

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Electronique et Télécommunication



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Réseaux et
Télécommunication
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunication
Spécialité : Réseaux et Télécommunication
Thème

*Simulation d'antenne patch à dépointage de
faisceau pour des applications spatiales*

Présenté Par :

1) **Melle.** GUEDOUDOU Amina Sabira

2) **Melle.** ERROUANE Imane

Devant le jury composé de :

Dr DEBBAL Mohammed

M C A UAT.B.B (Ain Temouchent)

Président

Dr FEROUANI Souheyla

M C A UAT.B.B (Ain Temouchent)

Examinatrice

Dr MOULESSEHOUL Wassila

M C B UAT.B.B (Ain Temouchent)

Encadrante

Dr RABAH Mohammed Amin

M R A CDS (Oran)

Co-Encadrant

Dr KOURDI Zakarya

M R A CDS(Oran)

Invité

Année Universitaire 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous remercions ALLAH de nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Au terme de ce modeste travail nous tenons à remercier chaleureusement et respectivement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet de fin d'étude, à savoir notre encadreur *Mme. MOULESSHOUL Wassila* et notre Co-encadreur *RABAH Mohammed Amin*.

Nous remercions également *Dr DEBBAL Mohammed*, qui a eu la gentillesse de présider le jury de ce mémoire et *Dr FEROUANI Souheyla* qui nous a fait l'honneur d'examiner le présent travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre formation et pour leurs valeureux conseils. Ce travail fut difficile mais très bénéfique à tout point de vue.

Merci à tous

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
Que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à
Nos chers parents, qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite
Et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.
Nous espérons qu'un jour,
Nous pourrons leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour
nous,
Que dieu leur prête bonheur et longue vie.
Nous dédions aussi ce travail à nos chers frères et sœurs,
Nos familles, nos amis,
Tous nos professeurs qui nous ont enseigné
Et à tous ceux qui sont chers.*

Résumé

Le développement rapide de la communication sans fil a conduit à des ressources de fréquence limitées et à une vitesse et une efficacité de transmission réduites.

Les antennes reconfigurables permettent de résoudre ces problèmes, elles offrent de nombreuses fonctions et modifient dynamiquement leurs propriétés, telles que la fréquence, le diagramme de rayonnement, la polarisation ou une combinaison de ces trois paramètres.

Le thème de notre projet de fin d'études est la reconfiguration en fréquence d'antenne patch rectangulaire qui fonctionne dans la bande Ku [10.7-12.7] GHZ.

La reconfiguration est effectuée par l'ajout d'une diode varicap à une capacité variable. L'antenne proposée est utilisée pour des applications spatiales. Les résultats de simulations ont été validés par une méthode numérique d'analyse à l'aide du logiciel CST STUDIO 2014.

Mots clés : les antennes reconfigurables, fréquence, diagramme de rayonnement, antenne imprimée, diode varicap, bande Ku.

Abstract

The rapid development of wireless communication has led to limited frequency resources and reduced transmission speed and efficiency.

Reconfigurable antennas solve these problems, offering many functions and dynamically changing their properties, such as frequency, radiation pattern, polarisation or a combination of these three parameters.

In our graduation project we studied the frequency reconfigurability of a rectangular patch antenna operating in the Ku-band [10.7-12.7] GHZ.

The reconfigurability is achieved by adding a varicap diode with a variable capacitance. The developed antenna is used for space applications. The simulation results were validated by a numerical analysis method using the CST STUDIO 2014 software.

Key words: reconfigurable antennas, frequency, radiation pattern, printed antenna, varicap diode, Ku band.

المخلص

ادى التطور السريع للاتصالات اللاسلكية الى الحد من موارد التردد و تقليل تدفق و كفاءة الارسال .
اصبحت الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل تعمل على حل هذه المشاكل فهي توفر وظائف متعددة عن طريق تعديل خصائصها ديناميكيا التردد، نمط الإشعاع و الاستقطاب .
في هذا العمل درسنا
اعادة تشكيل تردد الهوائي عن طريق اضافة صمام ثنائي (فراكتور) حيث يغطي نطاق التردد 10.7 جيجا هرتز -12.7 جيجا هرتز (المجا Ku) . يستعمل هذا الهوائي في مجال الاقمار الصناعية.
تمت هذه دراسة هذا الهوائي بواسطة استديو المحاكاة الرقمي (CST).
الكلمات المفتاحية: الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، التردد، مخطط الإشعاع، الهوائي المطبوع، الصمام الثنائي، النطاق Ku.

Liste des acronymes

2D :2 dimensions.

3D :3 dimensions.

BP : Bande passante.

CST: Computer simulation technology.

dB : Le décibel.

dBi : Le décibel isotopique.

DCS: Digital Cellular System.

FET: Field Effect Transistor.

GHz : Gigahertz.

GPS: Global Positioning System.

GSM: Global System for Mobile Communications.

ISM : Industriel, scientifique et médical.

MEMS: System Micro Electromécanique.

MMIC: Microwave monolithic integrated circuit.

nH : **Nano** Henry.

PF: Pico Farad.

PIN : positive intrinsic negative.

PVA: Poly Vinyl Alcohol.

ROS : Le rapport d'ondes stationnaires.

UCLA: University of California at Los Angeles.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

WIFI: Wireless Fidelity.

WLAN: Wireless Local Area Network.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Dédicace</i>	<i>III</i>
<i>Résumé</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des acronymes</i>	<i>VI</i>
<i>Liste de figures</i>	<i>IX</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>XI</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I</i>	<i>3</i>
<i>Généralités sur les antennes imprimées</i>	<i>3</i>
<i>I.1 Introduction</i>	<i>4</i>
<i>I.2 Définition et structure d'une antenne imprimée</i>	<i>4</i>
<i>I.2.1 Le Plan de masse</i>	<i>5</i>
<i>I.2.2 Le Substrat</i>	<i>5</i>
<i>I.2.3-Éléments rayonnants</i>	<i>5</i>
<i>I.3 Caractéristiques des antennes</i>	<i>6</i>
<i>I.3.1 Les caractéristiques électromagnétiques des antennes</i>	<i>6</i>
<i>I.3.2 Les caractéristiques électriques des antennes</i>	<i>9</i>
<i>I.4 Techniques d'alimentations</i>	<i>11</i>
<i>I.4.1 Alimentation par ligne micro ruban</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2 Alimentation par sonde coaxial</i>	<i>11</i>
<i>I.4.3 Alimentation couplée par fente (ouverture)</i>	<i>12</i>
<i>I.4.4 Alimentation couplée par proximité</i>	<i>13</i>
<i>I.5 Techniques d'adaptation des antennes imprimées</i>	<i>14</i>
<i>I.5.1 Adaptation par ligne quart d'onde</i>	<i>14</i>
<i>I.5.2 Adaptation par stub</i>	<i>15</i>
<i>I.5.3 Adaptation avec encoche</i>	<i>15</i>
<i>I.6 Applications des antennes imprimées</i>	<i>16</i>
<i>I.7 Réseaux d'antennes</i>	<i>16</i>
<i>III.7.1 Principe des réseaux antennes</i>	<i>16</i>
<i>I.8 Avantages et inconvénients des antennes imprimées</i>	<i>17</i>
<i>I.8.1 Avantages</i>	<i>17</i>
<i>I.8.2 Inconvénients</i>	<i>18</i>
<i>I.9 Conclusion</i>	<i>18</i>
<i>Chapitre II</i>	<i>19</i>
<i>Les Antennes reconfigurables</i>	<i>19</i>

<i>II.1 Introduction</i>	20
<i>II.2 Antenne reconfigurable</i>	20
<i>II.3 La reconfigurabilité</i>	20
<i>II.4 Les techniques de reconfiguration</i>	21
<i>II.4.1 Les diodes PIN</i>	21
<i>II.4.2 Les diodes varicaps</i>	21
<i>II.4.3 LES MEMS (Système Micro Electromécanique)</i>	22
<i>II.4.5 Commutateur optique</i>	23
<i>II.4.6 Matériaux agiles</i>	23
<i>II.5 Classifications des antennes reconfigurables</i>	25
<i>II.5.1 La reconfiguration en fréquence</i>	25
<i>II.5.2 La reconfiguration du rayonnement</i>	27
<i>II.5.3 La reconfiguration en polarisation</i>	27
<i>II.5.4 La reconfiguration composée</i>	28
<i>II.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable</i>	29
<i>II.6.1 Avantages</i>	29
<i>II.6.2 Les inconvénients</i>	29
<i>II.7 Conclusion</i>	30
<i>Chapitre III</i>	31
<i>Simulation & résultats</i>	31
<i>III.1 Introduction</i>	32
<i>III.2 Choix de l'outil de simulation</i>	32
<i>III.3 Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire</i>	33
<i>III.3.1 Géométrie de l'antenne</i>	33
<i>III.3.2 Résultat de simulation</i>	35
<i>III.4 Antenne patch reconfigurable sur la bande Ku</i>	37
<i>III.5 Augmentation du Gain et de la Directivité de l'antenne</i>	40
<i>III.5.2 Simulation du réseau d'antennes</i>	40
<i>III.6 Conclusion</i>	46
<i>Conclusion générale</i>	48

Liste de figures

Chapitre I :

Figure I.1: Structure d'une antenne patch rectangulaire.	4
Figure I.2: Divers types d'éléments rayonnants.	5
Figure I.3: Rayonnement d'une antenne directive.	6
Figure I.4: Types de polarisation.	8
Figure I.5 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	10
Figure I.6: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement.	10
Figure I.7:(a) Alimentation par ligne micro ruban et (b) exemples d'images de quelques antennes déjà réalisées.	11
Figure I.8: Antenne patch rectangulaire alimentée par la sonde coaxiale.....	12
Figure I.9: Alimentation couplée par ouverture.	13
Figure I.10: Alimentation couplée par proximité.....	13
Figure I.11: Adaptation par ligne quart d'onde.	14
Figure I.12: stub en circuit ouvert.	15
Figure I.13: Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches de longueur(c).	15

Chapitre II :

Figure II.1: Le circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF	21
Figure II.2: Diode varicap.....	22
Figure II.3: (a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS (b) photographie de l'antenne.....	22
Figure II.4:(a) Cristal liquide (PVA : Poly VinylAlcohol) et (b) méta matériau.....	23
Figure II.5: schéma des types d'antennes reconfigurables.....	25
Figure II.6: Illustration de l'agilité fréquentielle.....	26
Figure II.7: La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b).....	26
Figure II.8: La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée.	27
Figure II.9: Antenne patch à bord commuté en (a) et Antenne PASS de l'UCLA en (b).....	28
figure II.10: Géométrie de l'antenne Meander optimisée vue du dessus en (a) et du dessous en (b). ...	29

Chapitre III :

figure III. 1: Une interface graphique du simulateur CST studio 2014.	33
figure III. 2: Structure d'un patch rectangulaire simple.	33
figure III. 3 : coefficient de réflexion S11	35
figure III. 4: Forme de l'antenne adaptée.	36
figure III. 5: Le coefficient de réflexion de l'antenne.....	36
figure III. 6: Voltage Standing Wave Radio (VSWR).	36
figure III. 7: Directivité de l'antenne à 11GHz en 3D et polaire.	37

figure III. 8: Gain de l'antenne à 11GHz en 3D et polaire.	37
figure III. 9: Antenne rectangulaire avec diode varicap.....	38
figure III. 10 : Figure III.10: Paramètre S11 pour C=0.02pF.	38
figure III. 11: Figure III.11: Paramètre S11 pour C=0.05pF.	39
figure III. 12: Paramètre S11 pour C=0.2pF.....	39
figure III. 13: Paramètre S11 pour C=0.8pF.....	39
figure III. 14: Le paramètre S11 pour différentes valeurs de la Capacité.	40
figure III. 15: Structure d'un réseau de deux éléments.	41
figure III. 16: Le coefficient de réflexion d'un réseau de deux éléments.	41
figure III. 17: La directivité d'un réseau de deux éléments polaire et en 3D.....	42
figure III. 18: Le gain d'un réseau de deux éléments polaire et en 3D.....	42
figure III. 19: Structure de réseaux de quatre éléments.	42
figure III. 20: Coefficient de réflexion S11.....	43
figure III. 21: La directivité d'un réseau de quatre éléments polaire et en 3D.	43
figure III. 22: Le gain d'un réseau de quatre éléments polaire et en 3D.....	43
figure III. 23: Structure de réseaux de huit éléments.	44
figure III. 24: Coefficient de réflexion S11.	44
figure III. 25: La directivité d'un réseau de huit éléments polaire et en 3D.	44
figure III. 26: Le gain d'un réseau de huit éléments polaire et en 3D.	45
figure III. 27: Le paramètre S11 pour différentes valeurs de la Capacité.	45

Liste des tableaux

Tableau I.1: Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation.....	14
Tableau II.1: la différence entre les techniques de reconfiguration.....	24
Tableau III.1 : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.....	34
Tableau III.2: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.....	34

Introduction générale

Introduction générale

Les satellites sont partout dans la société moderne, nous utilisons quotidiennement des informations spatiales sans le savoir. Les satellites assurent de multiples tâches : la Télécommunications (télédiffusion, transmission multimédia haut débit...), localisation(GPS), observation de la terre (météorologie, climatologie...), défense (observation radar ou optique), scientifique (astronomie)...Quelque soient leur application tous les satellites utilisent des ondes électromagnétiques pour effectuer leurs missions, les antennes imprimées sont donc une partie très importante du système.

La technologie moderne nécessite l'utilisation de plusieurs applications (fonctions) sur une seule antenne, ce qui nécessite une reconfiguration du concept. Une antenne reconfigurable est une antenne qui peut s'adapter aux conditions changeantes en ajustant sa fréquence de fonctionnement, sa polarisation ou son diagramme de rayonnement. Les antennes reconfigurables sont les plus couramment utilisées dans les systèmes de télécommunications en raison de leur légèreté, de leur faible coût de fabrication et de leur capacité à être intégrées dans diverses applications.

Le but du travail présenté dans ce mémoire est de simuler une antenne patch reconfigurable en fréquence d'une forme rectangulaire pour des applications spatiales en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio édition.

Afin d'atteindre nos objectifs, ce travail est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les antennes imprimées, ses caractéristiques, ses techniques d'alimentation existantes et aussi on a cité le domaine d'applications de ces dernières ainsi leur avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre allons d'abord introduit quelques concepts de base sur les antennes reconfigurables et les techniques de reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation et on a conclu le chapitre par les avantages et les inconvénients d'antennes imprimées reconfigurables.

Le dernier chapitre est la partie pratique du mémoire. Nous utilisons le logiciel CST Microwave Studio pour simuler une antenne patch rectangulaire qui rayonne à la fréquence de 11 GHz, l'antenne a été modifiée pour s'adapter.

Dans un deuxième temps, nous utilisons la technique d'insertion d'une diode varicap pour reconfigurer la fréquence de l'antenne afin que notre antenne couvre toutes les fréquences de la bande Ku.

Comme dernière étapes de notre objectif, nous avons fait un réseau d'antenne patch reconfigurables de 2, 4 et 8 éléments, afin d'augmenter le gain du réseau. Puis, nous allons regrouper les résultats finaux de simulation de réseaux d'antennes reconfigurables afin de l'utiliser pour des applications satellitaires.

A la fin du manuscrit, nous allons terminer avec une conclusion générale sur le sujet examiné.

Chapitre I

*Généralités sur les
antennes imprimées*

I.1 Introduction

Le domaine des Télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les préoccupations de ce domaine, on trouve les antennes.

L'antenne est un dispositif métallique nécessaire dans tous les systèmes de communications sans fil, c'est la base de la liaison radioélectrique [I.1].

Elle permet de transmettre un signal modulé (porteur d'une information) d'un émetteur vers le récepteur via un canal de transmission (guide d'ondes, l'espace libre, ...). L'antenne transforme le signal électrique en une onde électromagnétique et vice versa (à un rôle réciproque).

Il existe plusieurs type d'antennes parmi ses types l'antenne imprimée (patch), elle est trop utilisée grâce à son caractère en miniature qui offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission - réception.

Dans notre premier chapitre, nous présentons la description, les caractéristiques, les avantages, les inconvénients des antennes patches, ainsi que les différents types d'alimentation.

I.2 Définition et structure d'une antenne imprimée

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.1].

