

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
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 Témouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Technologie
Département de Génie Électrique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention Du diplôme de master Académique En Télécommunication

Domaine : Télécommunication

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseau et télécommunication

Thème

Simulation d'une antenne imprimée agile pour les applications satellitaires

Présenté par :

- 1) Melle. BENZINA Marwa
- 2) Melle. CHOUIREF Jahida

Devant le jury composé de :

Dr BENTAIB Samia	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent) Présidente
Dr Kourdi Zakaria	MRB	CDS (Oran) Examineur
Dr MOULESSEHOUL Wassila	M CB	UAT.B.B (Ain Témouchent) Encadrante
Dr RABAH Amine	MRA	CDS (Oran) Co-Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement :

Notre parfaite gratitude et nos remerciements à ALLAH au premier lieu, le plus puissant qui nous a donné le courage et la force pour aboutir à notre objectif.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadrante «MOULESSEHOUL Wassila » pour son soutien, conseils judicieux et sa grande bienveillance durant l'élaboration de ce projet et pour avoir bénéficié de ses compétences scientifiques et aussi pour sa disponibilité

Nous saisissons également cette opportunité pour remercier Monsieur « RABAH Amine »Et

Le centre de développement satellitaire d'Oran pour la réception de documentation et l'accompagnement tout au long de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury Dr BENTAIB et Dr

KOURDI d'avoir accepté de siéger et de juger notre travail. Nous les remercions aussi pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire.

Finalement, nous remercions tous les enseignants qui ont participé à notre formation de Télécommunications.

Merci à tous...

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

La source de mes efforts, mon cher papa ALLAH yerahmou.

*Aucune dédicace ne serait exprimée l'amour, l'estime et le respect que j'ai
toujours eu pour toi.*

*Ma mère qui m'a apporté son appui durant toutes mes années d'étude, Pour son
sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité*

A mes chers frères spécialement Isshak

A mon neveu Adem et ma nièce Léa.

*A ma chère amie : Amel, et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans
la réalisation de ce travail.*

Marwa BENZINA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers Parents, Pour tous vos sacrifices pour moi, nul mot ne saura
exprimer mon amour envers vous. Que Dieu vous protège et vous accorde une
longue vie*

À mes frères et mes sœurs,

Que Dieu vous garde, Je vous aime et je vous souhaite une vie pleine de succès.

*A ma très chère nièce Nessrine que Dieu te garde pour nous et à toutes les
personnes qui m'ont prodigué des encouragements.*

Et à tous ceux qui me connaissent.

Jahida CHOUIREF

Résumé

Le but de ce travail est de développer une antenne imprimée agile pour des applications satellitaires qui fonctionne dans la bande Ku [10.7-12.7] GHZ, cette agilité est connu sous le nom de reconfiguration, qui dans le cas de notre travail est le fait qu'elle change d'une façon dynamique soit la fréquence, ou le diagramme de rayonnement sans changer la structure de celle ci. La reconfiguration est effectuée par l'ajout d'une diode varicap, et une mise en réseau à l'élément rayonnant.

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

Abstract

The aim goal of this work is to develop an agile printed antenna for satellite applications that operates in the Ku band [10.7-12.7] GHZ, this agility is known as reconfiguration, which in the case of our work is the fact that it dynamically changes either the frequency or the radiation pattern without changing its structure. Reconfiguration is performed by adding a varicap diode, and networking to the radiating element.

Keywords: reconfigurable antennas, frequency, radiation pattern, antenna printed, varicap diode.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو تطوير هوائي مطبوع لتطبيقات الأقمار الصناعية التي تعمل في نطاق Ku [10.7-12.7] GHZ ، تُعرف هذه السرعة باسم إعادة التشكيل ، والتي في حالة عملنا تتغير ديناميكياً من حيث التردد أو نمط الإشعاع دون تغيير بنيته. يتم إجراء إعادة التكوين عن طريق إضافة الصمام الثنائي varicap ، والتواصل مع العنصر المشع.
الكلمات المفتاحية: الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل ، التردد ، مخطط الإشعاع ، الهوائيات المطبوعة ، ديود varicap.

Liste de figures

Chapitre I :

Figure I.1 : exemple d'antenne imprimée.....	2
Figure I.2 : Divers types d'éléments rayonnants.....	4
Figure I.3 : Rayonnement d'une antenne directive.....	5
Figure I.4 : Mécanisme de rayonnement.....	7
Figure I.5 : La bande passante	8
Figure I.6 Alimentation par ligne microruban.....	9
Figure I.7 Alimentation par sonde coaxial.....	9
Figure I.8 :Alimentation par ligne coplanaire	10
Figure I.9 : Alimentation au travers une ouverture au plan de masse.....	11
Figure I.10 : Adaptation par quart à adaptation quart d'onde.....	11
Figure I.11 : stub en circuit ouvert.....	12
Figure I.12 : Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches de Longueur©.....	12

Chapitre II :

Figure II.1 : Le circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF.....	18
Figure II.2 : Diode varicap.....	19
Figure II.3 :(a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS (b) Photographie de l'antenne.....	19
Figure II.4 :(a) Cristal liquide (PVA : Poly VinylAlcohol) et (b) méta matériau.....	20
Figure II.5 : schéma des types d'antennes reconfigurables.....	21
Figure II.6 : Illustration de l'agilité fréquentielle.....	22
Figure II.7 : La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue Dessus (a) et du dessous (b).....	22
Figure II.8 : Réseau d'éléments déphasés pointant dans la direction θ_0 [12].....	23
Figure II.9 : Antenne patch reconfigurable avec quatre états de polarisation [15].....	24

Chapitre III :

Figure III.1 : outil de simulation CST.....	28
Figure III.2 : Structure d'un patch rectangulaire simple.....	29
Figure III.3 : Coefficient de réflexion S11 obtenu.	31
Figure III.4 : Antenne imprimée avec ligne quart d'onde.	31
Figure III.5 : Forme d'antenne adaptée.....	32

