method of Line) qui est une combinaison de la méthode des différences finies dans le domaine fréquentiel avec une méthode analytique. [14]

L'avantage de cette méthode est la formulation relativement facile, la possibilité de simuler sur une large bande de fréquences, les calculs s'effectuant directement dans le domaine temporel. Cette méthode présente une grande capacité de diversité de calcul permettant ainsi de modéliser l'antenne requise. [15]

### **I.7.2.3-Méthode des éléments finis (FEM).**

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation nodale par sous-domaine. La région de diffusion est divisée en un nombre fini, généralement un grand nombre de sous-domaines de forme triangulaire appelés éléments. Les fonctions approximatives de chaque élément doivent respecter les conditions de continuité entre les différents éléments du champ. En additionnant toutes les équations obtenues sur chaque élément, nous obtenons un système linéaire avec de nombreuses inconnues où il existe des équations qui sont résolues par des méthodes numériques appropriées, et la taille de la matrice correspond au nombre total de nœuds. [1]

Cette méthode permet de calculer, en chaque point des éléments divisant l'espace, les champs électriques qui minimisent la fonction d'énergie, cette dernière s'écrit sous forme matricielle :

$$[J] = [Y] \cdot [E]. [5]$$

L'avantage de la méthode des éléments finis est lié au fait que la forme tétraédrique et le contraste des dimensions des cellules primaires caractérisant le volume divisé, donnent au réseau une grande souplesse. Cette méthode permet de simuler des structures géométriques complexes mais avec des ressources informatiques importantes. [5]

### **I.7.2.4-La méthode de la matrice des lignes de transmissions (TLM) :**

La méthode de la matrice des lignes de transmission TLM permet de distinguer les champs et les courants de la structure étudiée en petits éléments, chacun de ces éléments est considéré comme un ensemble de ligne de transmission et les calculs s'effectuent directement dans le domaine temporel. [5]

L'un des points forts de cette méthode est la formulation simple qui ne dépend pas beaucoup de la géométrie de la structure étudiée (ce qui n'est pas le cas pour la méthode spectrale). Elle est facile pour traiter des structures complexes composées de plusieurs matériaux, et particulièrement appropriée pour l'analyse des structures planaires multicouches. [5]

## **I.8 -Les caractéristiques des antennes imprimées**

Les paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge que l'antenne apporte au circuit d'excitation et, en conséquence, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour cette caractérisation, nous allons définir les principaux paramètres [4].

### **I.8.1-Le coefficient de réflexion S11**

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui indique la quantité d'énergie perdu à la charge et qui n'est pas réfléchi. Les ondes réfléchies provoquent la formation d'ondes stationnaires, lorsque l'impédance de l'émetteur et de l'antenne ne sont pas égaux. Par conséquent, le coefficient de réflexion est un paramètre semblable au VSWR pour indiquer la correspondance entre l'émetteur et l'antenne. [16]

Le coefficient de réflexion est donné par :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{z_{in} - z_c}{z_{in} + z_c} \quad (1.1)$$

$v_r$  : est l'amplitude d'onde réfléchie.

$v_i$  : est l'amplitude d'onde incidente.

$z_c$  : L'impédance caractéristique.

$z_{in}$  : L'impédance d'entrée de l'antenne

Avec :  $z_c = 50\text{ohm}$

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) se définit comme suit : [16]

$$|S_{11}|_{db} = 20 \log(S_{11}) \quad (1.2)$$

### I.8.2-La directivité :

La directivité de l'antenne est le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les même.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{tot}/4\pi} \quad (1.3)$$

$$P_{tot} = \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1.4)$$

Dans la direction de rayonnement maximale  $(\theta_0, \varphi_0)$ , On note la directivité :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = D = 4\pi \cdot \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_{tot}} \quad (1.5)$$

### I.8.3-Le gain:

Le gain de l'antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances d'alimentation soient les même :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a/4\pi} \quad (1.6)$$

Dans la direction de rayonnement maximal  $(\theta_0, \varphi_0)$  On note le gain

$$G(\theta_0, \varphi_0) = G = 4\pi \cdot \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_a} \quad (1.7)$$

Nous voyons qu'en valeur naturelle, la relation entre gain et directivité est :

$$G = \eta D \quad (1.8)$$

### I.8.4-Rendement de l'antenne :

Le rendement  $\eta$  d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée  $P_A$  sous forme de puissance rayonnée  $P_R$ . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. [17]

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \quad (1.9)$$

### I.8.5-Fréquence de résonance $f_r$ :

C'est la fréquence où l'antenne présente un minimum d'amplitude du coefficient de réflexion. Elle est donnée par cette relation : [18] [4]

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{L + 2\Delta L} \quad (1.10)$$

Elle est en fonction de permittivité et les dimensions de l'antenne patch

### I.8.6-Diagramme de rayonnement

C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace.

$$P = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad (1.11)$$

### I.8.7-Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée, elle est entre les deux directions du lobe principal pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus approprié. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. Voir figure I.12

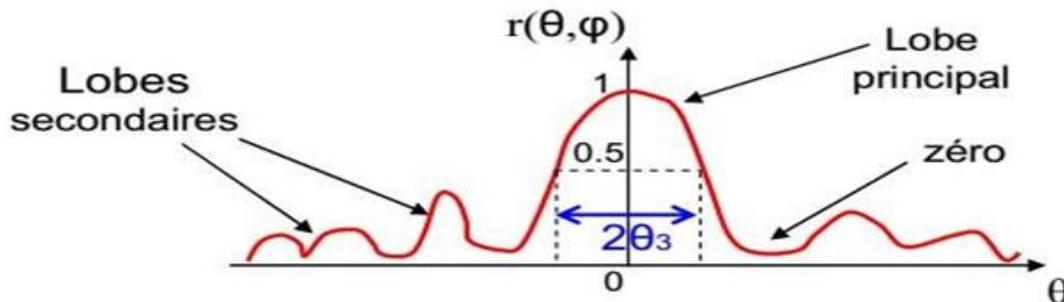


Figure I.12: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

### I.8.8-Bande passante et facteur de qualité

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante. Voir figure I.13

$$BW = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{centrale}} = f_{\text{résonance}}} \quad (I.12)$$

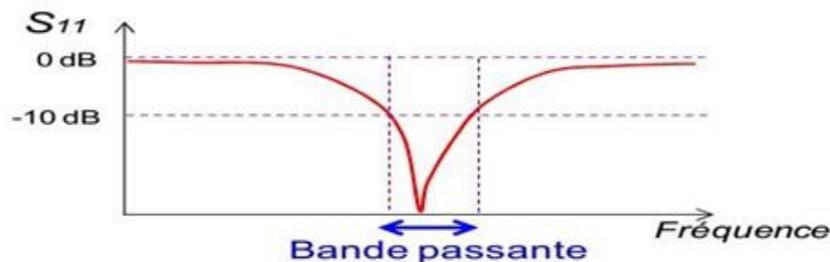


Figure I.13: Bande passante et coefficient de réflexion

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance

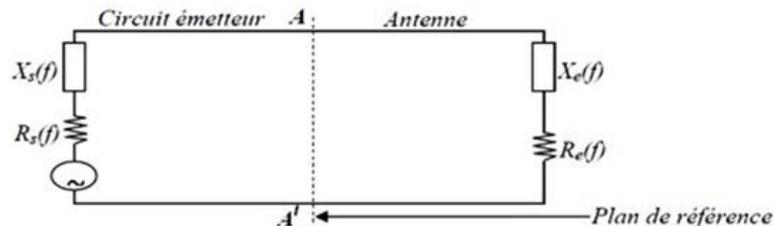
$$f_{Res} : Q = f_{Res} / BW \quad (1.13)$$

Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série)

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} \cdot L_{ant}} \quad (1.14)$$

### I.8.9-Impédance d'entrée de l'antenne

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe  $z_e(f) = R_e(f) + jX_e(f)$  chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne :  $z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$  (Figure I.14). Précisons que f est la fréquence de résonance de l'antenne. [14]

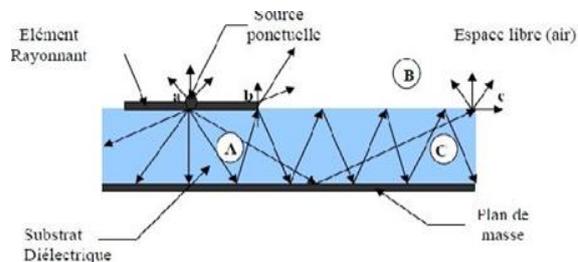


**Figure I.14:** Schéma équivalent du dispositif à l'émission.  
[14]

D'une part, la partie réelle de l'impédance d'entrée  $R_e(f)$  caractérise la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de pertes diverses dans sa structure (effet Joule, onde de surface, etc.) et d'autre part, la partie imaginaire  $X_e(f)$ , d'interprétation plus précise est liée à la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et avec son décalage de phase. [14]

### I.9 -Mécanisme de rayonnement:[19]

Pour mieux comprendre le mécanisme de rayonnement des antennes imprimées, la littérature scientifique s'appuie généralement sur la théorie de l'optique.



**Figure I.15:** Mécanisme de rayonnement. [19]

L'élément rayonnant est en fait une multitude de sources ponctuelles similaires à celle qui se trouve au point a. Ces sources isotropiques vont rayonnées dans toutes les directions. Une partie de celui-ci est réfléchi par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur et ainsi de suite. Certains de ces rayons aboutissent sur l'arrête du conducteur (point « b ») qui les diffracte et par conséquent le champ se décompose en deux composantes normale et tangentielle par rapport au plan de masse. On peut donc envisager trois régions :

#### **Région A :**

C'est la plus dense en rayons. Dans cette région le champ électromagnétique s'accumule plus fortement. Cette propriété est d'ailleurs utilisée pour la propagation le long des lignes micro rubans. Lorsque les fréquences sont basses ; le champ électromagnétique est concentré dans cette zone. Donc il y a propagation sans rayonnement.

#### **Région B :**

Région de l'espace libre au-dessus du substrat dans laquelle il y a dispersion libre du champ. La contribution des sources ponctuelles est faible. La partie la plus grande du rayonnement provient des rayons à l'extrémité du conducteur supérieur (point « b »), le reste du champ demeure à l'intérieur du substrat et sera considéré comme perte dans le diélectrique. Nous obtenons ainsi une antenne dont le rendement en rayonnement est très limité.

#### **Région C :**

Certains rayons atteignent les surfaces de séparation (air-diélectrique) avec une incidence rasante et restent piégés à l'intérieur du diélectrique. Il peut arriver que certains de ces rayons soit diffracté en atteignant le bord (Point « c ») du substrat, engendrant ainsi, un rayonnement parasite. Cette dernière est à l'origine du couplage inter éléments, lorsque les antennes

imprimées sont mise en réseau. Au de la d'une certaine fréquence, ce phénomène affecte considérablement le rayonnement de l'antenne. Ce si, détériore la qualité du diagramme de rayonnement, particulièrement au niveau du lobe secondaire.

### I.10 -Les avantages et les inconvénients

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et sont les suivantes [20] :

- ❖ faible poids,
- ❖ faible volume et épaisseur réduite,
- ❖ faible coût de fabrication,
- ❖ compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives),
- ❖ Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- ❖ Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications
- ❖ Toutefois, les antennes imprimées ont également des inconvénients sont les suivantes [20] :
- ❖ largeur de bande étroite,
- ❖ faible gain.
- ❖ Supportent uniquement des faibles puissances
- ❖ Pertes de rayonnement par ondes de surfaces

### I.11 -Les applications des antennes imprimées

Le remplacement des antennes traditionnelles par des antennes patch de performances équivalentes est une préoccupation majeure des concepteurs de systèmes de télécommunication, compte tenu des besoins et exigences du marché industriel. [13]. Il existe différentes applications réussies démontrant la possibilité de cette transition : [21]

- ❖ Télécommunication satellitaires.
- ❖ Commande et contrôle.
- ❖ Télémétrie (télémesure) par missile.
- ❖ Équipements portatifs.
- ❖ Des éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- ❖ Antenne d'émission utilisée en médecine.
- ❖ Récepteur satellite de navigation.

### **I.12 -Conclusions**

Dans ce chapitre nous avons présenté de façon concise, l'essentiel de la théorie des antennes imprimées dont aurait besoin tout ingénieur ou chercheur s'intéressant à ce type d'antenne. Nous avons montré également quelques différentes techniques d'alimentation, ainsi que les méthodes d'analyses les plus utilisées à des structures microbandes de forme quelconque. Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients.