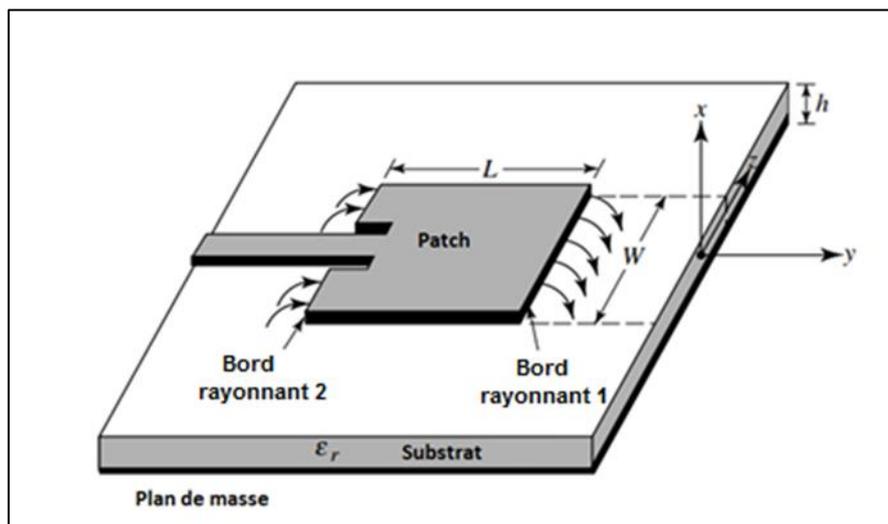


Figure I.1: Structure d'une antenne patch rectangulaire[I.1].

1.2.1 Le Plan de masse

Le plan de masse est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure. [I.2].

Le patch et le plan de masse sont séparés par une feuille diélectrique (appelée substrat), comme le montre *la figure I.1*. [I.3]

1.2.2 Le Substrat

Le substrat composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de joule et améliorer la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante [I.2].

1.2.3-Éléments rayonnants

L'élément rayonnant est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire ...etc.). Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission (micro-ruban) qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion [I.2].

Afin de simplifier l'analyse et l'estimation des performances, le patch a généralement une forme rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique ou autre forme connue comme indiqué dans *la figure (I.3)* Les divers types d'éléments rayonnants les plus simples sont indiqués sur la figure suivante :

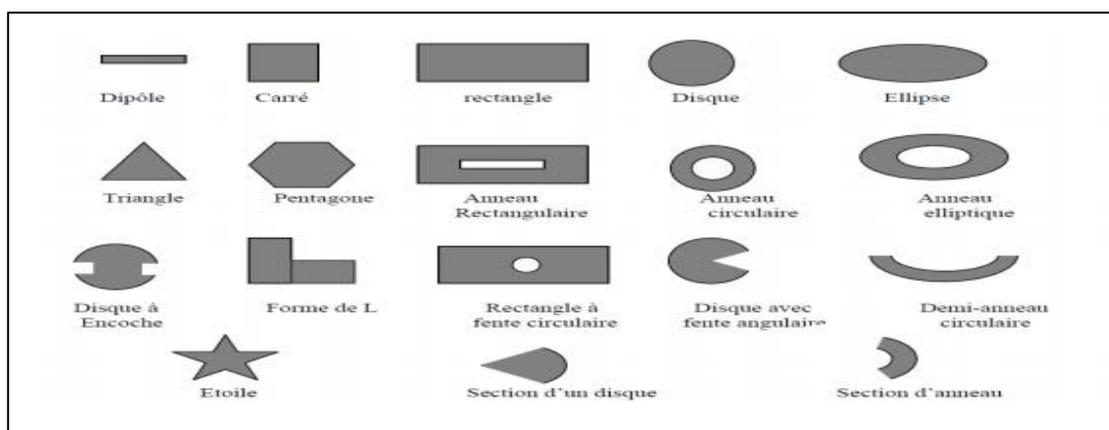


Figure I.2: Divers types d'éléments rayonnants[I.3].

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant [1.4]

On trouve également d'autres formes plus complexes et plus difficiles à analyser. Elle résulte souvent de la combinaison de deux formes simples et sont utilisées dans certaines applications particulières [I.5].

Le choix de la forme d'antenne dépendra du type d'application désiré et des paramètres qu'on cherche à optimiser (bande passante, gain et efficacité, impédance d'entrée, niveaux des lobes secondaires, ... etc.) [I.5].

I.3 Caractéristiques des antennes

I.3.1 Les caractéristiques électromagnétiques des antennes

I.3.1.1 Le rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle qui lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [I.6] :

$$\eta = \frac{Rr}{(Rr + RP)} \quad (I.1)$$

Il est aussi exprimé par [I.7] :

$$\eta = \frac{Pr}{Pa} \quad (I.2)$$

I.3.1.2 La directivité

On dit qu'une antenne est directive quand elle centralise l'énergie qu'elle rayonne dans une direction donnée dans l'espace. Elle sera plus directive que la largeur de bande de rayonnement sera étroite. Une antenne omnidirectionnelle rayonne de la même énergie dans toutes les directions du plan horizontal [I.8].

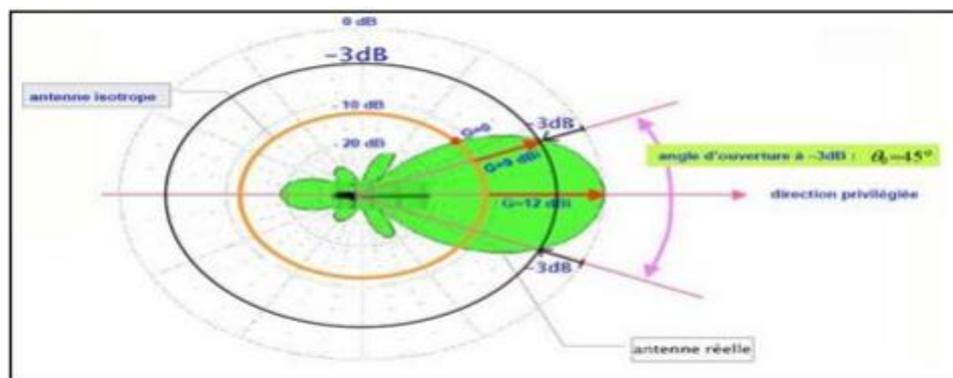


Figure I.3: Rayonnement d'une antenne directive [I.8].

- Le lobe principal : C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- L'angle d'ouverture : C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- Les lobes secondaires : Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables
- Le lobe arrière : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à 180° du lobe principal.

La directivité d'une antenne $D(\theta, \varphi)$ est évaluée par le rapport entre la puissance rayonnée $P(\theta, \varphi)$ dans une direction donnée et la puissance émise par une antenne isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les mêmes :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r/4\pi} \quad (I.3)$$

Dans la direction de rayonnement maximale $P_0(\theta_0, \varphi_0)$ on note la directivité :

$$D(\theta_0, \varphi_0) = 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_r} \quad (I.4)$$

1.3.1.3 Le gain

Le gain est considéré comme un des principaux paramètres des antennes directives, pour ces derniers, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres. Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre la puissance émise dans la direction du lobe principal et la puissance qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, les deux antennes étant alimenté [I.8] [I.9].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_t/4\pi R^2} = 4\pi R^2 \frac{P(\theta, \varphi)}{\iint P(\theta, \varphi)} \quad (I.5)$$

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m^2).

P_0 : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m^2).

P_t : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

1.3.1.4 La polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique [I.8], comme montrés sur la **figure (I.6)**.

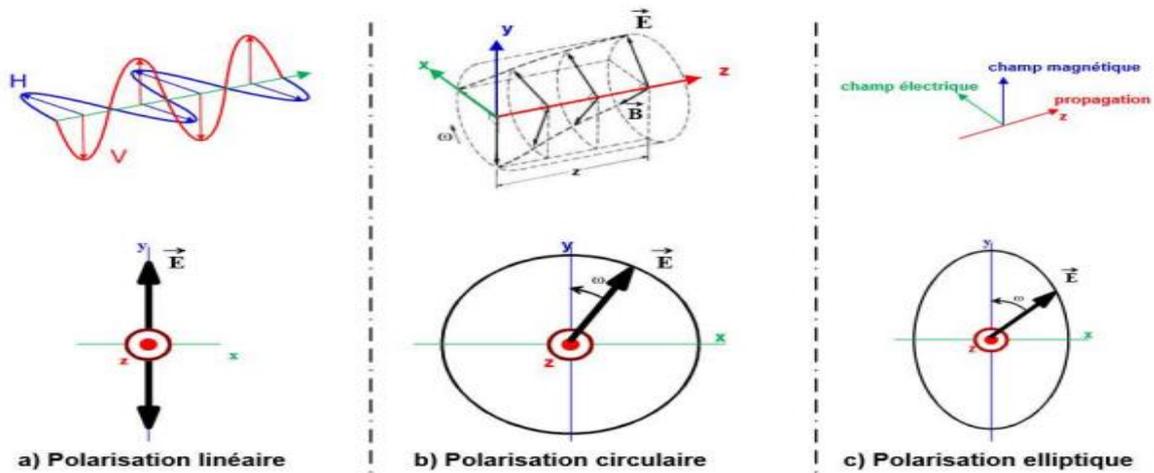


Figure I.4: Types de polarisation[I.8].

1.3.1.5 Le Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement présente les changements de la puissance rayonné par l'antenne dans les différentes directions de l'espace, il indique les directions dans lesquels la puissance rayonnée est maximale. Le diagramme de rayonnement (**figure I.5**) peut être représenté soit en distribution 3D qui nous permette une meilleure visualisation du lobe principale et des lobes secondaires, soit en 2D en une représentation polaire ou cartésienne [I.6].

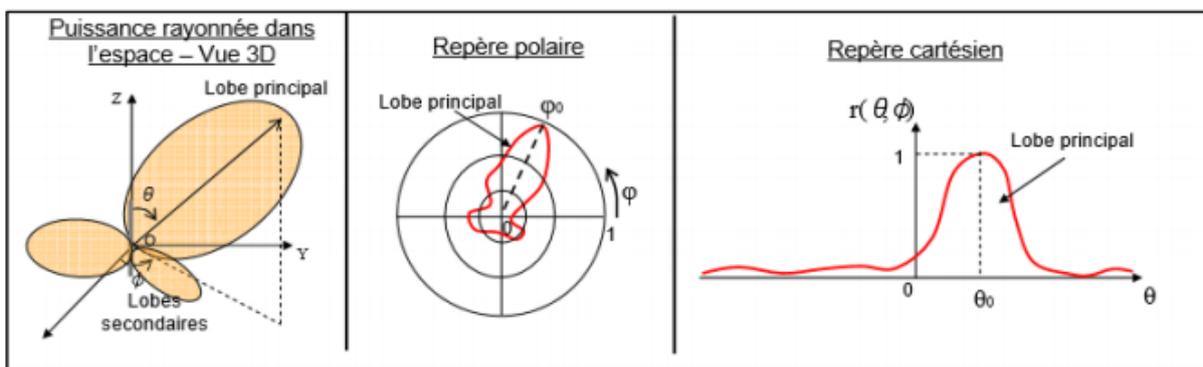


Figure I.5 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [I.6].

1.3.1.6 Ouverture d'une antenne

L'ouverture rayonnante d'une antenne est la surface géométrique rayonnante de cette antenne. C'est aussi la surface qui capte l'énergie des ondes électromagnétiques transmises [I.10].

1.3.2 Les caractéristiques électriques des antennes

1.3.2.1 Le coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivante [I.11] :

$$S_{11} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} \quad (I.6)$$

Où : Z_c : est l'impédance de normalisation, en générale égale à 50Ω .

Le module du coefficient de réflexion est habituellement présenté en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$S_{11}dB = 20 \log * S_{11} \quad (I.7)$$

1.3.2.2 Le rapport d'ondes stationnaires (ROS)

Ce paramètre est un indicateur du bon fonctionnement du système d'alimentation d'une antenne, qui est évaluée par le rapport entre le maximum et le minimum de tension mesurés sur la ligne au niveau d'un ventre de tension [I.12].

$$ROS = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (I.8)$$

On peut aussi l'évaluer à partir du coefficient de réflexion :

$$ROS = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (I.9)$$

1.3.2.3 La bande passante (BP)

Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal (largeur de bande de fonctionnement) [I.9] :

$$|BP| = F_2 - F_1 \quad (I.10)$$

Généralement, ce paramètre est évalué aussi en pourcentage du rapport de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale :

$$BP(\%) = \frac{|BP|}{F_0} \quad (I.11)$$

La **figure (I.7)** présente la courbe du coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la largeur de bande de fonctionnement (bande passante à -10 dB).

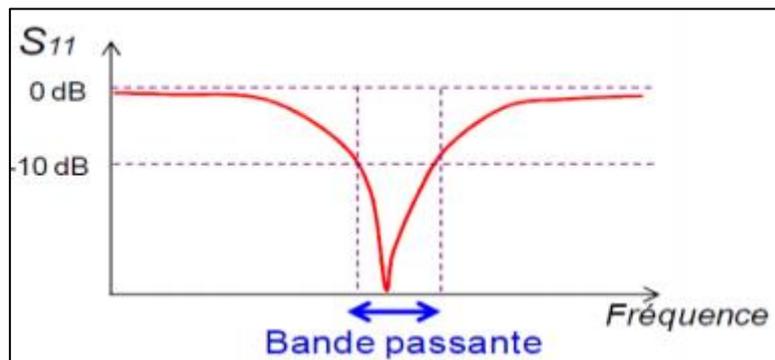


Figure I.6 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement [I.9].

I.3.2.4 L'impédance d'entrée

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on considère une antenne à l'émission. L'antenne est équivalente à une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{IN} et une tension V_{IN} [I.6]. Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{IN} .

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = R_{IN} + jX_{IN} \quad (I.12)$$

Avec :

X_{IN} : La partie réactive (réactance) de l'antenne, elle représente la puissance stockée dans les régions proches du champ rayonné.

R_{IN} : La partie active est reliée aux champs (puissance) rayonnés et à la puissance perdue par effet de joules. Elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte R_p ($R_{in} = R_p + R_r$).

La puissance associée à la résistance R_r est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance R_p est perdue en chaleur dans l'antenne [I.12] [I.13].

I.4 Techniques d'alimentations

L'alimentation joue un rôle très important lors de la conception des antennes imprimées. Elle peut modifier les caractéristiques de rayonnement de celles-ci. L'alimentation pourra être soit centrée soit arbitraire par rapport à la géométrie de l'élément. Par sa position, elle détermine l'adaptation de l'antenne à la ligne d'alimentation. Il existe une large variété de techniques d'alimentation permettant ainsi de fournir à l'antenne, l'énergie qui lui est nécessaire pour rayonner [I.2].

I.4.1 Alimentation par ligne micro ruban

Dans cette méthode d'alimentation, une ligne microruban (généralement de 50Ω) est connectée 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 à réaliser [I.14] [I.15].

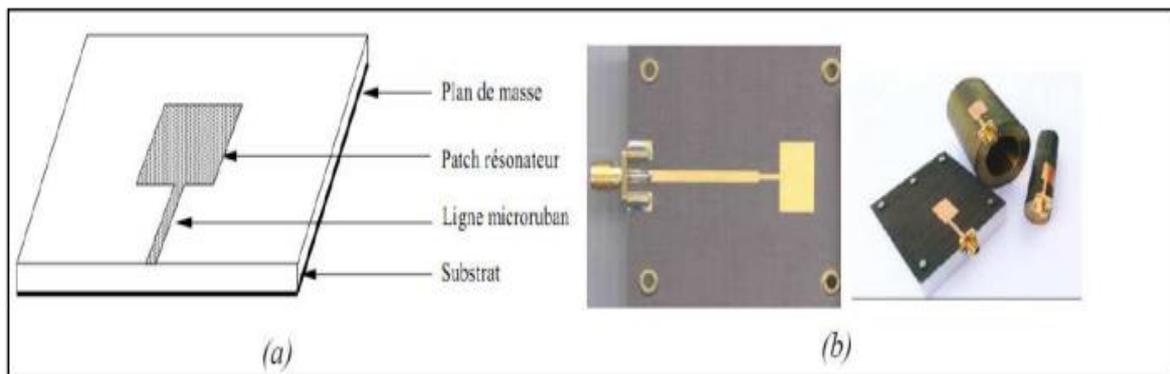


Figure I.7 : (a) Alimentation par ligne micro ruban et (b) exemples d'images de quelques antennes déjà réalisées [I.16].