Figure III.6 : Forme de l'antenne adaptée.....	32
Figure III.7 : Gain de l'antenne à 11.7 GHz en polaire.....	33
Figure III.8 Gain de l'antenne à 11.7 GHz en 3D.....	33
Figure III.9 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en polaire.....	34
Figure III.10 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en 3D.....	34
Figure III.11 Géométrie de l'antenne octaèdre.....	35
Figure III.12 : Le coefficient de réflexion de l'antenne.....	35
Figure III.13 : Le Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)	36
Figure III.14 Gain de l'antenne à 11.7 GHz en polaire.....	36
Figure III.15 : Gain de l'antenne à 11.7 GHz en 3D.....	37
Figure III.16 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en polaire.....	37
Figure III.17 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en 3D.....	37
Figure III.18 : Antenne patch avec diode varicap.....	38
Figure III.19 : Le paramètre S11 pour différentes valeurs de la Capacité.....	38
Figure III.20 : Réseau de 2 éléments.	39
Figure III.21 : Le paramètre S11 pour le réseau de 2 éléments.....	40
Figure III.22 : Gain de 2 éléments à 11.7 GHz en polaire.....	40
Figure III.23 : Gain de 2 éléments à 11.7 GHz en 3D.....	40
Figure III.24 : directivité de 2 éléments à 11.7 GHz en polaire.....	41
Figure III.25 directivité de 2 éléments à 11.7 GHz en 3D.....	41
Figure III.26 : Réseau de 4 éléments.....	42
Figure III.27 : Paramètre S11 pour le réseau de 4 éléments.....	42
Figure III.28 : Gain de 4 éléments à 11.7 GHz en polaire.....	43
Figure III.29 : Gain de 4 éléments à 11.7 GHz en 3D.....	43
Figure III.30 : Directivité de 4 éléments à 11.7 GHz en polaire	44
Figure III.31 : Directivité de 4 éléments à 11.7 GHz en 3D.....	44
Figure III.32 : Directivité de 4 éléments à 11.7 GHz en 3D.....	44
Figure A : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle.....	47

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les équations paramétriques d'un patch rectangulaire.	30
Tableau III.2 : Les dimensions (en mm) de l'antenne patch rectangulaire proposée.....	30
Tableau III .3 : les paramètres S11 pour différente valeur de la capacité.....	40
Tableau III.4 : comparaison des résultats.....	45

Liste des acronymes

BP : Bande passante.

dB : Le décibel.

dBi : Le décibel isotopique.

CST: Computer simulation technology

DCS: Digital Cellular System.

2D :2 dimensions.

3D :3 dimensions.

FET: Field Effect Transistor.

ISM : Industriel, scientifique et médical.

GHz : Gigahertz.

GPS: Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile Communications

MEMS: System Micro Electromécanique

MMIC: Microwavemonolithicintegrated circuit.

nH : **Nano** Henry

PF: Pico Farad.

PIN :positive intrinsicnegative

PVA:Poly VinylAlcohol.

ROS : Le rapport d'ondes stationnaires..

UCLA:University of Californiaat Los Angeles.

UMTS:Universal Mobile Telecommunications System.

WIFI: Wireless Fidelity.

WLAN:Wireless Local Area Network.

Table des matières

Remerciement :

Dédicace

Résumé

Liste de figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale

Chapitre I Généralités sur les Antennes imprimées

I.1-Introduction :	2
I.2-Historique des antennes imprimées :	2
I.3-Les antennes Imprimées :	2
I.3.1-Le plan de masse :	3
I.3.2 Le substrat diélectrique :	3
I.3.3L'élément rayonnant (patch) :	3
I.4- Caractéristiques des antennes imprimées :	4
I.4.1 Le rendement :	4
I.4.2 La directivité :	4
I.4.3 Le gain :	5
I.4.4 Le coefficient de réflexion S11 :	6
I.4.5 Mécanisme de rayonnement : [3].	6
I.4.6Impédance d'entrée :	7
I.4.7 La bande passante :	8
I.5-Les techniques d'alimentations :	8
I.5.1 Alimentation par ligne microruban :	8
I.5.2 Alimentation par sonde coaxial :	9
I.5.3 Alimentation par ligne coplanaire :	9
I.5.4 Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse :	10
I.6-Techniques d'adaptation des antennes imprimées :	11
I.6.1 Adaptation par ligne quart d'onde :	11
I.6.2 Adaptation par stub	12
I.6.3 Adaptation avec encoche :	12
I.7 - Avantages et inconvénients des antennes imprimées	13

I.8- Les applications des antennes imprimées.....	13
I.9- Conclusion.....	14
<i>Référence</i> :	15
<i>Chapitre II Les Antennes agiles</i>	
II.1-Introduction :	17
II.2- Les Antennes imprimées agiles :.....	17
II.3- Les techniques d'agilités (reconfigurations) :.....	18
II.3.1 Les diodes PIN :.....	18
II.3.2 Les diodes varicaps :	18
II.3.3 LES MEMS (Système Micro Electromécanique) :.....	19
II.3.4 Utilisation des transistors FET.....	20
II.3.5 Commutateur optique :.....	20
II.3.6 Matériaux agiles :	20
II.4- Classifications des antennes reconfigurables :	20
II.5- Types de reconfigurabilités :.....	21
II .5.1 Reconfiguration fréquentielle :	21
II.5.2Reconfiguration du diagramme de rayonnement.....	22
II.5.3 Reconfiguration de la polarisation :	24
II.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable :.....	25
II.7 Conclusion :	26
<i>Référence</i> :	27
<i>Chapitre III Simulation & résultats</i>	
III.1 Introduction	28
III.2 Choix de l'outil de simulation.....	28
<i>III.3 Conception et simulation de l'antenne patch rectangulaire</i>	29
<i>III.3.1.Géométrie de l'antenne</i>	29
III.3.2 Résultat de simulation	30
III.3.2.1 Paramètre de réflexion S11 :	30
<i>III.3.2.2 Adaptation de l'antenne</i> :	31
III.4 Conception d'une nouvelle structure d'antenne imprimée.....	35
III.4.1 Résultat de simulation	36
III.5 Antenne imprimée agile sur la bande Ku :.....	38
III.5.1. Agilité en fréquence	39
III.5.2. Agilité en diagramme de rayonnement	40
<i>III.6 Conclusion</i> :	47

Conclusion générale 46
Anexe A.....47

Introduction
Générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les antennes sont présents dans tous les systèmes de communications, elles sont utilisées pour le GPS, le positionnement à distance, le radar et nos besoins quotidiens. elles se présentent sous plusieurs formes en fonction de leur utilisation.

La technologie moderne s'oriente vers la miniaturisation de ces antennes tout en essayant de maintenir des performances optimales. Conçue pour répondre à ces besoins, l'antenne imprimée est un conducteur métallique de forme spéciale placé sur un substrat terminé par un plan de masse ; ses caractéristiques miniatures permettent une intégration facile dans système d'envoi et de réception.

Ce travail vise à étudier et concevoir l'antenne reconfigurable. Se pose alors le problème de la conception d'une antenne qui puisse s'adapter à ces conditions de changer en ajustant la fréquence de fonctionnement dans la bande souhaitée qui est destinée pour des applications satellitaire , et aussi le diagramme de rayonnement. Afin d'atteindre cet objectif.