### Bibliographie

- [1] ZemaMm .Youssouf et Foukia. Aimad Eddine<<Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs>>, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-telemcen ,2017
- [2] [http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/ant\\_imprimees.pdf](http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/ant_imprimees.pdf)
- [3] Yazid Hmeydi<< Réalisation et mise au point d'un système de brouillage GSM 900-1800 >> Mémoire Online, Institut supérieur des études technologiques en communications de Tunis - Projet de fin d'études 2009.
- [4] Barkat. Ouarda, <<Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique >>, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantin, 2009.
- [5] Chouti. Leila << Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage>>, Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 2009
- [6] Touati Mohamed, Houssein Eddine << Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire>> Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire de master ,2014 9memoire fin
- [7] Snežana Lj. Stefanovski1, Branko M. Kolundžija<< The Impedance Variation with Feed Position of a Microstrip Line-Fed Patch Antenna>>, University of Belgrade, Bulevar kralja ,Aleksandra 73, 11120, Vol. 11, No. 1, February 2014, 85-96 article aw fa dossier antenne
- [8] C. A. Balanis, <<Antenna theory analysis and design>>, 2eme edition John Wiley and Sons, 1997.
- [9] 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>> Thèse Doctorat, Electronique. Institut National des Postes ET Telecommunications, 2017
- [10] Rainee N. Simons, <<Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems>>, John Wiley & Sons,Inc, 2001.
- [11] Punit. S. NA, <<Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for Use in Wireless Cellular Devtces>>, Memoir de Master, University de Florida, 2004.
- [12] Allat. Nabil, Mohamed Oussaid Noureddine <<études ses antennes imprimées application aux signaux radiocommunications>> mémoire de master, Université 08 mai 1945 Guelma, 2011
- [13] Tebache. Sofiane <<Méthodes de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées >>Mémoire de Magister En Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013
- [14] Soltane. Samia << Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système ultra-large bande>> Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra ,2015.
- [15] Michaël Diblanc << Développement du concept de l'antenne a résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire>>, Université de Limoges. Thèse de doctorat 20 mars 2006.
- [16] Amina. Larouciet et Soundous Rania. Maamri " Conception et simulation d'une antenne imprimée Planaire avec une bande rejetée " mémoire de master academique, Université Kasdi Merbah Ouargla 24/06/2018
- [17] Alexandre Boyer <<Antennes>>, institut national des sciences appliquee de toulouse, support de cours, Octobre 2011

## Chapitre I : Généralités sur les antennes imprimées

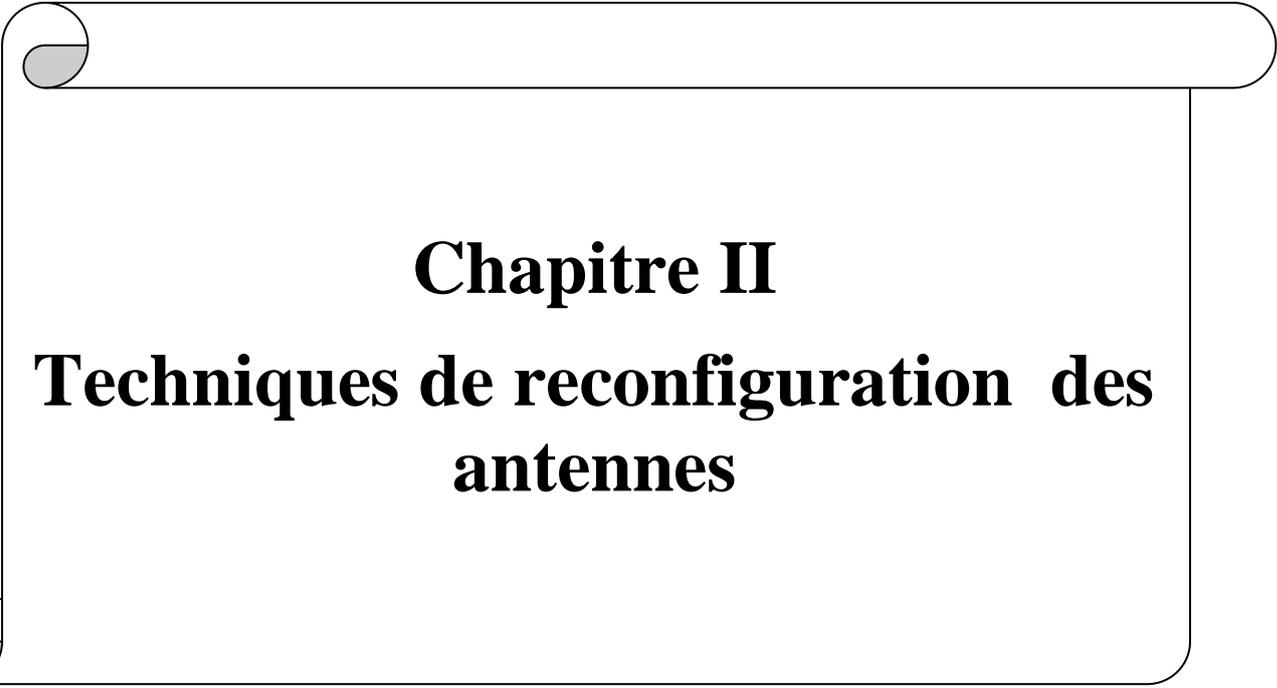
---

[18] Boussaha.Somian << Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication>> Mémoire de Magister, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2012.

[19] Abdellatif Hafiane « Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique» Mémoire pour le grade de docteur de l'université de Marne la Vallée.Mars2003

[20] Fouad Benamrane << Conception d'une antenne Patch Microstrip>>mémoire online, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) Maroc ,2011

[21] Abl.Behloul, << Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire>> Mémoire de Magister, Université Mentouri constantine, 2010



**Chapitre II**  
**Techniques de reconfiguration des**  
**antennes**

### **II.2-Introductions**

Avec le développement rapide de la communication, les antennes reconfigurables attirent une grande attention. Les antennes reconfigurables ont plus d'avantages et de meilleures perspectives par rapport aux antennes conventionnelles car elles présentent des caractéristiques intéressantes assurant diverses fonctions, par exemple, la fréquence de résonance, les diagrammes de rayonnement et les reconfigurations de polarisation [1]. Ces caractéristiques peuvent modifier après les fabrications en utilisant des dispositifs de commutations telles que RF MEMS, les diodes PIN, les Varactors.

Ce chapitre sera consacré à la présentation des antennes reconfigurables et leurs dispositifs de commutations de manière générale. On commence tout d'abord par l'historique de ces antennes et leur définition, ensuite, nous expliquons les techniques de reconfigurabilité pour chaque type de reconfigurations, puis nous parlons sur les dispositifs de commutations et on clôture le chapitre par quelques avantages et inconvénients des antennes reconfigurables.

### **II.2-Historique**

L'idée d'antenne reconfigurable est apparue au début des années 1930. En 1979, une antenne reconfigurable à motif a été conçue pour la communication par satellite. L'antenne proposée est capable de reconfigurer six angles de faisceau différents. La reconfiguration du faisceau pour la communication par satellite a également été rapportée. En 1999, une antenne patch reconfigurable utilisant une diode PIN a été présentée. De 1999 à nos jours, l'antenne micro ruban a été utilisée comme plate-forme pour concevoir une antenne reconfigurable [2].

### **II.3- Les antennes reconfigurables**

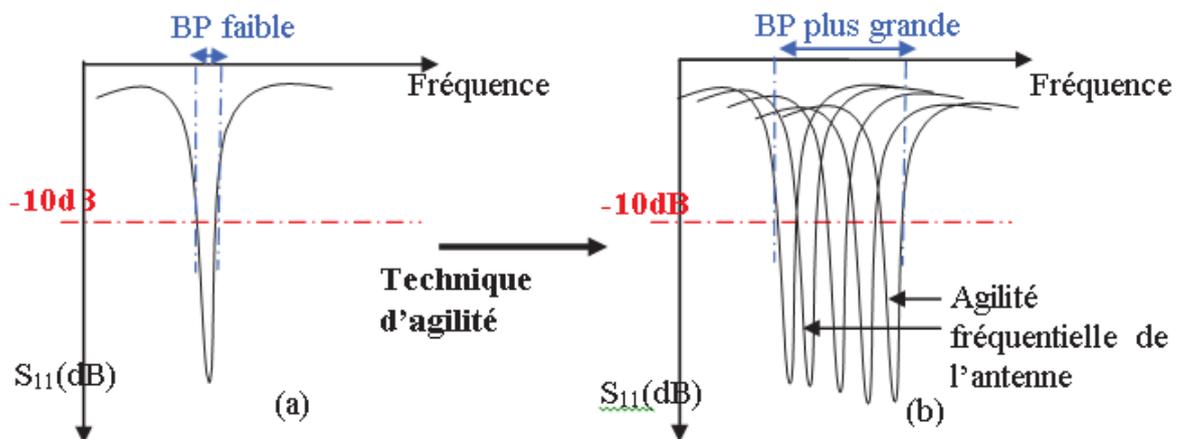
Les antennes reconfigurables sont des antennes capables de reconfigurer ses caractéristiques telles que la fréquence, le diagramme, la bande passante et la polarisation d'une manière dynamique après la fabrication pour s'adapter à l'environnement, la reconfiguration ne se limite pas à une seule caractéristique mais peut être une combinaison de différentes caractéristiques selon l'application [2]. La reconfiguration de l'antenne est obtenue par la modification de la distribution du courant électrique, et par conséquent des propriétés du champ électromagnétique et de l'impédance. Selon la fonction de reconfigurabilité il existe trois types de reconfigurations : reconfiguration en fréquence, en diagramme de rayonnement et de polarisation. [3]

#### **II.3.1- Antennes reconfigurables en fréquence :**

Les antennes reconfigurables en fréquence sont également appelées antennes accordables. Elles sont classées comme antennes reconfigurables en fréquence continue et antennes

reconfigurables en fréquence commutée est identique. Bien que le principe de fonctionnement soit le même ces antennes varient en termes de changements de longueur de courant, ce qui permet un fonctionnement pour différentes bandes. [4]

Dans cette partie, nous présentons trois techniques pour réaliser une reconfiguration en fréquence sont : la modification géométrique de l'antenne, l'utilisation de courts circuits commutables, l'insertion de fentes ou de lignes commutables et modification de matériaux, Ces techniques permettent à l'antenne de fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences. Voir figure II.1 [3]

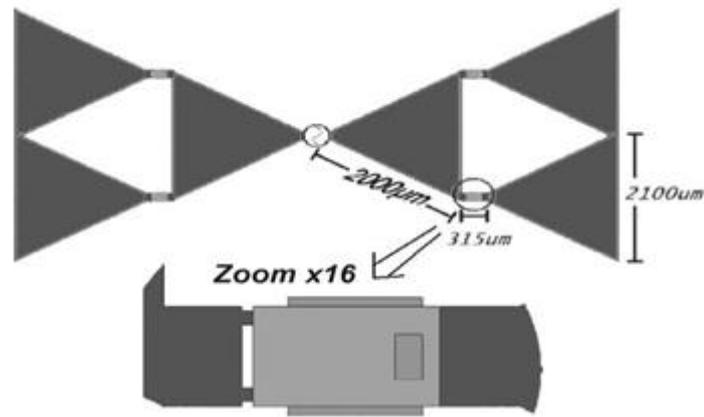


**Figure II.1:** Illustration de l'agilité fréquentielle [5]

### II.3.1.1-La modification géométrique

De plusieurs antennes reconfigurables utilisent la modification géométrique. Le principe de fonctionnement est basé sur le changement de la longueur électrique de l'élément rayonnant, ceci réalisé un changement de la fréquence de résonance. [3]

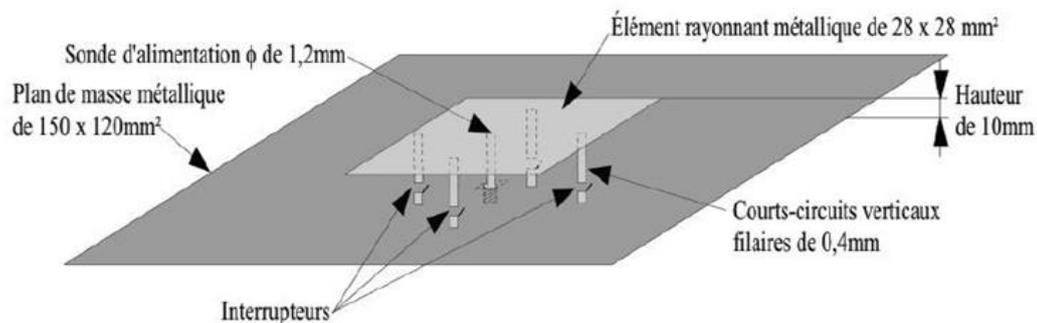
La figure II.2 illustre une antenne utilisant des MEMS est proposé dans [6]. L'antenne présentée est basée sur une antenne planaire fractale de type « Sierpinski » constitué de triangles isocèles. L'alimentation est placée au centre de symétrie de l'antenne rendue reconfigurable par l'ajout d'interrupteurs aux jointures entre triangles. Ces connecteurs permettent, ou non, la connexion des différentes parties conductrices de l'antenne. Quatre reconfigurations de cette antenne peuvent être obtenues. Parmi ces quatre, deux sont symétriques, commutateurs tous fermés ou tous ouverts, et conduisent respectivement à une géométrie du patch de type papillon ou de type fractal (à une itération). L'antenne a été conçue pour présenter trois bandes de fréquence autour de 8, 14, et 24 GHz. [7]



**Figure II.2:** Antenne fractale reconfigurable en fréquence des commutateurs RF MEMS. [6]

### II.3.1.2– Les Court-circuit commutable

Une autre technique dans le domaine des antennes reconfigurables consiste en l'utilisation des courts circuits commutables. De manière générale, l'activation ou non d'un court-circuit commutable permet de modifier les circulations des courants électromagnétiques sur l'antenne et par suite sa ou ses fréquence (s) de fonctionnement. La Fig. II.3 présente un exemple simple d'antenne patch équipée de courts-circuits reconfigurables. La commutation de ces interrupteurs permet ici d'obtenir deux fréquences de résonance distinctes. [8]



**Figure II.3 :** Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables. [8]

### II.3.1.3- Modification de matériaux

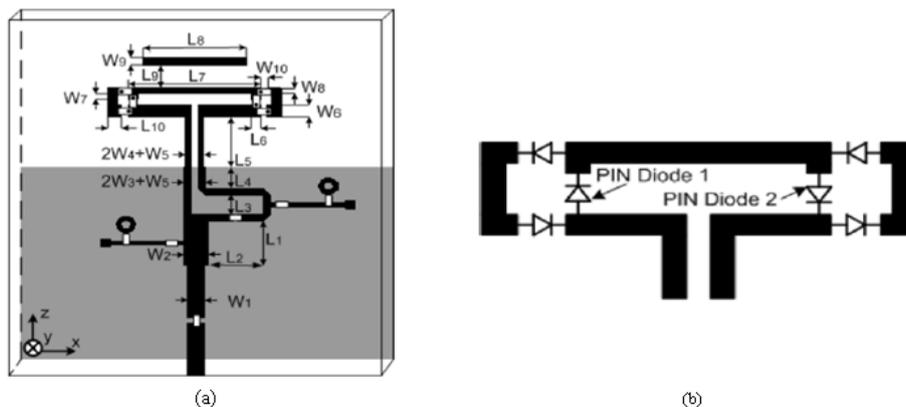
La reconfigurabilité de l'antenne peut également être obtenue en modifiant les caractéristiques du substrat avec l'utilisation de matériaux tels que des cristaux liquides et des ferrites. Le changement de matériau est obtenu par changement de la permittivité électrique relative ou de la perméabilité magnétique. Les cristaux liquides sont utilisés comme matériaux reconfigurables duettos la capacité de réglage continu avec une faible consommation d'énergie, une transparence et une capacité d'intégration. Un cristal liquide GT3-23001 a été choisi avec une permittivité de 2,4 pour obtenir une reconfigurable de fréquence et de motif dans.