Les principaux inconvénients de cette structure simple sont [I.16] :

- Les couplages parasites dû à la réalisation de la ligne de transmission et du résonateur sur le même substrat, et qui diminuent les performances de l'antenne au-delà de quelques GHz
- La nécessité d'ajouter un transformateur d'impédance pour obtenir l'adaptation entre la ligne d'alimentation et le résonateur.

I.4.2 Alimentation par sonde coaxial

L'alimentation par sonde 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 interne est relié au patch rayonnant. Mais ce type d'alimentation présente une bande passante étroite et une grande difficulté de la modéliser, surtout pour des substrats épais [I.17].

L'avantage de cette méthode est de positionner l'alimentation sous le patch et d'utiliser une ligne non rayonnante (coaxiale), ce qui diminue fortement les rayons parasites.

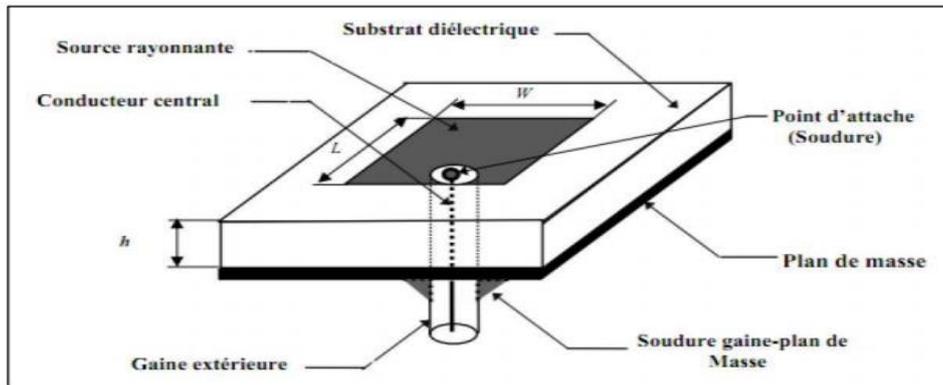


Figure I.8 : Antenne patch rectangulaire alimentée par la sonde coaxiale [I.17].

I.4.3 Alimentation couplée par fente (ouverture)

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indique sur la **figure I.8**. La conjonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch [I.14] [I.15] [I.16].

Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante [I.14].

L'inconvénient de telle technique et sa complexité de fabrication. Cette complexité réside dans : l'ouverture dans le plan de masse, La réalisation de deux couche diélectriques [I.18].

Elle reste tout de même utilisée pour certaines applications, car elle permet une amélioration de la bande passante qui peut aller jusqu'à 25%.

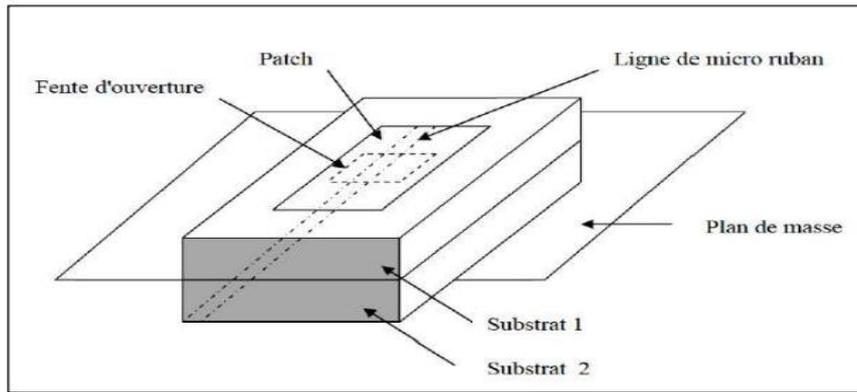


Figure I.9 : Alimentation couplée par ouverture [I.14].

I.4.4 Alimentation couplée par proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats et le patch est imprimé sur le substrat supérieur (*figure I.9*) [I.14] [I.15].

L'avantage principal de cette technique est qu'elle élimine le rayonnement parasite due à l'alimentation et fournit une largeur de bande très élevée (plus que 13%), en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne micro ruban. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [I.14].

Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs [I.14].

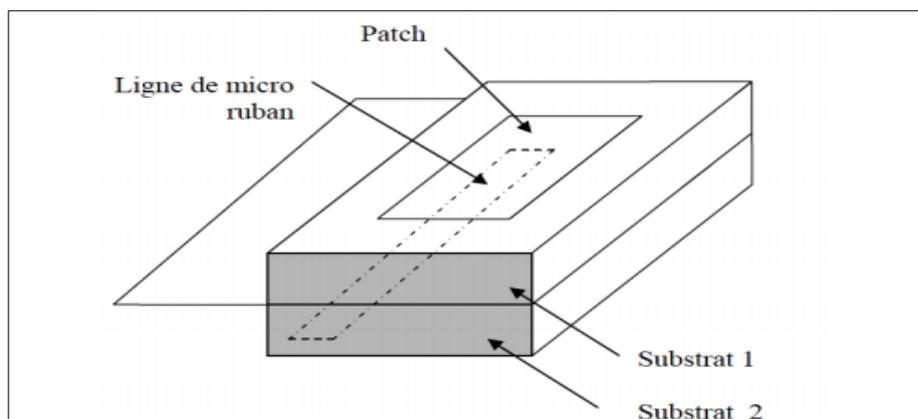


Figure I.10 : Alimentation couplée par proximité [I.15].

➤ *Comparaison entre ces différentes techniques d'alimentations*

Le tableau suivant fait la comparaison entre différentes techniques d'alimentation.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Alimentation par la ligne micro ruban</i>	<i>Alimentation coaxial</i>	<i>Alimentation couplée par ouverture</i>	<i>Alimentation couplée par proximité</i>
<i>Rayonnement parasite</i>	<i>Plus</i>	<i>Plus</i>	<i>Moins</i>	<i>Minimum</i>
<i>Fiabilité</i>	<i>Meilleur</i>	<i>Pauvre à cause de soudure</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>
<i>Facilité de fabrication</i>	<i>Facile</i>	<i>Soudure et forage requis</i>	<i>Alignement requis</i>	<i>Alignement requis</i>
<i>Adaptation d'impédance</i>	<i>Facile</i>	<i>Facile</i>	<i>Facile</i>	<i>Facile</i>
<i>Bande passante</i>	<i>2-5%</i>	<i>2-5%</i>	<i>2-5%</i>	<i>13%</i>

Tableau I.1: Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation [I.14].

1.5 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation ; la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique [I.19].

1.5.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [I.19].

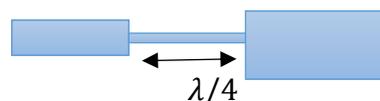


Figure I.11 : Adaptation par ligne quart d'onde.

I.5.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [I.19].

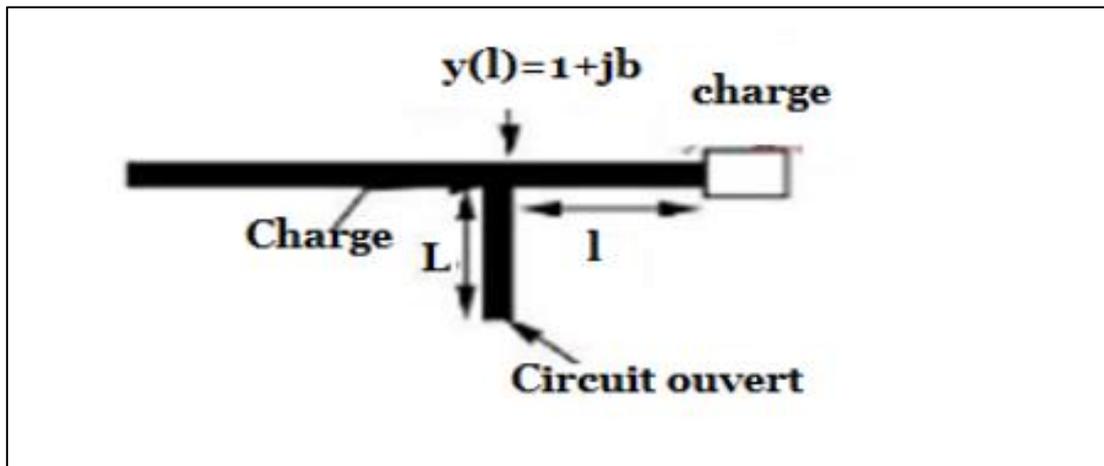
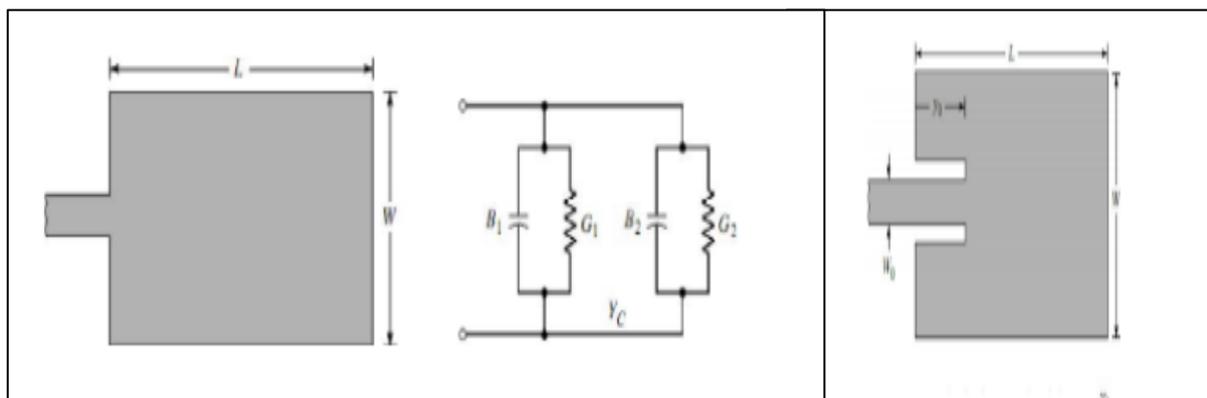


Figure I.12 : Stub en circuit ouvert [I.19].

I.5.3 Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch [I.19].



(a)

(b)

(c)

Figure I.13 : Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches de longueur(c) [I.19].

I.6 Applications des antennes imprimées

Les demandes des antennes imprimées sont au loin très nombreuses, de l'électronique grand public aux systèmes technologiques de pointe. Les antennes imprimées sont utilisées dans :

- La télémétrie des missiles.
- Les contrôles et les commandes à distance.
- Les radars.
- Les Réseaux mobiles (GSM 900, DCS 1800, UMTS...).
- Réseaux sans fils : (WLAN, BLUETOOTH, WIFI, ...).
- Les communications spatiales (GPS)

Plusieurs systèmes complexes comme les radars de poursuite ont été miniaturisés à partir de la taille réduite des antennes planaires. [I.20] [I.21]

I.7 Réseaux d'antennes

III.7.1 Principe des réseaux antennes

Un réseau d'antennes est un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patchs ...) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière. Le rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande. Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunication récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception.

Dans le cas d'un réseau d'antennes patch, le principe de la répartition d'énergie se fait par des lignes microrubans, où les déphaseurs, les diviseurs et les combineurs de puissance sont réalisés par des lignes microruban. Nous montrons sur la figure I.14 deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes.

- Alimentation série : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée (Fig. I.14.a).

- Alimentation parallèle : le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément (Fig. I.14.b).

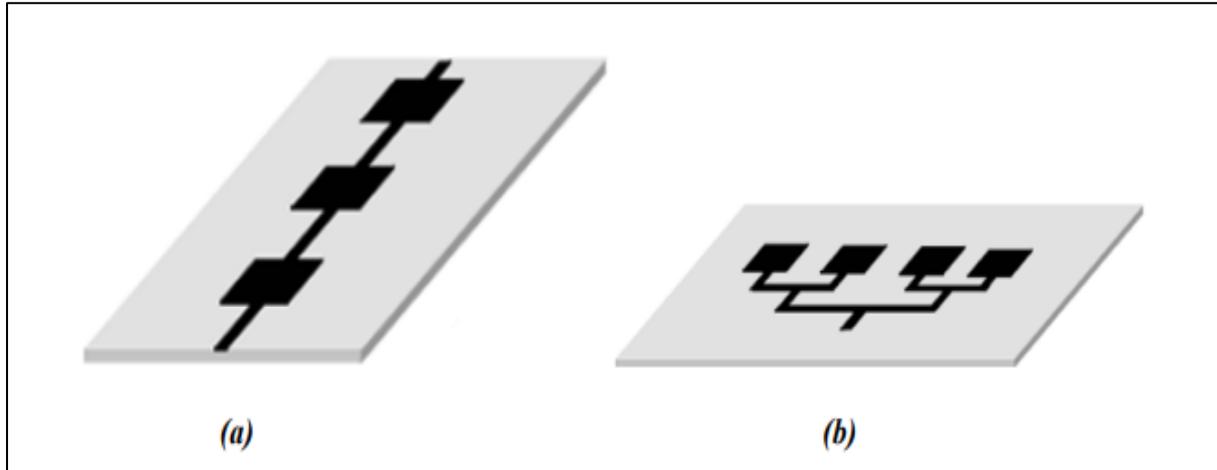


Figure I.14: Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle.

1.8 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et inconvénients comparés aux antennes microondes classiques [I.4].

1.8.1 Avantages

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles ;
- Faible coût de fabrication, production en masse possible ;
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications ;
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles ;
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave monolithic integrated circuit);
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Simplicité de leurs structures.
- Faible volume
- Faible épaisseur

1.8.2 Inconvénients

- Bande passante souvent étroite de l'ordre de 1 à 5% (pour les éléments résonants de géométrie simple) ;
- Généralement faible gain.
- Facteur de qualité Q élevé, va d'environ 50 jusqu'à 75.
- Supportent uniquement des faibles puissances.
- Rendement limité de surface.
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.
- Risque de rayonnement parasite dû aux jonctions avec l'alimentation ou à la limitation du plan de masse.
- Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation.

1.9 Conclusion

*D*ans ce chapitre nous avons essayé de présenter 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 parlé sur les caractéristiques, les techniques d'alimentations, quelques applications d'une antenne imprimée et leurs avantages et inconvénients.

Chapitre II

***Les Antennes
reconfigurables***

II.1 Introduction

Ces dernières années ont vu une évolution technologique importante et un développement de la télécommunication sans fil avec une grande consommation des données mobiles, ce qui provoque une limitation de ressources fréquentiel qui nécessite une amélioration des débits et d'efficacité de transmission.

Parmi les solutions qui résous ces problèmes est l'utilisation des antennes reconfigurable soit en fréquence, en diagramme de rayonnements et/ou en polarisation. Il s'agit maintenant de parler de quelque notion de base sur les antennes reconfigurables.

II.2 Antenne reconfigurable

Une antenne reconfigurable est définie comme un dispositif capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) d'une manière dynamique après sa fabrication. Le changement dans l'un de ses paramètres électriques, optiques, physiques (modification mécanique) ou l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) permet de modifier les caractéristiques de l'antenne, même durant le fonctionnement de l'antenne en temps réel. Ces changements permettent à l'antenne de s'adapter au changement de l'environnement et aux contraintes liées aux systèmes de communications [II.1].

II.3 La reconfigurabilité

Le développement technologique touche plusieurs domaines surtout les télécommunications sans fil. L'antenne est considérée comme l'élément principal dans la communication, son rôle est de capter ou de recevoir les ondes électromagnétiques puis les transforme en ondes électriques ou inversement [II.2].

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans le domaine de communications mobiles (téléphones mobiles, tablettes et des laptops). Ces antennes sont conçues et dédiées pour fonctionner sur une seule gamme de fréquence ce qui montre une grande limitation pour faire la diversité des services (WIFI, WLAN, GSM...). L'utilisation de plusieurs antennes pour un seul dispositif n'est pas faisable. La solution est présentée dans l'utilisation des antennes capable de changer sa bande d'utilisation suivant le besoin de l'utilisateur. Alors, on parle de la notion de reconfigurabilité [II.2].

Les antennes reconfigurables donnent un degré de liberté plus que les antennes patch simple (leurs paramètres et caractéristiques sont fixe et inchangeables), car ces antennes

reconfigurable ont la possibilité de régler la fréquence de fonctionnement, de changer le bande d'exploitation elle-même, de filtrer les signaux parasites et d'orienter le lobe principal vers la direction privilégiée ce qui augmente la capacité du réseau (mobile) grâce à la diversité spatiale fournie par ces types d'antennes[II.2].