Le travail est divisé en trois chapitres, dans lesquels nous expliquons brièvement dans les lignes suivantes :

- Le premier chapitre est consacré à des descriptions théoriques sur les antennes imprimées. Nous couvrirons la structure, les Caractéristiques des antennes imprimées et les différentes techniques d'alimentation. et on clôture le chapitre par un bref aperçu des domaines d'application et par une conclusion générale et une bibliographie qui comprend les références relatives à notre travail.
- Dans le chapitre 2, nous définirons d'abord l'antenne imprimée agile et les techniques d'agilités (reconfigurations), ensuite, nous présenterons des méthodes pour obtenir l'agilité de la fréquence, du diagramme de rayonnement et de la polarisation
- Le troisième chapitre présente les étapes à suivre pour concevoir et simuler une antenne patch reconfigurable à l'aide des outils logiciels CST Microwave Studio. Ensuite, les résultats de simulations sont illustrés avec des interprétations.
- Enfin, ce document se termine par une conclusion générale et une bibliographie qui comprend les références relatives à notre travail.

Chapitre I

*Généralités sur les
antennes imprimées*

I.1-Introduction :

Le développement des communications spatiales, du contrôle et de la commande à distance, révélant le besoin croissant de mettre en place des équipements hyperfréquences et d'utiliser des techniques simples et économiques, peu coûteuses et peu encombrantes, ce système hyperfréquence à structure microruban est les antennes imprimées les plus couramment utilisées (Antenne plaque ou antenne patch).

Ce chapitre sera consacré à la description de l'antenne imprimée, ses caractéristiques, ses techniques d'alimentations. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

I.2-Historique des antennes imprimées :

Les antennes micro ruban présentent une révolution dans le domaine de la télécommunication sans fils, elles sont largement utilisées dans les communications mobiles et personnelles et trouvent plusieurs applications dans une large gamme de fréquence grâce à leurs petites tailles, simplicité, facilité de fabrication, de mise en œuvre et leurs faibles couts, leurs concept est apparu dans les années 1950, mais il a fallu patienter qu'au début des années 1970 pour passer aux réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires, et les années 1990 pour un véritable passage au stade industriel [1]

I.3-Les antennes Imprimées :

L'antenne imprimée encore appelé patch et un type récent d'antenne dans le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est utilisée pour la conception des systèmes GPS, GSM, wifi. [2].

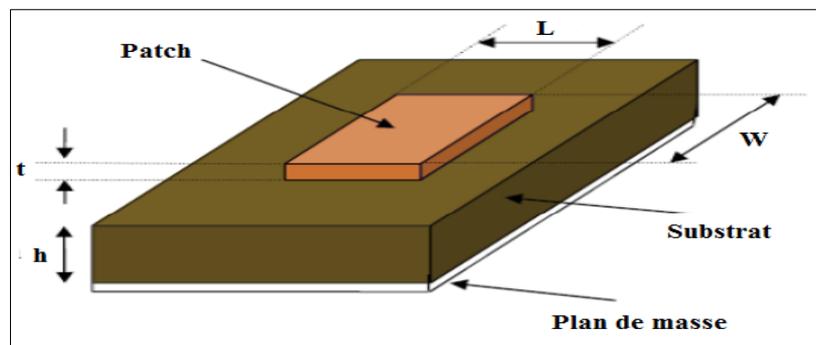


Figure I.1 : Exemple d'une antenne imprimée

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 [3].

I.3.1-Le plan de masse :

C'est une surface conductrice en cuivre recouvrant la partie inférieure du Substrat. Elle permet de faire rayonner l'énergie vers l'espace libre à travers ce dernier, il est théoriquement de dimensions infinies, mais en pratique de l'ordre de 3 à 4 λ [4].

I.3.2-Le substrat diélectrique :

Est une surface isolante d'épaisseur généralement inférieure à la longueur d'onde. Et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$). Parfois, pour obtenir une grande efficacité et une large bande passante il est préférable d'utiliser un substrat diélectrique de grande épaisseur et de faible permittivité [5].

I.3.3-L'élément rayonnant (patch) :

Est une plaque métallique conductrice de forme quelconque appelée l'élément rayonnant, déposé sur la face supérieure du Substrat diélectrique. Les formes régulières (rectangle, cercle, triangle, Anneaux) Sont les plus couramment utilisées à cause de leur facilité d'analyse [5].

Les divers types d'éléments rayonnants les plus simples sont indiqués sur la figure suivante :

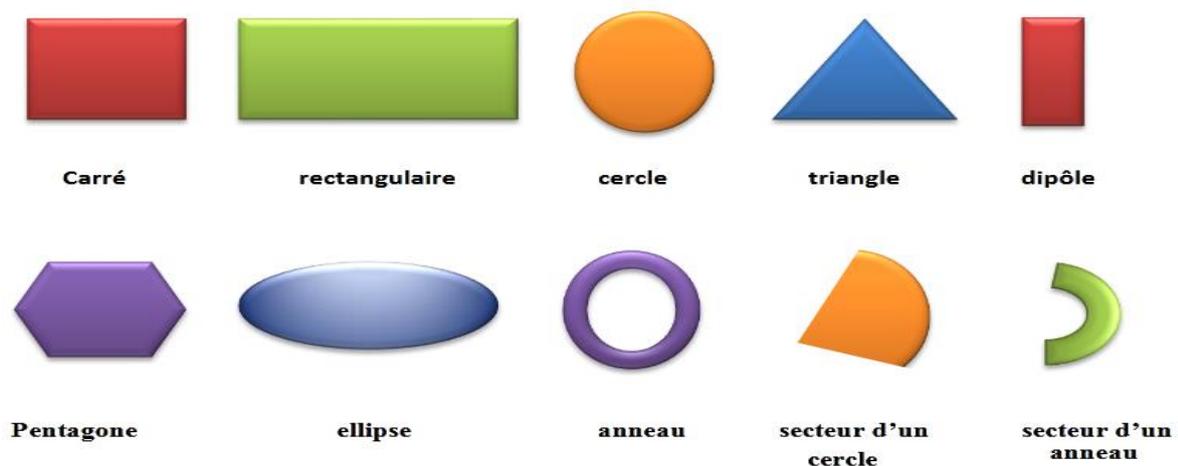


Figure I.2 : Divers types d'éléments rayonnants [5]

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 [6].

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.) [6].

I.4-Caractéristiques des antennes imprimées :

Les paramètres électriques définissent une antenne comme un élément d'un circuit où elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge imposée par l'antenne sur le circuit d'excitation. Par conséquent, caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre les systèmes fréquence radio et médias de propagation. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour la caractérisation, nous en définirons les principaux paramètres [7]

I.4.1-Le rendement :

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [8] :

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (I.1)$$

R_r : la résistance de rayonnement.

