

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 : **Systèmes des Télécommunications**

ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE FRACTALE RECONFIGURABLE EN FREQUENCE

Présenté par :

ADJILA FATIMA

MELATI NADIA

Sous la direction du :
Dr. BOUALLEG Ahcene

Juillet 2019

REMERCIEMENTS

Nous remercions infiniment Dieu le Tout puissant pour la santé, la force et le courage qu'il nous a donnés tout au long de notre parcours.

Notre gratitude va à l'égard de tout le corps professoral pour toutes nos Connaissances acquises durant notre formation spécialement Dr. BOUALLEG Ahcene pour son bon encadrement, ses conseils, sa patience et son attention qui nous ont énormément aidés dans ce travail.

Nos vifs remerciement vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à remercier aussi tous les personnes du département d'électronique et télécommunications pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploie de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que :

Je dédie ce travail à ma chère Mère *ZOËRA*

Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivant le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon cher Père *AHMED*

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as sa consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A ma chère sœur *Aïcha*, son petit-fils *Yakoub* et son mari *Walid*

A mes frères *AbedlRahmen*, *AbedlGhani* et sa femme.

A tous ce qui m'a apporté une aide spécialement M. *Walid*.

A toute la famille, A tous les étudiant(e)s de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

ADJILA FATIMA

Dédicace

A mes chers parents

A ma sœur et mon frère

A mes tantes et mes oncles

A mes chères amies

A tous qui m'aiment

Melati Nadia

L'évolution rapide de la télécommunication sans fils provoque une limitation de ressources fréquentielles et une réduction de débits et d'efficacité de transmission. Les antennes reconfigurables permettent de répondre à ces problèmes, elles offrent de multiples fonctions en changeant dynamiquement leurs propriétés telles que la fréquence, le diagramme de rayonnement, la polarisation ou la combinaison entre ces trois paramètres. Dans ce travail, nous avons étudié une antenne fractale (Triangle de Sierpensi 1^{er} itération) reconfigurable en fréquence qui fonctionne dans la gamme de 4,179 GHz jusqu'au 4.617 GHz. La reconfigurabilité est effectuée par l'ajout d'une diode PIN, tout en conservant le digramme de rayonnement et la polarisation. L'étude paramétrique de cette antenne était faite par l'utilisation du simulateur CST Studio 2017.

Abstract

The rapid evolution of wireless telecommunications causes a limitation of frequency resources and a reduction of data rates and transmission efficiency. Reconfigurable antennas can address these problems; they offer multiple functions by dynamically changing their properties such as frequency, radiation pattern, polarization or the combination of these three parameters. In this work, we have studied a frequency reconfigurable fractal antenna (Sierpensi Triangle 1st Iteration) that operates in the range of 4.179 GHz up to 4.617 GHz. Reconfigurability is achieved by adding a PIN diode, while maintaining the radiation pattern and polarization. The parametric study of this antenna was done using the CST Studio 2017 simulator.

ملخص

أدى التطور السريع للاتصالات اللاسلكية إلى الحد من موارد التردد و تقليل تدفق و كفاءة الإرسال، تتيح الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل الحل لهذه المشاكل، فهي توفر وظائف متعددة عن طريق تغيير خصائصها ديناميكيا مثل التردد ، نمط الإشعاع، الاستقطاب أو المزج بين هذه التعديلات الثلاثة. في هذا العمل، درسنا هوائي كسور قابل لإعادة التكوين، يعمل في المجال 4.179 جيجا هرتز و 4.617 جيجا هرتز. إعادة تشكيل الهوائي تمت عن طريق استخدام الصمام ثنائي الأقطاب PIN، مع الحفاظ على نمط الإشعاع و الاستقطاب. تم إجراء هذه الدراسة باستخدام المحاكاة الكهرومغناطيسية CST.

TABLE DE MATIERE

| | |
|---|------|
| Résumés | I |
| Liste des figures | V |
| Liste des Tableaux | VIII |
| Liste des abréviations | IX |
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES IMPRIMEES | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Définition et structure d'une antenne imprimée | 3 |
| I.3 Techniques d'alimentation | 5 |
| I.3.1 Alimentation par câble coaxial | 6 |
| I.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban | 7 |
| I.3.3 Alimentation par couplage électromagnétique | 7 |
| I.3.4 Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse | 8 |
| I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées | 10 |
| I.4.1 La directivité et le gain | 10 |
| I.4.2 Coefficient de réflexion | 10 |
| I.4.3 Impédance d'entrée de l'antenne | 11 |
| I.4.4 Rendement de l'antenne | 12 |
| I.4.5 Bande passante | 12 |
| I.5 Avantages et inconvénients des antennes imprimées | 13 |
| I.6 Les applications des antennes imprimées | 14 |
| I.7 Conclusion | 14 |
| CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RECONFIGURATION DES ANTENNES | |
| II. 1 Introduction | 16 |
| II.2 Qu'est-ce qu'une antenne reconfigurable ? | 16 |
| II.2.1 Comment s'effectue la reconfigurabilité ? | 16 |
| II.3 Techniques de reconfiguration | 16 |
| II.3.1 Les diodes PIN | 17 |
| II.3.2 Les diodes varicap | 17 |

| | |
|---|----|
| II.3.3 MEMS | 18 |
| II.3.4 Utilisation des transistors FET | 18 |
| II.3.5 Commutateur optique | 19 |
| II. 3.6 Matériaux agiles | 19 |
| II.4 Les classifications des antennes reconfigurables | 19 |
| II.5 Les types des reconfigurabilités | 20 |
| II.5.La reconfigurabilité fréquentielle | 21 |
| II.5.1.1 Les types d’agilité en fréquence | 21 |
| II.5.1.2 Techniques d’agilité fréquentielle | 21 |
| II.5.1.3 Comparaison entre les techniques de la reconfiguration en fréquence | 23 |
| II.5.2 Antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement | 24 |
| II.5.3 Antenne reconfigurable en polarisation | 25 |
| II.5.4 La reconfiguration composée | 26 |
| II.6 Avantages et inconvénients d’une antenne reconfigurable | 26 |
| II.7 Conclusion | 27 |
| CHAPITRE III : ETUDE ET CONCEPTION D’UNE ANTENNE FRACTALE (TRIANGLE DE SIERPENSKI 1 ^{ERE} ITERATION) RECONFIGURABLE EN FREQUENCE | |
| III.1 Introduction | 28 |
| III .2 Choix d’outil de simulation | 28 |
| III.3 Les structures rayonnantes principales | 28 |
| III.3.1 Les antennes filaires | 28 |
| III.3.2 Les antennes à fente | 29 |
| III.3.3 Les antennes patches | 29 |
| III.4 L’influence de la diode PIN sur la structure rayonnante d’une antenne | 29 |
| III.4.1 Modélisation de la diode PIN | 29 |
| III.4.2 L’influence de la diode PIN sur une antenne dipôle imprimée | 31 |
| III.5 Conception d’une antenne fractale reconfigurable en fréquence | 39 |
| III.5.1 La géométrie de l’antenne proposée | 39 |

TABLE DE MATIERE

| | |
|--|----|
| III. 5.2 Résultats de simulation | 40 |
| III.5.2.1 Structure de départ (Triangle de Sierpiński 1 ^{ère} itération) | 40 |
| III.5.2.2 Création des fentes et insertion des diodes PIN sur la structure de l'antenne fractale | 41 |
| III.6 Validation expérimentale | 47 |
| III.6.1 Description de la machine LPKF ProtoMat S103 | 47 |
| III.6.2 Le prototype réalisé | 48 |
| III.6.3 Mesures expérimentales | 49 |
| III.7 Conclusion | 51 |
| Conclusion générale | 53 |
| REFERENCES | 54 |

Chapitre I

| | | |
|------------|--|----|
| Figure I.1 | Structure d'une antenne patch rectangulaire | 3 |
| Figure I.2 | Divers types d'éléments rayonnants | 5 |
| Figure I.3 | Alimentation par câble coaxial | 6 |
| Figure I.4 | Alimentation par ligne Micro-ruban | 7 |
| Figure I.5 | Alimentation par proximité | 8 |
| Figure I.6 | Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse | 9 |
| Figure I.7 | Schéma équivalent du dispositif à l'émission | 12 |

Chapitre II

| | | |
|--------------|--|----|
| Figure II.1 | Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF | 17 |
| Figure II.2 | Le symbole et le circuit équivalent d'une diode Varicap | 18 |
| Figure II.3 | Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS (a), photographie de l'antenne (b) | 18 |
| Figure II.4 | Cristal liquide(a) (PVA : Poly VinylAlcohol),(b)métamatériau. | 19 |
| Figure II.5 | Schéma des types d'antennes reconfigurables | 20 |
| Figure II.6 | Antenne fractale reconfigurables en fréquence | 22 |
| Figure II.7 | Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables | 22 |
| Figure II.8 | La reconfigurabilité de rayonnement | 24 |
| Figure II.9 | Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement avec modification | 25 |
| Figure II.10 | Antenne PASS de l'UCLA | 26 |

Chapitre III

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure III.1 | Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN (a) Mode ON ;(b) Mode OFF | 30 |
| Figure III.2 | Schéma équivalent du commutateur | 30 |
| Figure III.3 | Structure d'antenne dipôle (a) vue au-dessus (b) vue au-dessous | 31 |
| Figure III.4 | Coefficient de réflexion S11 de l'antenne avec les deux simulateurs (a)HFSS,(b)CST | 32 |
| Figure III.5 | Antenne dipôle avec diode PIN | 33 |
| Figure III.6 | Antenne dipôle avec diode PIN modélisée par un plot métallique | 34 |
| Figure III.7 | coefficient de réflexion S11 pour l'antenne avec diode modélisée par un plot métallique (a) HFSS, (b) CST | 35 |
| Figure III.8 | Antenne dipôle avec diode PIN modélisée par circuit RLC (HFSS) | 36 |
| Figure III.9 | coefficient de réflexion S11 pour l'antenne avec diode modélisée par un circuit RLC | 37 |
| Figure III.10 | coefficient de réflexion S11,(a)Diode PIN Etat ON ($R=1\Omega$),(b) Diode PIN Etat OFF ($R=109\Omega$) | 38 |
| Figure III.11 | Structure de l'antenne fractale : Triangle de Sierpiński (1^{ère} itération) (a) vue au-dessus (b) vue au-dessous | 40 |
| Figure III.12 | Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale de départ(triangle de Sierpinsky (1er itération) | 41 |
| Figure III.13 | Antenne fractale avec diode PIN modélisée par un plot métallique (0.2x1mm ²) | 42 |
| Figure III.14 | Coefficient de réflexion S11 de la structure obtenue avec et sans plot | 42 |
| Figure III.15 | Antenne fractale avec trois diodes PIN aux sommets (trois plots métalliques) (a)Avec plots, (b) sans plots | 43 |
| Figure III.16 | Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale avec plots et sans plots | 43 |
| Figure III.17 | Antennefractale avec 3 Switchs (S1, S2 & S3) | 44 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure III.18 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale (S1, S2 & S3/ON & S1, S2 & S3/OFF) | 45 |
| Figure III.19 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale (ON-OFF-OFF, OFF-ON-OFF, OFF-OFF-ON) | 45 |
| Figure III.20 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale (OFF-ON-ON, ON-OFF-ON, ON-ON-OFF) | 46 |
| Figure III.21 La machine à gravure LPKF Protomat S103 | 48 |
| Figure III.22 prototype réalisé (Triangle de Sierpiński 1er tirage) (a) Avec trois fentes , (b) Avec trois plots | 49 |
| Figure III.23 Analyseur de réseau vectoriel | 49 |
| Figure III.24 Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du coefficient de réflexion S11 (a) Etat OFF OFFOFF , (b) Etat ON ONON | 50 |

LISTE DE TABLEAUX

| | | |
|---------------|--|----|
| Tableau I.1 | comparaison entre les différentes techniques d'alimentation | 9 |
| Tableau II.1 | la différence entre les techniques de reconfiguration en fréquence | 23 |
| Tableau III.1 | les résultats de simulation pour les trois types de modélisation de la diode PIN | 39 |
| Tableau III.2 | Les dimensions de l'antenne fractale proposée | 40 |
| Tableau III.3 | les résultats de simulation des trois états correspondants | 47 |
| Tableau III.4 | comparaison des résultats obtenus | 51 |

LISTE D'ABREVIATIONS

ADS: Advanced Design System

CAO: Conception Assisté par Ordinateur

CST: Computer Simulation Technology

FET: Field Effect Transistor

GPS: Global positioning System

HFSS: High Frequency Structure Simulator

MEMS: Micro Electro Mechanical system (Système Micro Electromécanique)

PIFA: Planar Inverted -F Antenna

PIN: Positive Intrinsic Negative

UCLA: University California Los-Anglos

Varicap : variable capacitor

3D : Trois dimensions

INTRODUCTION GENERALE

D'après des années, les télécommunications sans fils connaissent une évolution très rapide dans tous les domaines de la vie quotidienne, cette évolution nécessite à utiliser des nouvelles technologies pouvant améliorer les performances des échanges de l'information, d'augmenter la couverture, d'améliorer la qualité de service pour les abonnés, par conséquent, d'augmenter d'avantage le nombre d'utilisateurs.

Les antennes imprimées sont les plus utilisées dans les systèmes des télécommunications à cause de leurs faibles poids, leurs coûts de réalisation et leurs capacités d'intégration aux différentes applications. Tandis que l'émergence des conceptions classique, on peut classier les antennes reconfigurables en quatre catégories : la reconfigurabilité en fréquence, du rayonnement, en polarisation ou une combinaison entre deux ou plus de reconfigurations précédentes. Ce qu'ils présentent alors comme des solutions pour satisfaire aux exigences imposées.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier et de concevoir une antenne fractale reconfigurable en fréquence spécifiquement de la forme d'un triangle de Sierpiński (1^{er} itération) en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio version 2017.

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

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les antennes imprimées. Nous présenterons la structure, les différentes techniques d'alimentation ainsi que les avantages, les inconvénients et les domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté au début quelques notions de base sur les antennes reconfigurables et les différents types de reconfigurabilité. Ensuite, nous avons expliqué en détail les différentes techniques utilisées pour obtenir la reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation, à la fin de ce chapitre on a donné les avantages et les inconvénients de ce type d'antenne.

Le dernier chapitre de ce mémoire s'intéresse à l'étude et à la conception d'une antenne

INTRODUCTION GENERALE

fractale de type Triangle de Sierpinski 1^{ère} itération, dans la première partie on a fait une étude approfondie sur les différents types de modélisation d'une diode PIN et leur influence sur une antenne dipôle. Dans la deuxième partie on a effectué une étude détaillé sur la reconfigurabilité fréquentielle d'une antenne fractale. Dans la troisième partie de ce chapitre on a fait la réalisation et la caractérisation du modèle simulé précédemment.

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LES ANTENNES IMPRIMEES

I.1 Introduction :

Avec développement technologique actuel, 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.

Ce chapitre présente une définition et la structure d'une antenne imprimée; puis on passe aux techniques d'alimentation déployées, par la suite, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière. Ainsi quelques avantages ; des inconvénients et des applications des antennes imprimées.

I.2 Définition et structure d'une antenne imprimée

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique, ou inversement de convertir l'énergie électromagnétique en énergie électrique. Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur [I.1].

La configuration la plus simple d'une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, un substrat diélectrique caractérisé à la fois par une permittivité électrique ϵ_r , et une perméabilité magnétique μ_r , et un élément rayonnant de forme quelconque appelé patch [I.2].

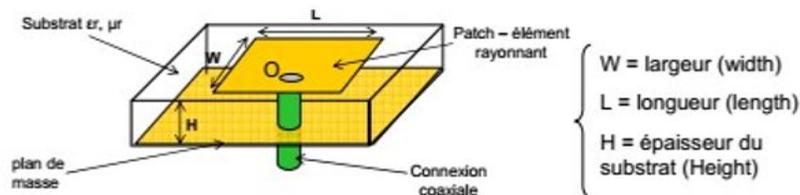


Figure I.1 Structure d'une antenne patch rectangulaire.