II.4 Les techniques de reconfiguration

Une antenne reconfigurable est une antenne qu'on peut modifier une ou plusieurs de ses caractéristiques même après sa confection.

Pour adopter la reconfiguration d'une antenne, il existe plusieurs techniques :

II.4.1 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. Elle est utilisée pour obtenir n'importe quelle technique de reconfigurabilité fréquentielle, en diagramme de rayonnement ou de polarisation avec faible coût, une grande facilité d'intégration et une faible tension de polarisation [II.3].

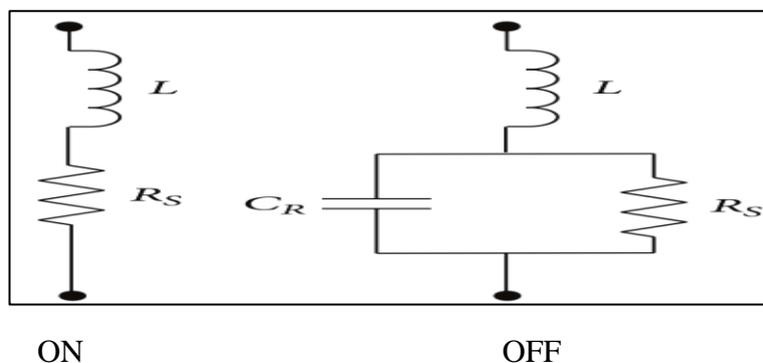


Figure II.1: Le circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF [II.3].

II.4.2 Les diodes varicaps

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

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.4].

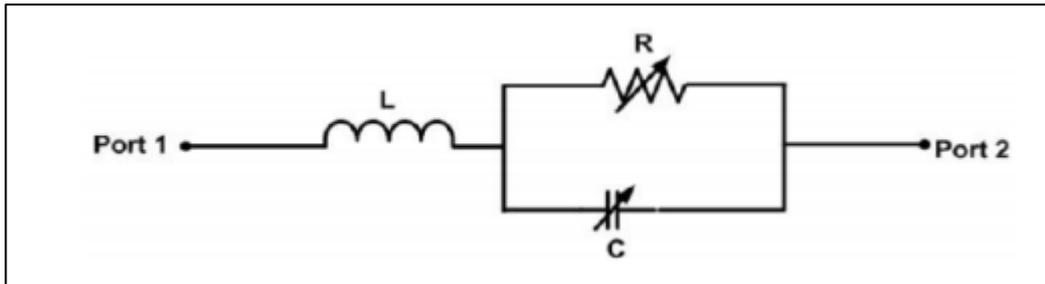


Figure II.2: Diode varicap [II.4].

II.4.3 LES MEMS (Système Micro Electromécanique)

Le MEMS (Système Micro Electromécanique) est un commutateur utilisé dans la reconfiguration des antennes, c'est un composant microsysteme 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.4].

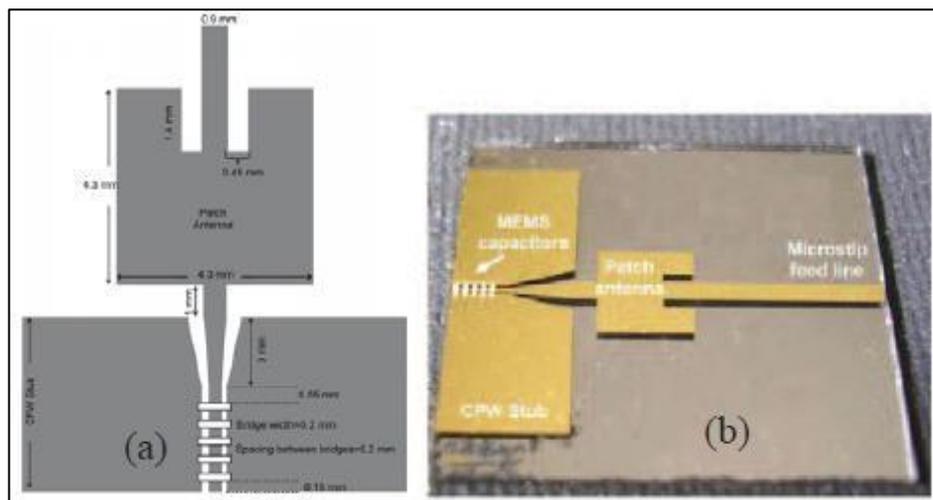


Figure II. 3:(a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS (b) photographie de l'antenne[II.4].

II.4.4 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.3].

II.4.5 Commutateur optique

L'utilisation des commutateurs optiques est la meilleure technique que les autres mais son coût est très élevé. Elle est utilisée pour éviter le recours aux circuits de polarisation [II.5].

II.4.6 Matériaux agiles

Cette technique consiste à utiliser des matériaux agiles (commandables) tel que les méta matériaux, les cristaux liquides, les ferromagnétiques et les ferroélectriques caractérisent par des propriétés diélectriques ou magnétiques modifiables selon l'application d'un champ électrique ou magnétique externe et on peut les utiliser comme un substrat de l'élément rayonnant réalisé [II.5].

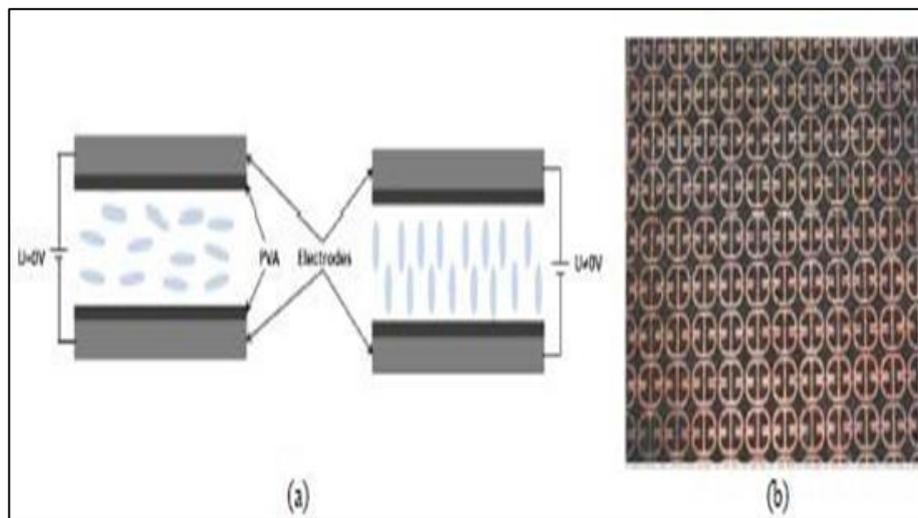


Figure II. 4:(a) Cristal liquide (PVA : Poly VinylAlcohol) et (b) méta matériau [II.5].

➤ *Comparaison entre les techniques de la reconfiguration [II.3] :*

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

Tableau II.1: la différence entre les techniques de reconfiguration [II.3].

II.5 Classifications des antennes reconfigurables

Le classement des antennes reconfigurables se base sur des critères, selon la fonctionnalité on distingue trois grandes catégories :

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

La combinaison de deux fonctionnalités ou plus reste possible (hybride) [II.5].

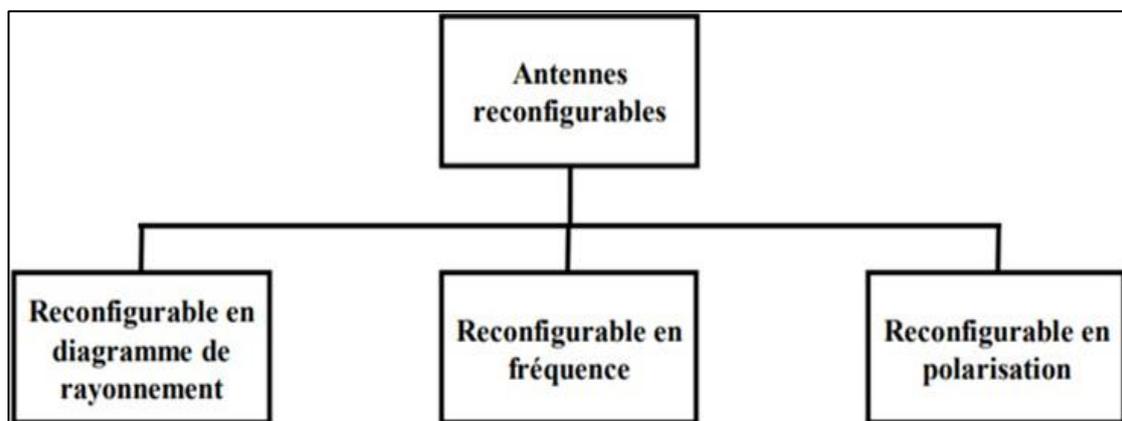


Figure II.5: schéma des types d'antennes reconfigurables[II.5].

II.5.1 La reconfiguration en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence ont attiré beaucoup d'attention en raison de leur capacité de couvrir plusieurs bandes de fréquences afin de réduire considérablement le nombre des antennes nécessaires pour la communication multi-modes. Ces antennes sont appelées aussi les antennes accordables et sont classifiées en deux catégories continue et discrète. Les antennes accordables continues permettent d'assurer le passage entre les bandes et d'offrir la possibilité de varier une ou plusieurs fréquences de résonance de façon continue.

Cependant la deuxième catégorie permet à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes de fréquences.

Pour mieux comprendre la reconfigurabilité en fréquence, on prend l'exemple de l'application WIFI (2,4GHz : Norme 802.11b). Ce service comprend plusieurs canaux de fréquences ISM. Une antenne reconfigurable en fréquence pour l'application WIFI, doit être conçue pour recouvrir tous les canaux précédents par commutation. La bande passante

instantanée doit être suffisamment grande afin de couvrir chaque canal et l'agilité fréquentielle permet de se déplacer d'un canal à un autre [II.6].

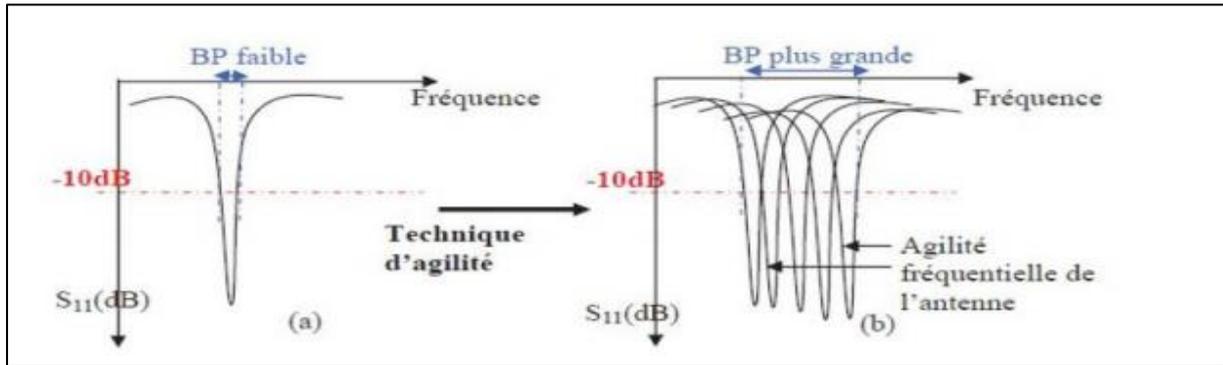


Figure II.6: Illustration de l'agilité fréquentielle[II.6].

II.5.1.1 Principe de la reconfiguration de fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence permettent de régler la fréquence de fonctionnement de façon dynamique, Ils sont particulièrement utiles dans les cas où plusieurs systèmes de communications convergent, parce que les antennes multiples requis peuvent être remplacées par une seule antenne reconfigurable. L'agilité fréquentielle est obtenue en modifiant la longueur de résonance 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'un commutateur (diode PIN, FET ou MEMS). Ces composants actifs exigent des circuits de polarisation (biasing) pour faire la commutation (ON-OFF) [II.6].

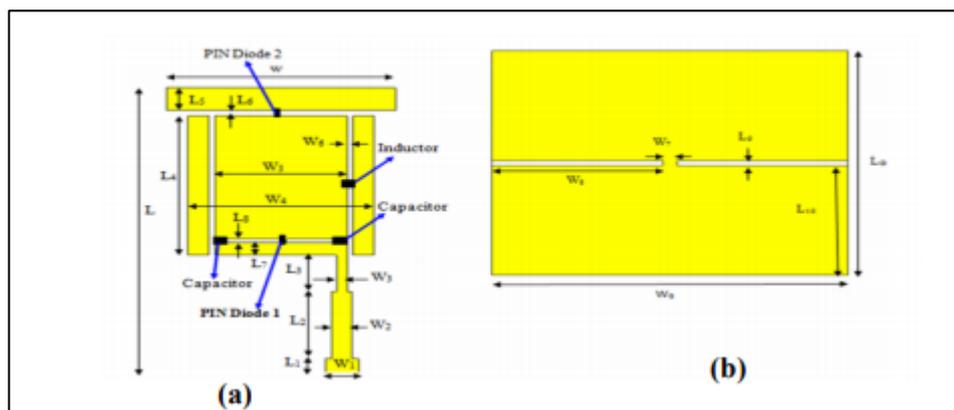


Figure II.7: La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b) [II.6].

II.5.2 La reconfiguration du rayonnement

La reconfigurabilité du rayonnement permet à 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. La reconfigurabilité du rayonnement permet à l'antenne de modifier sa forme, sa direction et son gain afin de favoriser les directions privilégiées. Les réseaux d'antennes sont souvent utilisés pour remplir cette tâche [II.7].

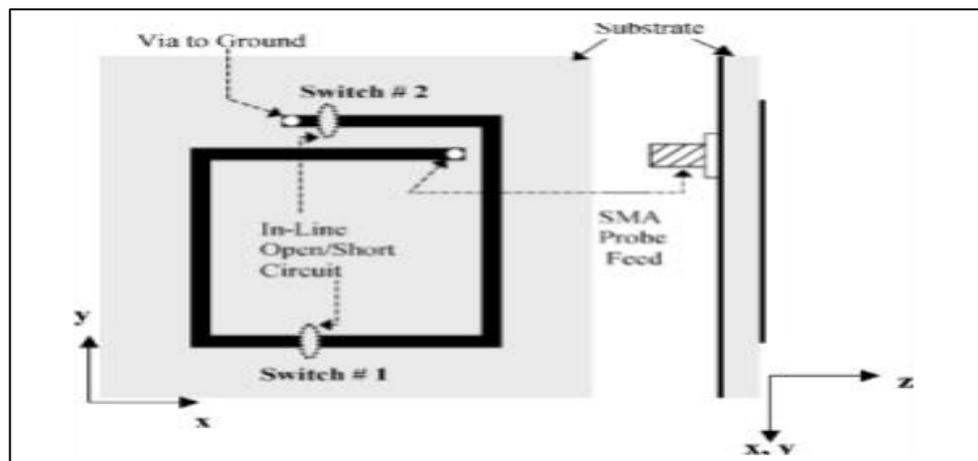


Figure II. 8: La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée [II.7].

II.5.2.1 Principe de reconfiguration

La géométrie doit présenter plusieurs cheminements de courant reconfigurables, mais ceux-ci doivent être similaires, ce qui a pour but de maintenir la fréquence d'opération tout en modifiant la forme du diagramme de rayonnement [II.2].

Mécanismes de reconfiguration

Principalement, le réglage de diagramme de rayonnement s'appuie sur le couplage mutuel entre l'élément principal et ceci parasite. Par conséquent, les changements dans les diagrammes de rayonnement sont obtenus grâce à des changements dans le couplage entre les éléments, qui, à de leur tour, modifier les courants d'alimentation à la fois sur l'élément principal et les éléments parasites [II.8].

II.5.3 La reconfiguration en polarisation

La reconfiguration en polarisation permet de changer la polarisation d'une antenne (horizontale/verticale, gauche ou droit de la polarisation circulaire, etc.). Ce type de configuration permet d'augmenter la fiabilité et la robustesse de la communication (immunité

aux interférences) ainsi que de fournir un degré de liberté supplémentaire (diversité). Afin de maintenir les autres caractéristiques (fréquence), on doit altérer la polarisation de l'antenne en agissant sur la phase et le sens du courant d'alimentation.