R_p : la résistance de perte.

Il est aussi exprimé par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (I.2)$$

P_r : la puissance rayonné par une antenne.

P_a : La puissance fournie par l'alimentation

I.4.2-La directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace, elle 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 :

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

Dans la direction de rayonnement maximale $P(\theta, \varphi)$ on note la directivité :

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

Une antenne omnidirectionnelle émet la même énergie dans toutes les directions du plan horizontal [9]

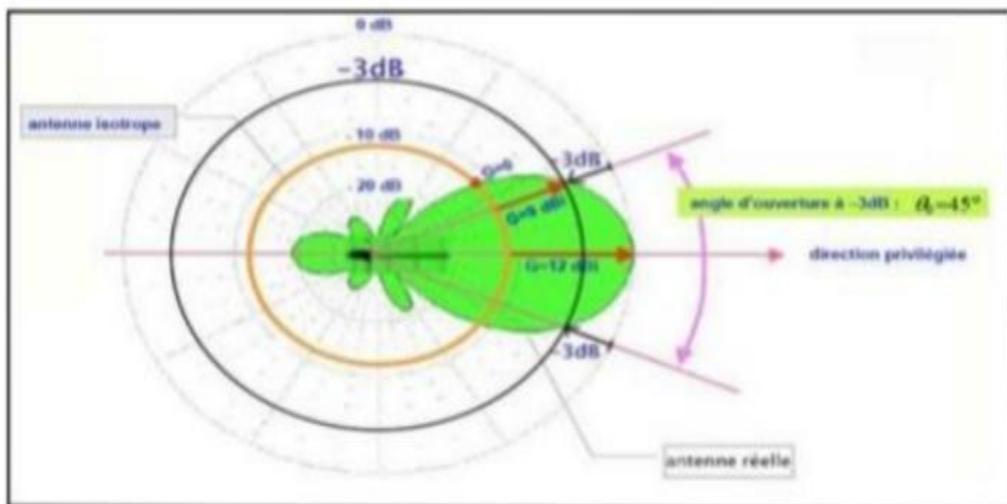


Figure I.3 : Rayonnement d'une antenne directive.

- 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.

I.4.3-Le gain :

Le gain est considéré comme l'un des principaux paramètres d'une antenne directive, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres directions. Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre les puissances émises par l'antenne et puissance transmise par l'antenne Omnidirectionnelle, les deux antennes sont alimentées [10].

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

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m²).

P₀ : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m²).

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

I.4.4-Le coefficient de réflexion S₁₁ :

Est un paramètre qui exprime une quantité d'énergie perdu par la charge et nonréfléchi [11]. Le coefficient de réflexion est donné par :

$$S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad (I.6)$$

V_r : l'amplitude de l'onde réfléchi.

V_i : l'amplitude de l'onde incidente.

Z_{in} : l'impédance d'antenne.

Z_s : l'impédance caractéristique

I.4.5-Mécanisme de rayonnement : [3]

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

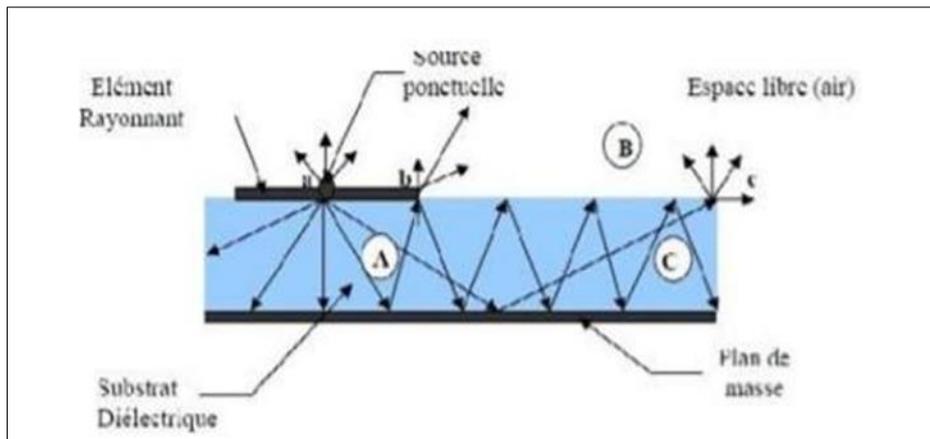


Figure I.4 : Mécanisme de rayonnement.[3]

Les éléments rayonnants sont en fait de nombreuses sources ponctuelles similaires c'est au point a. Ces sources d'isotopes rayonnent dans toutes les directions. Une partie est réfléchié par le plan de masse, puis par le conducteur supérieur, et ainsi de suite retour. Certains de ces rayons se retrouvent au bord du conducteur (point « b »), provoquant leur diffraction. Le champ est donc décomposé en deux composantes normale et tangentielle par rapport au plan du sol.

I.4.6-Impédanced'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} [14], le rapport de ces deux quantités fourni l'impédance Z_{IN} .

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = R_{IN} + jX_{IN} \quad (I.7)$$

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 a 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 associe à la résistance R_r est la responsable de rayonnement de l'antenne, Tandis que la puissance dissipée par la résistance R_p est perdue en chaleur dans l'antenne [13.14].

I.4.7-Labande passante :

La bande passante d'une antenne désigne la gamme de fréquence sur laquelle l'antenne peut fonctionner correctement. Elle représente le nombre Hz pour lesquels l'antenne représente un taux inférieur à 2 (ce qui équivaut à presque -10dB de la courbe des coefficients de réflexion). [13].

$$BW\% = \frac{\text{fréquence supérieure} - \text{fréquence inférieure}}{\text{fréquence de résonance}} \times 100 = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (\text{I.8})$$

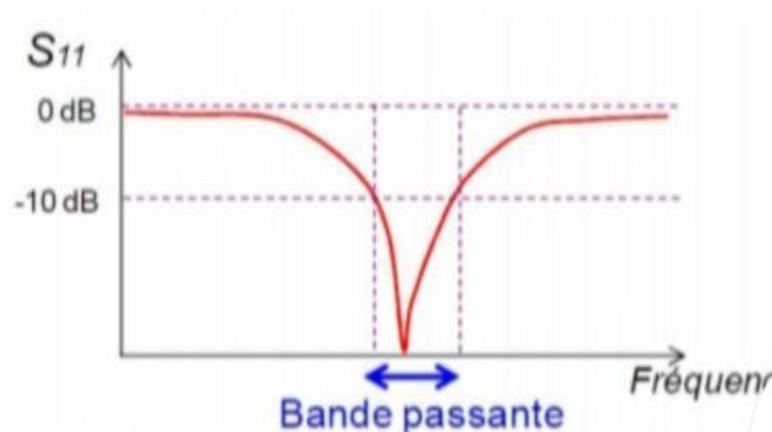


Figure I.5 : la bande passante

I.5-Les techniques d'alimentations :

L'excitation est un point très important lors de l'étude des antennes imprimées, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant de telle manière qu'elle peut affecter directement et modifier ses performances [16].

Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories : [16].

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

I.5.1-Alimentation par ligne microruban :

Dans cette méthode d'alimentation, la ligne microruban est reliée directement avec l'élément rayonnant. Cette ligne est généralement très petite par rapport à l'antenne patch, elle a l'avantage de graver sur le substrat pour donner des surfaces planaires. Certainement cette

technique est la moins coûteuse, elle est très simple, très facile à faire, et la modélisation est possible [17]

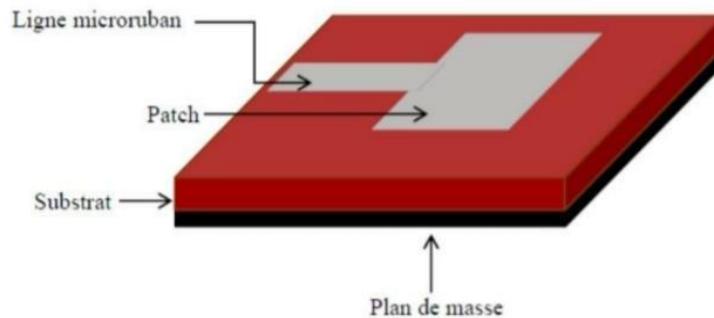


Figure I.6 : Alimentation par ligne microruban

I.5.2-Alimentation par sonde coaxial :

La sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant du conducteur central à travers un substrat et plan de masse (Figure I.7). Ce type d'alimentation est facile à réaliser, elle a la possibilité d'installer la sonde coaxiale à un n'importe quel emplacement. Mais il offre une bande passante étroite [18].

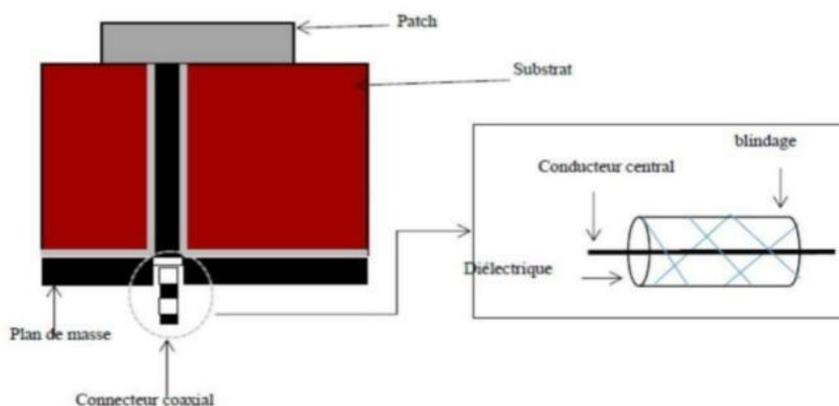


Figure I.7 : Alimentation par sonde coaxial

I.5.3-Alimentation par ligne coplanaire :

Coplanar Technology (CPW, CoPlanar Waveguide en anglais), comme son nom l'indique moyens, présentant le plan de masse au même niveau que la ligne de transmission [19]. CPW

Se compose d'un conducteur ruban central sur des substrats diélectriques conventionnels Plans de sols semi-infinis des deux côtés, comme illustré à la Figure 1.8. Cette structure Le mode de propagation quasi-TEM est pris en charge. CPW offre plusieurs avantages Lignes microruban conventionnelles : premièrement, pour simplifier la fabrication : deuxièmement, il Facilite le montage en surface shunt et en série des dispositifs actifs et passifs ; Troisièmement, il élimine le besoin de trous et de vias enveloppants, etquatrièmement, il réduit perte de rayonnement. De plus, l'impédance caractéristique est déterminée par le rapport a/b , de Ainsi, la taille peut être réduite indéfiniment, la seule pénalité est plus de perte élevé. [20]

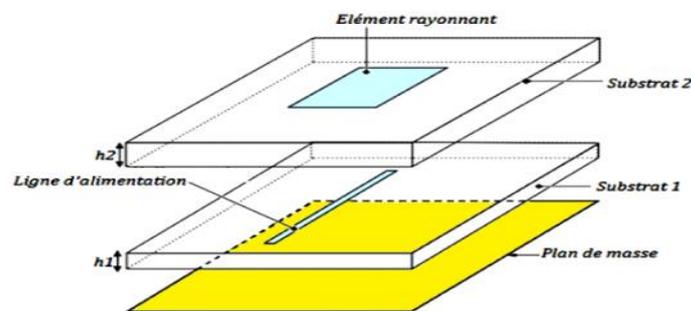


Figure I.8 : Alimentation par une ligne coplanaire [20]

I.5.4-Alimentation à travers d'une ouverture au plan de masse :

La géométrie de ce type d'alimentation est constituée de deux substrats électriques séparés par un plan de masse. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur, et la ligne d'alimentation est imprimée sur le substrat inférieur. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est donc assurée par une fente dans le plan de masse, centrée sous le patch. Cette technique présente un rayonnement parasite faible, mais offre une bande passante étroite et il est difficile à fabriquer [21].

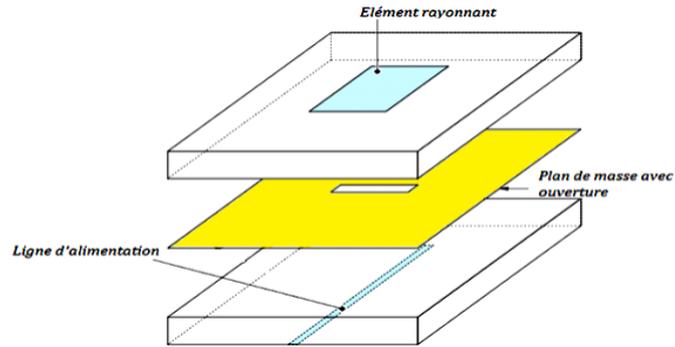


Figure I.9 : Alimentation au travers une ouverture au plan de masse.

I.6-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 [22].

I.6.1-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.

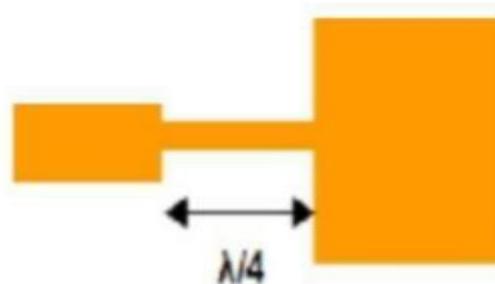


Figure I.10 : Adaptation par ligne quart d'onde

I.6.2-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.