Perméabilités et perméabilités. Dans, une ferrite de permittivité relative 4.3 est utilisée. L'antenne est conçue sur la base d'une cavité de guide d'ondes intégrée au substrat avec une dalle de ferrite intégrée pour obtenir une reconfigurable de fréquence. [4]

### II.3.1.4- Fente ou de lignes commutables[3]

Les fentes et les lignes commutables sont également très utilisées pour rendre une antenne reconfigurable en fréquence. L'apparition de perturbations de courant dans l'élément de rayonnement à la suite de l'ajout des fentes ou des lignes chargées par des composantes (Diode PIN, Varactors ...etc.), conduit d'accorder l'antenne à différentes fréquences de fonctionnement. [3]

Un exemple d'antenne reconfigurable quasi-Yagi muni d'un dipôle replié illustre dans la figure II.4. La fréquence centrale de l'antenne est réglée électroniquement en changeant la longueur électrique efficace du conducteur dipôle replié, ce qui est réalisé en employant des diodes PIN (Macom MA4AGBL912). Lorsque les diodes 1 et 2 sont passantes (les autres diodes étant bloquées), la longueur du dipôle est raccourcie, et l'antenne fonctionne dans la gamme de fréquences 6,4 à 8 GHz. Dans le cas contraire (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. Cette antenne offre donc deux bandes passantes distinctes selon la configuration choisie. [9]



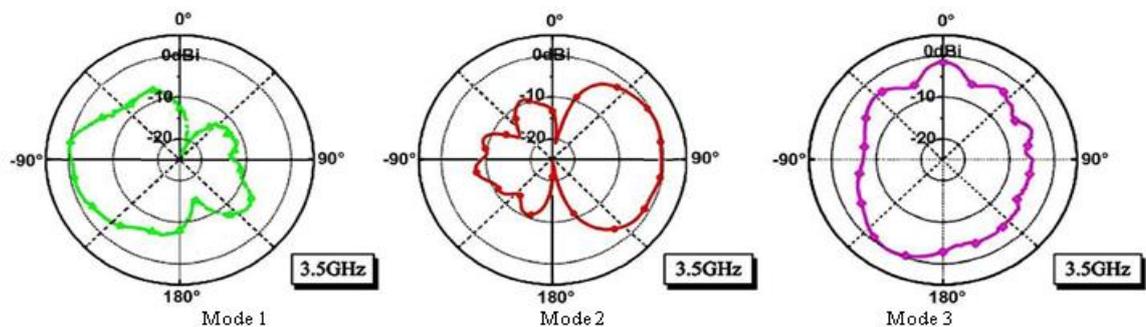
**Figure II.4:** Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence :  
(a) Géométrie de l'antenne ; (b) Position des diodes PIN sur le dipôle replié. [3]

### II.3.2- La reconfiguration en diagramme de rayonnement

Dans ce type de reconfiguration, nous exposons les différentes techniques de reconfigurable en diagramme de rayonnement. Il s'agit de changer la direction ou le gain du diagramme de rayonnement afin d'atteindre ou éviter certaines directions privilégiées. Il existe de nombreux concepts de reconfiguration en diagramme de rayonnement. Parmi ces techniques,

on trouve la modification géométrique, l'utilisation de courts circuits commutables et l'insertion de fentes commutables. [3]

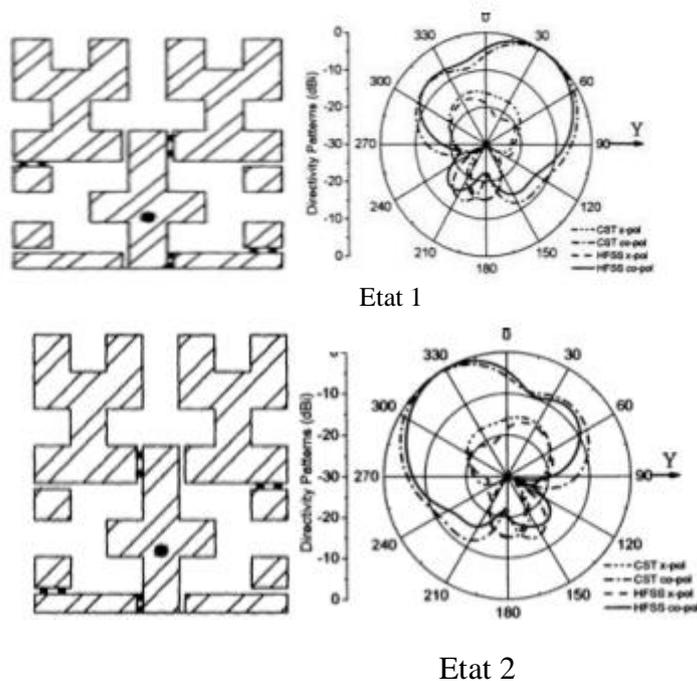
Ce type de reconfiguration peut être utilisé pour éviter les sources de bruit ou les interférences électroniques, améliorer la sécurité, et économiser l'énergie en changeant de direction pour les utilisateurs cibles. Par conséquent, ce type de reconfiguration est un candidat prometteur pour améliorer le signal dans la direction souhaitée ou éviter les signaux provenant de directions indésirables. [10] (Voire figure II.5)



**Figure II.5:** Diagrammes de rayonnement à 3.5 GHz selon les trois modes de configuration. [3]

### II.3.2.1-La Modification géométrique

Dans cette technique, la reconfiguration de diagramme cherche à obtenir des distributions de courant différentes sur la structure afin de modifier la direction du diagramme rayonnement tout en gardant la fréquence de fonctionnement fixe [3] . Voire la figure II.6



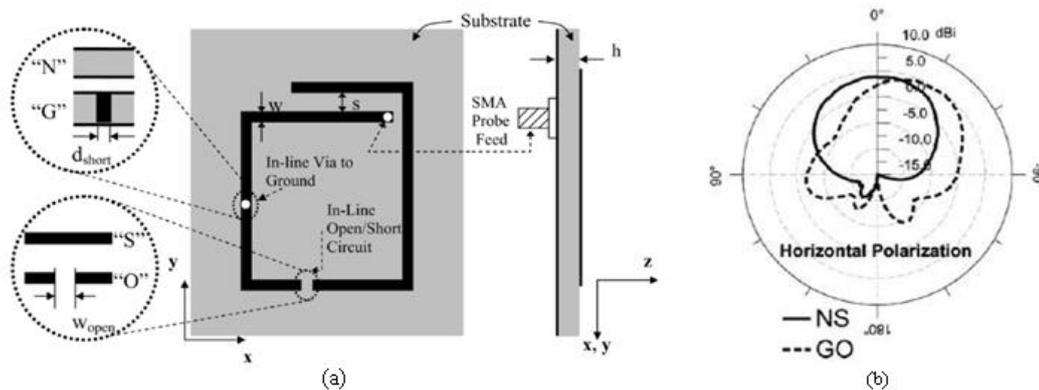
**Figure II.6:** Exemple d'antenne fractale reconfigurable en rayonnement. [3]

### II.3.2.2-Les Courts circuits commutables

Les courts-circuits commutables sont également utilisés pour réaliser la reconfiguration en diagrammes de rayonnement. Ces courts-circuits commutables peuvent être utilisés pour basculer entre différents accès d'alimentation d'un même élément rayonnant ; judicieusement positionnés, ils permettent tous de maintenir une fréquence de résonance commune, en modulant le diagramme de rayonnement [8]. Cette technique permet de modifier la distribution des courants sur l'antenne en gardant une impédance constante et en conséquence la fréquence de résonance. [3]

Dans cet exemple L'antenne reconfigurable utilisée est une spirale carrée microruban La géométrie de l'antenne et la position des éléments de commutation (câblés pour la preuve de concept) sont illustrées à la FigII.7. La longueur totale de la spirale est de 80 mm et est déterminée par environ une longueur d'onde autour de la fréquence opérationnelle de base souhaitée. L'espacement entre les première et dernière sections en spirale linéaire est de 1,0 mm, et l'antenne est centrée sur un substrat Duroid 58801 de constante de diélectrique relative 2,2 avec des dimensions de 34 mm 36 mm. [11]

Pour reconfigurer le diagramme de rayonnement, deux diodes PIN sont utilisées : l'une est située à un quart de longueur d'onde du point d'alimentation et permet de réaliser un court-circuit avec le plan de masse, l'autre est placée dans la spirale et permet de réaliser un court-circuit. Lorsque les deux diodes sont actives, le diagramme de rayonnement subit une rotation de 45°. [7]



**Figure II.7:** Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme : a) Topologie de l'antenne ; b) Diagrammes NS : configuration initiale ; GO : diodes activées. [11]

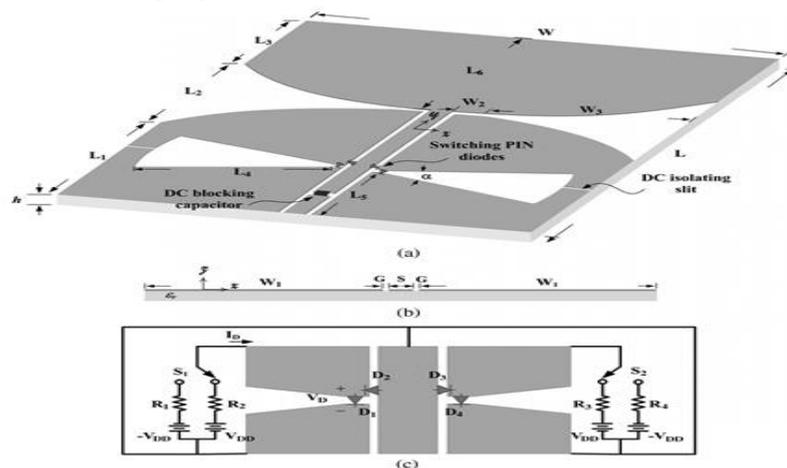
### II.3.2.3- Fente ou de lignes commutables

L'utilisation de cette technique comme le cas des courts circuits, diffère de celle pour obtenir une reconfiguration en fréquence. En effet, leur placement s'effectue au niveau de l'alimentation en respectant une certaine symétrie ce qui permet de modifier le diagramme de rayonnement en gardant la même fréquence de résonance. [3]

## Chapitre II : Techniques de reconfiguration des antennes

Un exemple d'antenne nœud papillon à fentes reconfigurable à motif proposé est illustré à la figure II.8 [12]. Le réseau de polarisation associé, se trouve dans le plan xy avec sa direction normale parallèle à l'axe z. Le signal est envoyé à la ligne d'entrée CPW via un connecteur SMA. L'entrée CPW, qui est en cascade par une paire de CPW-to-slotline transitions, est conçu pour avoir une impédance caractéristique de 50 ohms sur la bande de fréquences concernée. L'impédance de la ligne de fente, par contre, est d'environ 90 ohms, ce qui correspond à une largeur de 0,2 mm dans la conception. Le tronçon radial de la transition CPW-à-rainure de premier ordre a un rayon de 19,6 mm et un angle évasé de 60°, et un condensateur de blocage et des fentes minces sont ajoutées à la ligne CPW d'entrée et à l'extrémité distante du tronçon ouvert radial, respectivement, pour fournir les isolations DC nécessaires. [12]

Pour réaliser la reconfigurabilité du motif, comme le montre la figure 1 (c), deux diodes PIN sont placées sur les entrées du tronçon radial en circuit ouvert des transitions, tandis que les deux autres diodes sont placées à travers les lignes de fente couplées de l'entrée CPW. Sur la base de la disposition de polarisation en courant continu des diodes PIN, l'antenne proposée peut être alimentée par l'une des trois configurations d'alimentation, qui sont appelées le mode d'alimentation CPW, le mode d'alimentation de la fente droite (RS) et la fente gauche (LS): dans cette conception, la diode PIN sélectionnée est une diode PIN de plomb de faisceau MACOM MA4AGBPL912 AlGaAs avec une résistance de polarisation directe de 4 ohms et une capacité totale de polarisation inverse inférieure à 0,022 pF à 10 GHz. La diode comprenant les broches est d'environ 0,63 sur 0,18 mm<sup>2</sup>. [12]



**Figure II.8:** Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation. [12]

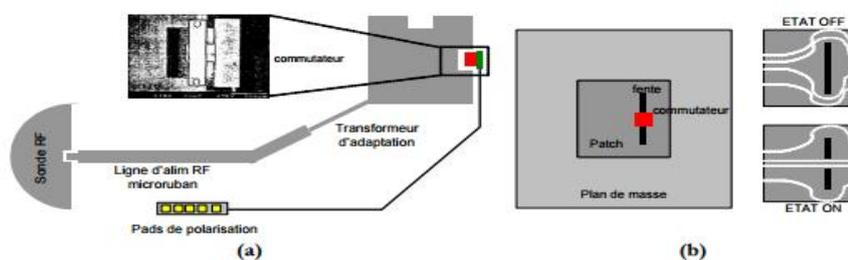
### II.3.3-Antennes reconfigurables en polarisations

Les antennes reconfigurables à polarisation ont attiré de plus en plus d'attention car elles présentent certains avantages souhaitables pour les communications sans fil modernes, comme éviter la perte de fading causée par les effets de trajets multiples dans les réseaux locaux sans fil, utile pour créer des liaisons sans fil plus fiables et robustes, fournir un schéma de modulation puissant dans les systèmes d'étiquetage micro-ondes à lecture / écriture actifs, réaliser la réutilisation de la fréquence la capacité des systèmes de communication par satellite et être un candidat approprié dans un système à entrées multiples et sorties multiples (MIMO). [13]

Un exemple d'antenne à diversité de polarisation réglée à 26 GHz, employant des MEMS, ces commutateurs se composent d'une bande mobile métallique suspendue. Dans cette conception un commutateur MEMS est placé sur une antenne patch micro ruban avec une alimentation dans le coin pour exciter deux modes orthogonaux. dans ce cas l'antenne rayonne une onde polarisée circulairement si la bande métallique est suspendue au-dessus de l'encoche, et si la bande en métal peut être abaissée l'antenne rayonne une onde polarisée linéairement duale (figure II .9.a). [14]

Un autre exemple d'antenne reconfigurable est l'antenne patch avec des fentes commutables, ou "PASS" développée par l'UCLA. L'antenne PASS se compose d'une antenne patch en technologie micro ruban dans laquelle sont découpées une ou plusieurs fentes.