On peut changer la polarisation de l'antenne en modifiant l'orientation vectorielle du champ E et cela sans altérer ni les fréquences résonantes, ni la forme du diagramme de rayonnement [II.8].

Mécanismes de reconfiguration en Polarisation

Les mécanismes permettant d'atteindre cette reconfiguration sont, en grande partie, les mêmes que celles décrites pour la reconfigurabilité de fréquence et du rayonnement, mais leurs implémentations sont nécessairement différentes.

Un exemple d'antenne reconfigurable est l'antenne patch avec des fentes commutables, 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 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. On peut atteindre une polarisation différente en utilisant deux fentes orthogonales sur le patch [II.2].

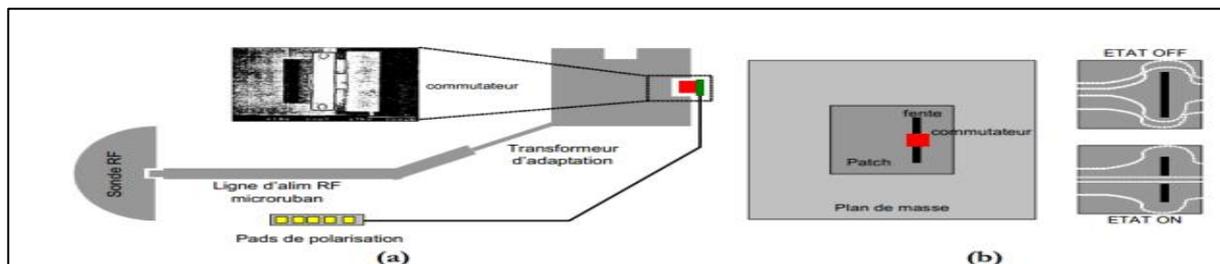


Figure II.9: Antenne patch à bord commuté en (a) et Antenne PASS de l'UCLA en (b) [II.2].

II.5.4 La reconfiguration composée

Ce type de reconfiguration combine entre deux autres types précédents, par exemple, on peut atteindre une reconfigurabilité en fréquence avec la diversité de polarisation en même temps.

Le principe de fonctionnement d'un composé reconfigurable n'est pas différent de celle d'une simple reconfiguration, bien sûr avec un plus de complexité. On dit que l'antenne est de reconfigurabilité composée si elle a la capacité de contrôler plus de caractéristiques à la fois (la fréquence, la bande passante, diagramme de rayonnement et de polarisation) [II.2].

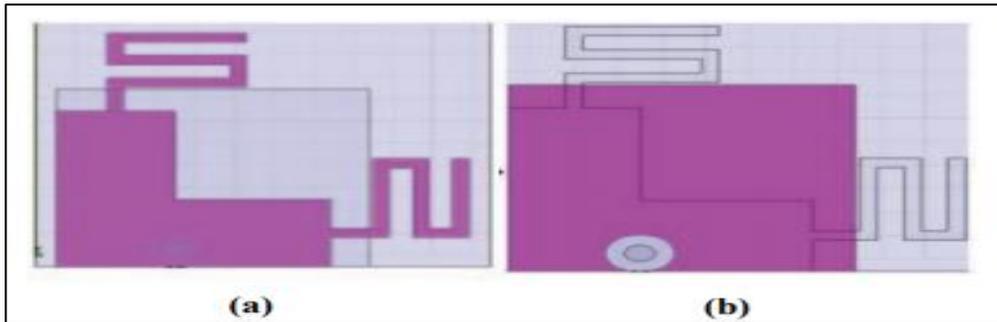


Figure II.10: Géométrie de l'antenne Meander optimisée vue du dessus en (a) et du dessous en (b) [II.2].

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].

II.6.1 Avantages

Parmi ses avantages, on peut citer [II.5] :

- 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 fils 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.

II.6.2 Les inconvénients

Bien que les antennes reconfigurables aient beaucoup d'avantages, elles ont aussi des méfaits. Parmi ses méfaits, on peut citer [II.5] :

- Plus chers que les antennes classiques (introduire des composants actifs)
- Consommation énergétique élevée (composants actifs à polariser continue)

- 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

Ce chapitre s'est intéressé aux antennes reconfigurables dont le développement est en plein essor en raison des nouvelles fonctionnalités qu'elles proposent.

On a abordé dans ce chapitre la partie théorique de l'antenne reconfigurables, les techniques et types de reconfigurations (en fréquence, en polarisation, en diagramme) et à la fin du chapitre on a cité les avantages et inconvénients de ces antennes reconfigurables.

Chapitre III

Simulation & résultats

III.1 Introduction

Dans le cadre de notre projet de fin de cycle, nous allons reconfigurer et simuler une antenne patch rectangulaire, cette antenne va être utilisée pour une application spatiale.

Dans ce chapitre nous avons appliqué quelque notion citée dans les deux chapitres précédents pour la conception d'une antenne imprimée reconfigurable dans la bande de fréquences **Ku**, en présentant l'outil de simulation utilisé qui est le CST Microwave studio. Par la suite, notre travail va être divisé en trois parties :

La première partie est la conception d'une antenne patch rectangulaire dans la bande **Ku** : nous allons calculer les dimensions de cette antenne, la simuler et l'adapter à la fréquence de **11 GHz** après nous présentons les résultats finaux de l'antenne en termes de coefficient de réflexion, bande passante et diagramme de rayonnement en gain et directivité.

La deuxième partie de ce chapitre est consacré pour la reconfiguration fréquentiel de l'antenne simulée avec l'insertion d'une diode varicap. Nous allons représenter les résultats de l'agilité fréquentiel pour avoir à la fin une antenne patch reconfigurable dans la bande Ku.

Et la troisième partie est destinée à la partie réseau ou nous allons procéder à l'augmentation du Gain et la Directivité de l'ensemble du système en visualisant le dépointage du faisceau d'antenne.

Notre chapitre va être finalisé par une conclusion.

III.2 Choix de l'outil de simulation

Pour la conception des composants micro-ondes (les antennes imprimées, les filtres HF...), il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques destinés par exemples le HFSS, ADS Momentum, IE3D, FEKO et CST MICROWAVESTUDIO.

Nous avons utilisé dans notre étude le CST MICROWAVESTUDIO, qui est un outil spécialisé pour la simulation en 3D des composants à haute fréquence basé sur la résolution des équations de MAXWELL suivant la technique des intégrales finies (FIT, Finit Integration Technique).

L'avantage de cet outil est la possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes quelle que soit la technologie utilisée.

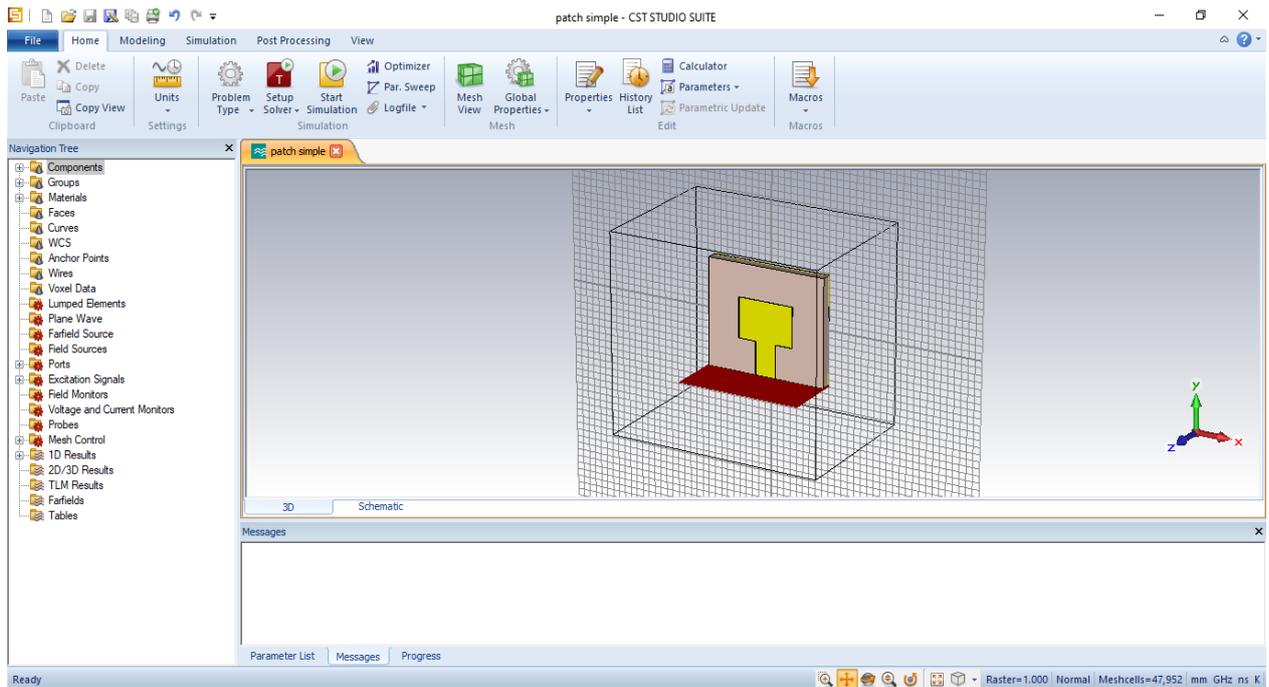


figure III. 1: Une interface graphique du simulateur CST studio 2014.

III.3 Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire

III.3.1 Géométrie de l'antenne

L'antenne proposée est une antenne patch rectangulaire constituée d'un patch rectangulaire ($W \times L$) adaptée par impédance d'entrée (50Ω), avec un substrat ($W_g \times L_g$) de type **FR-4(LOSSY)** d'une permittivité relative $\epsilon_r=4.3$ et d'une épaisseur $h=1.6$ mm

Le plan de masse ($W_g \times L_g$) est de la même matière que le patch (**Copper**) avec la même épaisseur $t=0.035$ mm.

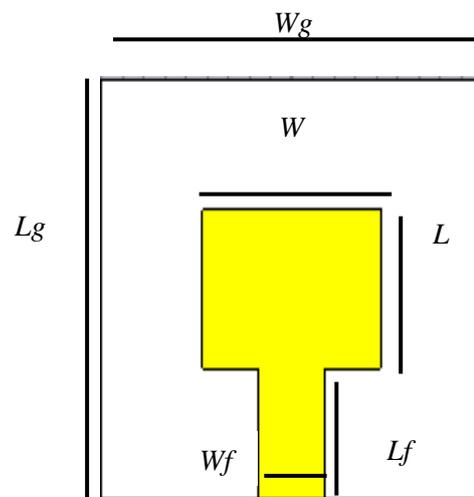


figure III. 2: Structure d'un patch rectangulaire simple.

On fait les calculs des dimensions à partir des équations présentées dans le *tableau III.1* :

Paramètres de l'antenne	Equation
Longueur réel du patch	$L=L_{eff}-2\Delta L$
Longueur effective	$L_{eff}=\frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
L'extension de longueur	$\Delta L=\frac{0.412h(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{w}{h}+0.8\right)}$
Constante diélectrique	$\epsilon_{reff}=\frac{\epsilon_r+1}{2}+\frac{\epsilon_r-1}{2}\left(1+12\frac{h}{w}\right)^{-1/2}$
Largeur du patch	$W=\frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_r+1}}$
Longueur du substrat	$L_g=L+6h$
Largeur du substrat	$W_g=W+6h$
Largeur de la ligne	$W_f=\frac{8e^A}{e^{2A}-2}\times h$ Avec $A=\frac{Z\sqrt{2(\epsilon_r+1)}}{120}+\frac{1}{2}\left(\frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}\right)\times\left(h\ln\frac{\pi}{2}+\frac{1}{\epsilon_r}\times\ln\frac{4}{\pi}\right)$

Tableau III.1: Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.

Les résultats après calculs sont mentionnés dans le *Tableau III.2* :

Wg	lg	W	L	Wf	Lf	h	T
17.97	15.42	8.37	5.82	3.13	7.23	1.6	0.035

Tableau III.2: Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.

III.3.2 Résultat de simulation

III.3.1.1 Paramètre de réflexion S11

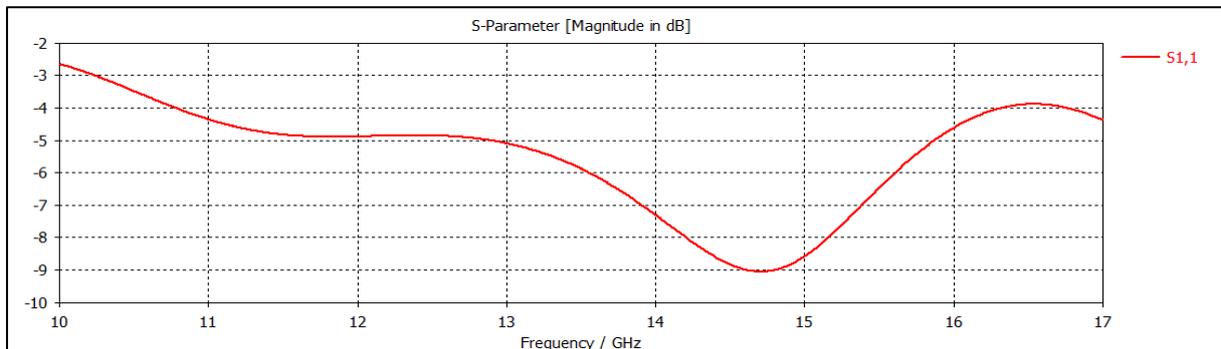


figure III. 3 :coefficient de réflexion S11

La figure III.3 présente le résultat de la simulation du coefficient de réflexion S11 (dB) en fonction de la fréquence, nous voyons bien que l'antenne n'est pas adaptée à la fréquence désirée.

Nous avons obtenu après la simulation un coefficient de réflexion S11 de **-9.055 dB** à la fréquence **14.704 GHz**

III.3.1.2 Adaptation de l'antenne

Dans cette étape, nous essayons d'adapter notre antenne à la fréquence désirée, pour cela nous avons ajouté des encoches de largeur $w_e=0.715mm$ et longueur $l_e=2.175mm$ sur le patch, ainsi qu'une ouverture sur ce dernier (slot) de largeur $w_s=3.77mm$ et longueur $l_s=1.75mm$, comme montré sur la **figure III.4**.

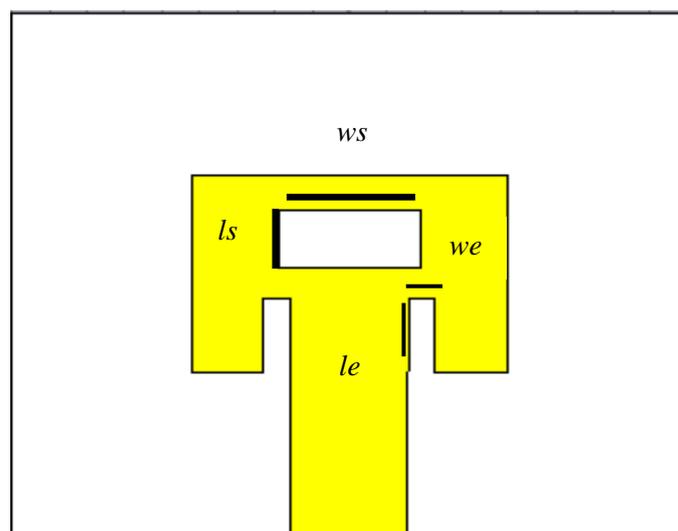


figure III. 4: Forme de l'antenne adaptée.