➤ **Plan de masse : [I.3]**

Doit être théoriquement de dimension infinie mais en pratique celui-ci est plutôt, pour des raisons d'encombrement, de l'ordre de 3 ou 4 longueur d'onde. Il arrive cependant que celui-ci soit très réduit, ce qui bien évidemment modifie les caractéristiques de l'antenne initiale, parfois de manière très prononcée.

➤ **Substrat : [I.4] [I.5]**

Les caractéristiques du substrat conditionnent également le comportement de l'antenne. On choisit en général un diélectrique de faible hauteur vis-à-vis de la longueur d'onde λ d'utilisation (quelques $\lambda/10$), idéalement la permittivité relative du substrat doit être faible ($\epsilon_r \leq 3$) de façon à permettre le rayonnement, en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse

Les matériaux les plus couramment utilisés sont des composites à base de téflon ($2 \leq \epsilon_r \leq 3$ et $tg \delta \approx 10^{-3}$), du polypropylène ($\epsilon_r = 2,18$ et $tg \delta = 3.10^{-4}$) ainsi que des mousses synthétiques contenant beaucoup de minuscules poches d'air ($\epsilon_r = 1,03$ et $tg \delta \approx 10^{-3}$)

Le substrat est caractérisé par sa permittivité relative ϵ_r , sa hauteur h et son facteur de perte $\tan \delta$, il doit répondre à certaines exigences :

- Une conservation de la forme originale
- La stabilité en température (pour soudure) et aux conditions atmosphériques
- L'uniformité de la permittivité relative et de hauteur (sur de grande plaque)
- faible pertes diélectrique $\tan \delta \approx 10^{-3}$ pour une meilleure efficacité
- Une résistance aux produits chimiques

- Une faible rugosité

Substrat mince avec des constantes diélectriques élevées sont souhaitables pour les circuits micro-ondes, car ils nécessitent une liaison étroite au champ pour minimiser le rayonnement indésirable et le couplage.

➤ **Elements rayonnants :**

Les éléments rayonnants présentent différentes formes : carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire, elliptique ou d'autres formes plus complexes.

Les divers types d'éléments rayonnants les plus simples sont indiqués dans la figure [I.2] .

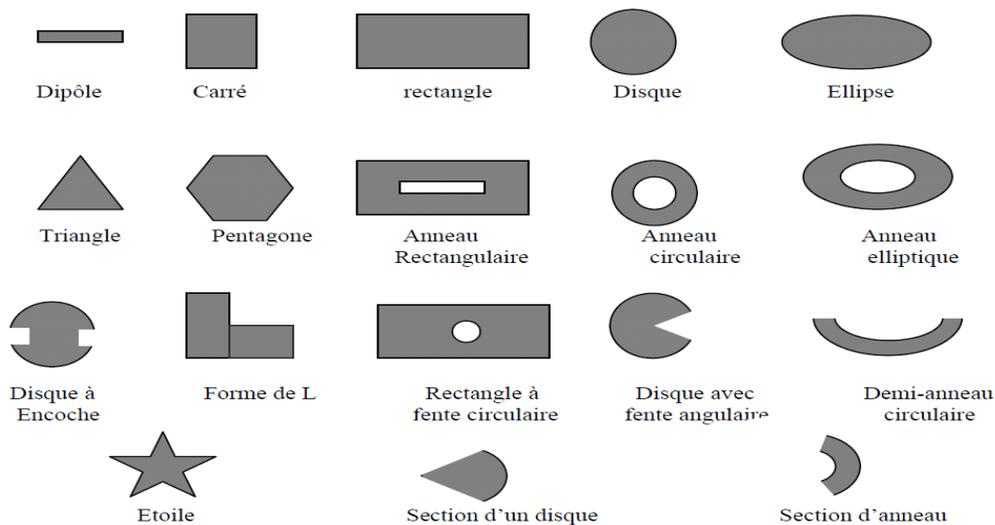


Figure I.2 Divers types d'éléments rayonnants.

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro bandes [I.1].

I.3 Techniques d'alimentation :

Une antenne patch peut être excitée par plusieurs techniques qui sont catégorisées en deux types avec et sans contact. Dans le premier type, l'antenne est alimentée directement à l'aide

d'une connexion comme la ligne micro ruban et le câble coaxial. Dans le deuxième type (sans contact), l'alimentation est assurée par un couplage par fente ou par proximité. Ces deux dernières techniques permettent de transférer la puissance RF entre la ligne micro ruban et le patch rayonnant [I.2].

Les principales techniques d'alimentation utilisées sont :

- ✚ Alimentation par câble coaxial
- ✚ Alimentation par ligne micro-ruban
- ✚ Alimentation par couplage par proximité
- ✚ Alimentation par couplage de fente ou d'ouverture

I.3.1 Alimentation par câble coaxial :

L'alimentation par câble coaxial est très utilisée dans les antennes micro-ondes à cause de sa simplicité de mettre en œuvre et sa facilité d'adaptation d'impédance. Le câble coaxial se compose de deux conducteurs (externe et interne). Le conducteur externe est relié au plan de masse tandis que le conducteur intérieur est relié au patch rayonnant. Mais ce type d'alimentation présente une bande passante étroite et une grande difficulté de le modéliser, surtout pour des substrats épais[I.5].

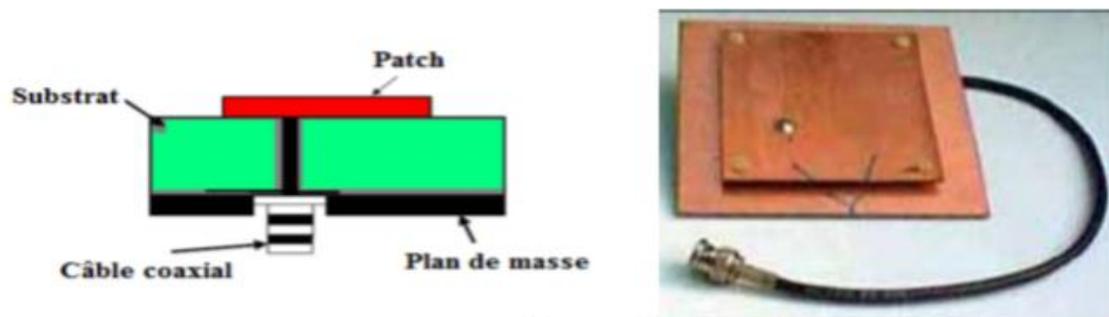


Figure I.3 Alimentation par câble coaxial.

Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des

pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué [I.2].

I.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban :

Dans cette méthode d'alimentation, une ligne micro-ruban (généralement de 50Ω) est connecte directement au bord du patch rayonnant. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport au patch. Ce genre d'alimentation a l'avantage que l'alimentation peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure planaire .C'est la technique la moins coûteuse et la plus simple a réalisé [I.4]

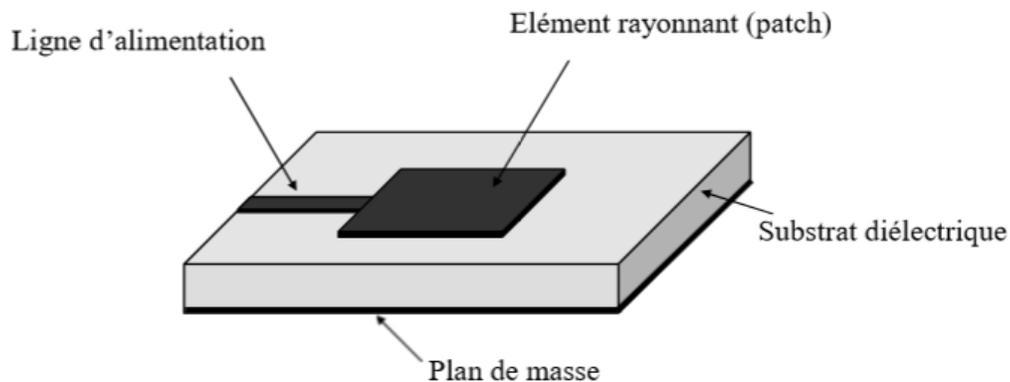


Figure I.4 Alimentation par ligne Micro-ruban.

I.3.3 Alimentation par couplage électromagnétique :

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (figure I.5).

L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [I.2].

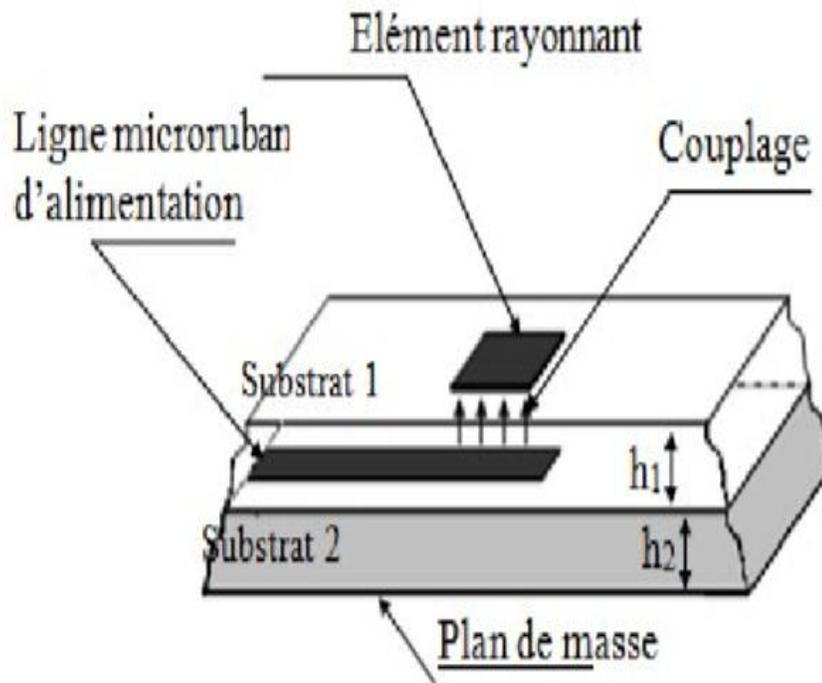


Figure I.5 : Alimentation par proximité.

I.3.4 Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse :

L'alimentation par ouverture est la plus difficile à mettre en œuvre en plus elle présente de même une bande passante étroite. Cependant elle présente des rayonnements parasites faibles. La géométrie est constituée de deux substrats, de permittivités différentes, séparés par un plan de masse sur lequel l'ouverture est faite. Une ligne de transmission est disposée sur le substrat inférieur (permittivité élevée) alors que le patch est disposé sur le substrat supérieur (permittivité faible). Ce patch est alimenté par la ligne micro-ruban à travers l'ouverture du plan de masse. Pour aboutir l'adaptation d'impédance, on doit contrôler la taille de la fente et/ou la taille de la ligne de transmission [I.5].

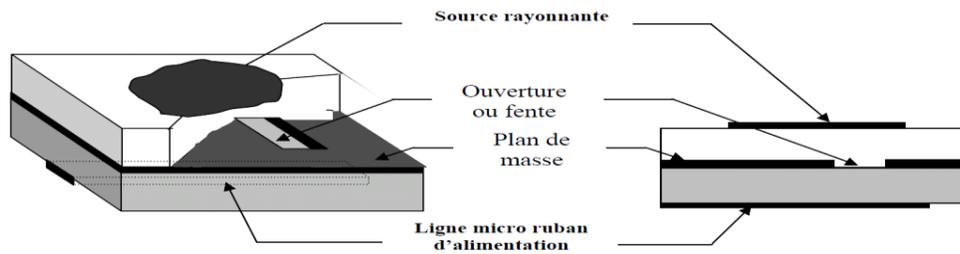


Figure I.6 Alimentation par couplage électromagnétique à une ligne microbande à travers une fente dans le plan de masse.

❖ Comparaison entre les différentes techniques d'alimentations :

| Caractéristiques | Alimentation par Ligne microruban | Alimentation Coaxiale | alimentation couplée par Ouverture | alimentation couplée par Proximité |
|--|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| rayonnement parasite de l'alimentation | Plus | Plus | Moins | Minimum |
| Fiabilité | Meilleur | Pauvres à cause de soudure | Bon | Bon |
| Facilité de fabrication | Facile | Soudure et forage requis | Alignement requis | Alignement requis |
| adaptation d'Impédance | Facile | Facile | Facile | Facile |
| Bande passante (réalisé avec adaptation D'impédance) | 2-5% | 2-5% | 2-5% | 13% |

Tableau I.1: Comparaison entre les différentes techniques d'alimentations

I.4 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 apportée par l'antenne au circuit d'excitation et, ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation, nous définirons les principaux paramètres [I.3].

I.4.1 La directivité et le gain :

La directivité est le rapport entre la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée (U) et la puissance rayonnée par une antenne isotrope (U_0).

Mathématiquement, elle s'exprime par

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{U}{Prad/4\pi} \quad (I.1)$$

Le gain d'une antenne est un paramètre similaire de la directivité, sauf, il introduit les pertes intrinsèques d'une antenne dans le calcul. Les deux paramètres sont exprimés en dBi (décibel relatif à une antenne isotrope) [I.5].

Le gain est déduit de la directivité connaissant le rendement η de l'antenne $G_0 = \eta D$; Le gain augmente avec la hauteur h du substrat et si ϵ_r diminue.

I.4.2 Coefficient de réflexion [I.3]

La représentation du coefficient de réflexion S_{11} (ou Γ) en fonction de la fréquence permet de déterminer la fréquence de résonance de l'antenne pour des dimensions données.

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

$$S_{11}(dB) = 10 \log \left| \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \right| \quad (I.3)$$

Z_e : Impédance d'entrée de l'antenne

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne qui alimenté l'antenne ($Z_c = 50\Omega$).

Une antenne est un circuit résonnant qui a une impédance ramenée dont laquelle peut être égale à l'impédance caractéristique à cette fréquence de résonance.

Une antenne résonne si la partie imaginaire de son impédance d'entrée est nulle (Pratiquement on prend le minimum de la partie imaginaire),

$$\Gamma \rightarrow 0 \Rightarrow \text{Re}\{Z_e\} \approx Z_c \quad (\text{I.4})$$

Et dans laquelle la directivité de l'antenne est maximal, et le gain est plus élevé, c'est à dire le rayonnement est plus directif, et c'est la définition pour déterminer la fréquence de résonance.

I.4.3 Impédance d'entrée de l'antenne : [I.3]

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» la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source

d'impédance interne $Z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$. Précisons que f est la fréquence de résonance de l'antenne.

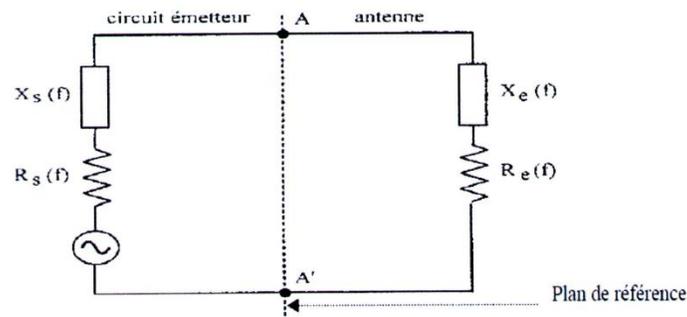


Figure I.7schéma équivalent du dispositif à l'émission

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 délicate est liée à la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et au déphasage.

I.4.4 Rendement de l'antenne :

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

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \text{ (I.5)}$$

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

I.4.5 Bande passante : [I.3] [I.4]

La bande passante en pourcent est donnée par la relation suivante :

$$B(\%) = 100 \times \frac{f_s - f_i}{f_c} \text{ (I.6)}$$

f_s : La fréquence limite supérieur

f_i : La fréquence limite inferieur

f_c : La fréquence centrale d'utilisation pour laquelle l'antenne est conçue.