Par l'insertion d'un commutateur (diode PIN ou FET) au centre de la fente (figure II.9.b), en contrôlant le comportement du courant. Sile commutateur est à l'état OFF, les courants en pointillé blanc sont obligés de contourner la fente, si à l'état ON, le courant peut suivre le chemin plus court ainsi créé. On peut réaliser une polarisation différente en utilisant deux fentes orthogonales sur le patch. [14]



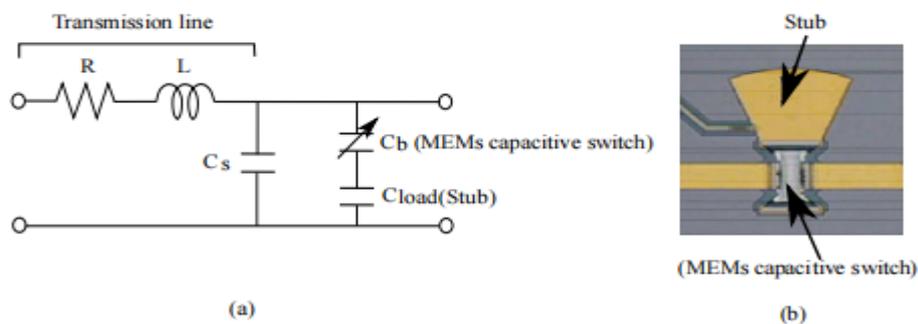
**Figure II.9 :** Antenne patch à bord commuté en (a) et Antenne PASS de l'UCLA en (b). [14]

### II.4-Les dispositifs de commutations pour les antennes reconfigurables

La reconfigurabilité est devenue technologie largement utilisée dans le monde de communications sans fil pour améliorer les performances des différents systèmes et donner un plus de degré de liberté. Cette reconfigurabilité aura lieu après la fabrication de l'antenne car ses propriétés peuvent être modifiées en introduisant des composants RF sur la surface rayonnante. Dans cette partie, nous verrons certains des composants de commutateur qui sont largement utilisés dans la reconfigurabilité. [15]

#### II.4.1-Les RF-MEMS

Un commutateur RF MEMS est un système de commutation mécanique standard basé sur des semi-conducteurs basé sur la technologie de fabrication de circuits VLSI. Ce commutateur peut être utilisé pour contrôler le flux de courant de surface soit par court-circuit soit en circuit ouvert. En outre, un commutateur RF MEMS peut être fabriqué directement sur la structure de l'antenne, c'est-à-dire imprimé sur un substrat diélectrique en verre ou en céramique. La figure II.10, montre un circuit équivalent au modèle et un exemple de commutateur RF MEMS. Le dispositif ayant une faible capacité à l'état haut, cela se traduit par des performances à large bande dans la conception de l'antenne. Les avantages typiques des commutateurs RF MEMS sont leur faible consommation d'énergie et leur vitesse de réglage élevée (de 1 à 100 ns), faible coût, isolation élevée et faible perte d'insertion. Cependant, le commutateur a une limitation dans un facteur de qualité médiocre, un comportement non linéaire, une accordable non continue et une exigence de courant de polarisation CC élevée dans l'état «ON». [16]



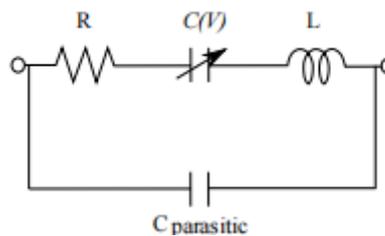
**Figure II.10:** RF MEMS. Circuit équivalent et modèle de commutateur RF MEMS. (a) Modèle de circuit équivalent, exemple de commutateur MEMS RF intégré (b). [16]

### II.4.2-Les Diodes Varactor

Une diode varactor (également parfois appelée diode varicap) est un composant semi-conducteur qui consiste normalement en une jonction PN [16]. Cette diode comporte comme un condensateur dont la valeur de la capacité varie avec la tension inverse appliquée à ses bornes lorsque l'on change sa tension de polarisation, on change la valeur de cette capacité. Bien que ces types présentent une certaine facilité d'intégration et une grande agilité [17]. La figure II.11 montre un circuit équivalent d'une diode varactor.

La capacité de jonction variable  $C(V)$  peut être calculée comme : [16]

$$C(V) = \frac{C_{JO}}{\left(1 + \frac{V}{V_J}\right)^M} + C_{par}$$



**Figure II.11:** Circuit équivalent de diode varactor. [16]

Les varactors sont utiles pour régler la gamme de fréquences de l'antenne [18]. Ces diodes modifier la fréquence de résonance consiste à utiliser une charge réactive variable et permet des changements de fréquence en douceur avec les changements de valeur de capacité, L'inconvénient de l'utilisation de diodes varactor est la commutation de plage de fréquences limitée [2]. Les pertes introduites par ce composant sont parfois importantes et les tensions de polarisation peuvent atteindre 30V, De plus, cette complexité est augmentée avec le nombre des diodes varactors nécessaires pour rendre l'antenne reconfigurable. Les diodes varactor sont largement utilisées dans les applications de communication. [15]

### II.4.3-Les Diodes PIN

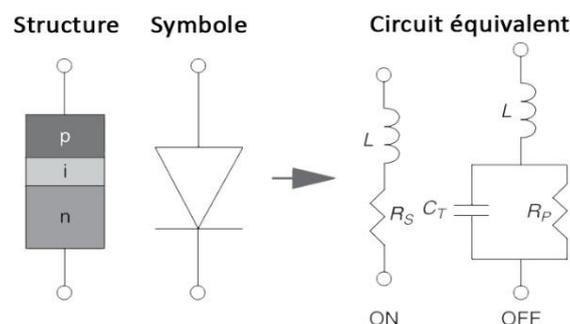
Une diode PIN (Positive Intrinsèque Négative diode) est un dispositif semi-conducteur constitué d'une région non dopée (dite région intrinsèque I) entrelacée entre deux autres régions dopées de type N et P et constitue un composant de base largement utilisé dans les circuits RF. Tels que les commutateurs, les atténuateurs [15]. La diode p-i-n est utilisée dans un grand nombre d'applications allant de la bande UHF aux fréquences micro-ondes. Elle fonctionne

Comme résistance variable aux fréquences RF et micro-ondes en étant contrôlée principalement par son courant de polarisation directe. Dans les applications de commutation et d'atténuation, la diode doit idéalement piloter le niveau du signal RF sans introduire de distorsions qui

changerait la forme du signal, et très utilisée en hyperfréquence dans les applications de commutation. Elle permet d'obtenir de bons court-circuits inférieurs à l'ohm sous de très fortes puissances mais également de bons circuits ouverts. Dans les radars modernes et dans toutes les applications de puissance, la diode p-i-n est très largement utilisée [19]. Les diodes PIN intégrées dans les structures étudiées sont modélisées à l'aide des modèles de circuits équivalents présentés à la figure II.11. Les circuits équivalents de polarisation directe et inverse sont représentés sur les figures 8 (a) et 8 (b). Présente un circuit équivalent de polarisation inverse converti en un circuit RLC série. Les valeurs utilisées pour la polarisation directe sont  $R = 5\Omega$  et  $L = 0,4nH$ . Pour la polarisation inverse, une capacité  $C = 0,27pF$  est ajoutée. [20]

Elle est utilisée comme un commutateur rapide pour les signaux de hautes fréquences. Lorsqu'elle est polarisée en direct, la diode présente une impédance relativement faible, et par conséquent, elle se comporte comme un circuit fermé (l'état ON). En revanche, lorsqu'elle est polarisée en inverse, elle offre une très grande impédance en parallèle avec une très faible conductance, elle se comporte donc comme un circuit ouvert (l'état OFF), voire figure II.11. [10]

Les diodes PIN est caractérisé par la facilité d'intégration et un très faible coût et favorable à de nombreux chercheurs et par meilleure tenue en tension et une capacité de jonction plus faible elles sont fiables et nécessitent une faible tension de polarisation .dans le travail actuel elles sont souvent utilise comme un commutateur pour obtenir à une antenne reconfigurable. [10]

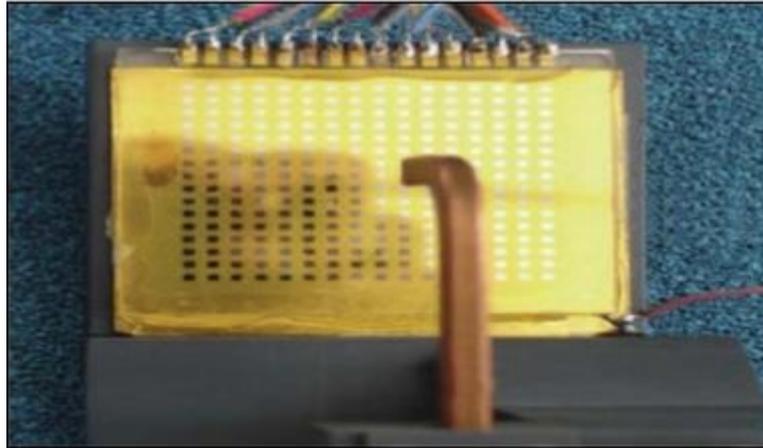


**Figure II.12:** Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF. [10]

### II.4.4-Matériaux Agiles :

Les matériaux intelligents sont utilisés comme substrat dont les propriétés électromagnétiques (permittivité et/ou perméabilité) peuvent être modifiées via un contrôle externe (par l'application d'un champ électrique et/ou magnétique) assurant ainsi l'agilité des antennes. . La nature de la commande extrême permet de distinguer deux sous-egroupes : les matériaux à

commande électrique (ferroélectrique et cristaux liquides) et les matériaux à commande magnétique (ferrites, composites ferromagnétiques) .Ils offrent l'avantage d'être peu encombrants et de plus facilement intégrables. Comme le montre la figureII.12. [17]



**Figure II.13:** commande par changement de matériau [17].

Cette technique de commande qui a été consisté a utilisé le cristal liquide, comme substrat de l'antenne [17]. En effet, un cristal liquide est un matériau non linéaire dont le constant diélectrique peut être modifié avec différents niveaux de tension, en modifiant l'orientation des molécules de ce cristal liquide. Il offre l'avantage d'être simple et facile à intégrer .Néanmoins, rendre ces matériaux agiles n'est pas une tâche facile. En plus, une grande tension doit être appliquée sur les matériaux pour faire l'agilité, les pertes sont assez importantes et le temps de réponse est élevé. [15]

### II.5-Les inconvénients [8]

-Les antennes reconfigurables leur coût, bien plus élevé que celui d'antennes classiques. Ce surcoût est directement lié à l'ajout de composants actifs sur l'antenne, parfois de haute performance, mais il peut aussi résulter d'une industrialisation plus complexe ou de procédés de fabrication intrinsèquement plus dispendieux.

- dans les antennes reconfigurable coût de la conception, qui, pour des séries limitées, domine celui de la fabrication.

-les antennes reconfigurables consomment de l'énergie, aussi bien dans le domaine continu que dans le domaine RF. En effet, les composants actifs devant souvent être polarisés en continu, ils consomment nécessairement de l'énergie qu'il faut prendre en compte dans le dimensionnement énergétique du système.

-les composants comportent souvent une composante résistive qui absorbe de la puissance haute fréquence et impacte directement le rendement de l'antenne.

-Les antennes reconfigurable sont complexes, génératrice de nombreux problèmes lié à la complexité structurelle de l'antenne

### II.6-Les avantages [17]

-Les antennes reconfigurables peuvent vous permettre de modifier la bande d'opération, de filtre l'interférence ou encore d'accorder la fréquence de résonance de l'antenne pour tenir compte d'un nouvel environnement.

-Les antennes reconfigurables peuvent être avantageuses dans les domaines où infrastructure et matériels sont destinés à être opérationnels pendant une longue durée.

- les antennes reconfigurables présentée nombreux avantages sur système composé de plusieurs éléments à fonction unique : potentiellement elle va permettre un gain de volume, de poids, de frais de maintenance, voire de durabilité en s'adaptant à de nouveaux standards.

-les antennes reconfigurables peuvent obtenir le niveau de fonctionnalités nécessaire, et intégrer des fonctionnalités dans des systèmes complets efficaces.

-L'intérêt des antennes reconfigurable dans les systèmes complexes et exigeants en reconfiguration comme la radio logicielle.

-les antennes reconfigurables leur intérêt réside aussi dans leurs capacités à apporter des fonctionnalités et des degrés de liberté supplémentaires aux systèmes de communication, de manière à améliorer leur performance.

### II.7-Conclusion

Les antennes reconfigurables très nécessaires dans le domaine des télécommunications et restent la solution la plus utilisée pour répondre aux normes des systèmes de télécommunication. Dans ce chapitre nous avons présenté le concept des antennes reconfigurables, et on a cité les différents types des antennes reconfigurables et les techniques de reconfigurabilité en fréquence, diagramme de rayonnement et en polarisation, ainsi que nous avons présenté le rôle des différents dispositifs de commutations RF-MEMS, les diodes Varactors, les diodes PIN pour faire la reconfiguration des antennes. Nous avons terminé ce chapitre avec quelques avantages et inconvénients de ces antennes reconfigurables.