- Coefficient de réflexion S_{11} :

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de 11 GHz avec un coefficient de réflexion S_{11} égale à -43.88 dB, et une bande passante $BP = 5.10\%$.

$$BP = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_c} \times 100$$

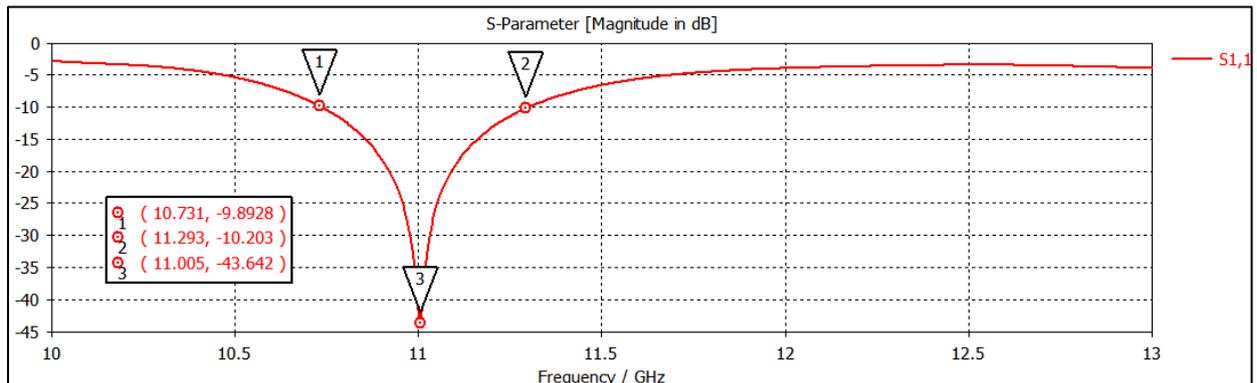


figure III. 5: Le coefficient de réflexion de l'antenne.

- Voltage Standing Wave Ratio (VSWR):

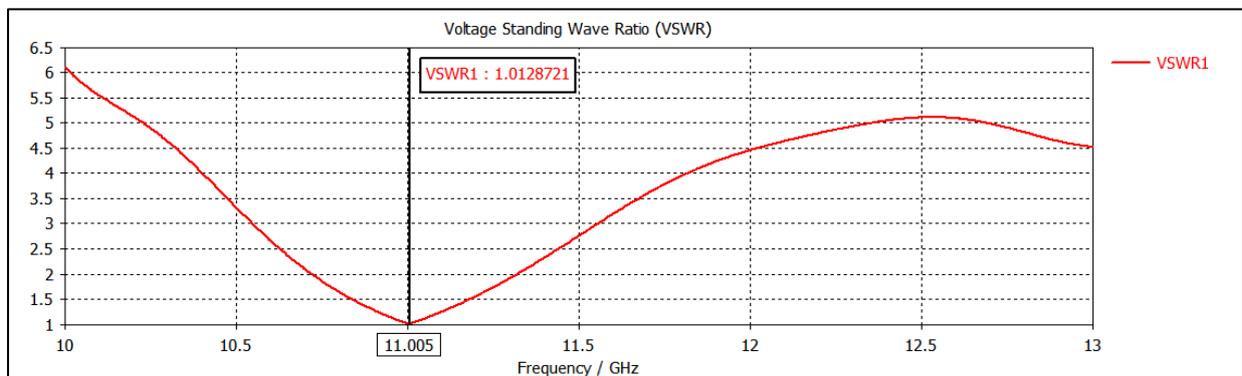


figure III. 6: Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).

Comme montré sur la figure suivante, le Taux d'onde stationnaire est < 2 , ce qui signifie que l'antenne es bien adaptée à la fréquence désirée.

• Le diagramme de rayonnement :

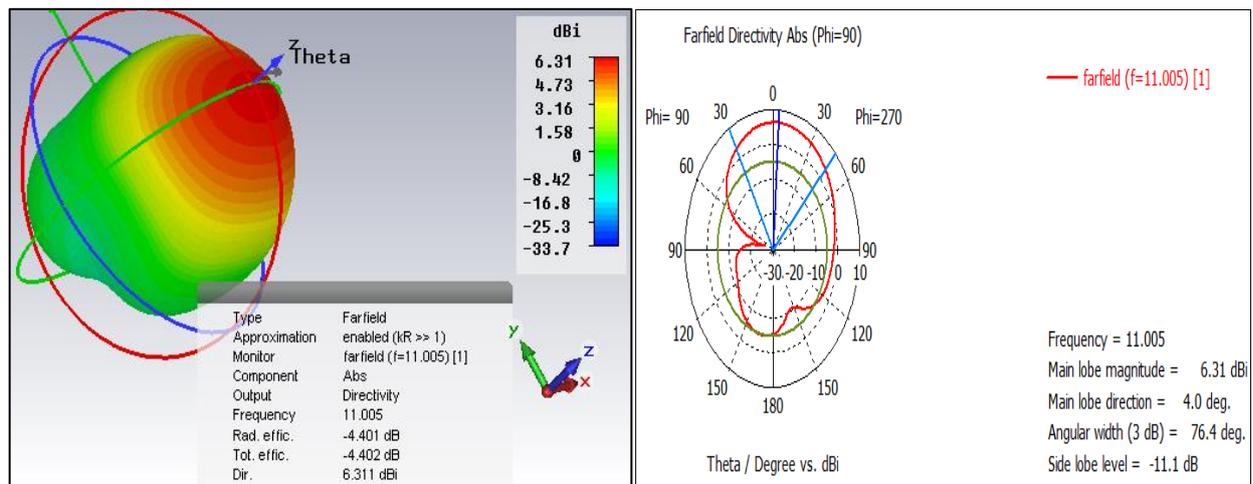


figure III. 7: Directivité de l'antenne à 11GHz en 3D et polaire.

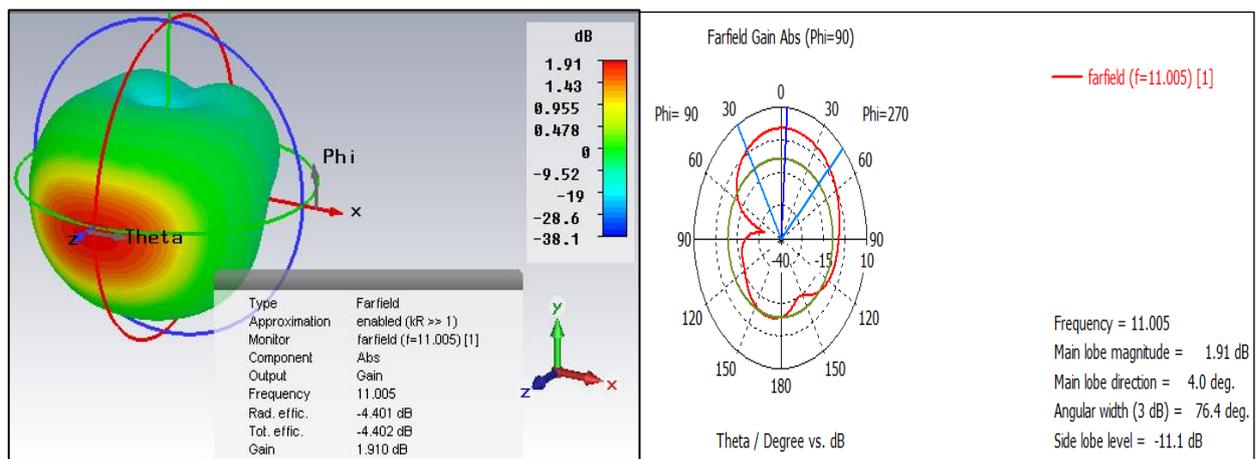


figure III. 8: Gain de l'antenne à 11GHz en 3D et polaire.

La représentation 3D de cette antenne a montré que la directivité est égale à **6.31dB**, avec un gain égal à **1.91dB**.

III.4 Antenne patch reconfigurable sur la bande Ku

Au jour d’Hui, les systèmes de communication sans fils demandent des antennes qui fonctionnent dans plusieurs fréquences, ce type de fonctionnement est réalisé à l'aide des antennes reconfigurables qui permettent de réduire l'utilisation du matériel complexe ainsi le coût du système.

Dans cette section, nous allons réaliser une antenne à reconfiguration fréquentielle avec l'utilisation d'une diode varicap qui a une capacité variable qui se varie dans la *bande Ku* entre $[0.02\text{pF}-0.8\text{pF}]$, avec une résistance de 0.07 Ohm et une inductance de 0.2 nH .

La *figure III.17* montre l'emplacement de la diode varicap sur le patch :

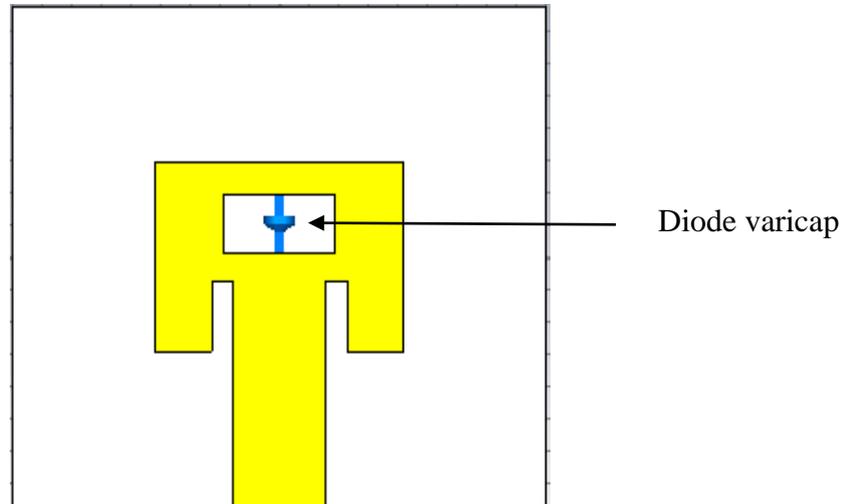


figure III. 9: Antenne rectangulaire avec diode varicap.

Nous voyons bien qu'avec la même structure de l'antenne nous obtenons une variation fréquentielle dans la bande Ku, et cela en variant juste la valeur de la diode Varicap.

• $C=0.02\text{ pF}$:

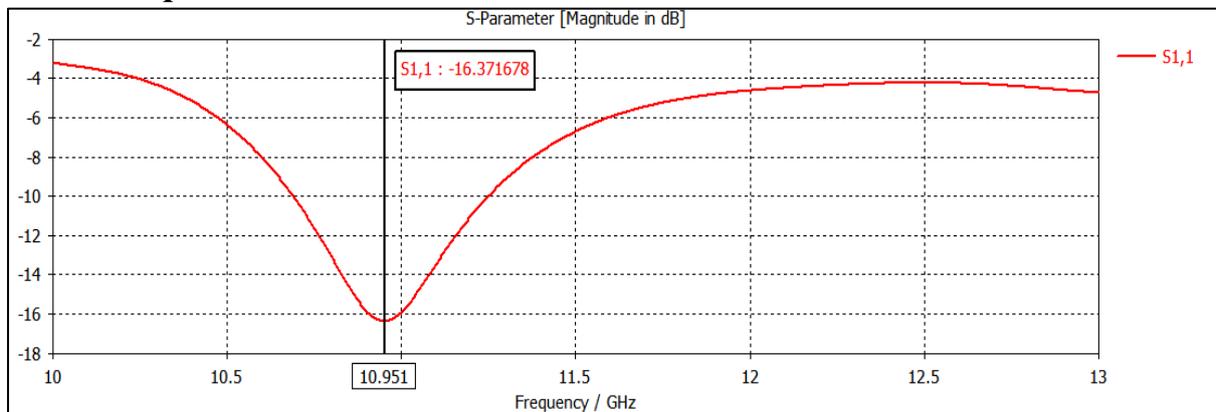


figure III. 10 :Figure III.10: Paramètre S11 pour $C=0.02\text{pF}$.

• $C= 0.05\text{pF}$

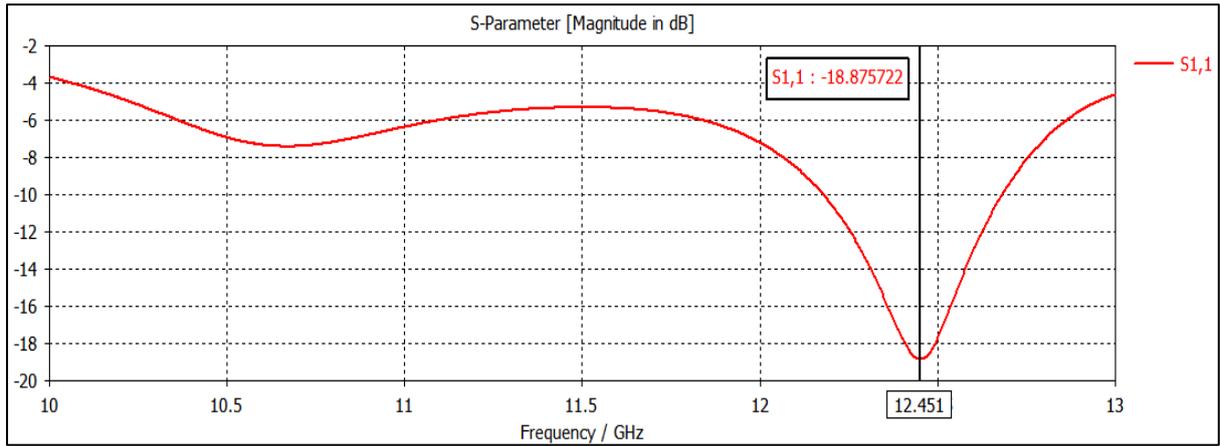


figure III. 11: Figure III.11: Paramètre S11 pour C=0.05pF.

• C= 0.2pF

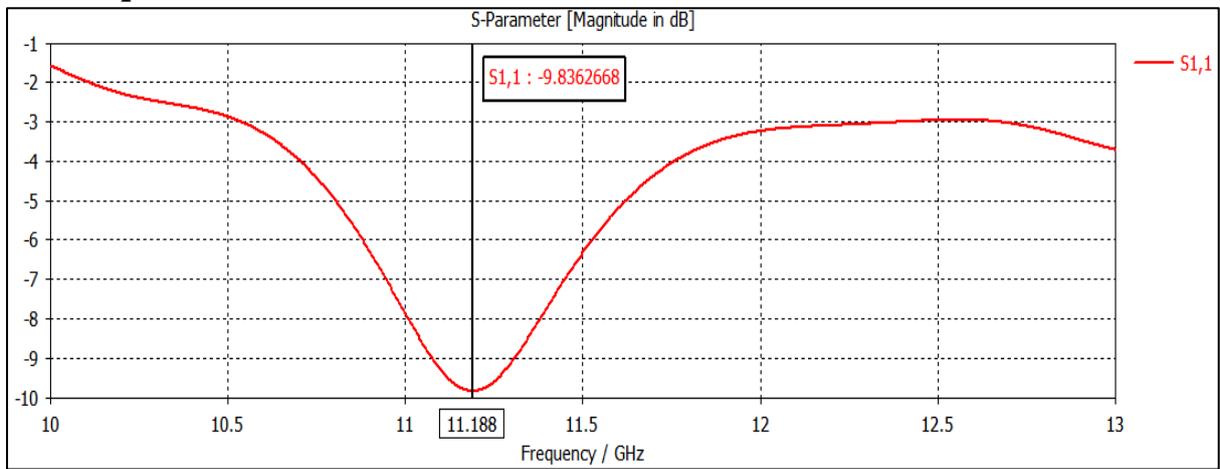


figure III. 12: Paramètre S11 pour C=0.2pF.