La bande passante donnée pour une certaine valeur de rapport d'onde stationnaire (ROS), S à l'entrée de l'antenne est donnée par :
$$\frac{\Delta f}{f_r} = \frac{S-1}{Q\sqrt{S}} \quad (I.7)$$

I.5 Avantages et inconvénients des antennes imprimées :

Actuellement, les antennes micro rubans sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquence 100 MHz à 100 GHz, leur configuration et dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (avion, voiture, missile,). Parmi les avantages de ces d'antennes, on peut citer [I.6] :

- Profil plat • Faible poids.
- Volume réduit.
- La conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes.
- Simplicité de leurs structures.
- Faible coût de fabrication donc la production en grandes quantités devient facile.
- Plusieurs éléments radiants peuvent être placés sur la même plaque avec le réseau d'alimentation ou avec d'autres circuits imprimés (déphaseurs, commutateurs, etc.).
 - Toutefois, comme rien n'est jamais parfait, nous pouvons citer quelques inconvénients [I.5]
- Bande passante très étroite,
- Faible gain dû aux pertes et faible rendement dû à la concentration des champs sur les parois métalliques,
- Effet de couplage parasite entre les éléments (excitation d'ondes de surface guidées),

- Rayonnement parasite de l'alimentation,
- Puissance supportable plus faible vis à vis aux antennes classiques,
- Pureté de polarisation difficile à obtenir.

I.6 Les applications des antennes imprimées

Vu le développement de la technologie de la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimés, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication ; les antennes imprimées sont des solutions pour répondre à ces exigences parmi ces applications qui on peut les citer [I.2][I.7] :

- ✓ Les télécommunications par satellites ;
- ✓ La commande et contrôle ;
- ✓ La télémessure par missile ;
- ✓ Les équipements portatifs ;
- ✓ Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes ;
- ✓ Les antennes d'émission utilisées en médecine ;
- ✓ Les récepteurs satellite de navigation.

I.7 Conclusion

On a abordé dans ce chapitre des initiations de base sur les antennes imprimées, Nous avons présenté également quelques techniques d'alimentation, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Et nous avons cité quelques domaines d'applications

CHAPITRE II :

TECHNIQUES DE RECONFIGURATION

DES ANTENNES

II. 1 Introduction

Ces dernières années ont vu une évolution technologique importante, un développement de la télécommunication sans fil et une grande consommation des données mobiles, ça provoque une limitation de ressources fréquentielles et nécessite une amélioration des débits et d'efficacité de transmission. Parmi les solutions qui résolvent ces problèmes est l'utilisation des antennes reconfigurables soit en fréquence, en diagramme de rayonnements et/ou en polarisation. Il s'agit maintenant de parler sur quelques notions de base sur les antennes reconfigurables.

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

Une antenne est dite reconfigurable (ou agile) si elle est capable de modifier dynamiquement sa fonctionnalité après sa fabrication, c'est-à-dire de modifier une ou plusieurs de ses caractéristiques de fonctionnement (en terme de fréquence, de polarisation ou de diagramme de rayonnement) et cela en fonction des besoins dictés par l'environnement de l'antenne et les besoins de l'application. [II.1]

II.2.1 Comment s'effectue la reconfigurabilité ?

La reconfiguration de l'antenne peut être obtenue par diverses approches. Certaines techniques ont recours à des composants localisés actifs qui permettent de modifier de façon quasi-ponctuelle les lignes de courant ou l'impédance, d'autres s'appuient sur une altération mécanique de la structure constituant l'antenne, tandis que d'autres utilisent des substrats à caractéristiques accordables. D'autres approches s'appuient sur la reconfigurabilité des réseaux d'alimentation, ou encore excitent de façon appropriée les réseaux d'antennes.[II.2]

II.3 Techniques de reconfiguration :

Il existe plusieurs techniques pour la reconfiguration des antennes. Parmi ces techniques les plus utilisées sont les composants actifs (les diodes PIN, les diodes varicap, les commutateurs MEMS et les commutateurs optiques ou l'utilisation des matériaux particuliers (métamatériaux, ferromagnétique, cristaux liquides...)).

II.3.1 Les diodes PIN :

La diode PIN est un semi-conducteur. Elle est utilisée pour les applications hyperfréquences. En appliquant une polarisation directe, la diode PIN passe à son état « ON » avec une impédance extrêmement faible qui peut être modélisée par un court circuit. En inversant la polarisation, la diode PIN passe à son état « OFF », dans ce cas, elle présente une impédance très grande [II.2]. Elle a utilisé pour obtenir n'importe quel technique de reconfigurabilité fréquentielle, en diagramme de rayonnement ou de polarisation avec faible cout, une grande facilité d'intégration et une faible tension de polarisation

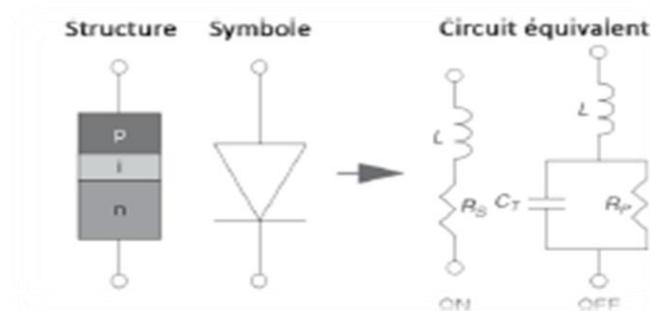


Figure II.1 Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF.

II.3.2 Les diodes varicap :

La diode varicap ou varactor (variable capacitor) est considéré comme une capacité si en le polarisée en inverse et avec le changement de l'état de polarisation la valeur de la capacité sera changé.

Elle offre une variation continue en fonction de tension de polarisation au contraire de la diode PIN qui offre une variation discrète. Dans la littérature, la combinaison de diodes PIN et varicap est souvent utilisée pour obtenir un recouvrement fréquentiel important [II.3].

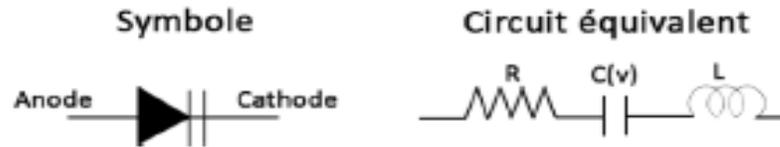


Figure II.2 Le symbole et le circuit équivalent d'une diode varicap

II.3.3 MEMS :

Le MEMS (Système Micro Electromécanique) est un commutateur utilisé dans la reconfiguration des antennes, c'est un composant microsystème qui permet par une déformation mécanique de microstructures, d'obtenir un court-circuit ou un circuit ouvert. Il est caractérisé par son coût élevé, la fiabilité n'est pas garantie, et une tension importante pour son activation, cependant, Ce type de commutateur se distingue par une faible perte d'insertion et un temps de réponse extrêmement rapide [II.3].

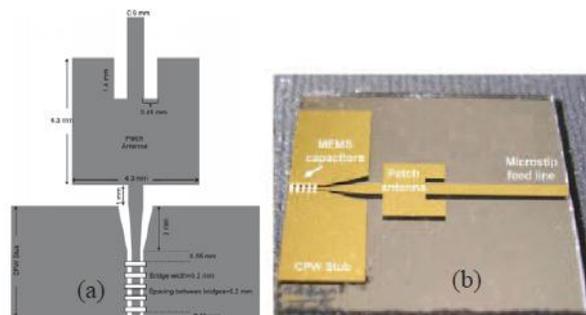


Figure II.3 (a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS

(b) photographie de l'antenne [III.6]

II.3.4 Utilisation des transistors FET :

Le transistor à effet de champ ou Field Effect Transistor (FET) est un commutateur commandé et utilisé pour des applications hyperfréquences. Ce transistor est constitué d'un canal (entre la source et le drain) dans lequel va circuler un courant contrôlé par le biais d'un champ électrique appliqué sur la grille. Les commutateurs FET présentent une faible tension de

polarisation avec une consommation du courant quasiment nulle [II.2].

II.3.5 Commutateur optique :

L'utilisation des commutateurs optiques est la meilleure technique que les autres mais son cout est très élevé. Elle est utilisée pour éviter le recours aux circuits de polarisation

II.3.6 Matériaux agiles :

Cette technique consiste a utilisé des matériaux agiles (commandable) tel que les métamatériaux, les cristaux liquides, les ferromagnétiques et les ferroélectriques caractérisent par des propriétés diélectriques ou magnétiques modifiable selon l'application d'un champ électrique ou magnétique externe et on peut les utilisés comme un substrat de l'élément rayonnant réalisé.

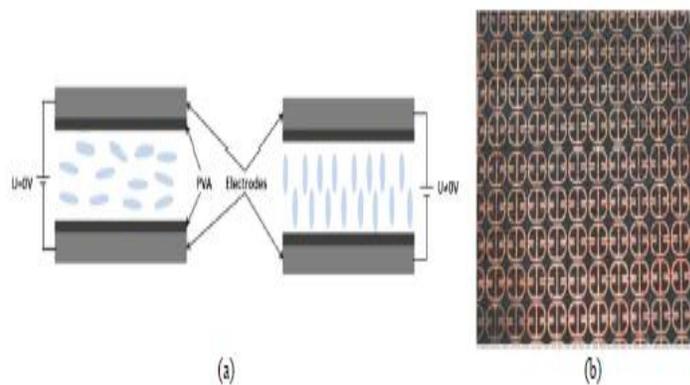


Figure II.4 (a) Cristal liquide (PVA : Poly VinylAlcohol) et (b) métamatériau.

II.4 Les classifications des antennes reconfigurables [II.2]:

Il existe différents types de reconfigurations permettant d'obtenir une antenne reconfigurables soit en fréquence, digramme de rayonnement ou en polarisation.

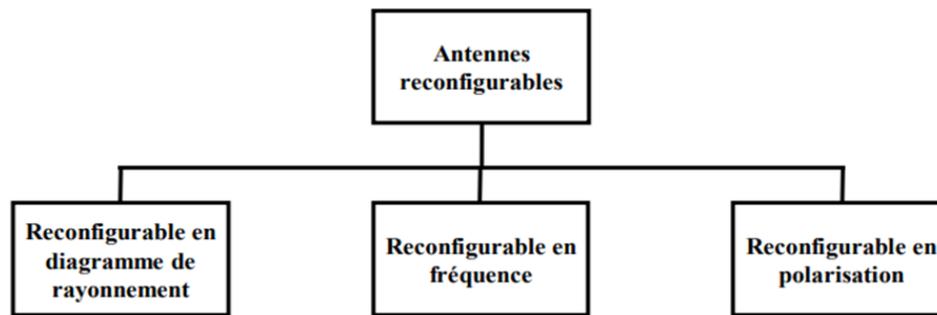


Figure II.5 schéma des types d'antennes reconfigurables

➤ **Antenne reconfigurable en fréquence**

Il consiste de modifier la fréquence de résonance à l'aide d'une commande extérieure (électrique ou magnétique) afin de couvrir une bande de fréquence déterminée sans aucun changement dans la structure physique d'antenne.

➤ **Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement**

Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement sont capables de modifier la forme et la direction des diagrammes de rayonnement sans aucun changement de fréquence de fonctionnement.

➤ **Antennes reconfigurables en polarisation**

La reconfiguration de polarisation d'une antenne consiste à modifier uniquement l'orientation vectorielle du champ E sans changer ni la fréquence de résonance ni le diagramme de rayonnement.

II.5 Les types des reconfigurabilités :

II.5.1 Reconfigurabilité fréquentielle

La reconfigurabilité fréquentielle est obtenue en modifiant la longueur électrique du résonateur. Pour cela, on charge l'antenne par des éléments actifs dont la réactance peut être contrôlée électroniquement (diode varicap), ou par des composants jouant le rôle d'interrupteur (diodes PIN, FET ou MEMS). Il ressort de l'état de l'art plutôt quatre types de structures

d'antennes reconfigurables en fréquence les plus utilisées dans les plateformes sans fils: les antennes microruban, les antennes à fentes, les antennes filaires et les antennes PIFAs (Planar Inverted -F Antenna) [II.6].

II.5.1.1 Les types d'agilité en fréquence :

Comme décrit précédemment, l'agilité en fréquence nécessite d'intégrer des éléments actifs accordables. Selon ces éléments, il existe deux types de reconfiguration en fréquence continue et discrète. Pour la reconfiguration continue, on utilise les diodes varactors ou condensateurs à base de matériaux dont les propriétés électriques peuvent être modifiés et pour la reconfiguration discrète on utilise les commutateurs (les diodes PIN, les transistors à effet de champ FET, les photodiodes, les MEMS ou des commutateurs à base de matériaux à transition isolant-métal).

Il existe aussi des antennes reconfigurables en fréquence qui combinent les deux réglages, continu et discret [II.4].

II.5.1.2 La reconfigurabilité fréquentielle

L'agilité (reconfigurabilité) de fréquence permet à l'antenne de fonctionner dans plusieurs bandes de fréquence soit par le chargement des éléments actifs qu'on a cité précédemment ou par l'utilisation des différentes techniques suivantes : la modification géométrique de l'antenne, l'utilisation de court circuits commutables et l'insertion de fentes ou de lignes commutables.

a. La modification géométrique de l'antenne :

La technique de la modification de la géométrie de l'antenne consiste à modifier la longueur électrique de l'élément rayonnant, s'implique le changement de la fréquence de résonance. Elle peut être appliquée pour différents types d'antennes dipôle, fractale, patch... [II.4].

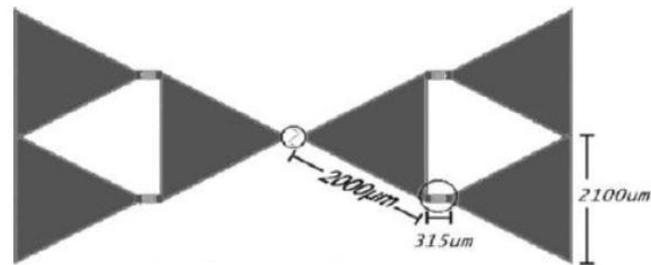


Figure II.6 Antenne fractale reconfigurables en fréquence [II.4]

b. Court-circuit commutable :

L'utilisation des courts circuits permet de modifier la circulation du courant sur l'antenne. La figure suivante représente un exemple d'antenne patch intégrant des courts-circuits commutables [II.4]. La commutation de ces interrupteurs permet d'obtenir deux fréquences de résonance différentes.

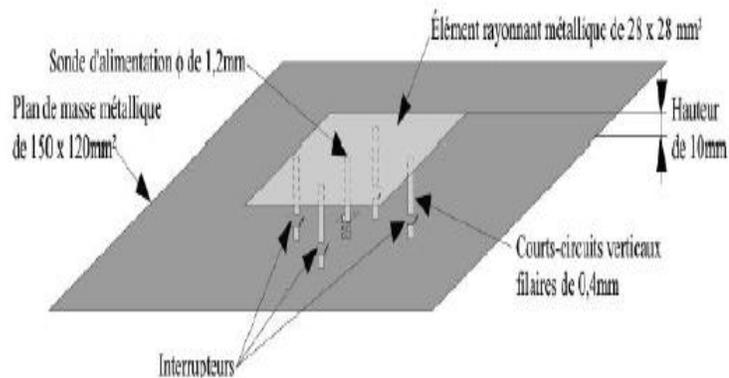


Figure II.7 Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables [II.4]

c. Fente ou ligne commutables :

Les fentes et les lignes commutables chargées par des composants (Diode PIN, Varactors ...) permettent d'accorder l'antenne à différentes fréquences de fonctionnement par la perturbation de courant sur l'élément rayonnant.