### Bibliographie

- [1] Hüseyin Altun, Erdal Korkmaz, Bahattin Türetken, <<Reconfigurable Fractal Tree Antenna for Multiband Applications>> Department of Electrical and Electronics Engineering, Fatih University, Istanbul, Turkey .The National Research Institute of Electronics and Cryptology (UEKAE), TUBITAK, Gebze, Turkey.
- [2] Huda A. Majid, Mohamad K. A. Rahim, Mohamad R. Hamid, and Muhammad F. Ismail, <<Frequency Reconfigurable Microstrip Patch-Slot Antenna with Directional Radiation Pattern>>Progress In Electromagnetics Research, Vol. 144, 319–328, 2014.
- [3] Sabre Dakhli <<Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par métamatériaux : conception d’antennes, inspirée par métamatériaux >> Université Rennes 1, 2015.
- [4] Tanweer Ali. Sameena Pathan. Rajashekhar C. Biradar. <<Multiband, Frequency Reconfigurable and Metamaterial Antennas Design Techniques - Present and Future Research Directions>> School of ECE REVA University Bangalore -560064, India.Dept. Of CSE MIT, Manipal University Manipal-576104, India.
- [5] Sarah Sufyar <<Contribution à l’étude d’Antennes Miniatures Reconfigurables en Fréquence par Association d’éléments actifs>> Thèse Doctorat, Université de Grenoble ,2011.
- [6] Dimitrios E. Anagnosto, Guizhen Zheng, Michael T. Chryssomallis, James C. Lyke, George E. Ponchak, John Papapolymou, and Christos G. Christodoulou<<Design, Fabrication, and Measurements of an RF-MEMS-Based Self-Similar Reconfigurable Antenna>>.IEE transactions antennas and propagation ,vol.54,NO.2,February 2006
- [7] Trong Duc Nguyen << Conception d’antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive>> Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [8] Sylvain.Loizeau, << Conception et optimisation d'antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande>> Thèse Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2009.
- [9] Zemam .Youssef, Foukia. Aimad Eddine, << Étude et Conception d’Antennes Reconfigurables par Association d’éléments actifs>>, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-telemcen ,2017.
- [10] 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>> Thèse Doctorat, Electronique. Institut National des Postes et Télécommunications, 2017.
- [11] Greg H. Huff, Judy Feng, Shenghui Zhang, Garvin Cung, and Jennifer T. Bernhard, <<Directional reconfigurable antenna on laptop computers: Simulation, measurement and evaluation of candidate integration positions>>, Article in IEE transactions on antennas and propagation,vol.52,no.12,December 2004.
- [12] Sung-Jung Wu, Tzyh-Ghuang Ma,<< A Wideband Slotted Bow-Tie Antenna With Reconfigurable CPW-to-Slotline Transition for Pattern Diversity>>,IEEE Transactions on antennas and Propagation,Vol.56,No.2.February 2008.
- [13] FEI HE, << Design and implementation of reconfigurable patch antennas for wireless communications>> Theses, Dissertations, and Student Research from Electrical & Computer Engineering, University of Nebraska-Lincoln. December, 2016
- [14] Laurent Petit, << Antenne reconfigurables a base de MEMES RF>> Thèse Doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007.
- [15] Chaima .Amel<<Etude et conception d’une antenne reconfigurable pour les applications WLAN>> Mémoire de Master Académique, université Mohamed Boudiaf-M’SILA, 2017-2018

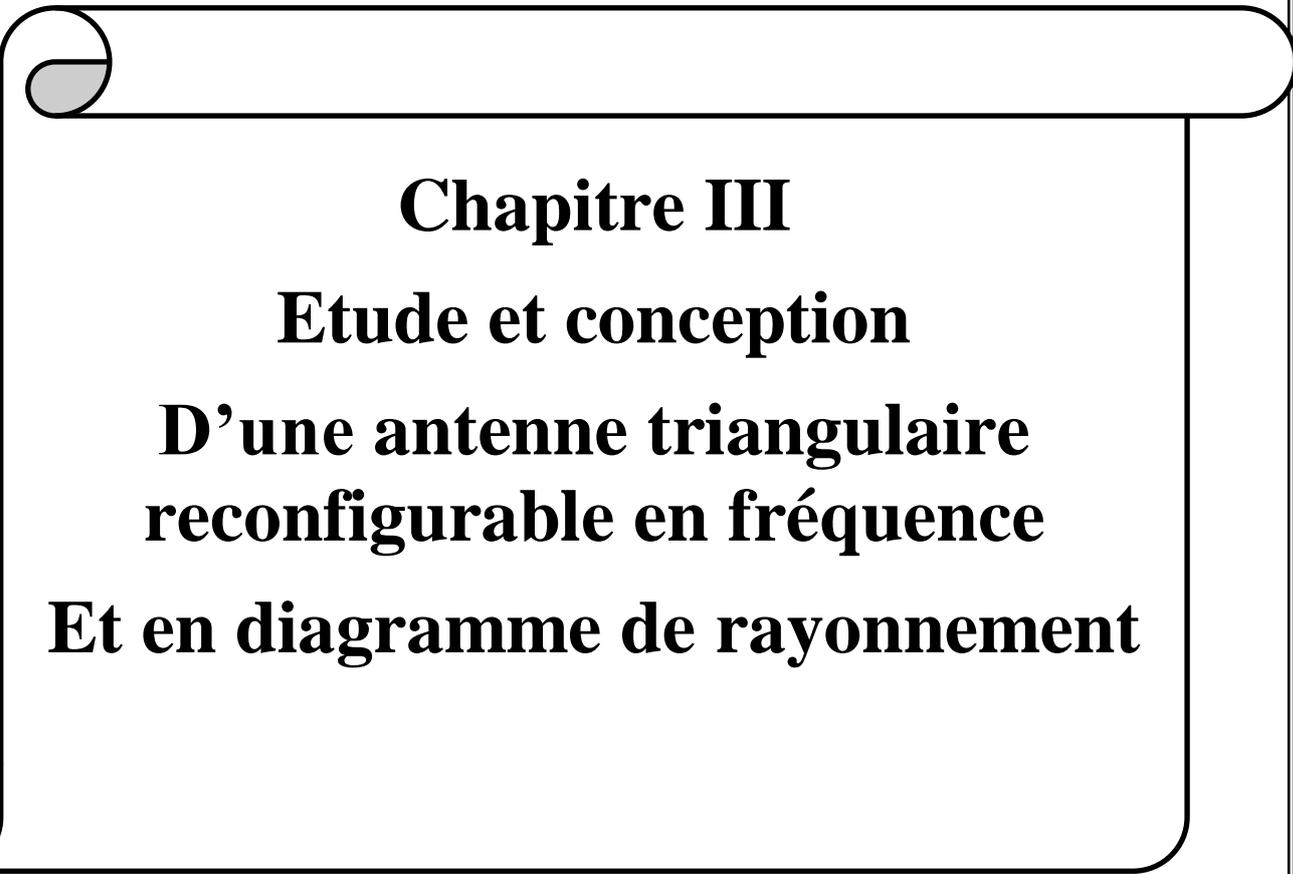
[16] Siti Nailah, Mastura Zainarry <<Reconfigurable Antennas Based on Varactor-Loaded Stubs>>, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in School of Electrical & Electronic Engineering Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences The University of Adelaide, 2019.

[17] Adda Sekrane Kheira, Cherier Ouissam << Etude et conception d'antenne reconfigurable pour radiocommunications >>, Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunications, institut national des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, 2016-2017.

[18] Randy L. Haupt and Michael Lanagan <<Reconfigurable Antennas," IEEE Antennas and Propagation Magazine>>, vol. 55, no. 1, pp. 49–61, Feb. 2013.

[19] Emmanuel Gatard << Analyse des phénomènes physiques dans les diodes p-i-n : Contribution à la modélisation électrothermique pour les applications de puissance RF et hyperfréquences>> Thèse de Doctorat, Université de Limoges 4/12/2006.

[20] S. Mili, C. Larbi Aguil, and T. Aguil,<<Study of fractal-shaped structures with PIN diode the multi-scale method combined to the generalized equivalent circuit modelling>> Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 27, 213–233, 2011.



**Chapitre III**  
**Etude et conception**  
**D'une antenne triangulaire**  
**reconfigurable en fréquence**  
**Et en diagramme de rayonnement**

### III.1 -Introduction

Nous rappelons d'après le chapitre précédent que la reconfiguration de la fréquence et du diagramme de rayonnement consiste en la modification de la fréquence de résonance et de la forme du diagramme de rayonnement de l'antenne. Dans ce chapitre, nous proposons de concevoir une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagrammes de rayonnement en utilisant la technique des fentes et la modification géométrique.

La simulation des antennes avec précision avant la réalisation est une étape très importante que nous franchissons par l'utilisation du logiciel Microwave Studio CST (Computer Simulation Technologie) pour concevoir des antennes reconfigurables. Cet outil de simulation électromagnétique conçu par la compagnie CST permet de faire la modélisation et la simulation de plusieurs types d'antennes [1]. Il permet de calculer les paramètres  $S_{ij}$ , le diagramme de rayonnement, le champ électromagnétique, la distribution de courant.....

Dans la première partie de ce chapitre, on a fait une étude approfondie sur les différents types de modélisation de la diode PIN et leur influence sur la reconfiguration des antennes. Dans la deuxième partie on a effectué une étude détaillée sur la reconfigurabilité fréquentielle d'une antenne triangulaire. Enfin, dans la troisième partie de ce chapitre on a fait la réalisation et la caractérisation du modèle simulé précédemment.

### III.2 -L'outil de simulation :

Dans notre étude de simulation, nous avons utilisé le logiciel CST, est une solution logicielle d'analyse électromagnétiques 3D hautes performances dédiée à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des composants hyperfréquences tels que les antennes imprimées et les antennes filaires et systèmes électromagnétiques (EM) [2]. Il permet de réaliser des simulations dans de nombreux domaines d'application telle que les performances et l'efficacité des antennes et des filtres, communications électroniques (Wifi, 5G, satellite ...), Compatibilité électromagnétique et interférences (EMC/EMI), Transports (voitures connectées,...) performance des circuits imprimés. [3]

CST permet aux utilisateurs d'accéder à de nombreux solveurs de simulation électromagnétique (EM) qui utilisent des méthodes telles que la méthode des éléments finis (FEM), la technique d'intégration finie (FIT) et la matrice des lignes de transmission (TLM). Il s'agit des solveurs généraux les plus puissants pour les tâches de simulation à haute fréquence. [4]

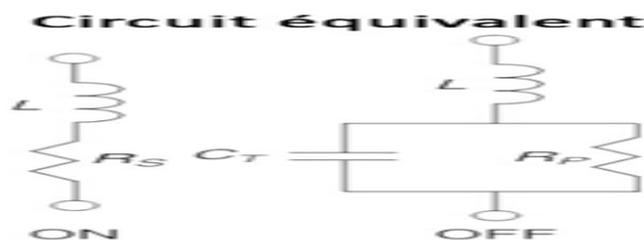
**III.3 - Modélisation de la diode PIN :**

**III.3.1 -Modélisation par un plot métallique:**

Le mode passant(ON) ou bloqué(OFF) de la diode PIN (connexion ou déconnexion) est simulé par la présence ou l'absence (respectivement) d'un plot métallique généralement de dimension  $2 \times 4 \text{ mm}^2$ . Plusieurs travaux basés sur des diodes PIN, comme par exemple la diode 4005HPND, ont démontré la validité de cette modélisation très simple afin de simuler correctement les performances de l'antenne. [5]

**III.3.2 -Modélisation par un circuit RLC équivalent :**

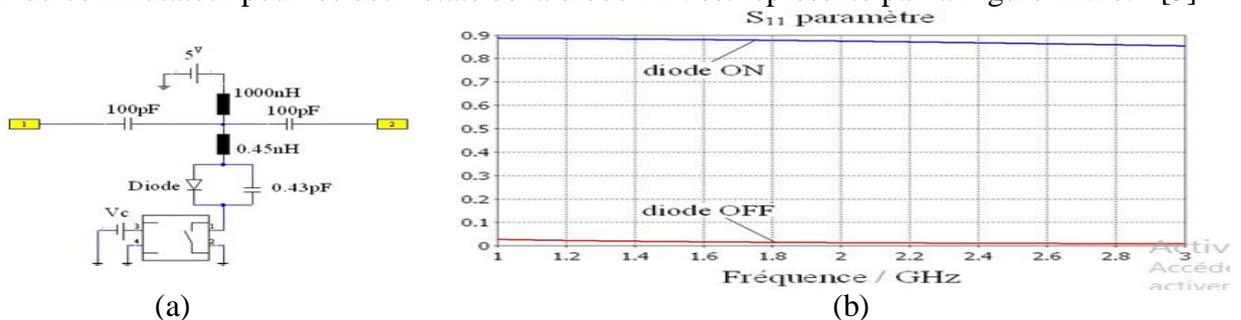
Il s'agit d'un circuit RLC équivalent simplifié de la diode PIN. Ce modèle simplifié est illustré par la Figure III.1. Il se compose d'une inductance parasite (L) en série avec une capacité intrinsèque (C) et une résistance intrinsèque (R), qui elles sont montées en parallèle à l'état OFF d'une part et d'autre part la capacité n'intervient plus quand la diode PIN est à l'état « ON »[5]



**Figure III.1 :** Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN [6]

❖ **Modélisation via l'utilisation d'un commutateur commandé en tension**

Le schéma équivalent du commutateur est illustré par la Figure III.2a. Lorsque la tension  $V_c$  est inférieure à 5 V ( $V_c = 0 \text{ V} ; 2,5 \text{ V}$ ) l'état de la diode est passant ; et dans le cas inverse,  $V_c$  supérieure à 5 V ( $V_c = 7,5 \text{ V} ; 10 \text{ V}$ ) l'état de la diode est bloqué. Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  du commutateur pour les deux états de la diode PIN est représenté par la Figure III.2b. [5]