• C=0.8pF

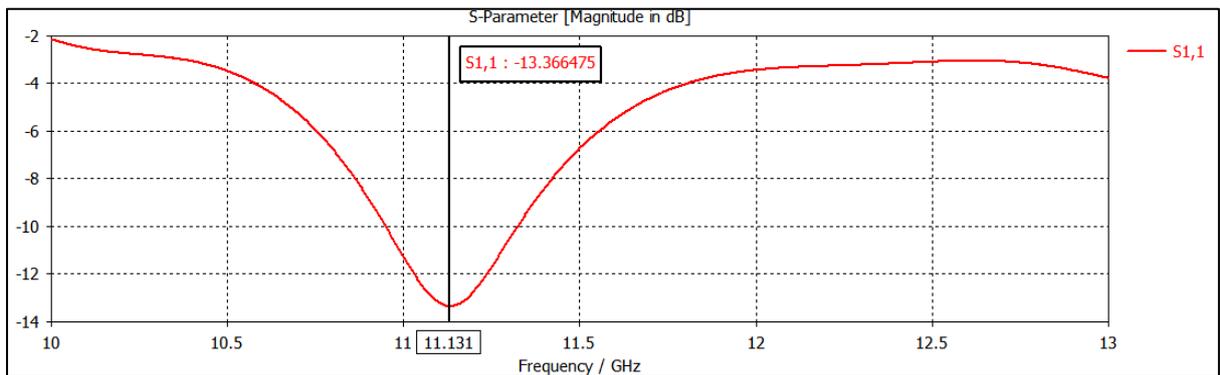
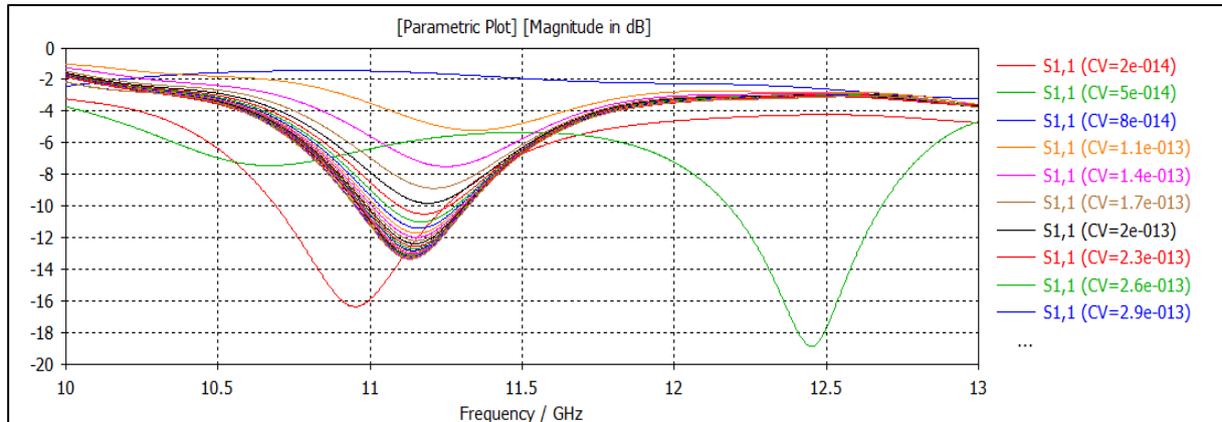


figure III. 13: Paramètre S11 pour C=0.8pF.

figure III. 14: Le paramètre S_{11} pour différentes valeurs de la Capacité.



La **figure III.14** montre la variation de la valeur de la capacité de la diode varicap en fonction de la fréquence

III.5 Augmentation du Gain et de la Directivité de l'antenne

L'augmentation du nombre d'éléments rayonnants permettra d'avoir un gain plus élevé qui se fera au détriment de l'ouverture angulaire du faisceau. De ce fait nous allons faire la simulation de quelques éléments du réseau et voir l'effet sur le gain et la directivité.

Dans notre étude nous utilisons la structure parallèle nous donne des résultats mieux que la structure en série .

III.5.2 Simulation du réseau d'antennes

Pour réaliser notre réseau, nous utilisons les mêmes dimensions citées précédemment avec un espacement de 0.4λ entre deux patches, et en prenant une valeur de la capacité qui est de 0.05pF.

III.5.2.1 Réseau de deux éléments

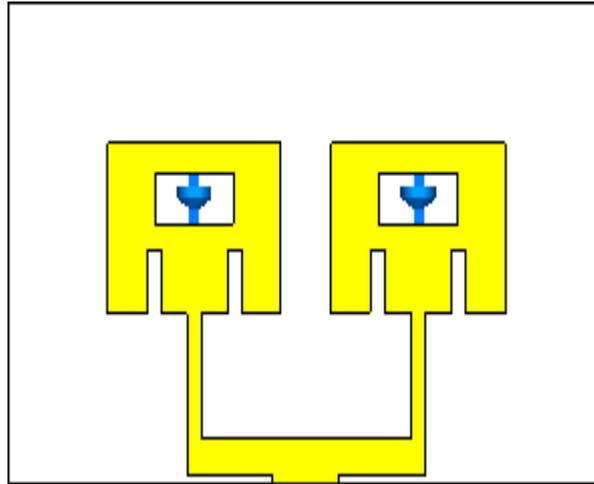


figure III. 15: Structure d'un réseau de deux éléments.

- *Le Coefficient de réflexion :*

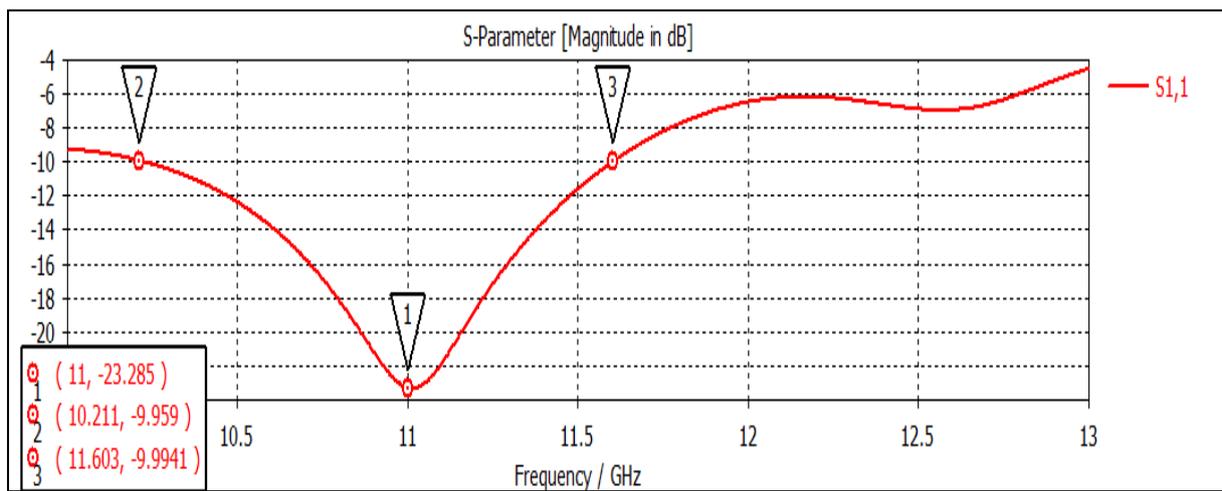


figure III. 16: Le coefficient de réflexion d'un réseau de deux éléments.

Cette antenne (*Figure III.16*) présente un coefficient de réflexion de **-23.28 dB** à la fréquence **11 GHz** avec une bande de fréquence **BP=12.63%**.

- *Le diagramme de rayonnement :*

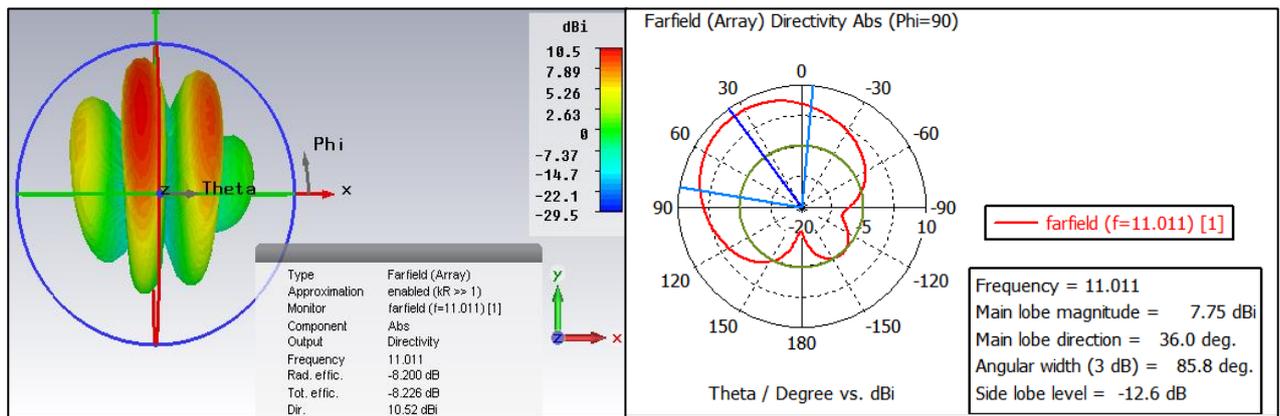


figure III. 17: La directivité d'un réseau de deux éléments polaire et en 3D.

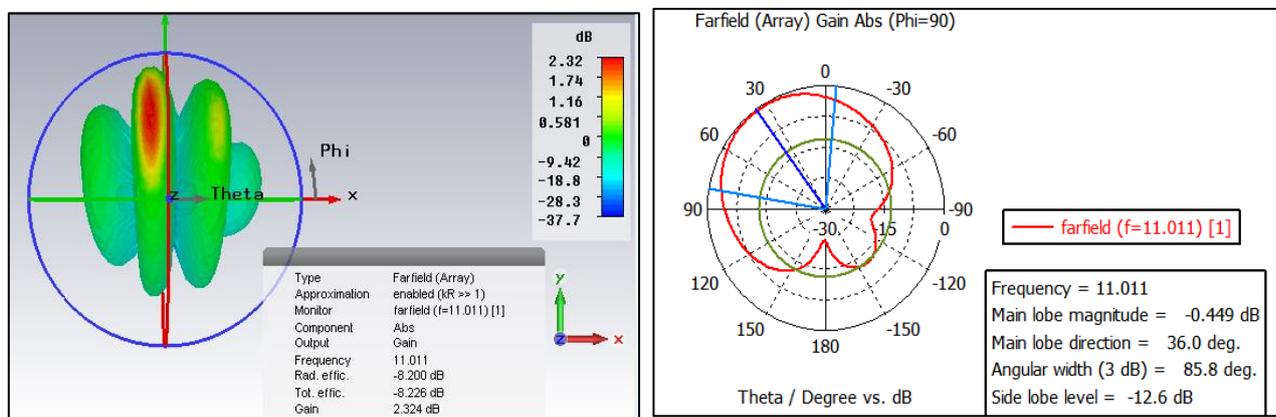


figure III. 18: Le gain d'un réseau de deux éléments polaire et en 3D.

Nous remarquons une augmentation du gain et de la directivité avec deux éléments,

III.5.2.2 Réseau de quatre éléments

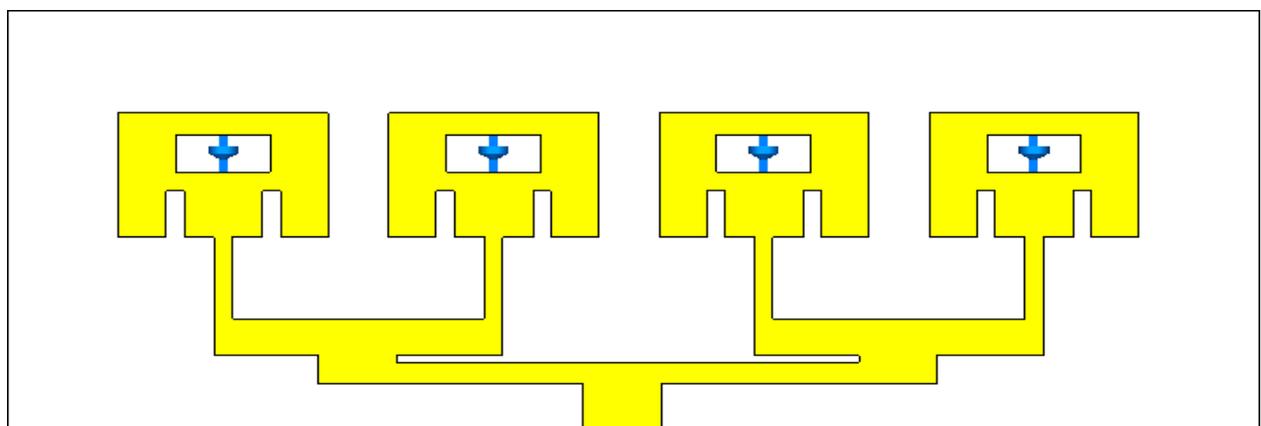


figure III. 19: Structure de réseaux de quatre éléments.

- Coefficient de réflexion S_{11} :

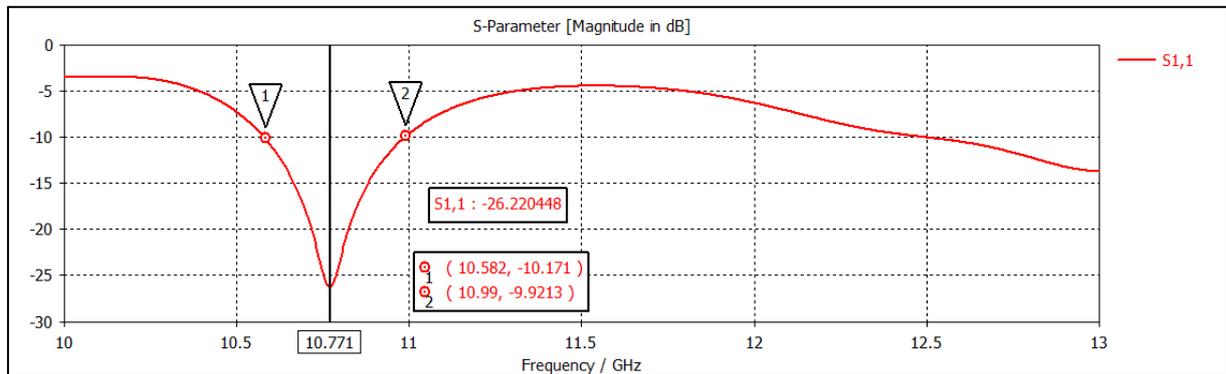


figure III. 20: Coefficient de réflexion S_{11} .

Cette antenne (Figure III.19) présente un coefficient de réflexion de -26.22 dB à la fréquence 10.771 GHz avec une bande de fréquence $BP=3.9\%$.

- Le diagramme de rayonnement :

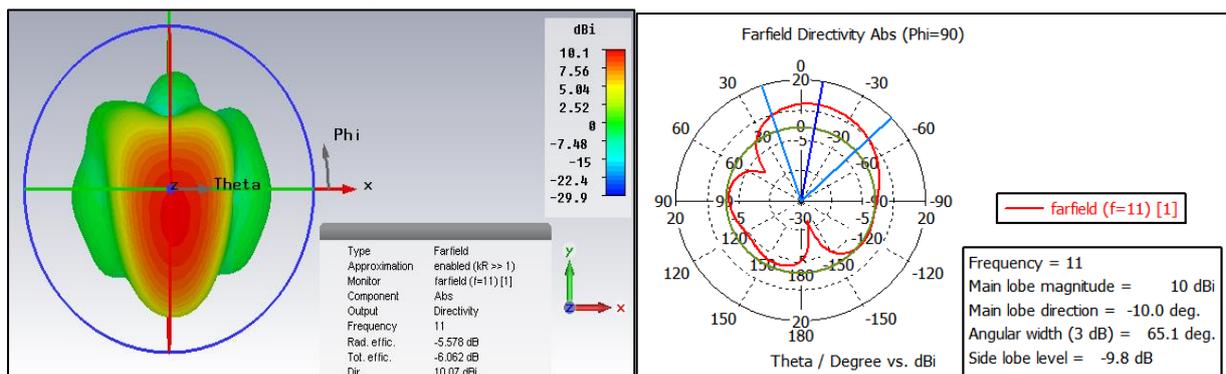


figure III. 21: La directivité d'un réseau de quatre éléments polaire et en 3D.

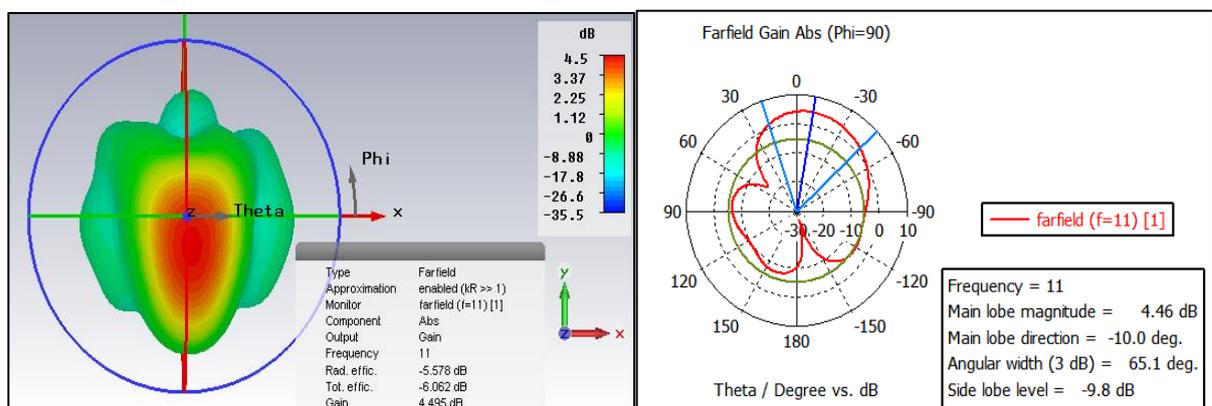


figure III. 22: Le gain d'un réseau de quatre éléments polaire et en 3D.