II.5.1.3 Comparaison entre les techniques de la reconfiguration en fréquence [II.2] :

| Méthode de reconfigurabilité | Avantages | Inconvénients |
|------------------------------|---|---|
| Diode varactor | <ul style="list-style-type: none"> •Intégration facile • Accordabilité forte (>50%) • Faible consommation de puissance et Temps de commutation rapide | <ul style="list-style-type: none"> •Faible tenue en puissance (<5dBm) • Pertes élevées (>20) • Coût moyen |
| Diode PIN | <ul style="list-style-type: none"> •Bonne tenue en puissance • Accordabilité forte (>50%) • Faible tension de polarisation (<10V) • Temps de commutation rapide (0.001-0.1µs) • Coût bas | <ul style="list-style-type: none"> •Circuit de polarisation complexe • Pertes élevées (1-50) • Forte consommation de puissance (5-125mW) |
| Transistor FET | <ul style="list-style-type: none"> •Faible tension de polarisation (<10V) • Courant de commande très faible • Coût bas • Temps de commutation rapide (0.001-0.1µs) | <ul style="list-style-type: none"> •Pertes élevées • Implémentation difficile • Consommation de puissance élevée |
| MEMES | <ul style="list-style-type: none"> •Accordabilité forte (<50%) • Bonne tenue en puissance (>10dBm),Faible perte et Faible Consommation de puissance (0.05-0.1mW) | <ul style="list-style-type: none"> •Tension de polarisation élevée (>50V) • Coût élevé |
| Cristaux liquides | <ul style="list-style-type: none"> •Consommation en courant faible (~µA) | <ul style="list-style-type: none"> •Temps de commutation très lente (10ms-20s) • Intégration difficile • Accordabilité faible (<30%) |

Tableau II.1 la différence entre les techniques de reconfiguration en fréquence

II.5.2 Antenne reconfigurable en digramme de rayonnement :

La reconfigurabilité du rayonnement permet l'antenne d'adapter son diagramme de rayonnement et de maintenir sa fréquence de fonctionnement. Ce type de configuration est utilisé pour orienter le lobe principal vers les directions utiles et annuler les rayonnements dans les directions des interférences, ce qui permet d'améliorer la capacité du système. [II.5]. elle est utilisée beaucoup plus pour Les réseaux d'antennes [II.7].

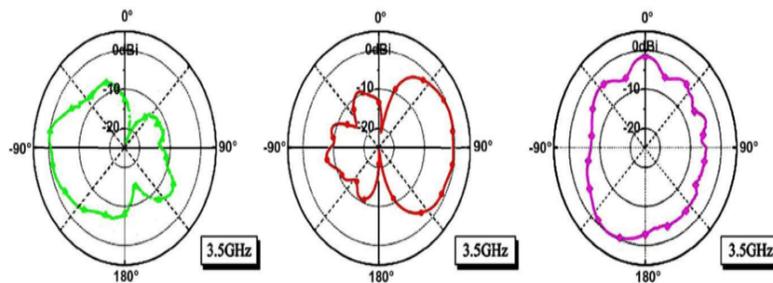
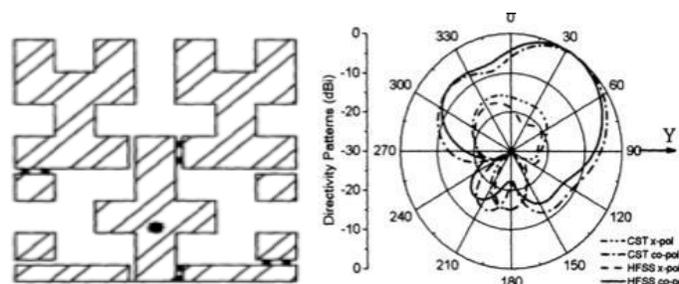


Figure II.8 la reconfigurabilité de rayonnement [II.4]

Parmi les technique utilisé dans cette rconfigurabilité : la modification géométrique, l'utilisation de courts circuits commutables et l'insertion de fentes commutables

a. Modification géométrique

On modifiant la direction du diagramme de rayonnement et gardant la même fréquence de fonctionnement a partir de la recherche des distributions de courants différents sur la structure de l'antenne [II.4]



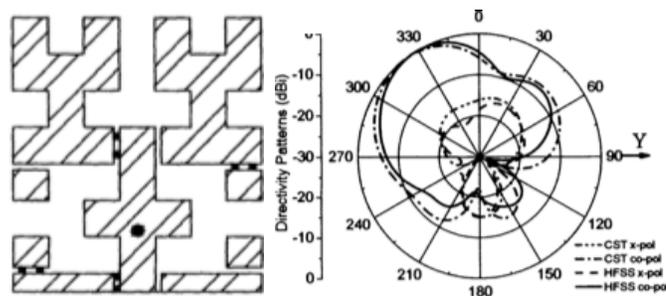


Figure II.9 reconfigurabilité en diagramme de rayonnement avec modification géométrique [II.4]

b. Court-circuit commutable

Les court-circuits commutables présentent une deuxième technique pour obtenir la reconfiguration en diagrammes de rayonnement. Elle consiste à spécifier l'emplacement des courts circuits sur la ligne d'alimentation d'une façon judicieuse pour obtenir une bonne reconfigurabilité.

c. Fente et ligne commutable

Les fentes commutables sont également utilisées pour obtenir une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement. Le 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 [II.4].

II.5.3 Antenne reconfigurable en polarisation :

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

On doit altérer la polarisation de l'antenne en agissant sur la phase et le sens du courant d'alimentation [II.8]. L'antenne patch avec des fentes commutables, ou "PASS" développée par

l'UCLA est un antenne reconfigurable en polarisation. On l'obtient par l'insertion d'un commutateur (diode PIN ou FET) au centre de la fente, en contrôlant le comportement du courant sur le patch par l'utilisation d'un circuit biaisant qui permet de commuter la diode PIN de l'état On vers l'état OFF et vice versa comme montre la figure [II.9]. On peut atteindre une polarisation différente en utilisant deux fentes orthogonales sur le patch [II.9].

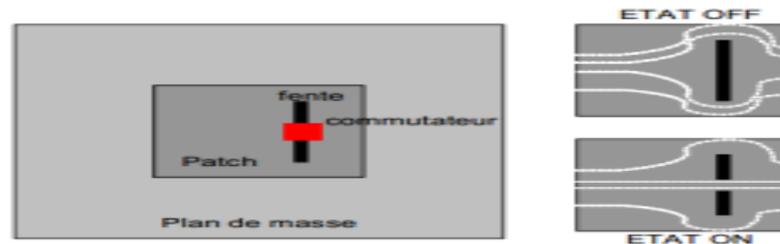


Figure II.10 Antenne PASS de l'UCLA[II.5]

II.5.4 La reconfiguration composée :

Cette technique consiste à combiner entre deux reconfiguration (fréquentille ,en diagramme de rayonnement ou en polarisation),elle est plus complex que les autres techniques.et elle permet de controler deux caractéristique ou plus(frequence , polarisation....) à la fois.

II.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable :

Une antenne reconfigurable, comme tous les autres types d'antennes classiques, a des avantages et des inconvénients. [II.5]

✚ Avantages

Parmi ces avantages, on peut citer

- La réallocation et la gestion dynamique du spectre
- Offre la flexibilité et répond aux exigences de plate-forme radio sans fil (des services multiples dans un seul appareil).
- Réduction du nombre d'antennes dans le système ce qui réduit la taille et le coût de

l'appareil.

- Une bonne isolation entre les différentes normes sans fil et les bandes.
- La reconfigurabilité de rayonnement permet d'avoir une diversité spatiale.
- Reconfigurabilité en fréquence est utile à l'appui de nombreuses applications sans fil.
- Reconfigurabilité en polarisation permet de réduire divers problèmes tels que l'affaiblissement du signal dû à la propagation par trajets multiples, la sensibilité de l'émetteur-récepteur de signaux à l'orientation de l'antenne et la sécurité, etc.

Inconvénient:

Bien que les antennes reconfigurables aient beaucoup d'avantages, elles ont aussi des méfaits. Parmi ces méfaits, on peut citer

- Plus chers que les antennes classiques (introduire des composants actifs)
- Consommation énergétique élevée (composants actifs à polariser econtinu)
- Difficultés de conception et de simulation à cause de l'intégration des composants actifs dans l'antenne(le besoin d'utiliser des packages, circuit de polarisation) et Une efficacité réduite

II.7 Conclusion :

De nos jours, les antennes reconfigurables restent la solution la plus utilisée pour répondre aux standards de plus en plus diversifiés des systèmes de télécommunication. On a abordé dans ce chapitre des initiations de base sur les antennes reconfigurables et on a cité les différents types et les techniques de reconfigurabilité en fréquence, diagramme de rayonnement et en polarisation. On a terminé ce chapitre par quelques avantages et inconvénients de ces antennes reconfigurables.

CHAPITRE III :

ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE
FRACTALE (TRIANGLE DE SIERPINSKI 1^{ERE}
ITERATION) RECONFIGURABLE EN FREQUE

III.1 Introduction :

L'utilisation des logiciels adaptés telle que le HFSS, CST, ADS... est une étape principale pour la conception des antennes qui nous aide à étudier des structures complexes en trois dimensions aux paramètres désirés et on prend en compte leurs paramètres électriques et diélectriques et en plus elle permet de rapprocher des futures antennes réalisées. C'est pour ça qu'on utilise le CST et HFSS pour la simulation et le calcul des paramètres S_{ij} , les fréquences de résonance, le diagramme de rayonnement, le champ électromagnétique...

III.2 Choix d'outil de simulation:

Il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques consacrés pour la conception des composants micro-ondes tel que les antennes imprimées, les antennes filaires... A titre d'exemple, on peut citer le CST (Computer Simulation Technology), HFSS (High Frequency Structure Simulator), le ADS (Advanced Design System) [III.1], Dans la première partie de notre étude, on va baser sur le CST et le HFSS pour faire une comparaison entre les différents résultats obtenus. Ces deux simulateurs sont des outils spécialisés pour la simulation et la conception électromagnétique des structures en 3D des dispositifs micro-ondes en basant sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant la méthode d'intégration finie.

III.3 Les structures rayonnantes principales :

Il existe plusieurs types d'antennes qui diffèrent par leur fonctionnement, leur géométrie, et leur technologie. Parmi ces types nous citons les trois grandes familles suivantes: Les antennes filaires (le dipôle, monopole, Yagi...), les antennes à fente et les antennes patches (antenne à structure planeaire)...

1- Les antennes filaires [III.2] :

L'antenne dipôle est une antenne composée de deux brins conducteurs métalliques en forme de fil ou de tige. Ces deux brins conducteurs peuvent être en ligne, parallèles (partiellement). L'alimentation est le plus souvent présentée au centre de la structure ce qui donne un système symétrique.

L'antenne monopole est constituée d'un brin conducteur en forme de fil ou de tige, souvent placé au-dessus et perpendiculairement d'une surface conductrice, constituant le plan de masse. Il est possible de varier, de modifier la longueur électrique et la fréquence de fonctionnement par l'emplacement d'une capacité variable par exemple.

2- Les antennes à fente :

Une antenne à fente est composée d'une surface métallique, généralement une plaque plane, avec un trou ou une fente [III.2]. L'antenne à fente a le même comportement que le dipôle mais en inversant les champs électrique et magnétique. Cette antenne se caractérise par son développement vertical ou horizontal en forme de cornière, ou de guide d'ondes, avec des fentes de dimensions et d'emplacements particuliers qui sont en fonctions de la fréquence. Elle est utilisée notamment pour le Wi-Fi, pour des radars micro-onde de surveillance maritime et aéroportuaire [III.3].

3- Les antennes patch :

L'antenne planaire ou patch en anglais, est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat. Le concept d'antenne patch est apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970. Elle est utilisée pour les émetteurs-récepteurs portables de radiocommunications, sur les récepteurs GPS....etc [III.3] .

III .4 L'influence de la diode PIN sur la structure rayonnante d'une antenne :

III.4.1 Modélisation de la diode PIN :

❖ Modélisation par un plot métallique:

le mode passant ou bloqué de la diode PIN (connexion ou déconnexion) est simulé par la présence ou l'absence d'un plot métallique généralement de dimension $0,3 \times 0,9 \text{ mm}^2$.Plusieurs travaux basés sur des diodes PIN, comme la diode 4005HPND, ont démontré la validité de cette modélisation très simple afin de simuler correctement les performances de l'antenne [III .3]

❖ **Modélisation par un circuit RLC équivalent :**

Il s'agit d'un circuit équivalent RLC 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'une autre part la capacité n'intervient plus, quand la diode PIN est à l'état «ON» [III.2].

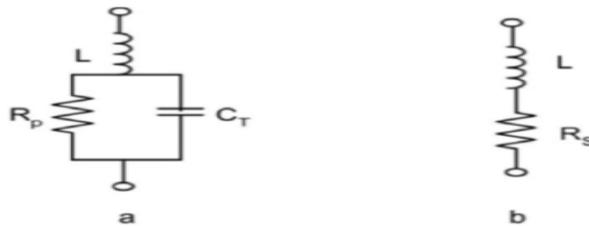


Figure III.1 Circuit équivalent simplifié pour une diode PIN
(a) Mode OFF ;(b) Mode ON

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

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

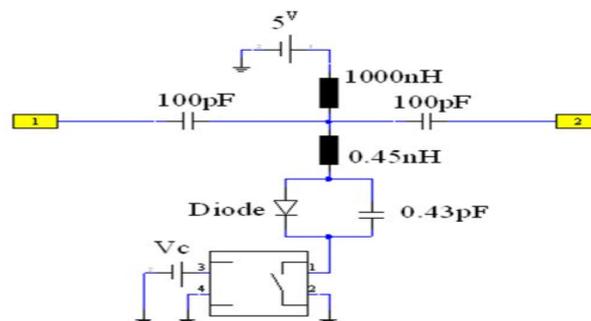


Figure III.2 Schéma équivalent du commutateur [III .2]

III.4.2 L'influence de la diode PIN sur une antenne dipôle imprimée

a. Présentation de la structure rayonnante étudiée :

Pour une configuration de départ on utilise une antenne dipôle. La structure rayonnante de notre antenne dipôle est constituée de deux lignes de même longueur $l = 15 \text{ mm}$, séparés d'une distance de $d = 4 \text{ mm}$, de largeur $w = 1 \text{ mm}$ et imprimés sur un substrat FR4 de dimension $L = 40 \text{ mm}$ et $G = 40 \text{ mm}$, caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_{rr} = 4.4$ et de tangente de perte $\tan \delta = 0.025$. Cette antenne dipôle résonne dans une bande de fréquence comprise entre 8,1 et 8,3 GHz comme nous montre les Figures suivantes :