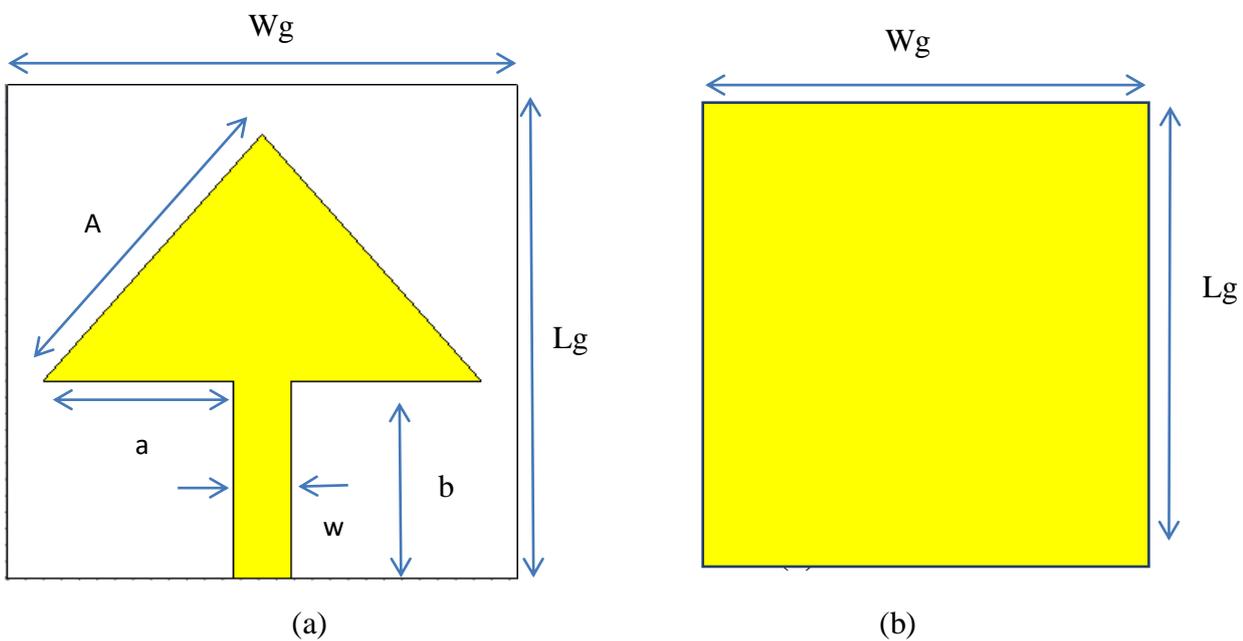


**Figure III.2:** Schéma équivalent du commutateur [5].

**III.4 - Conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence**

**III.4.1 - La géométrie de l'antenne proposée :**

Initialement, on a choisi une antenne patch de forme triangulaire avec un plan de masse. Les paramètres géométriques de l'antenne proposée sont définis de la façon suivante un substrat (FR4) d'une dimension de  $26.4 \times 30 \text{ mm}^2$  (largeur x longueur) qui a une permittivité relative  $\xi_r=4.4$ , et une épaisseur  $h=1.5 \text{ mm}^2$ , l'épaisseur de cuivre  $t$  est de  $0.035 \text{ mm}^2$ . L'antenne est alimentée par une ligne micro ruban d'une dimension de  $3.2 \times 12 \text{ mm}^2$  (largeur x longueur) et d'une impédance caractéristique  $Z=50\Omega$ , comme elle est illustrée dans la Figure III.3



**FigurIII.3 Structure de l'antenne Triangulaire : (a) vue de dessus (b) vue de dessous**

Les dimensions adoptées lors de cette étude sont montrés dans le Tableau III.1

Paramètre	Valeur [mm]	paramètre	Valeur [mm]
Wg	<b>26.4</b>	a	<b>10.6</b>
Lg	<b>30</b>	b	<b>12</b>
A	<b>15</b>	w	<b>3.2</b>

**Tableau III. 1 : Les dimensions de l'antenne triangulaire proposée**

### III.4.2 -Résultats de simulation

#### III.4.2.1- Structure de base (antenne triangulaire sans fente)

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

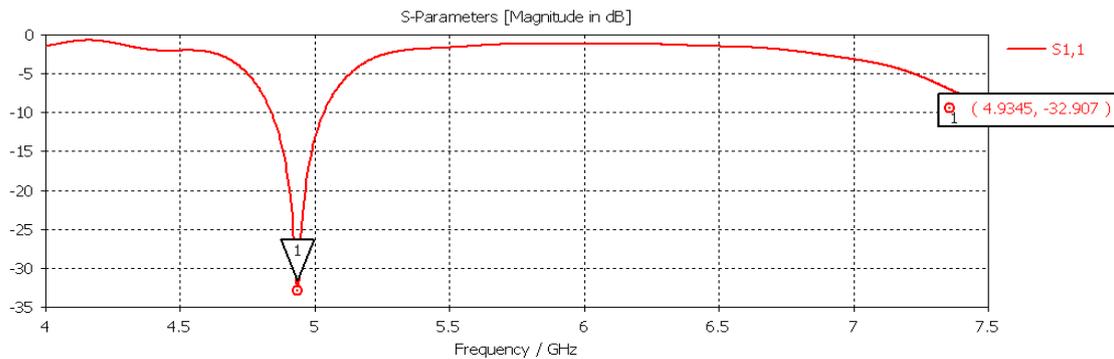


Figure III.4 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée

La figure suivante nous montre que la fréquence de résonance est de 4.9345 GHz et le niveau de coefficient de réflexion est de -32.907 dB.

#### III.4.2.2 -Création des fentes et insertion des diodes PIN et des plots métalliques sur le plan de masse

##### ➤ 1<sup>er</sup> cas : Antenne triangulaire avec création des fentes

Dans notre étude, les fentes que nous avons créées sont de la forme U avec les dimensions suivantes 2x16 mm<sup>2</sup> (largeur x longueur). Ces fentes sont insérées sur le plan de masse, voire figure III.5, III.6

##### ✚ État 1 : Antenne triangulaire avec une seule fente.

Le coefficient de réflexion S11 est représenté dans la figure III.5 (b)

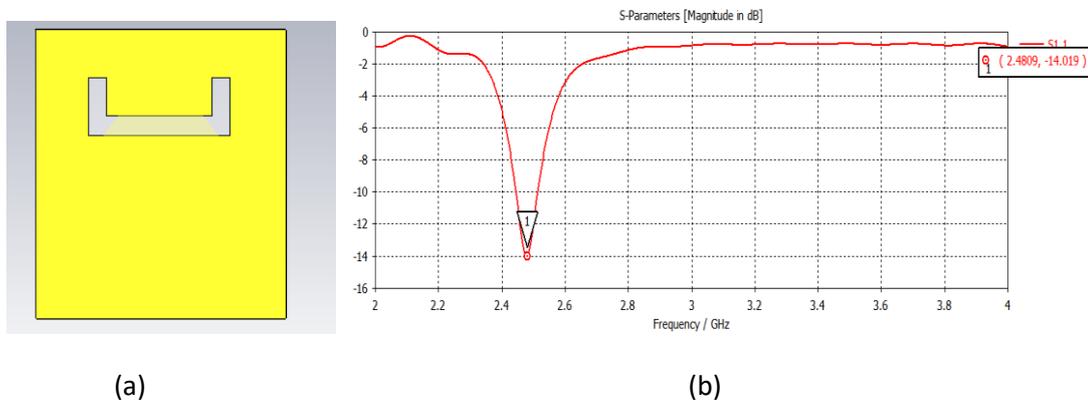
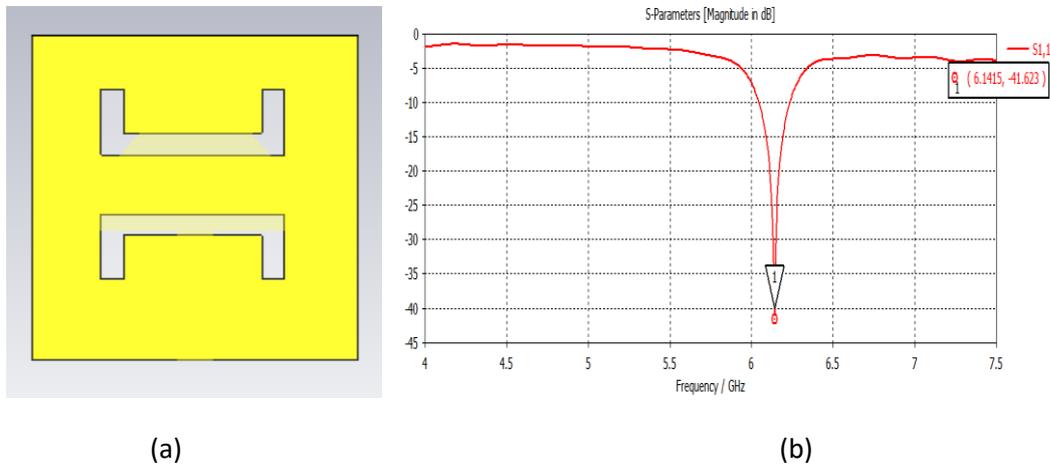


Figure III.5 : a) Géométrie du plan masse ;b) Coefficient de réflexionS11

✚ **État 2** : Antenne triangulaire avec deux fentes.

Le coefficient de réflexion S11 est représenté dans la figure III.6 (b)



**Figure III.6** : a) Géométrie du plan masse ;b) Coefficient de réflexion S11

D'après les résultats de simulation on remarque que lorsque nous avons créé une fente sur le plan masse la fréquence de résonance est décalée par rapport à l'état initial (sans fente) et elle est égale 2.4809GHz avec une adaptation de -14.623 dB, et lorsque nous avons créé deux fentes on remarque qu'il y a un décalage de la fréquence de résonance par rapport à l'état initial (sans fente) et par rapport a l'état d'une seule fentee et elle égale 6.1415 GHZ avec une bonne adaptation de -41.623dB.

Les résultats de simulation de cette partie sont regroupés dans le Tableau III.2

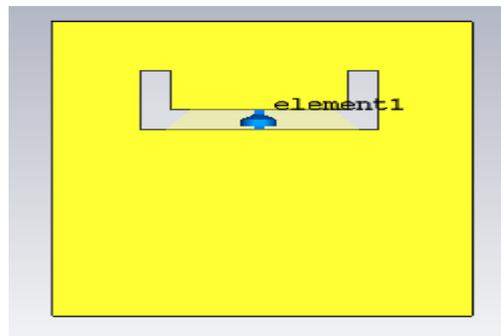
Etats	S11 [dB]	fréquence de résonance [GHZ]
Modèle de base sans fente	-32.907	4.9345
Avec une seule fente	-14.623	2.4809
Avec deux fentes	-41.623	6.1415

**Tableau III.2** : les résultats de simulation des trois états correspondants.

### ➤ 2<sup>eme</sup> cas : Utilisation de la diode PIN

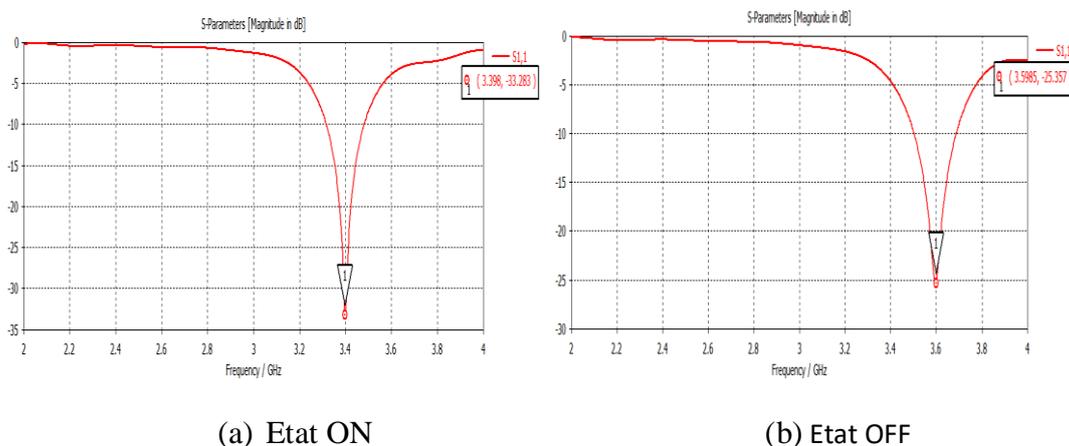
Le fonctionnement de la diode PIN est basé sur deux états ON (passante) et OFF (bloquée), alors que dans notre étude de simulation la diode PIN est modélisée par un circuit RLC équivalent sérier (Etat ON) et parallèle (Etat OFF).

Les valeurs de R, L et C que nous avons utilisé à l'état « OFF », sont respectivement égales à [0 ohm,  $6.10^{-10}$  H et  $5.10^{-13}$  F] et lorsque la diode PIN est à l'état « ON » (R=0.5ohm, L=0 H, C=0F). La diode est insérée sur le centre de la fente pour changer la circulation du courant surfacique, voire la figure III.7



**Figure III. 7 :** Antenne triangulaire avec une diode (element1) insérée sur la fente

- ✚ **État 1 :** diode passante, Le coefficient de réflexion est représenté sur la figure III.8 (a).
- ✚ **État 2 :** diode bloquée, Le coefficient de réflexion est représenté sur la figure III.8 (b).



**Figure III.8 :** Coefficient de réflexion S11 de l'antenne triangulaire avec une seule diode

### Chapitre III : Etude et conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement

Les résultats obtenus nous montre que lorsque la diode PIN est passante (l'état ON), la fréquence de résonance est égale à 3.5985GHZ avec une adaptation -25.357 dB et lorsqu'elle est bloquée (l'état OFF) la fréquence de résonance est égale à 3.398 GHZ avec une bonne adaptation -33.283 dB.