III.4.2.3 Réseau de huit éléments

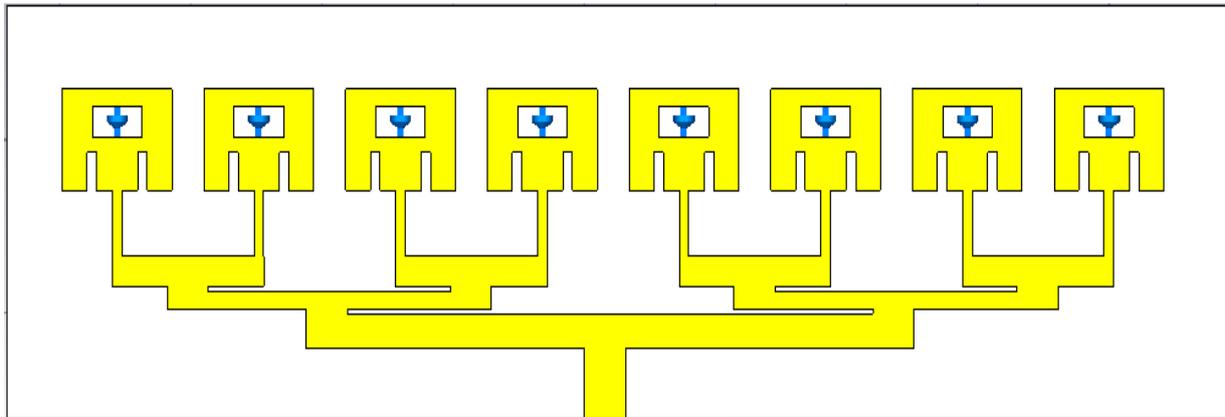


figure III. 23: Structure de réseaux de huit éléments.

- Coefficient de réflexion S_{11} :

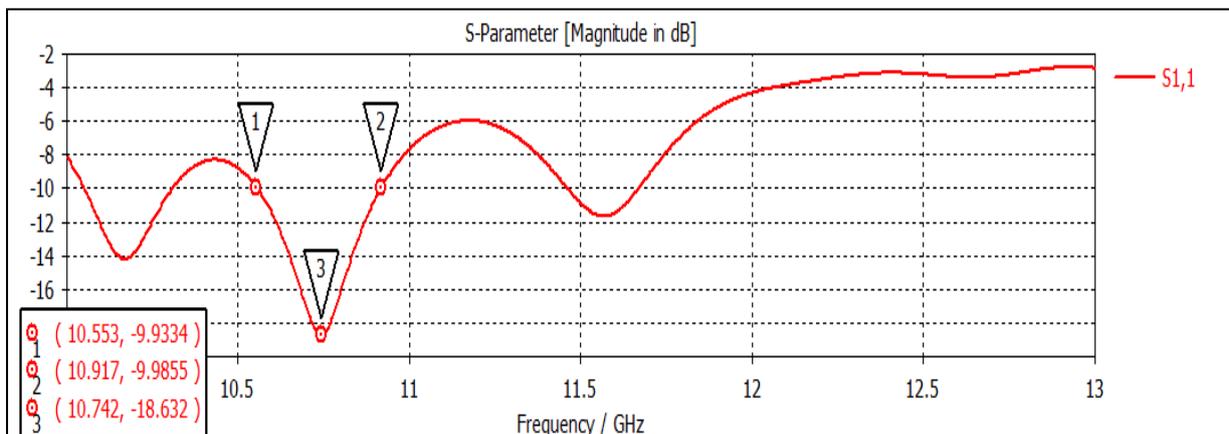


figure III. 24: Coefficient de réflexion S_{11} .

Cette antenne (*Figure III.23*) présente un coefficient de réflexion de **-18.63 dB** à la fréquence **10.74 GHz** avec une bande de fréquence **BP=3.36%**.

- Le diagramme de rayonnement :

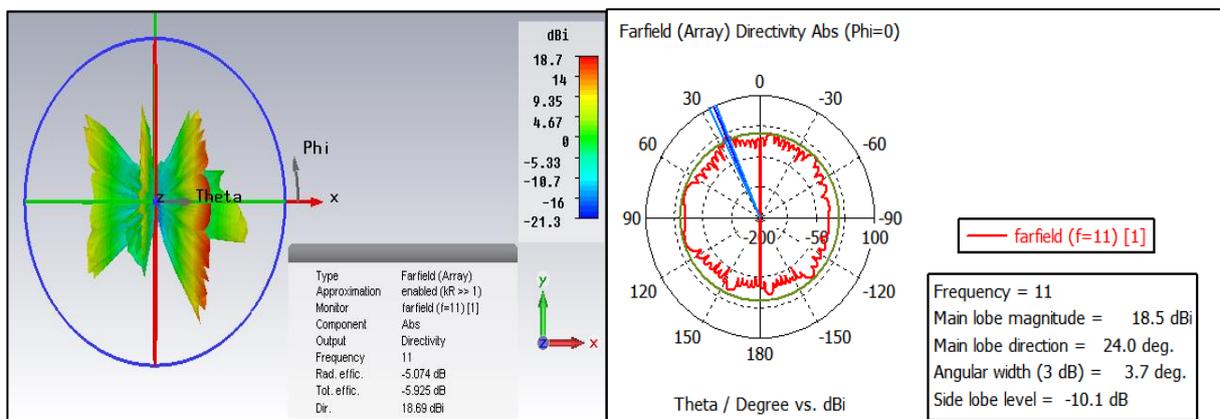


figure III. 25: La directivité d'un réseau de huit éléments polaire et en 3D.

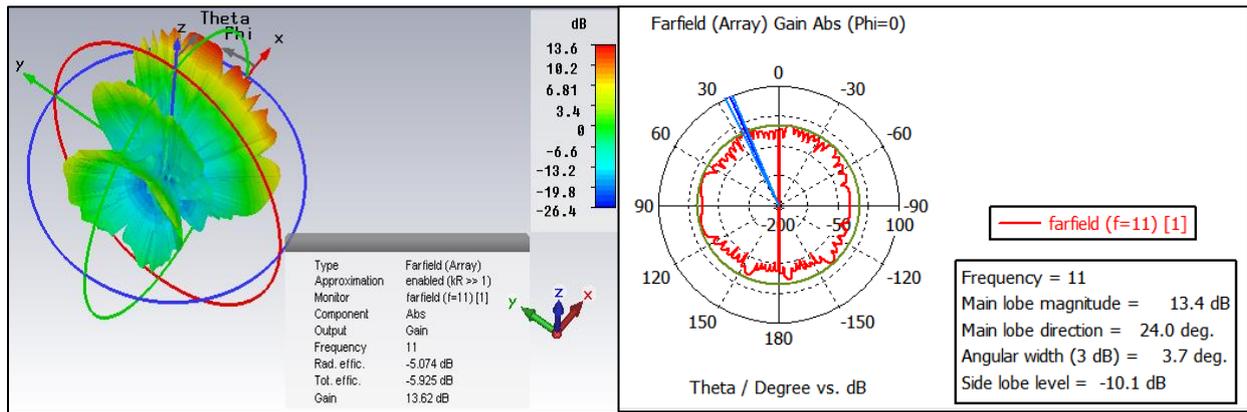


figure III. 26: Le gain d'un réseau de huit éléments polaire et en 3D.

Pour un réseau de 8 éléments, nous obtenons une augmentation du Gain avec une ouverture angulaire plus étroite ce qui est normale pour les réseaux d'antennes, aussi nous avons remarqué une réduction de la Bande passante.

Nous avons lancé l'étude paramétrique de la capacité pour visualiser le changement des fréquences et du coefficient de réflexion à chaque fois la capacité change.

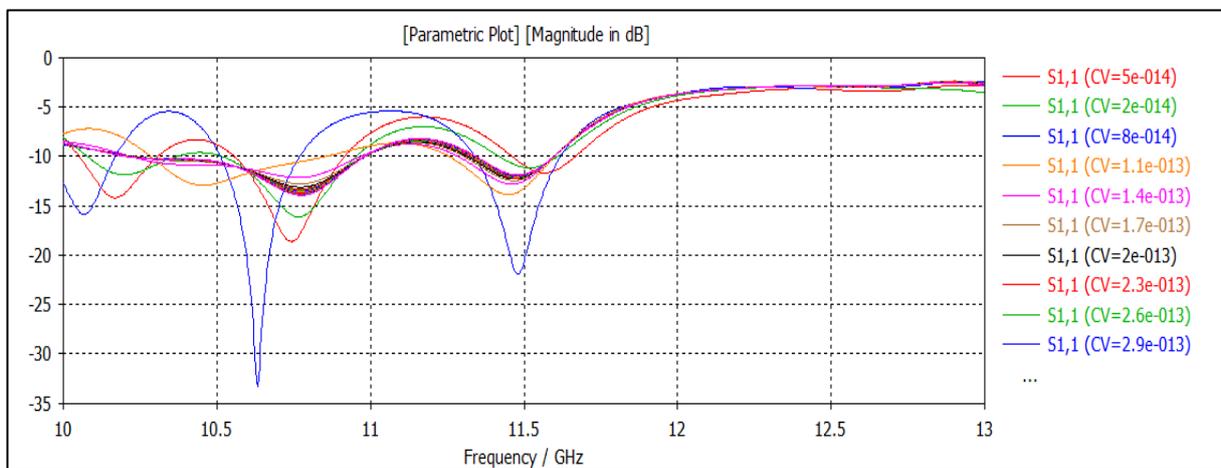


figure III. 27: Le paramètre S11 pour différentes valeurs de la Capacité.

La figure III.27 représente le dépointage de la fréquence pour chaque valeur de la capacité.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a été destiné à la simulation d'une antenne imprimée reconfigurable sur laquelle on a entraîné quelques modifications pour qu'elle soit adaptée à une fréquence de 11 GHz, en insérant une diode Varicap pour introduire la notion de la reconfiguration fréquentielle, afin d'aboutir à notre objectif qui est une antenne imprimée reconfigurable pour des utilisations satellitaires sur la bande Ku.

A l'aide du logiciel CST nous avons réalisé un réseau d'antenne patch reconfigurable de deux éléments, quatre éléments et un autre réseau de huit éléments. Les diagrammes de rayonnement prouvent que cette antenne présente également une reconfigurabilité de diagramme à différentes fréquences pour différentes combinaisons de commutation. Tous les coefficients de réflexion sont inférieurs à -10dB et les gains dépassent 4dB.

L'antenne change sa fréquence dans la bande Ku chaque fois que la capacité de la diode a changée.

L'antenne patch reconfigurable a un grand potentiel pour devenir une partie intégrante du futur système de télécommunication.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons proposé une nouvelle forme d'antenne imprimée reconfigurable capable de modifier son faisceau sur des fréquences dans la bande Ku.

Dans le premier chapitre nous avons donné un aperçu des antennes imprimées, alors que dans le deuxième chapitre, nous avons élaboré les différentes méthodes de reconfiguration d'antennes en choisissant des géométries d'antennes dimensionnées en fonction de l'application envisagée.

Enfin, dans le troisième chapitre nous avons mené des recherches théoriques pour atteindre l'objectif de développer des antennes reconfigurables. Après avoir calculé les paramètres de l'antenne, nous avons étudiée une antenne reconfigurable à partir d'une simple antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban, après l'exécution est faite sur le logiciel CST Microwave studio.

En fait, grâce à la diode varicap, et en changeant la valeur de la capacité de l'antenne nous avons pu modifier la fréquence de résonance de l'antenne, pour obtenir à la fin différentes fréquences de résonance dans la bande Ku (10.7-12.7 GHz).

Comme dernière étape de ce chapitre et pour augmenter le gain nous avons fait une étude de comparaison de réseaux d'antenne à 2,4 et 8 éléments avec diode, et nous avons constaté que plus le nombre d'éléments augmente plus le gain augmente, Cela signifie que nos antennes sont adaptées à diverses applications (utilisation satellite) dans la bande Ku.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [I.1] ZEMAM Youssouf et FOUKIA Imad Eddine, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs » MEMOIRE pour obtenir le diplôme de MASTER de l'université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen – Juin 2017.
- [I.2] Melihi Souhila. Fengal Tine-hinane "Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation"; mémoire de fin d'étude de master en télécommunication, Département d'Automatique de Télécommunication et d'Electronique, Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [I.3] ZITOUNI Ahmed « Maître de Conférences Classe B » « Polycopié de Cours Antennes Destiné aux étudiants de la 1ère Master en Télécommunications » UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, Septembre 2018.
- [I.4] WAHIBA, Abdellaoui et FARIDA, Chergui. Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle de la cavité. 2012. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [I.5] Abla Behloul « Contribution à l'étude des antennes microstrip supraconducteur de forme triangulaire » mémoire de magister en électronique de l'université Mentouri Constantine Avril 2010.
- [I.6] Azzaz Rahmani Salima « Analyse et conception des antennes imprimées multi bandes en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications » Thèse de doctorat présenté à l'Université de Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, 2013.
- [I.6] Stalling, D., Zockler, M., & Hege, H. C. (1997). Fast display of illuminated field lines. IEEE transactions on visualisation and computer graphics, 3(2), 118-128.
- [I.7] Djamel. Bennjima et Tarek. Rahmani "Etude, conception et réalisation d'un réseau d'antennes patches", Institut supérieur des études technologique en communication de Tunis, 2002.
- [I.8] Guennach Mohamed « Conception d'une antenne ''PIFA'' multi bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur présenté à l'Université Sidi Mohamed Ben Abella, 2016.
- [I.9] Anna Niang « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non Foster » Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.

[I.10] CHORFI, Hamid. Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique. 2012. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

[I.11] Nigarura Dieudonné « Etude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log - périodique multicouches » Mémoire de Master présenté à l'Université de Abou Bakr Belkaid de Tlemcen juillet 2012

[I.12] Boussaha Somia « Contribution à l'étude et à la modélisation des antennes Imprimées rectangulaires Applications aux systèmes de communication » Mémoire de Magister présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma, 2012.

[I.13] Airza Karemipour "Contribution à l'étude du couplage entre antennes, application à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antenne et de réseaux d'antennes", thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spécialité communication et électronique, juin 2002.

[I.14] Chouti Leila « Contribution à l'étude d'antennes imprimés rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage » Mémoire pour obtenir le diplôme de magister janvier 2009, université Mentouri-Constantine

[I.15] Hafedh ben Ibrahim Gaha « Analyse et conception des antennes fractales applications à la télécommunication large bande » Thèse de doctorat juillet 2007.

[I.16] Hatem Rmili « Étude, réalisation et caractérisation d'une antenne plaquée en polyaniline fonctionnant à 10 GHz » Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Bordeaux I, novembre 2004.

[I.17] CHAIMA Amel, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN », Master en télécommunication, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2017/2018

[I.18] B.Alioun, "Conception et caractérisation d'une antenne de portable radio mobile", projet de fin d'études d'ingénieurs, Université Mohamed 5, Ecole Mohammadia d'ingénieurs, Rabat, Maroc 2001

[I.19] Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne patch microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdallah (Fès) MAROC - Master télécoms hyperfréquence 2011.

[I.20] www.techniques-ingenieur.fr/base.../antennes.../antennes-imprimées-e3310/

[I.21] Colinas, J. (2002). Etude et amélioration des performances d'une méthode de mesure en champ proche : La méthode des courants magnétiques équivalents. [II.1] C. G.

Christodoulou, et al., « Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications », Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, Jul. 2012.

[II.2] CHAIMA Amel « Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, Génie électrique, 2018.

[II.3] 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.4] NACHOUANE, Hamza. 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. 2017. Thèse de doctorat. Institut National des Postes et Télécommunications.

[II.5] ADJILA FATIMA « ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE FRACTALE RECONFIGURABLE EN FR EQUENCE », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, systèmes des télécommunications, 2019.

[II.6] B. Allen, et al., « Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging » London, UK: Wiley, 2006.

[II.7] NGUYEN, Trong Duc. Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive. 2012. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.

[II.8] J. T. Bernhard, "Reconfigurable Antennas". San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2007.