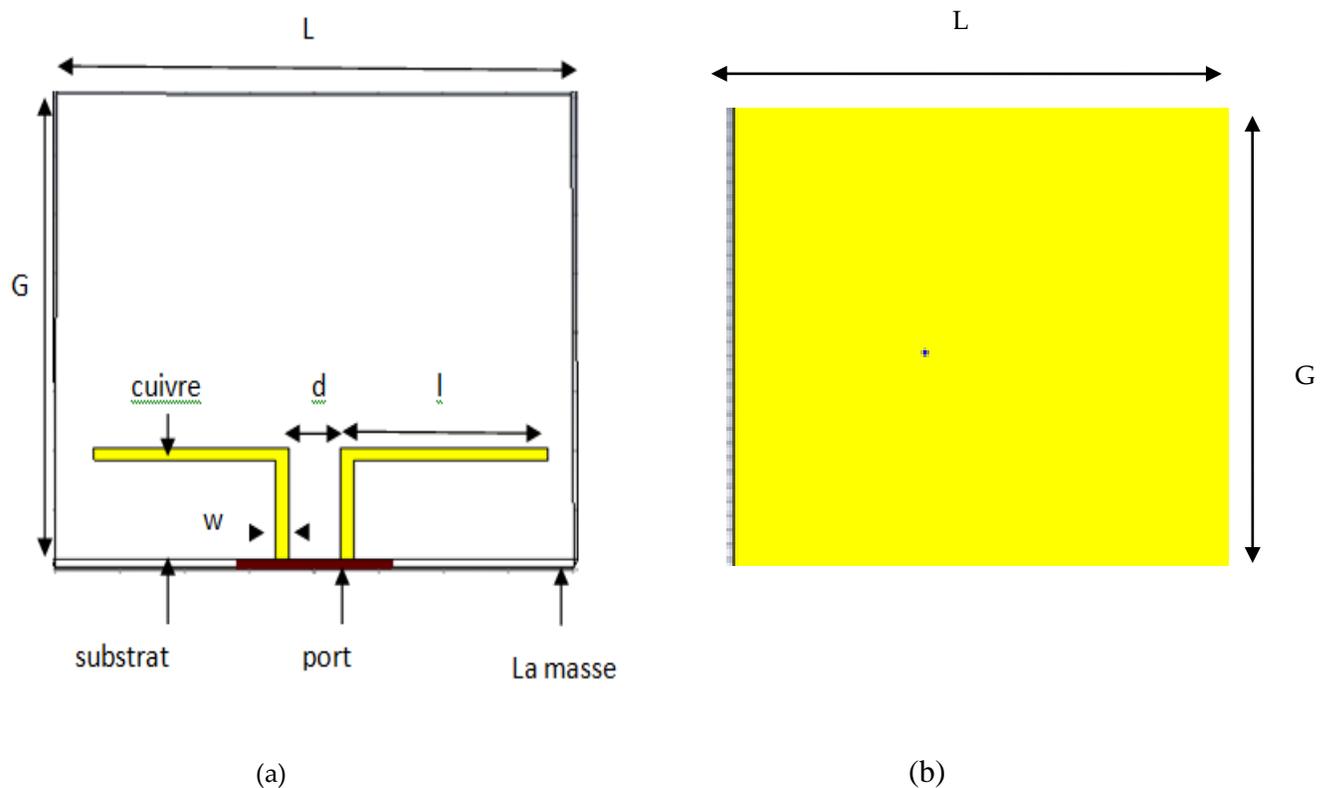
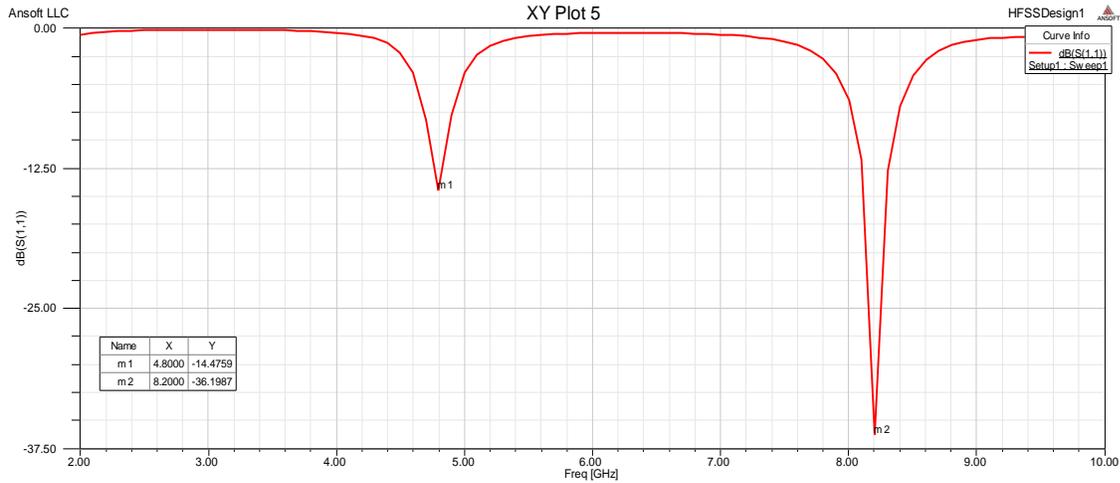
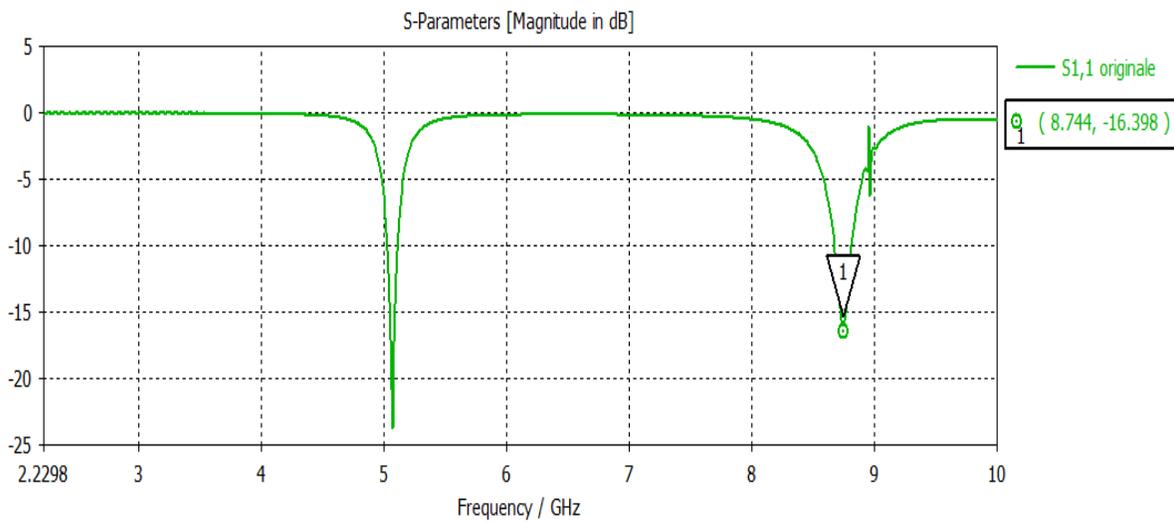


Figure III.3 Structure d'antenne dipôle (a) vue au-dessus (b) vue au-dessous

CHAPITRE III : ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE FRACTALE (TRIANGLE DE SIERPINSKI 1^{ERE} ITERATION) RECONFIGURABLE EN FREQUENCE



(a)



(b)

Figure III.4 Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne avec les deux simulateurs (a) HFSS, (b) CST

On remarque qu'il y a une grande similarité entre les deux simulations pour la fréquence

de résonance mais pour l'adaptation de l'antenne cette condition n'est pas réalisée.

b. Diode PIN insérée au milieu de l'un des lignes de l'antenne dipôle :

Pour étudier l'influence de la diode PIN sur l'antenne dipôle considérée, on divise l'un de ces lignes en deux parties égales séparées par une diode PIN et selon leur état ON ou OFF, elle permet de les relier ou non.

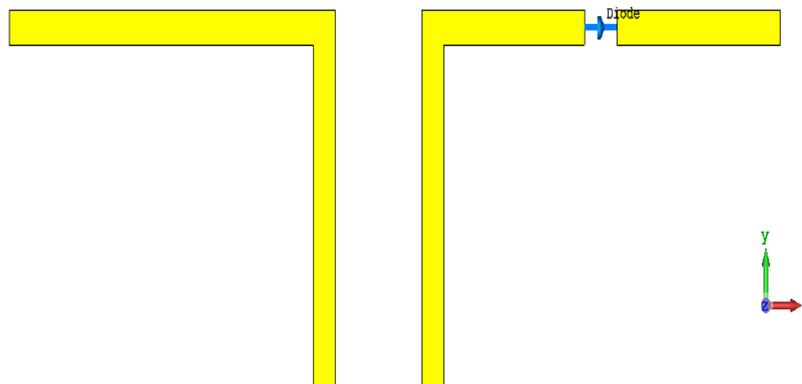


Figure III.5 Antenne dipôle avec diode PIN

Les cas d'étude suivants permettent d'illustrer le comportement du dipôle en fonction de l'état de la diode (ON ou OFF) et cela en considérant les deux types de modélisation de la diode PIN présentés précédemment

1^{er} cas : Diode PIN modélisée par un plot métallique :

On modélise la diode PIN par un plot métallique de dimension $0.3 \times 0.42 \text{ mm}^2$.

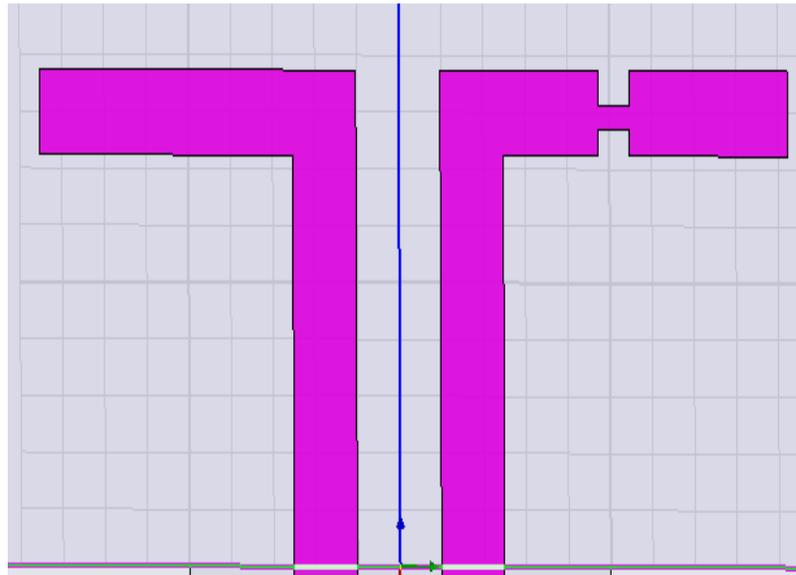
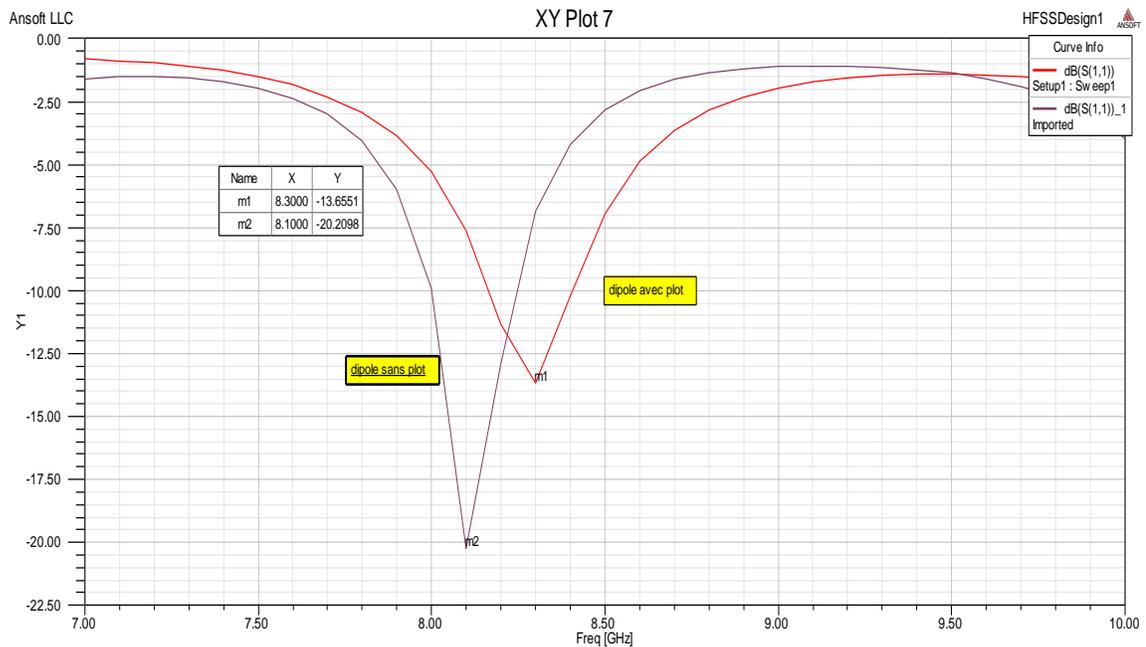
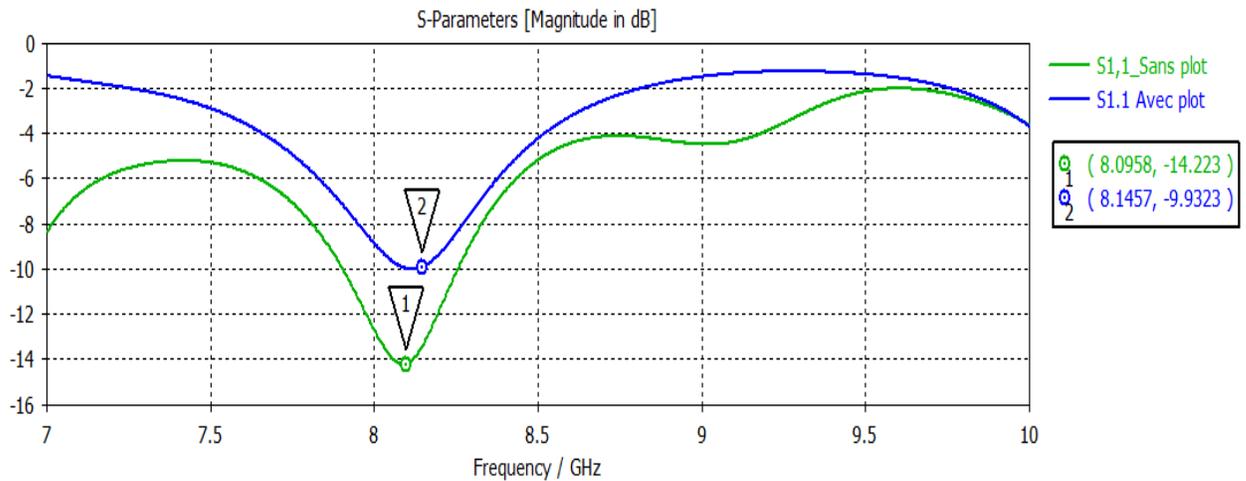


Figure III.6 Antenne dipôle avec diode PIN modélisée par un plot métallique.



(a)



(b)

Figure III.7 Coefficient de réflexion S_{11} pour l'antenne avec diode modélisée par un plot métallique (a) HFSS, (b) CST

On observe que lorsque la diode PIN est à l'état ON (les deux brins étant reliés par un plot métallique), la fréquence de résonance est égale à 8.3 GHz pour HFSS (8.1457GHz pour CST) et elle est décalée par rapport à la résonance du dipôle initial et égale à 8.2 GHz pour HFSS (8.1907GHz pour CST). Et quand la diode est à l'état OFF (les deux brins ne sont pas reliés), ce qui correspond à une antenne dipôle asymétrique, la résonance est moins importante et se retrouve à la fréquence 8.1 GHz pour HFSS (8.0958GHz pour CST). On peut expliquer cette différence par l'effet de couplage entre les deux parties du brin non reliée.