Les résultats de simulations de cette partie sont regroupés dans le Tableau III.3 :

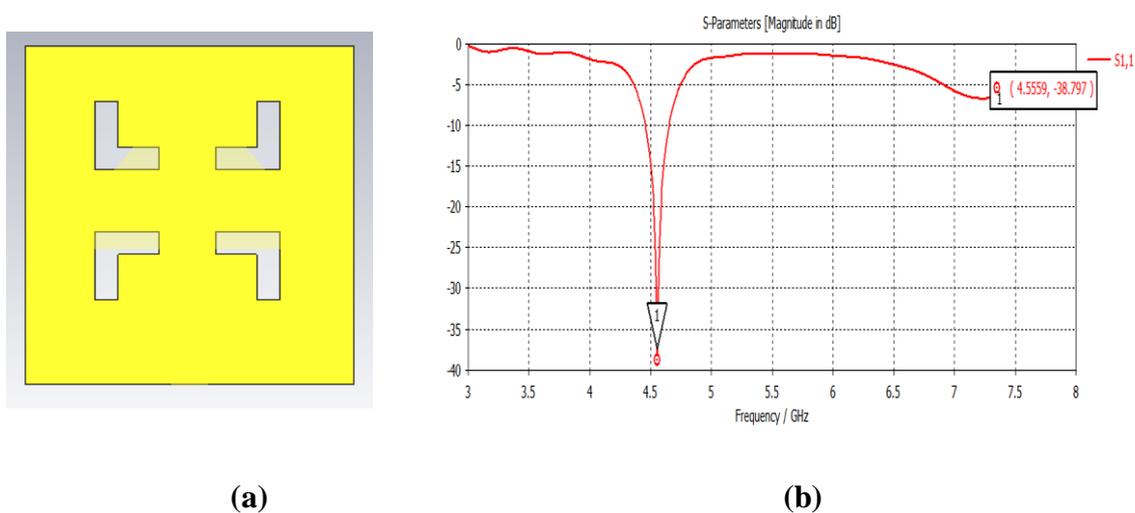
Etats	S11dB	Fréquence de résonance
Une seule fente	-14.623	2.4809
Diode passante (ON)	-25.357	3.5985
Diode bloquée (OFF)	-33.283	3.398

**Tableau III.3** : les résultats de simulation des trois états correspondants.

#### ➤ 3<sup>ème</sup> cas : Utilisation d'un plot métallique

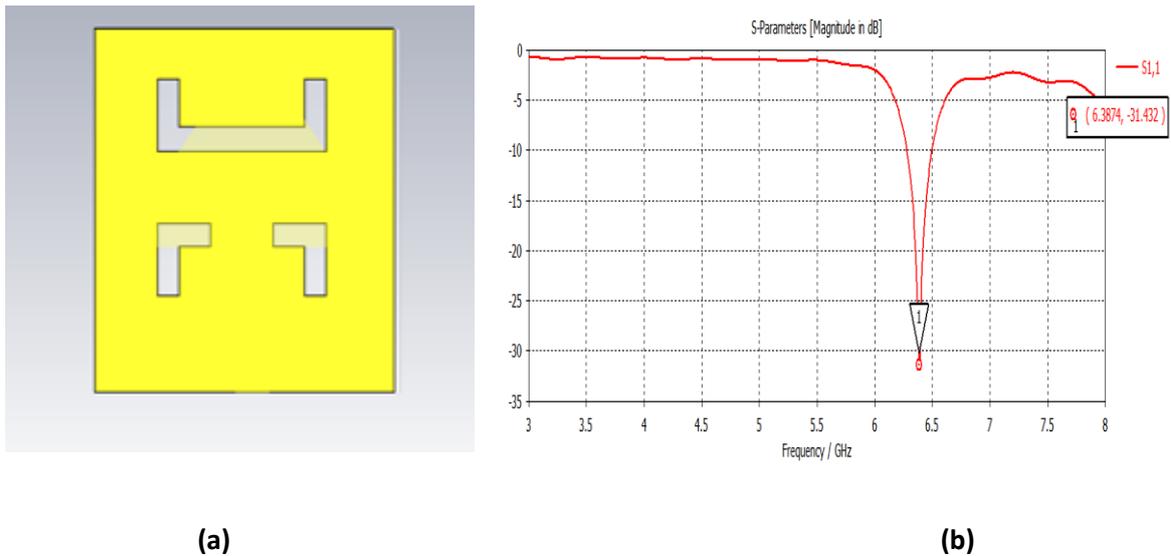
Dans ce cas la diode PIN est modélisée par un plot métallique de dimension 2x5 mm<sup>2</sup> (largeur x longueurs). Ce plot est placé au milieu de la fente.

- ✚ **État 1** : Les deux plots métallique sont à l'état (ON-ON) comme illustré dans la figure III.9 (a)
- ✚ **État2** : Les deux plots métalliques sont à l'état (ON-OFF) comme illustré dans la figure III.10 (a)



**Figure III.9** :a) insertion de deux plots métalliques sur les deux fentes ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (ON-ON)

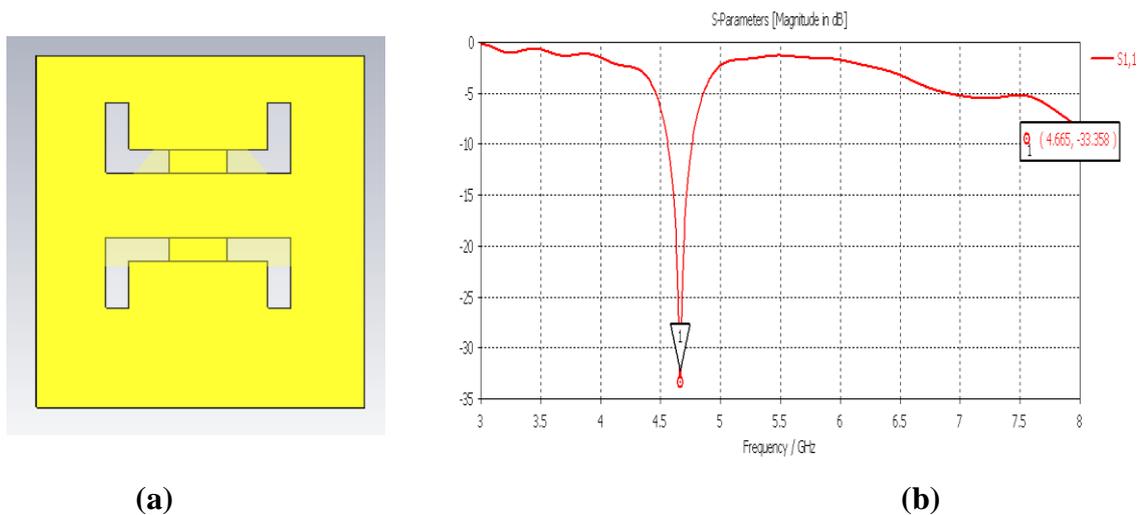
### Chapitre III : Etude et conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement



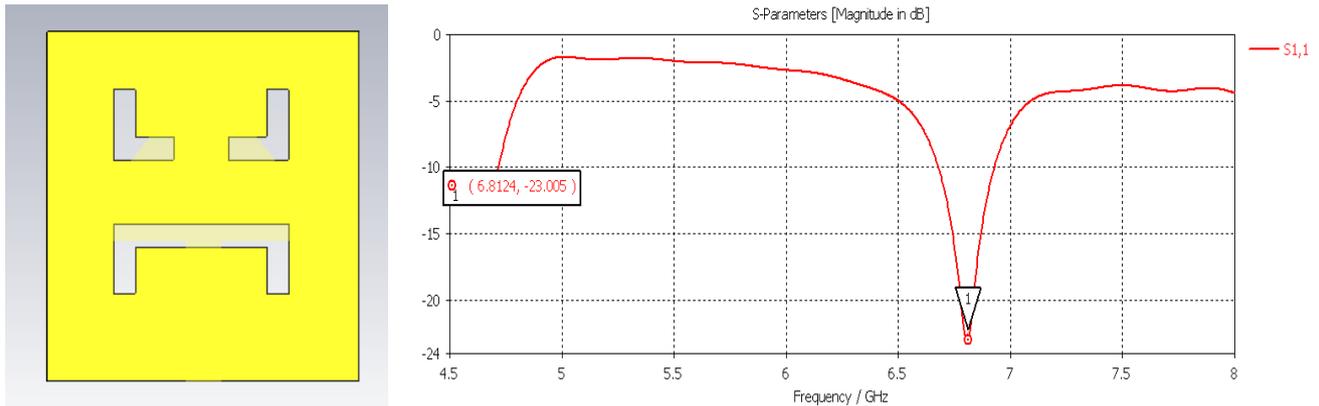
**Figure III.10 :** a) insertion d'un plot métallique sur la première fente ; b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (ON-OFF)

D'après les résultats obtenus on remarque que lorsque les deux plots métallique sont à l'état (ON - ON), la fréquence de résonance est égale à 4.5559 GHz avec une adaptation -38.797 dB, et lorsque ils sont à l'état (ON-OFF) la fréquence de résonance est égale à 6.3874 GHz avec une adaptation -31.432 dB. Donc, on peut dire qu'il y a un décalage de la fréquence de résonance par rapport à l'état ON-ON

- ✚ **État 3 :** Les deux plots métalliques sont à l'état (OFF-OFF) comme illustré dans la figure III.11 (a),
- ✚ **État 4 :** Les deux plots métalliques à l'état (OFF-ON) comme illustré dans la figure III.12 (a).



**Figure III.11:** a) insertion de deux plots métalliques sur les deux fentes ; b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (OFF-OFF)



**Figure III.12:**a)insertion d'un plot métallique sur la deuxième fente ;b) Coefficient de réflexion S11 de l'état (OFF-ON)

D'après ces résultats on observe que lorsque les deux plots métallique sont à l'état (OFF-OFF) la fréquence de résonance est égale à 4.665 GHz avec une adaptation de -33.358 dB, et lorsque les deux plots métallique sont à l'état (OFF-ON) la fréquence de résonance est égale à 6.8124 GHz avec une adaptation -23.005 et se retrouve donc un décalage par rapport à la résonance de l'état précédent (OFF-OFF).

Les résultats de simulations de cette partie sont regroupés dans le Tableau III.2 :

Plot1	Plot 2	S11 [dB]	Fréquence de résonance GHZ
ON	ON	-38.797	4.5559
ON	OFF	-31.432	6.3874
OFF	OFF	-33.358	4.665
OFF	ON	-23.005	6.8124

**Tableau III.4:** les résultats de simulation des quatre états correspondants

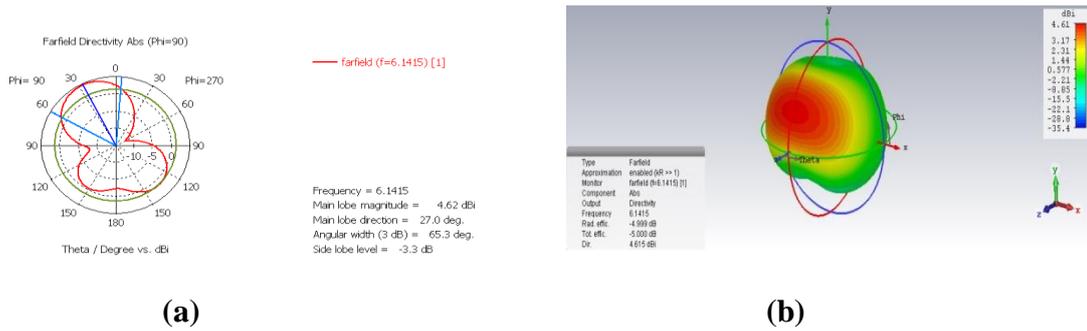
### III.5 -Conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en diagramme de rayonnement.

Dans cette partie, nous avons effectué une reconfigurabilité du diagramme de rayonnement en utilisant deux plots métalliques insérés sur les deux fentes qui se trouvent sur le plan de masse

#### **État 1:** deux fentes sans plots métalliques

Le Diagramme de rayonnement de cette structure de base est représentée en coordonnées polaire sur la figure III.13 (a) et dans l'espace 3D sur la figure III.13(b) à la fréquence de résonance de 6.1415 GHz

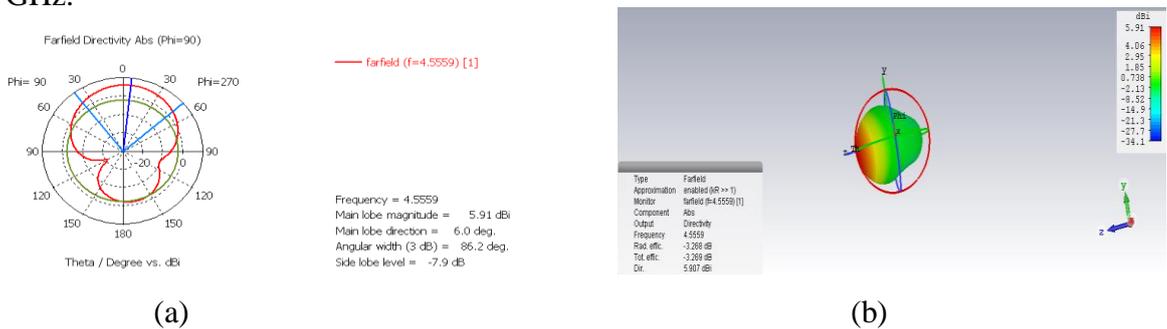
## Chapitre III : Etude et conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement



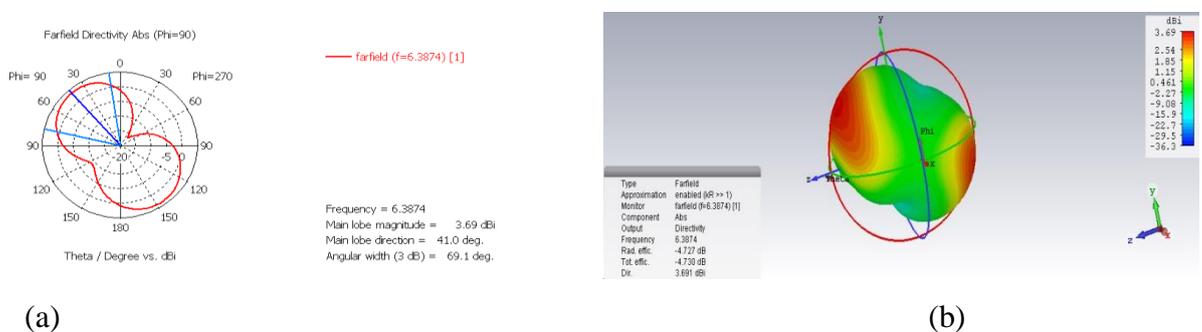
**Figure III.13 :** Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.1415 GHz ;a)en coordonnées polaires, b) en3D

Le gain obtenu est de l'ordre 4.62dBi et la forme du diagramme de rayonnement nous montre qu'il ya deux directions de rayonnement (deux lobes principaux)

- ✚ **État 2 :** Les deux plots métalliques sont à l'état (ON-ON), le Diagramme de rayonnement est représenté sur la figure III.14 .en coordonnée polaire et en 3D à la fréquence 4.5559 GHz.
- ✚ **État 3 :** Les deux plots métalliques sont à l'état (ON-OFF) Diagramme de rayonnement est montré dans la figure III.15.en coordonnée polaire et en 3D à la fréquence 6.3874 GHz.