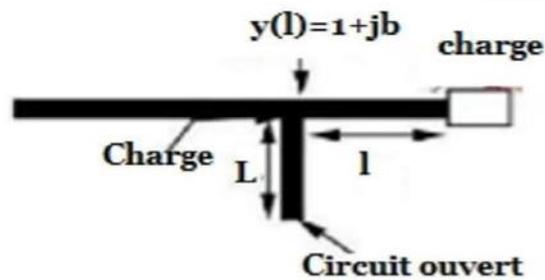


Figure I.11 : stub en circuit ouvert

I.6.3-Adaptation avec encoche :

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du Patch ou les dimensions des encoches [22].

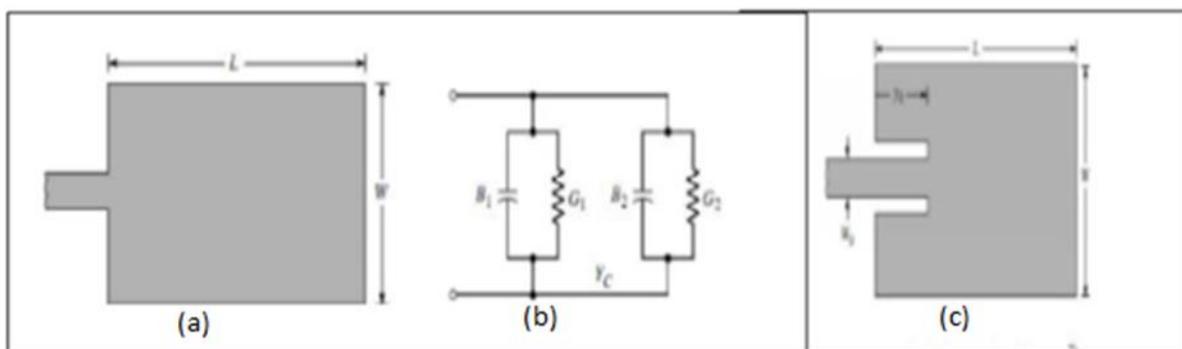


Figure I.12 : Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches De Longueur (c).

I.7-Avantages et inconvénients des antennes imprimées :

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et sont les suivantes [22].

- Faible poids, faible épaisseur et volume.
- faible coût et facilité de fabrication.,
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives),
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications
- Toutefois, les antennes imprimées ont également des inconvénients sont les suivantes [22].
- largeur de bande de fréquence très étroite (1 à 5%).,
- Faible gain.
- Possibilité de fonctionnement en faible puissance
- Faible efficacité de rayonnement.

I.8-Les applications des antennes imprimées :

Les antennes patch hautes performances remplacent les antennes traditionnelles l'équivalence est une préoccupation majeure des concepteurs de systèmes télécoms, Prise en compte des besoins et exigences du marché industriel. [23], il existe différentes applications : [24]

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

I.9- Conclusion :

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

Référence

- [1] http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/ant_imprimees.pdf
- [2] Abdellatif HAFIANE, *Etude du couplage d'antennes imprimées par la Méthode des différences finies et extraction du modèle électrique. Thèse de Doctorat, université de Marne la Vallée (France), 2003.*
- [3] J. D. BERAMOU and B. DESPRÈS, "A domain de composition Method for the Helmholtz equation and related optimal control problems". INRIA ,Feb. 1996.
- [4] Paul F. Combes, « *Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes,* » Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [5] Leila Chouitti, « *contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires Doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage* », Thèse Magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [6] Abla Behloul « *Contribution à l'étude des antennes micros rip supraconducteur de forme Triangulaire* » mémoire de magister en électronique de l'université Mentoura Constantine Avril 2010.
- [7] Barkat. Ouarda, <<*Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique* >>, Thèse de Doctorat, université Mentouri Constantin, 2009.
- [8] R. L Yadava, "Antenna and Wave Propagation," PHI Learning Pvt. Ltd., 2011.
- [9] Gaurav Mani Khanal, «*Design of a compact PIFA for Wlan Wi-Fi wireless applications*», *International journal of engineering research and development*, Vol. 8, Issue 7, PP. 13-18,2013.
- [10] Anna Niang « *Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non Foster* » Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.
- [11] Makarov, S.N., "Antenna and EM Modeling with MATLAB", John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [12] AlirezaKazemipour, « *Contribution à l'étude du couplage entre antennes, application à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antennes et de réseaux d'antennes* », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications , Spécialité : Communications et Electronique , juin 2002.
- [13] Barkat Ouarda« *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.
- [14] 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.

[15] *Antenna Basics_Wireless @ICTP.*

[16] *Chouti. Leila << Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi Bandes tenant compte de l'effet de couplage>>, Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 2009*

[17] *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*

[18] *C. A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, 2005.*

[19] *R. Simons, CoplanarWaveguide Circuits, Components, and Systems, John Wiley& Sons, 2001.*

Thèse Doctorat, Electronique. Institut National des Postes ET Telecommunications, 2017

[20] *Rainee N. Simons, <<Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems>>, John Wiley & Sons,,Inc, 2001.*

[21] *C.A Balanis « Antenna theory : Analysis and design » third edition, John Wiley &Sons,NY, 2005.*

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

[23] *Abla. B,"Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire", Mémoire de Magistère en Micro-Ondes. UniversiteMentouri. Constantine 2010.*

Chapitre II

Les Antennes agiles

II.1-Introduction :

Ces dernières années, les progrès technologiques ont été remarquables, le développement des télécommunications sans fil à forte consommation de données mobile entraîne des contraintes de ressources en fréquence, qui nécessitent une amélioration de la vitesse et l'efficacité du Transfert. Une des solutions à ces problèmes est d'utiliser des antennes agiles ou bien dites reconfigurables, qui sont soit en fréquence, en diagramme de rayonnement et/ou en polarisation. Il s'agit maintenant de parler de quelques notions de base sur les antennes agiles.