2^{eme} cas : Diode PIN modélisée par circuit RLC :

Dans ce cas, la diode PIN est modélisée par un circuit RLC équivalent (série/parallèle) en utilisant les valeurs c'est dessous correspondent à la diode PINMACOM-MASGBLP912 :

Etat ON (RL série): $R_s= 1.2\Omega$, $L_s=0.6$ nH

Etat OFF (RC parallèle): $R_p=15k\Omega$, $C= 0.3pF$

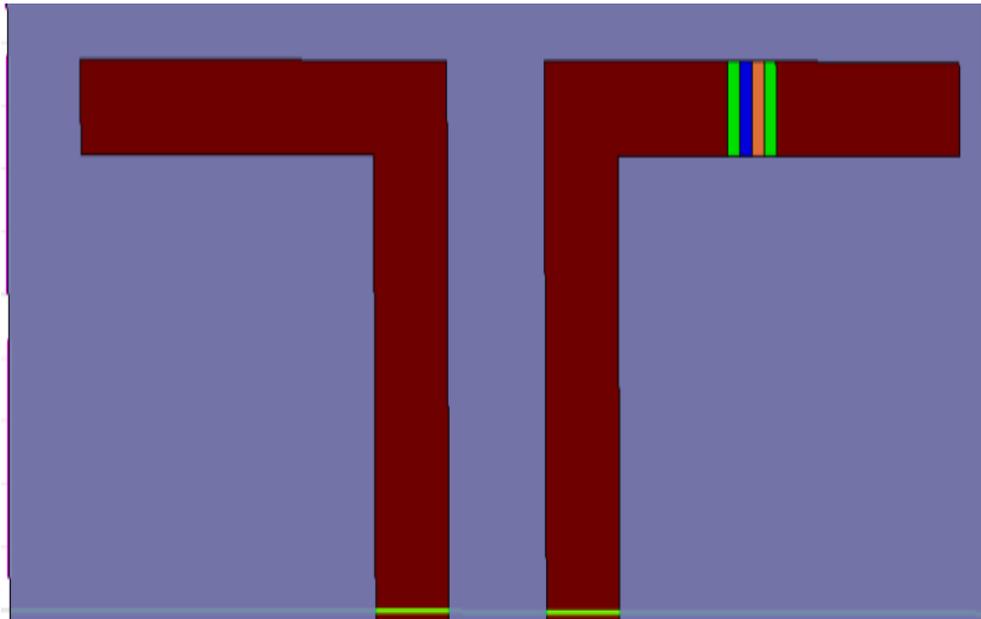
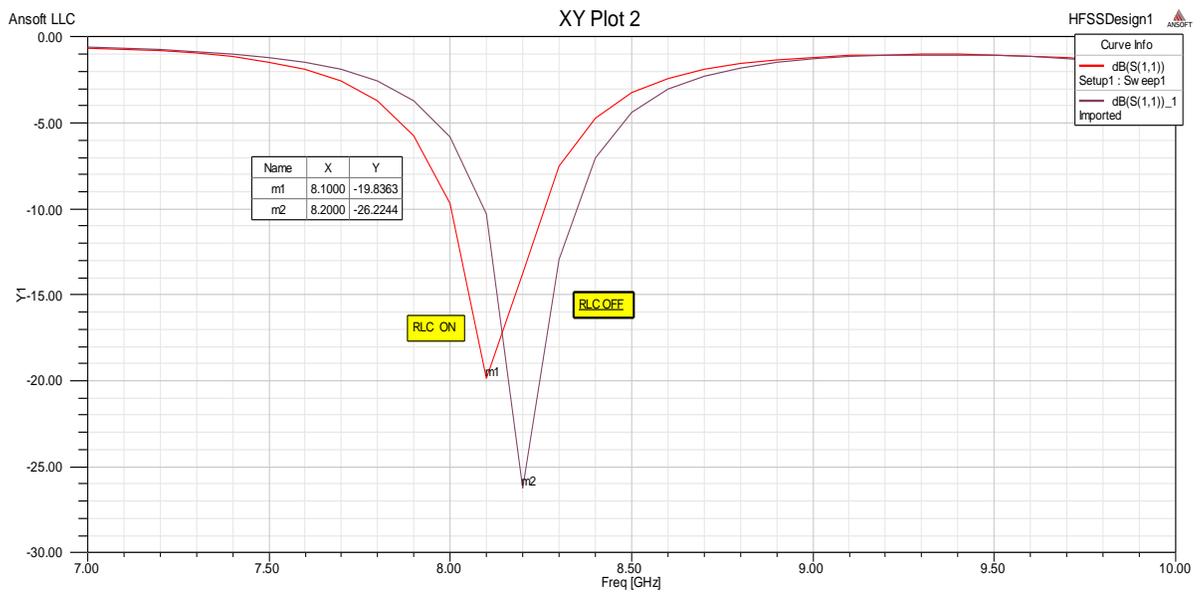
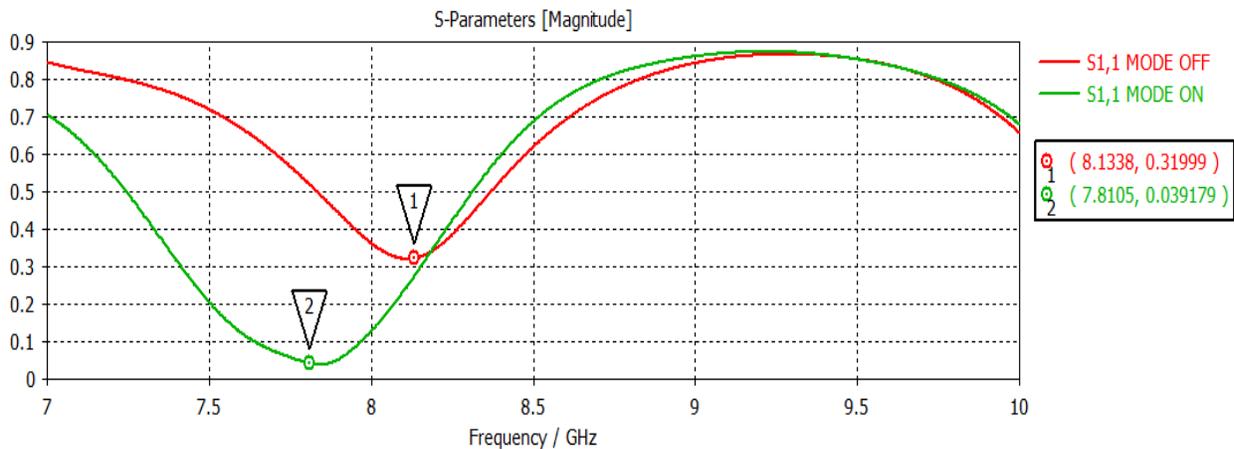


Figure III.8 Antenne dipôle avec diode PIN modélisée par circuit RLC (HFSS).

Comme précédemment on présente le coefficient de réflexion S_{11} correspondant à l'état de la diode PIN (ON/OFF) en basant sur les deux logiciels HFSS et CST



(a)



(b)

Figure III.9 Coefficient de réflexion S_{11} pour l'antenne avec diode modélisée par un circuit RLC

Comme la diode PIN est passante la fréquence de résonance égale à 8.1 GHz pour HFSS (7.8105 GHz pour CST). Et quand la diode est bloquée, la fréquence devient égale à 8.2GHz (8.1338 GHz pour CST) .Il y a toujours une différence avec le cas de l'antenne asymétrique, cette différence s'explique également par l'effet de couplage.

3^{eme} cas : utilisation d'une diode PIN :

Dans cette partie, on va baser sur le simulateur CST studio puisque le simulateur HFSS ne contient pas les composants actifs comme les diodes PIN, les diodes varicap,.....

Dans cette section, on va insérer une diode PIN entre les deux morceaux de l'un des ligne qu'on a divisée en deux parties égales pour avoir l'influence de ce composant actif sur les paramètres caractéristiques (électrique et de rayonnement) de cette antenne dipôle.

A cet effet, le simulateur utilisé CST contient une procédure très simple qui remplace le rôle de cette diode PIN. Comme la diode Pin jeu le rôle d'un commutateur dans le domaine des hyperfréquences, donc on peut remplacer ce composant par une résistance de faible valeur (de

l'ordre de 1Ω) à l'état ON et une forte valeur (de l'ordre de $10^9\Omega$) à l'état OFF.

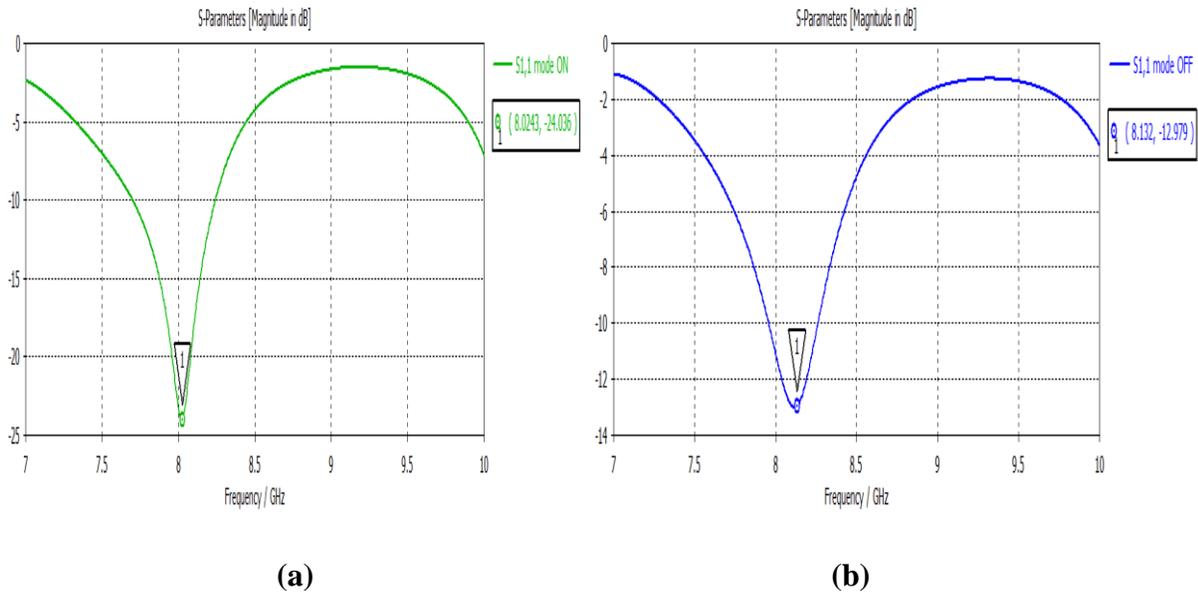


Figure III.10 coefficient de réflexion S_{11} , (a) Diode PIN Etat ON ($R=1\Omega$), (b) Diode PIN Etat OFF ($R=10^9\Omega$)

Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau suivant Tableau III.1

| | HFSS | | CST | |
|-------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| | Fréquence de resonance (GHz) | S_{11} (dB) | Fréquence de resonance (GHz) | S_{11} (dB) |
| Dipôle original | 8.20 | -36.19 | 8.74 | -16.39 |
| Dipôle sans plot | 8.10 | -20.20 | 8.09 | -14.22 |
| Dipôle avec plot | 8.30 | -13.65 | 8.14 | -9.93 |

| | | | | |
|--|------|--------|------|--------|
| Dipôle avec RLC (ON/série) | 8.10 | -19.83 | 7.81 | -15.08 |
| Dipôle avec RLC (OFF/parallèle) | 8.20 | -26.22 | 8.13 | -5.08 |
| Dipôle avec diode (ON) | / | / | 8.02 | -24.03 |
| Dipôle avec diode(OFF) | / | / | 8.13 | -12.97 |

Tableau III.1 Les résultats de simulation pour les trois types de modélisation de la diode PIN

III.5 Conception d'une antenne fractale reconfigurable en fréquence :

III.5.1 La géométrie de l'antenne proposée

L'antenne proposée pour l'étude et la réalisation a la forme d'une antenne fractale appelée **triangle de Sierpiński (1^{er} itération)**. Cette forme de fractal a été introduite par **Benoît Mandelbrot** au cours des années 70 [III.4]. Le **triangle de Sierpiński**, aussi appelé par Mandelbrot le **joint de culasse de Sierpiński**, est une fractale, du nom de Wacław Sierpiński. Il peut s'obtenir à partir d'un triangle « plein », par une infinité de répétitions consistant à diviser par deux la taille du triangle puis à les accoler en trois exemplaires par leurs sommets pour former un nouveau triangle. À chaque répétition le triangle est donc de même taille, mais « de moins en moins plein ».

L'antenne proposée est conçue sur un substrat (FR4) d'une dimension de 25x30mm²(largeur x longueur) qui a une permittivité relative $\xi_r=4.4$, avec une perte par $\tan \delta$ de 0.025 et une épaisseur de substrat de h=1.6 mm, l'épaisseur de cuivre t est 0.035 mm, et les dimensions du plan de masse sont 25x30mm² (largeur x longueur). Le patch est relié directement à la ligne d'alimentation d'une impédance caractéristique $Z=50\Omega$, comme elle est

illustrée dans la **Figure III.11**.

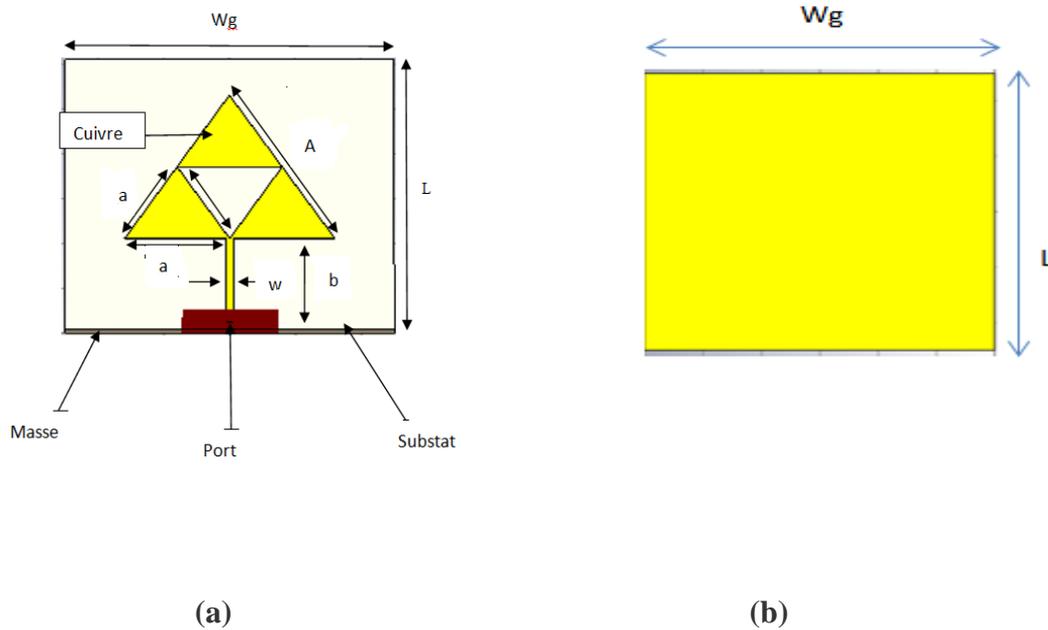


Figure III.11 Structure de l'antenne fractale : Triangle de Sierpiński (1^{ère} itération) (a) vue au-dessus (b) vue au-dessous

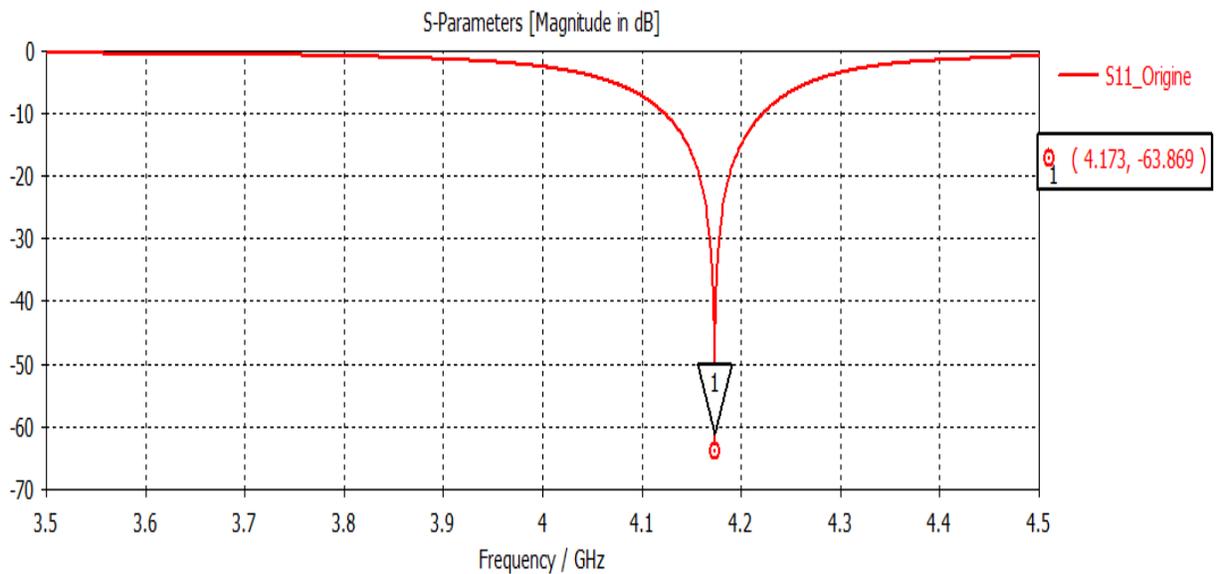
- Les dimensions adoptées lors de cette étude sont montrés dans le Tableau III.2

| Paramètre | Valeur [mm] | paramètre | Valeur [mm] |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| W_g | 26 | a | 8 |
| L | 30 | b | 10 |
| A | 16 | w | 0.5 |

Tableau III.2 Les dimensions de l'antenne fractale proposée

III. 5.2 Résultats de simulation :

III.5.2.1 structure de départ (triangle de Sierpiński 1^{ère} itération)



**Figure III.12 Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne fractale de départ
(Triangle de Sierpinsky (1^{er} itération))**

D'après le résultat obtenu on peut dire que la structure proposée est bien adaptée à la fréquence de résonance de 4.173 GHz.