**Figure III.14:** Diagramme de rayonnement à la fréquence 4.5559 GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D

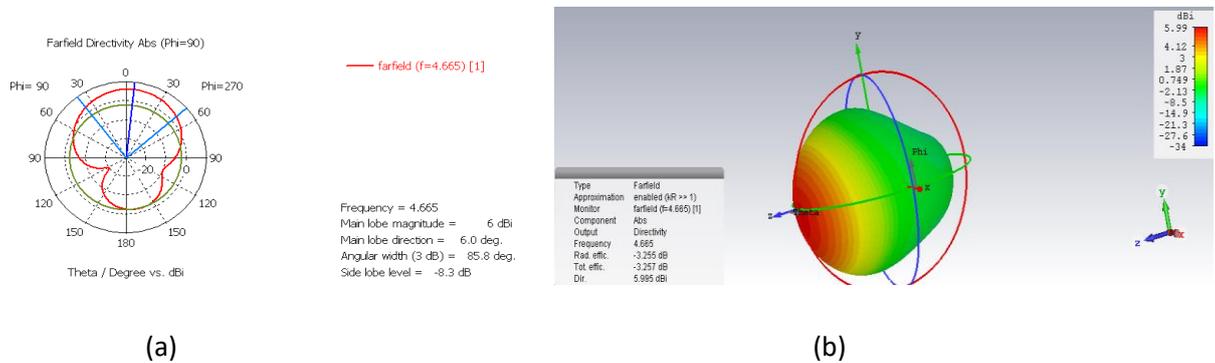


**Figure III.15 :** Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.3874 GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D

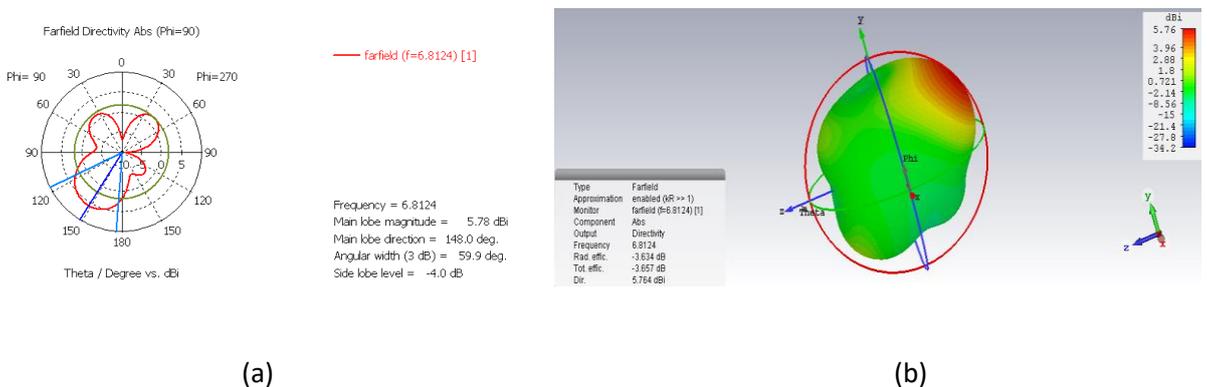
## Chapitre III : Etude et conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement

D'après Les résultats obtenus, on observe que lorsque les deux plots métallique sont à l'état (ON-ON) le diagramme de rayonnement change sa direction ainsi que sa forme par rapport à l'état initial (sans plots) et lorsqu'ils sont à l'état (ON-OFF) le diagramme de rayonnement change encore sa direction et sa forma par rapport aux deux cas précédents (Etat 1 sans plots et Etat 2 ON-ON)

- ✚ **État 4 :** Les deux plots métalliques sont à l'état (OFF-OFF), le diagramme de rayonnement est représenté sur la figure III.16 en coordonnée polaire et en 3D à la fréquence 4.665GHz.
- ✚ **État 5 :** les deux plots métalliques sont à l'état (OFF-ON), le diagramme de rayonnement est présenté dans la figure III.17 en coordonnée polaire et en 3D à la Fréquence 6.8124 GHz.



**Figure III.16:** Diagramme de rayonnement à la fréquence 4.665GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D.



**Figure III.17:**Diagramme de rayonnement à la fréquence 6.8124 GHz ;a) en coordonnée polaire, b) en 3D.

D'après tous les résultats obtenus dans cette partie (reconfigurabilité en diagramme de rayonnement), nous pouvons conclure que, lorsqu'on change l'état de n'importe quel plot (1 ou 2, 1 et 2)), le diagramme de rayonnement change sa direction ainsi que sa forme.

### **III.6 -Validation expérimentale**

Dans cette partie nous avons procédé à la procédure de réalisation en utilisant la machine de gravure mécanique LPKF ProtoMat S103. La réalisation s'est déroulée au niveau du laboratoire de département Electronique et Télécommunications de l'Université 8 Mai 1945 Guelma/Algérie dans le cadre du Mémoire de fin d'étude.

Cette procédure passe par deux phases: phase de fabrication des antennes on utilisant la machine à gravure mécanique LPKF ProtoMat S103 et la deuxième phase de mesures est basée sur l'utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriel.

#### **III.6.1 -Description de la machine LPKF ProtoMat S103 :**

Le ProtoMat S103 est le premier système de la gamme LPKF S-Séries de fraiseuses pour circuits imprimés avec une zone de travail de 9 "x 12" et recommandé pour les matériaux RF et micro-ondes plus doux à base de PTFE. Il est capable de traiter facilement des applications PCB avancées. Grâce aux fonctionnalités du système telles que la reconnaissance optique des repères et la résolution de fraisage de 0,002 milles. Le ProtoMat S103 fonctionne directement des données CAO aux cartes de traitement. Les caractéristiques standard uniques du système incluent une table à vide pour retravailler les PCB endommagés et sécuriser les matériaux délicats ainsi qu'un limiteur de profondeur sans contact, ou pied pneumatique, qui garantit que rien n'entre en contact avec le matériau de la carte mais l'outil. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour ceux qui travaillent avec des conceptions RF et micro-ondes. Avec un moteur de broche de 100 000 tr/min, 4 les traces et l'espacement de mil sont courants sur une large gamme de matériaux avec des trous de perçage aussi petits que 6 mil ; des caractéristiques plus petites peuvent être possibles en fonction de l'outillage, de l'épaisseur du cuivre, du type de substrat et résistance au pelage. Le ProtoMat S103 comprend également un fraisage 2.5D contrôlé par logiciel pour le fraisage et la découpe de poches ou le perçage de l'aluminium, du laiton, du cuivre et des plastiques permettant le développement de circuits imprimés à noyau métallique. La distribution de pâte à souder est également une caractéristique standard si une alimentation en air comprimé propre/sec est fournie [7].



**Figure III.18:**La machine à gravure LPKF Protomat S103

### **III.6.2 -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, voire la figure III.19

Dans la majorité des cas, l'antenne est liée à l'analyseur de réseaux à travers des câbles et des connecteurs qui rajoutent au signal un affaiblissement et un déphasage. Alors, il faut éliminer l'influence de cette liaison. L'opération qui permet d'éliminer les erreurs systématiques dues au calibrage, c'est une opération qui permet de compenser les erreurs par égalisation. Elle se fait en reliant au bout de la liaison, au lieu de l'antenne, une charge assimilée à un circuit ouvert, une charge de 50ohm et enfin un court-circuit. [8]



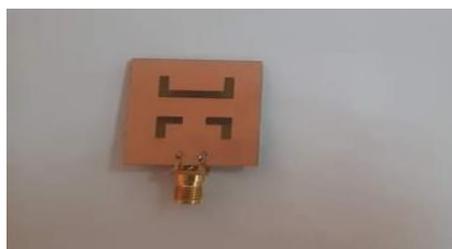
**Figure III.19:**Analyseur de réseau vectoriel

### III.6.3 -Le prototype réalisé

Nous avons réalisés deux prototypes :

Le premier concerne une antenne triangulaire avec deux fentes insérées sur le plans masse et avec un seul plot métallique placé sur la première fente figure III.20(a)

Le deuxième concerne une antenne triangulaire avec deux fentes insérées sur le plan masse et avec deux plots métalliques placés sur les deux fentes figure III.20 (b)



(a)



(b)



(c)

**Figure III.20:** prototype réalisé

(a) Avec un seul plot, (b) Avec deux plots, (c) vue de dessus (patch)

### III.6.4 -Mesures expérimentales

➤ Mesure du coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est mesuré à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel Rohde&Schwarz R&S @ZNB20 Vector Network Analyser)

Les résultats expérimentaux et les résultats de simulation des deux états (ON-OFF et ON-ON) sont illustrés sur la figure III.21 et la figure III.22 respectivement.

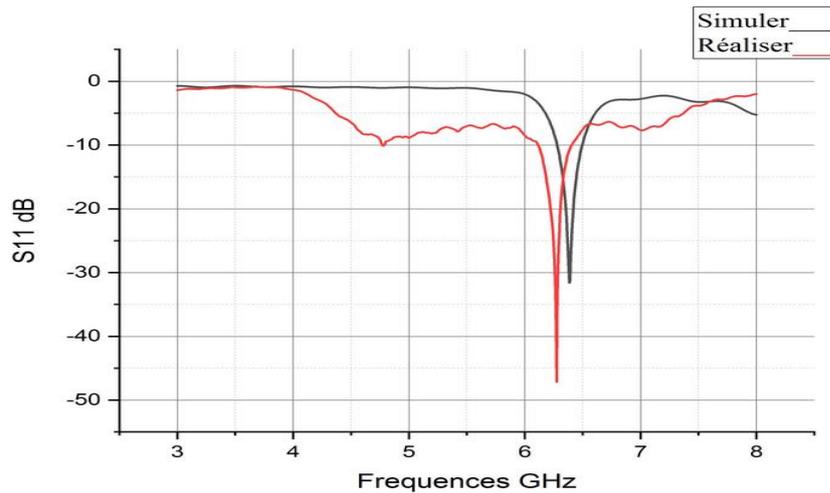


Figure III.21: Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11 a l'État ON OFF

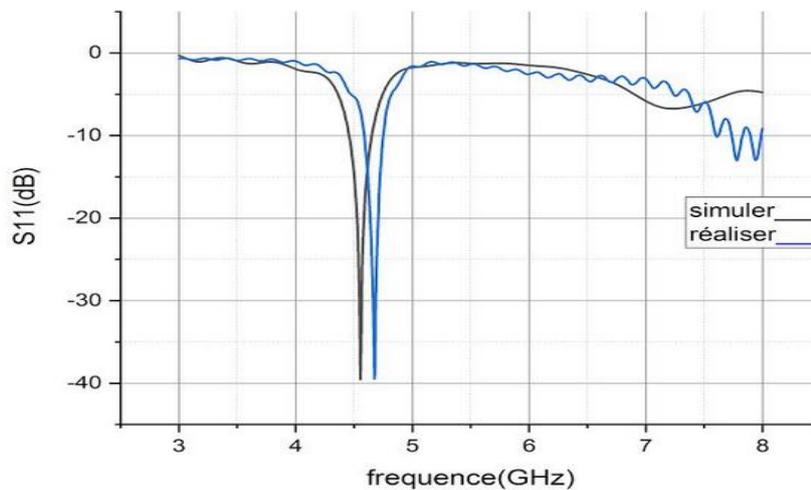


Figure III.22: Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S11 à l'État ON ON

	<b>Etat</b>	<b>Fréquence de résonance (GHz)</b>	<b>Coefficient de réflexion S11 (dB)</b>
Simulé	ON-OFF	6.3874	-31.432
Mesuré	ON-OFF	6.30	-47
Simulé	ON-ON	4.5559	-38.797
Mesuré	ON-ON	4.70	-38.79

**Tableau III. 5** : comparaison des résultats obtenus

On remarque que les résultats expérimentaux sont presque identiques aux résultats de la simulation. Cette petite différence peut s'expliquer par des influences externes sur l'antenne réalisée.

### **III.7-Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation et de réalisation d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement en utilisant le simulateur CST

Dans la première partie nous avons créé deux fente de forme U sur le plan masse de l'antenne proposée et on a effectué une modification géométrique par l'insertion de la diode PIN pour pouvoir atteindre notre objectif qui est la reconfigurabilité de l'antenne. Et comme il existe d'autres procédures de modélisation de la diode PIN pour simplifier la simulation et même la réalisation, on a remplacé cette diode par un circuit RLC équivalent puis par un plot métallique.

Dans la dernière partie on a procédé à la réalisation de deux modèles, tous d'abord nous avons décrit les instruments utilisés dans cette partie, ensuite nous avons comparé les résultats de simulation et de mesure en termes de coefficient de réflexion S11. Nous pouvons dire qu'il y a une petite différence entre les résultats de simulation et de mesure, cette différence s'explique par les influences extérieures sur l'antenne réalisée ou les problèmes provoqués par la machine de graveur.

#### Bibliographie

- [1] Zemam .Youssouf, Foukia. Aimad Eddine, << Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs>>, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-telemcen ,2017
- [2] <https://www.directindustry.fr/prod/simulia/product-6159-1883061.html>
- [3] <https://www.keonys.com/logiciels-simulations/cst-studio-suite/>
- [4] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/solveurs/>
- [5] Trong Duc Nguyen << Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive>> Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2012
- [6] 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>> Thèse Doctorat, Electronique. Institut National des Postes et Télécommunications, 2017
- [7] <https://datasheets.globalspec.com/ds/3382/LPKFLaserElectronicsNorthAmerica/8D32C891-161B-4DC5-8637-5F43A82E2202>
- [8] Abdelhadi Amine, Haroun Imene<<conception et réalisations d'une antenne multi bande pour les système GNSS>>, Mémoire de master, université Saad Dahlab de Blida, 2011-2012

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous nous intéressons à l'étude et à la conception d'une antenne triangulaire 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. Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons présenté la différente technique de reconfiguration avec quelques exemples illustratifs et nous avons cité les différents dispositifs de commutation telle que RF MEMS, les diodes PIN, les Varactors qui peuvent modifier les caractéristiques des antennes reconfigurable après les fabrications.

Finalement, le dernier chapitre est consacré à l'étude et la conception d'une antenne triangulaire reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. La première partie de cette étude est basée sur la création des fentes et la modification géométriques dans laquelle on a utilisé les Diodes PIN ainsi que leur technique de modalisation à savoir circuit RLC équivalente et plot métallique. La deuxième partie est consacrée à la réalisation de deux prototypes, le première concerne une antenne triangulaire avec deux fentes insérées sur le plans masse et avec un seul plot métallique place sur la première fente et le deuxième concerne une antenne triangulaire avec deux fentes insérées sur le plan masse avec deux plots métalliques places sur les deux fentes.

Alors que, nous avons constaté que les résultats de mesure obtenus sont similaires avec les résultats de simulation avec des petites différences qui peuvent être expliquées par une incertitude dimensionnelle lors de la construction ou des problèmes causés par la machine LPKF.