II.2- Les Antennes imprimées agiles :

Le terme antenne agile (reconfigurable) a été introduit pour la première fois en 1939. Les antennes reconfigurables sont capables de changer sa configuration c'est-à-dire de changer une ou plusieurs de ses caractéristiques fondamentales (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) par l'utilisation des composants discrets intégrés (diode PIN, RF MEMS.....)[1]

Une antenne est dite reconfigurable ou agile si elle peut être modifiée dynamiquement une ou plusieurs caractéristiques en termes de fréquence de fonctionnement, mode de rayonnement ou de polarisation, selon les besoins de l'application. Une fonction spécifique ou adaptée dans un environnement spécifique. En effet, l'agilité permet de doter l'antenne de plus de fonctions dans une seule antenne. Compte tenu de l'encombrement, cela réduit son encombrement et facilite ainsi son intégration dans des systèmes de communication plus compacts. Par conséquent, les avantages de ces antennes dans leur capacité à améliorer le fonctionnement et les performances des terminaux sans fil, avec un impact minimal sur la complexité et le coût. L'antenne unique reconfigurable peut remplacer plusieurs antennes à fonction unique dans les années 1960 et 1970, les premières antennes reconfigurables, dites antennes actives, sont apparues [2]. L'intérêt pour de telles antennes s'est accru ces dernières années, par le développement de nouvelles technologies. En effet, l'apparence des Appareils portables (téléphones, ordinateurs, casques et autres appareils électroniques connectés) systèmes de télédétection plus efficaces et complexes, systèmes de transport le développement Accéléré des systèmes intelligents et de l'industrie aérospatiale Poids, taille et facteur de forme De l'antenne Par conséquent, ils ont une petite puissance électrique qui est nécessaire pour s'intégrer Correctement dans ces nouvelles technologies. Systèmes de communication par

satellite [3], drones [4], systèmes des normes de communication radar [5] et même 5G [6] en font partie applications pouvant bénéficier des avantages de ces antennes reconfigurables. Offre plus de fonctionnalités que les dispositifs antennaires classiques (non agiles).

II.3- Les techniques d'agilités (reconfigurations) :

Une antenne reconfigurable est une antenne qui peut modifier un ou plusieurs de ses propriétés même après sa fabrication. Pour mettre en œuvre la reconfiguration de l'antenne, il existe plusieurs techniques :

II.3.1- Les diodes PIN :

Une diode PIN est un semi-conducteur, il est utilisé pour l'application micro-onde. En appliquant une polarisation directe, la diode PIN est allumée, à une impédance extrêmement faible et peut être simulé par un court-circuit. En inversant la polarisation, la diode PIN passe dans son état « OFF », dans ce cas elle présente une très haute impédance. Il est utilisé pour obtenir n'importe quelle technique reconfigurable en fréquence. son utilisation nécessite un faible coût, une facilité d'intégration et une faible tension de polarisation. [7].

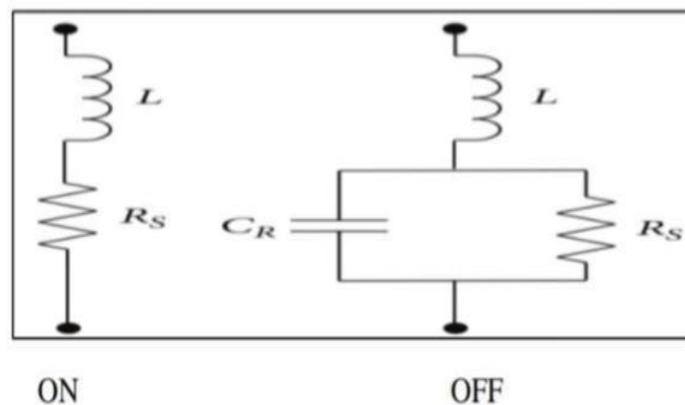


Figure II.1 : Le circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON et OFF.

II.3.2- Les diodes varicaps :

La diode varicap ou varactor (variable capacitor) est considéré comme un condensateur s'il est en valeurs de polarisation inverse et avec le changement de l'état de polarisation la valeur de la capacité sera changée.

Il fournit une variation continue en fonction de la tension de polarisation, contrairement à des Diodes PIN avec variation discrète. Dans la littérature, la combinaison de diodes PIN et les Varactors sont souvent utilisés pour obtenir un chevauchement de fréquence important.[8]

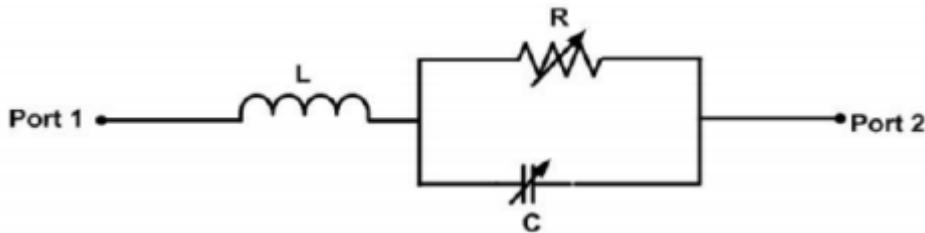


Figure II.2 : Diode varicap.

II.3.3-LES MEMS (Système Micro Electromécanique) :

MEMS (Système Micro Electromécanique) est un commutateur utilisé pour reconfiguration de l'antenne, qui est un composant du microsysteme qui permet une déformation mécanique de la Microstructure pour obtenir des circuits courts ou ouverts. Ses caractéristiques sont à un coût élevé, la fiabilité n'est pas garantie, une haute tension cependant, à son activation, ce type d'interrupteur se caractérise par de faibles pertes Insertion et temps de réponse extrêmement rapide [8].

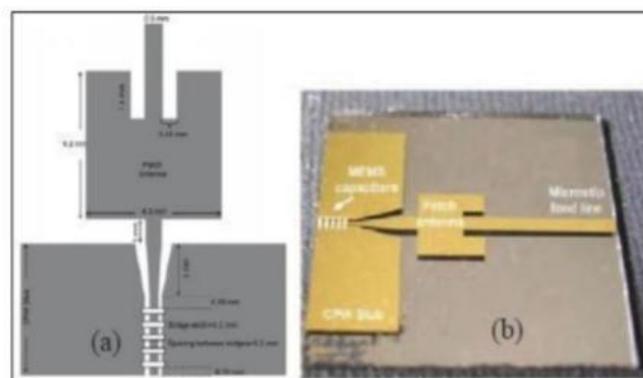


Figure II. 3 : (a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS (b)

Photographie de l'antenne

II.3.4-Utilisation des transistors FET :

Un transistor à effet de champ ou transistor à effet de champ (FET) est un interrupteur commandé et utilisé pour les applications micro-ondes. Le transistor est constitué d'un canal (entre la source et le drain) à travers lequel un courant contrôlé va circuler le champ électrique appliqué au réseau. Les commutateurs FET présentent une basse tension de polarisation avec une consommation de courant presque nulle. [7]

II.3.5-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.3.6-Matériaux agiles :

La technique implique l'utilisation de matériaux agiles (contrôlables) tels que le méta-matériaux, Cristaux liquides, ferromagnétiques et ferroélectriques se caractérisent par propriétés diélectriques ou magnétiques pouvant être modifiées en fonction de l'application du champ externe électrique ou magnétique, qui peut être utilisé comme substrat pour les composants réalisation de rayonnement. [9].