II.5.2.2 Création des fentes et insertion des diodes PIN sur les sommets de l'antenne fractale

- ✓ 1^{ere} cas : Antenne fractale avec une seule fente au sommet:

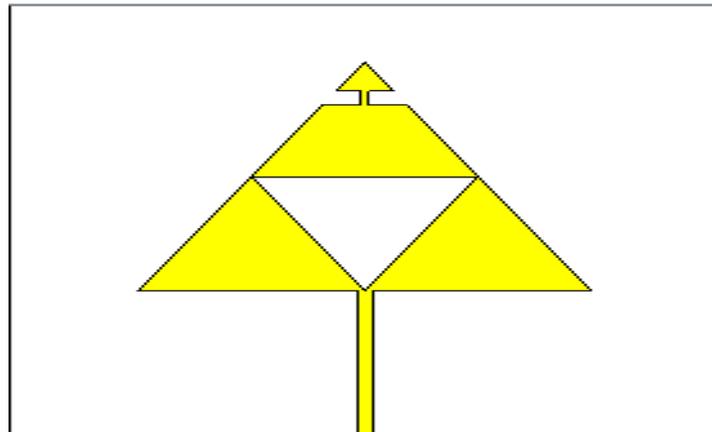


Figure III.13 Antenne fractale avec diode PIN modélisée par un plot métallique (0.2x1mm²)

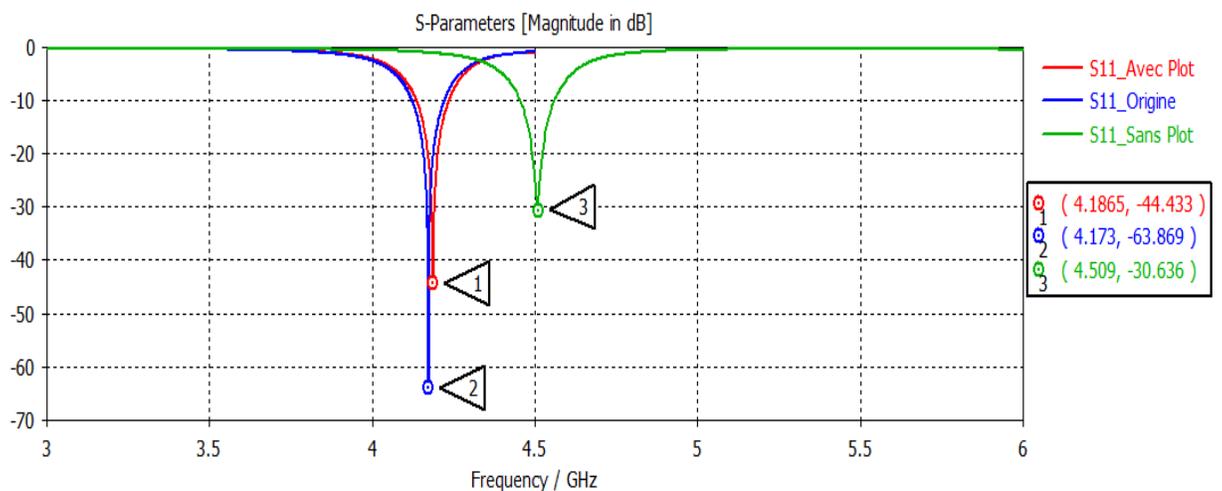


Figure III.14 Coefficient de réflexion S_{11} de la structure obtenue avec et sans plot

Lors que la diode est à l'état ON (avec plot), la fréquence de résonance est un peu décalé par rapport à l'état initial et elle égale 4.1865 GHz. Quand la diode est bloquée (sans plot) la fréquence est égale 4.5074GHz et l'adaptation de l'antenne est moins importante.

✓ 2^{ème} cas : Antenne fractale avec trois fentes aux sommets:

Au début, on a crée trois fentes sur les trois sommets de cette antenne, ensuite on inséré trois composants actifs radio fréquence

❖ **Utilisation des plots métallique :**

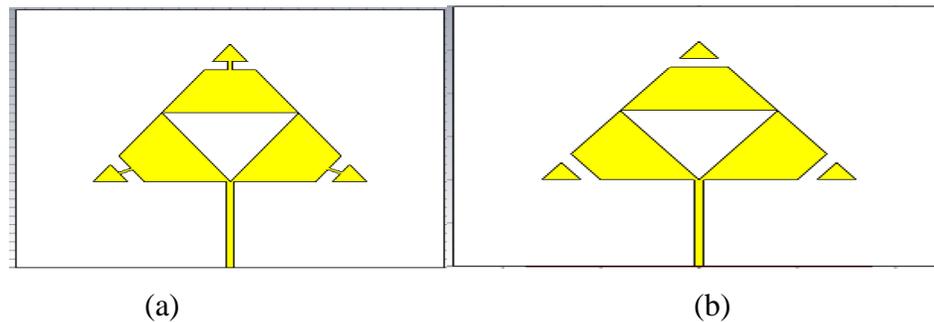


Figure III.15 Antenne fractale avec trois diodes PIN aux sommets (trois plots métalliques) Avec plots, (b) sans plots

La figure suivante présente le coefficient de réflexion S_{11} pour les deux cas avec et sans les plots métalliques :

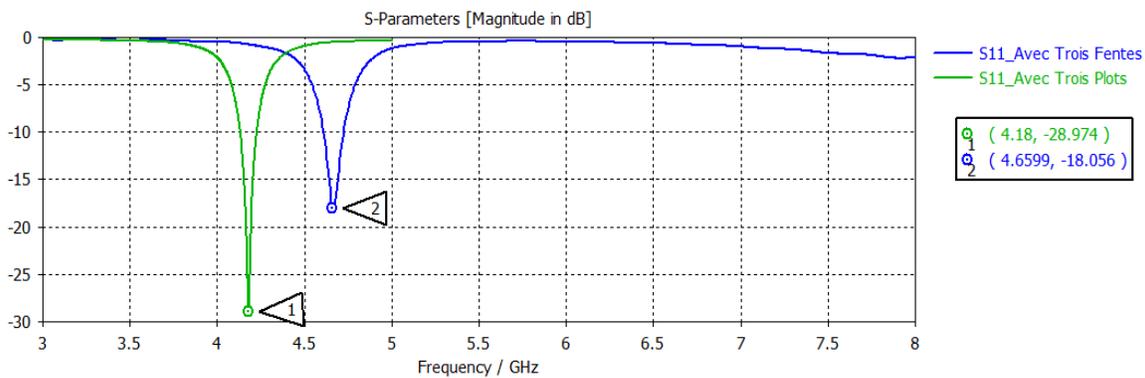


Figure III.16 Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne fractale Avec plots et sans plots

Les résultats sont identiques au cas précédent mais l'antenne est moins adaptée.

❖ **Utilisation des diodes PIN**

Le principe de fonctionnement de la diode PIN est basé sur deux états ON et OFF. Pour simplifier notre tâche, les diodes PIN sont remplacées par trois Switch (S1, S2 et

S 3). Comme on a dit précédemment, on peut remplacer la diode PIN par une résistance de faible valeur à l'état ON ($R=1\Omega$) et une forte valeur à l'état OFF ($R=10^9\Omega$) comme nous montre la Figure III.17

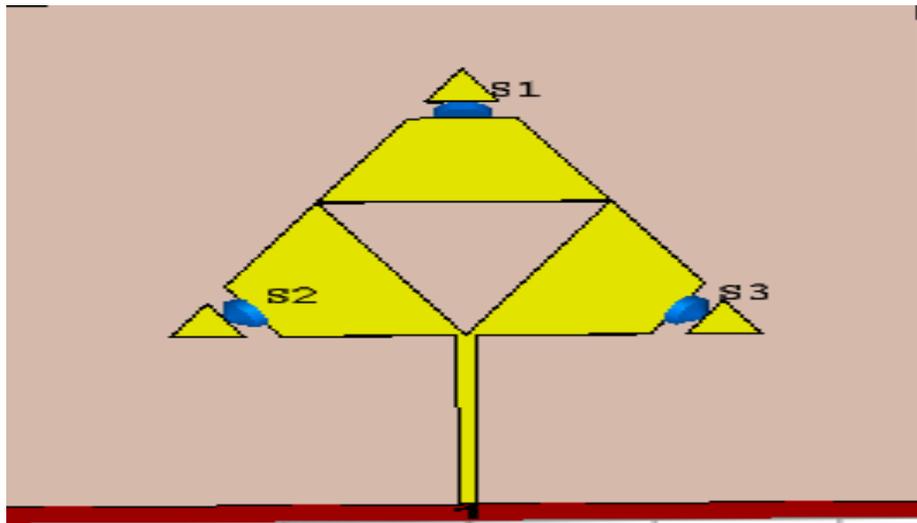


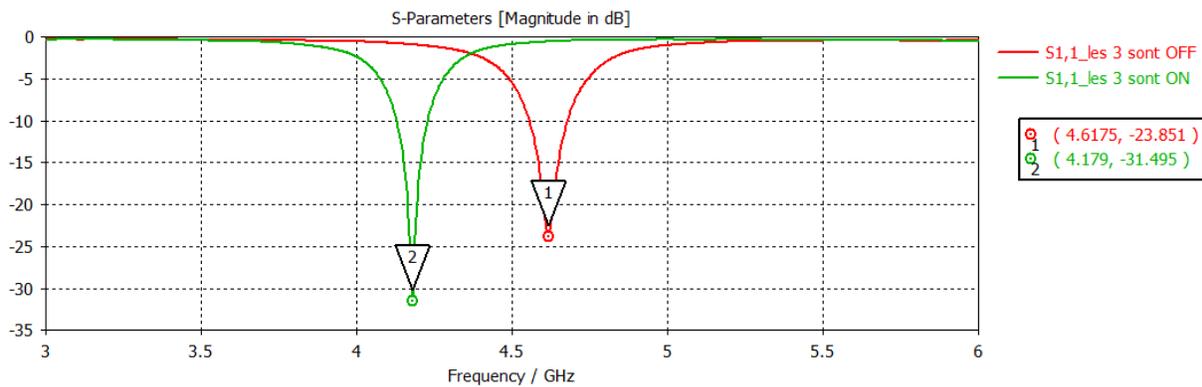
Figure III.17 Antenne fractale avec 3 Switchs (S1, S2 & S3)

Pour faire la simulation, on a utilisé trois Switchs pour avoir huit (08) cas possible (ON-ON-ON, OFF-OFF-OFF, OFF-ON-ON, ON-OFF-ON, ON-ON-OFF, ON-OFF-OFF, OFF-ON-OFF, OFF-OFF-ON)

On a répartie notre travail en trois états:

➤ **Etat 1 :**

Toutes les diodes sont à l'état ON ($R= 1\Omega$) ou toutes les diodes sont à l'état OFF($R= 10^9\Omega$).

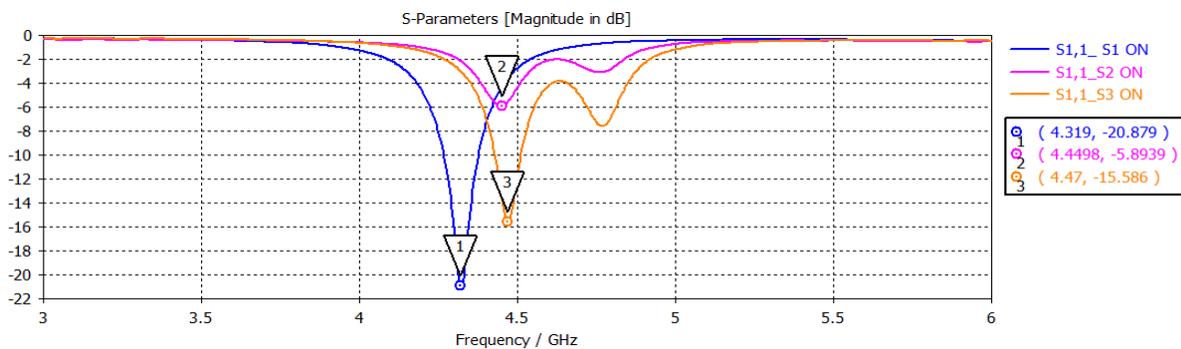


**Figure III.18 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale
(S1, S2 & S3/ON & S1, S2 & S3/OFF)**

Cette reconfiguration permet d'avoir deux fréquences de résonance l'une à 4.61 GHz avec une adaptation -23.85 dB pour l'état OFF et l'autre à 4.17 GHz avec une adaptation de -31.49 dB pour l'état ON. En plus, on remarque qu'il y a une bonne adaptation.

➤ **Etat 2 :**

Une seule diode est à l'état ON

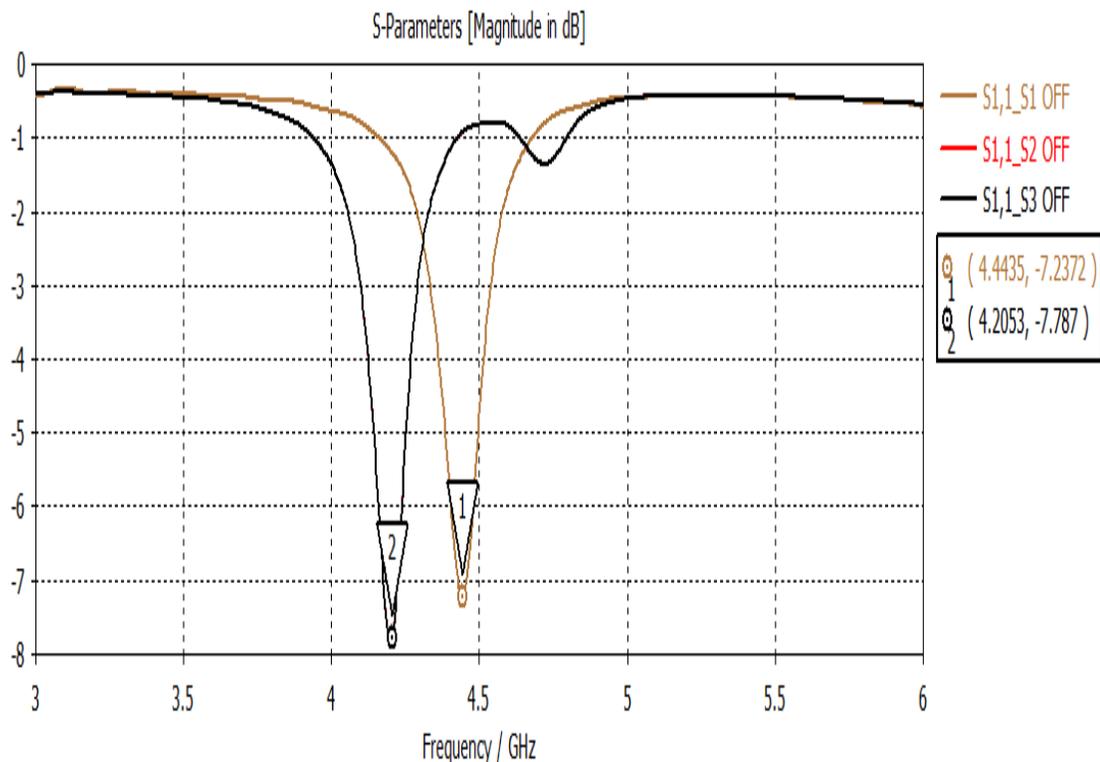


**Figure III.19 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale
(ON-OFF-OFF, OFF-ON-OFF, OFF-OFF-ON)**

Cette reconfiguration permet d'avoir trois fréquences de résonance, une à 4.31GHz pour S1← ON avec une adaptation -20.87 dB, S2←ON une fréquence de résonance à 4.44 GHz avec mauvais adaptation -5.89 dB, Et S3←ON a une adaptation de -15.58 dB à 4.47 GHz.

➤ **Etat 3 :**

Une seule diode est à l'état OFF



**Figure III.20 Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale
(OFF-ON-ON, ON-OFF-ON, ON-ON-OFF)**

Cette reconfiguration permet d'avoir trois fréquences de résonance, l'une à 4.44 GHz lorsque S1 est à l'état OFF avec une adaptation de -7.23 dB, pour les deux autres cas on a trouvé la même fréquence de résonance 4.20 GHz mais avec une adaptation de -7.78 dB. On peut dire que cet état donne une mauvaise adaptation de l'antenne fractale

Les résultats de simulations de cette partie sont regroupés dans le Tableau III.4

| Switch 1 | Switch 2 | Switch 3 | S11 [dB] | Fréquence de Résonance [GHz] |
|----------|----------|----------|----------|------------------------------|
| ON | ON | ON | -31.49 | 4.179 |
| ON | OFF | OFF | -20.87 | 4.319 |
| OFF | ON | OFF | -5.89 | 4.449 |
| OFF | OFF | ON | -15.58 | 4.470 |
| OFF | OFF | OFF | -23.85 | 4.617 |
| OFF | ON | ON | -7.23 | 4.443 |
| ON | OFF | ON | -7.78 | 4.205 |
| ON | ON | OFF | -7.78 | 4.205 |

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

III.6 Validation expérimentale

Après l'étape de simulation du modèle proposé précédemment on a passé à la procédure de réalisation, en utilisant la machine à gravure mécanique LPKF ProtoMat S103 disponible au niveau du département Electronique et Télécommunications de l'Université 8 Mai 1945 Guelma/Algérie. La dernière étape concerne la caractérisation du prototype réalisé en basant sur l'analyseur de réseau vectoriel

III.6.1 Description de la machine LPKF ProtoMat S103 :

Le ProtoMat S103 est le système de pointe de la gamme de fraiseuses pour cartes de circuits imprimés LPKF série S avec une zone de travail de 9" x 12". Il est recommandé pour les matériaux RF et hyperfréquences plus souples à base de PTFE. Il est capable de traiter

facilement des applications de PCB de pointe grâce à des fonctionnalités telles que la reconnaissance optique fiduciaire et la résolution de fraisage de 0,002 millième de pouce.

Le ProtoMat S103 fonctionne directement à partir de données CAO pour traiter les cartes. Les caractéristiques standard propres au système incluent une table à vide pour retravailler les circuits imprimés endommagés et la fixation de matériaux délicats ou flexibles, ainsi qu'un limiteur de profondeur sans contact, ou Air-foot, qui garantit que rien n'entre en contact avec le matériau de la carte sauf l'outil. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour ceux qui travaillent avec des conceptions RF et micro-ondes[III.3] .



Figure III.21 La machine à gravure LPKF Protomat S103

III.6.2 Le prototype réalisé

Le modèle proposé pour la réalisation est une antenne fractale (Triangle de Sierpiński 1^{er} itération) modifié comme nous montre la **Figure III.22**.

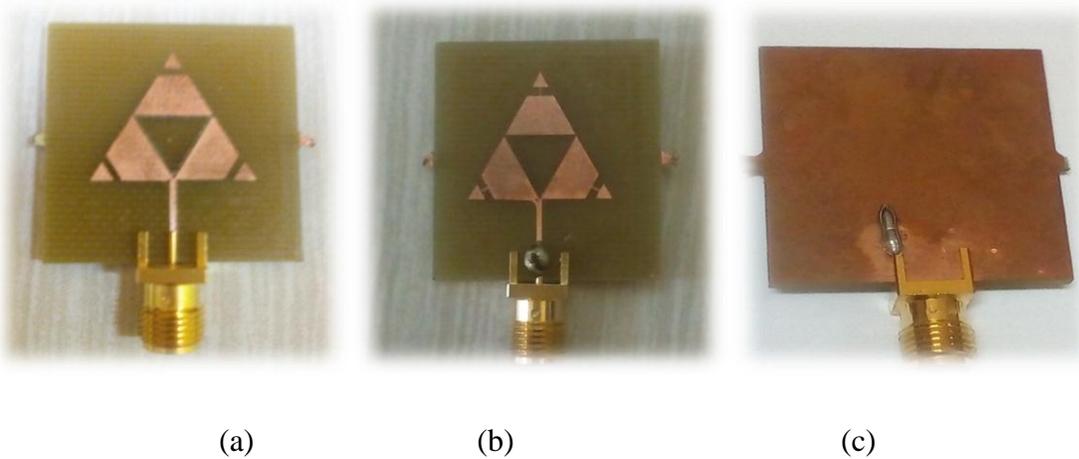


Figure III.22 prototype réalisé (Triangle de Sierpiński 1^{er} itération)

(a) Avec trois fentes , (b) Avec trois plots,(c) vue au dessous

III.6.3 Mesures expérimentales :

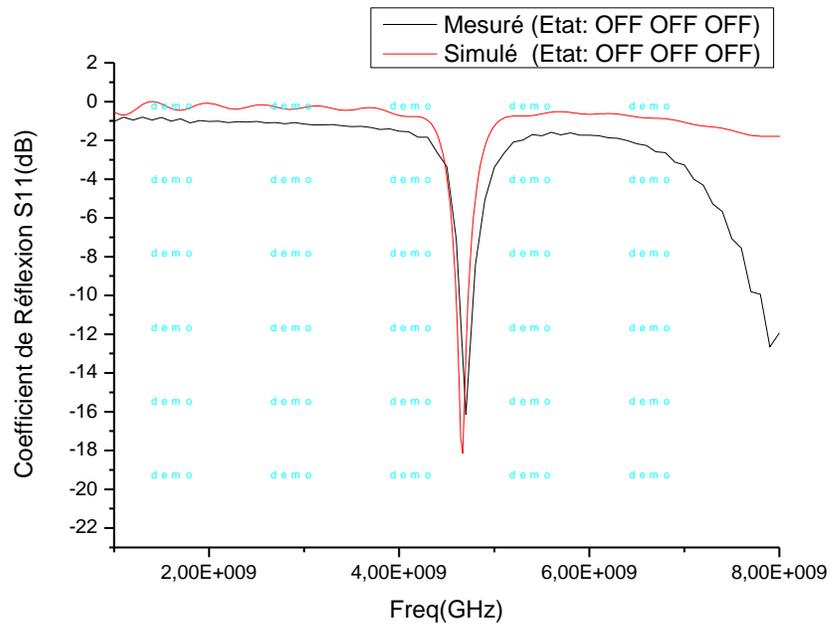
➤ Mesure du coefficient de réflexion :

On a réalisé les mesures du coefficient de réflexion par l'utilisation d'un analyseur de réseau vectorielle (Rohde &Schwarz R&S ®ZNB20 Vector Network Analyser) de 100 KHz à 20 GHz fréquence limite de l'analyseur.

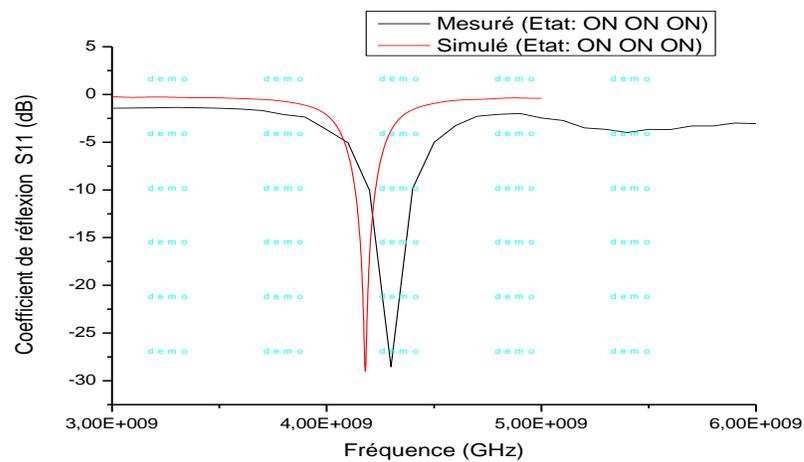


Figure III.23 Analyseur de réseau vectoriel

➤ Mesure du coefficient de réflexion S_{11} du modèle réalisé



(a)



(b)

Figure III.24 Comparaison entre les résultats simulé et réalisé du S_{11} (a)Etat OFF OFF OFF , (b) Etat ON ON ON

| | Etat | Fréquence de résonance (GHz) | coefficient de réflexion S11 (dB) |
|---------------|--------------------|-------------------------------------|--|
| Simulé | OFF OFF OFF | 4.65 | -18.05 |
| Mesuré | OFF OFF OFF | 4.69 | -17.01 |
| Simulé | ON ON ON | 4.18 | -28,69 |
| Mesuré | ON ON ON | 4.29 | -27,91 |

Tableau III.4 comparaison des résultats obtenus

D'après le Tableau III., on remarque que les résultats expérimentaux obtenus sont presque identiques aux résultats de la simulation. On peut expliquer cette petite différence par les influences extérieures sur l'antenne réalisée.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, notre travail est focalisé sur la simulation, la réalisation et la caractérisation d'une antenne fractale (Triangle de Sierpinski 1^{ere} itération) modifiée afin de faire une reconfigurabilité fréquentielle.

Dans une première étape, on a fait une simulation d'une antenne dipôle avec les deux simulateurs CST et HFSS afin de faire une comparaison entre les résultats obtenus. Ensuite on a inséré une diode PIN dans l'une des lignes de ce dipôle pour avoir l'influence de celle-ci sur les caractéristiques de ce dispositif en utilisant les différents types de modélisation de la diode PIN (circuit équivalent RLC série/parallèle, utilisation d'un plot métallique)

Dans la deuxième étape, nous avons effectué plusieurs modifications géométriques sur la structure de base qui est une antenne triangulaire standard de dimensions 16x16x16 mm³ afin d'avoir une fréquence de résonance comprise dans la gamme proposée et avec une bonne adaptation. Ensuite, on a créé à partir de ce modèle de base la géométrie souhaitée (Triangle de

Sierpinski de la première itération).

Dans la troisième étape, on a fait la réalisation et la caractérisation du modèle proposé précédemment pour la simulation. A cet effet, on a exploité la machine à graveur LPKF ainsi que l'analyseur de réseau vectoriel qui sont disponibles au niveau du département électronique et Télécommunications. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une grande similarité entre les la simulation et les résultats de la mesure soit en terme de la fréquence de résonance ou en terme du coefficient de réflexion S11. Les petites différences sont expliquées par l'incertitude de dimensionnement des antennes lors de la réalisation ou les problèmes provoqués par la machine de graveur

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous sommes intéressées à l'étude et à la conception d'antenne fractale reconfigurable en fréquence. A cet effet, on a fait une étude détaillée sur les techniques de reconfiguration possible concernant la fréquence, la polarisation et le diagramme de rayonnement ou la combinaison entre les trois.

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

Enfin, le troisième chapitre est consacré à l'étude et la conception d'une antenne fractale (Triangle de Sierpinski^{1^{er}} Itération) reconfigurable en fréquence. Dans une première partie de ce chapitre notre étude est basée sur l'utilisation des deux simulateurs électromagnétiques CST Studio 2017 et HFSS 2012 dans le domaine temporel. Ils sont basés sur la résolution des équations de Maxwell. Nous avons simulé au départ une antenne dipôle modifiée reconfigurable en fréquence par l'ajout d'une diode PIN. Ensuite nous avons effectué deux modélisations correspondantes à la diode PIN (circuit RLC Série/Parallèle, Plot métallique) dont le but de vérifier l'influence de ce composant actif sur la structure rayonnante. La deuxième partie est focalisée sur la simulation, la réalisation et la caractérisation du prototype étudié précédemment.

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

REFERENCES

REFERENCES

CHAPITRE I

- [I.1] Paul F. Combes, "Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes," Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [I.2] ZEMAM Youssouf et FOUKIA Aimad Eddine, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de MASTER de l'université AboubakrBelkaid– Tlemcen – Juin 2017.
- [I.3] BarkatOuarda« Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrices dans la bande millimétrique » Thèse de doctorat de l'université Mentouri Constantine décembre 2009
- [I.4] AbLaBehloul « Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire» mémoire de magister en électronique de l'université Mentouri Constantine Avril 2010.
- [I.5] CHAIMA Amel, « Étude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN actifs » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de MASTER de l'université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA- 2010.
- [I.6] CHOUTI LEILA, « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de master de l'université MENTOURI-CONSTANTINE 2009.
- [I.7] Kebbab Radhwane, «Conception D'antennes Ultra Large Bande en Technologie IMPRIMEE » ThesedeMagister de Telecommunication, Université Abou bakrBelkaid-Tlemcen 2010.

REFERENCES

Chapitre II

- [II.1] Imen BEN TRAD, Thèse de doctorat, Antennes Agiles pour les Télécommunications Multistandards, l'Université de Tunis El Manar, 2014
- [II.2] Mohamad RAMMAL, “ Développement d’antennes agiles en fréquence intégrant un condensateur ferroélectrique’’, Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences et Ingénierie pour l’Information, Mathématiques (ED 521), décembre 2017
- [II.3] 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 de Doctorat de l’Institut National des Postes et Télécommunications
- [II.4] Saber Dakhli, Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par metamateriaux : conception d'antennes inspirée par metamateriaux, Thèse de doctorat de l’université de rennes 1
- [II.5] Chaima Amel, Etude et conception d’une antenne reconfigurable pour les applications WLAN ,Mémoire de Master,Université Mohamed Boudiaf M’SILA,2018
- [II.6] Sarah Sufyar, Contribution à l’étude d’Antennes Miniatures Reconfigurables en Fréquence par Association d’éléments actifs , Thèse de doctorat, Université de Grenoble 2011
- [II.7] Trong Duc Nguyen, Thèse de doctorat, Conception d’antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive, École Doctorale Electronique,

REFERENCES

Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal,2012

- [II.8] J. T. Bernhard, “*Reconfigurable Antennas*”. San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2007
- [II.9] L. Petit, “Antennes Reconfigurables A Base De MEMS RF ” Micro et nanotechnologies / Microélectronique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007

Chapitre III

- [III.1] Trong Duc Nguyen, Thèse de doctorat, Conception d’antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive, École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal,2012
- [III.2] AminaLaroucietSoundous,RaniaMaamri, Planaire avec une bande rejetée, Mémoire Master Académique, Faculté des Nouvelles Technologies de l’Information et de la Communication Département d’Electronique et des Télécommunications Université KasdiMerbah Ouargla,2018
- [III.3] https://www.lpkfusa.com/products/pcb_prototyping/machines/protomat_s103/date de visite 24/06/2019.