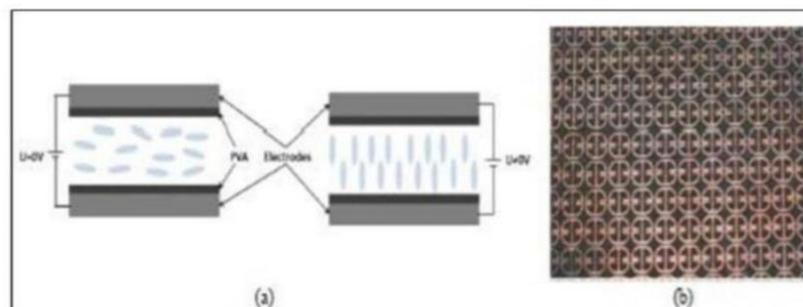


Figure II. 4 : (a) Cristal liquide (PVA : Poly VinylAlcohol) et (b) méta matériau

II.4-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) [9].

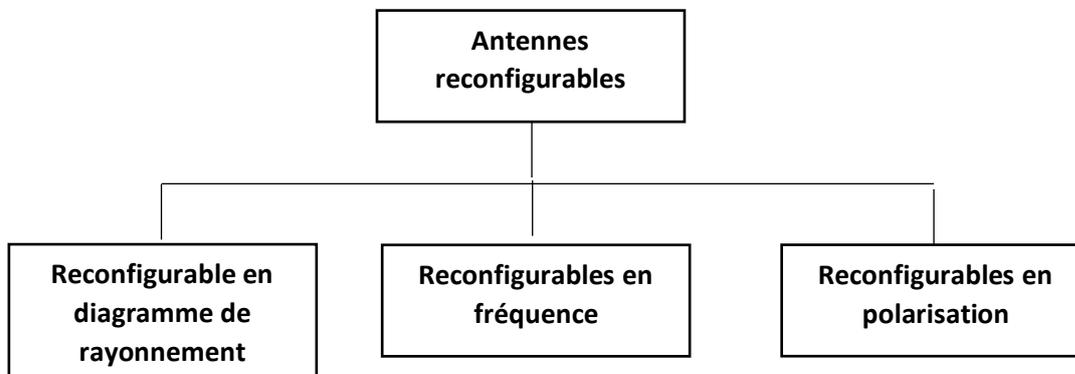


Figure II.5 : Schéma des types d'antennes reconfigurables

II.5-Types de reconfigurabilités :

Comme mentionné précédemment, on peut distinguer trois types de reconfiguration d'antennes : la reconfigurabilité fréquentielle, la reconfigurabilité en polarisation et la reconfigurabilité du diagramme de rayonnement. Plusieurs types de reconfigurabilités peuvent être présents simultanément dans certaines antennes.

II .5.1-Reconfiguration fréquentielle :

Les antennes reconfigurables en fréquence ont attiré beaucoup d'attention pour les raisons suivantes :

Leur capacité à couvrir plusieurs bandes de fréquences est considérablement réduite le nombre d'antennes nécessaires pour la communication multimode. Ces antennes sont également appelées antennes accordables, divisées en antennes continues et discrètes.

L'antenne réglable en continu permet d'assurer le passage entre les bandes de fréquences et offre la possibilité de changer en continu une ou plusieurs fréquences de résonance.

Cependant la deuxième catégorie permet à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes de fréquences. Pour 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 fréquentielle pour l'application WIFI, doit être

conçue pour recouvrir tous les canaux précédents par commutation. La bande passante instantanée doit être grande afin de couvrir chaque canal et l'agilité fréquentielle permet de se déplacer d'un canal à un autre [10].

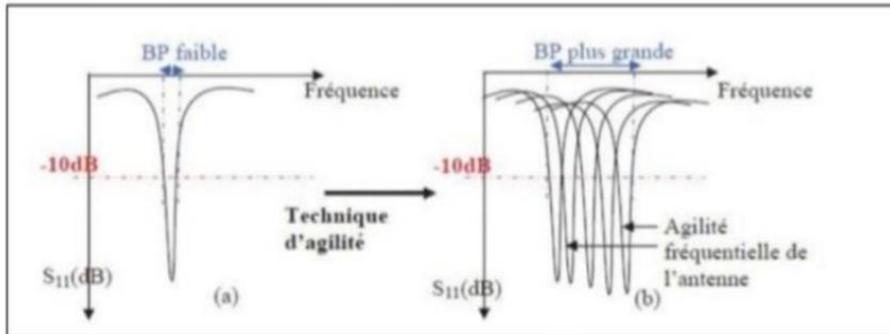


Figure II.6 : Illustration de l'agilité fréquentielle

L'agilité en fréquence est obtenue en modifiant la longueur de résonance du résonateur. A cet effet, l'antenne est équipée de la réactance, et peut-être contrôlée électroniquement par un élément actif (diode varicap), ou par éléments qui agissent comme des commutateurs (diodes PIN, FET ou MEMS). Ceux-là Les composants actifs nécessitent un circuit de polarisation (biasing) pour commuter (ON-OFF).

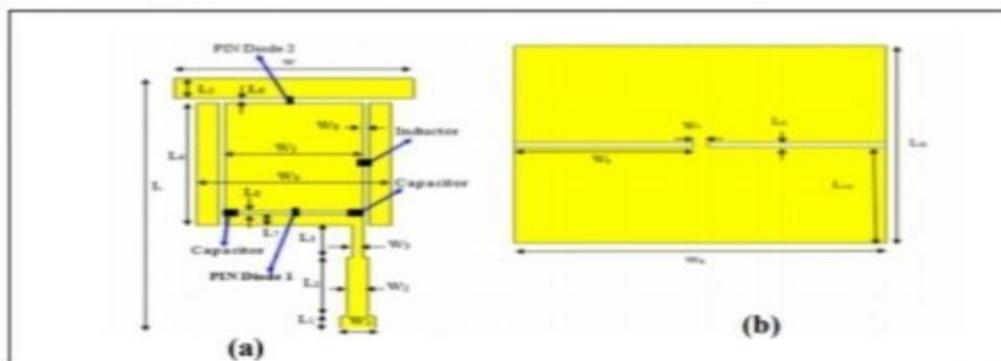


Figure II.7 : La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b).

II.5.2-Reconfiguration du diagramme de rayonnement :

Dans une antenne reconfigurable en rayonnement, son diagramme peut être modifié d'une manière ou d'une autre en dynamique. Celui-ci peut être modifié en fonction de sa forme, de

son ouverture ou de la directionnalité du faisceau, gain, pointage (balayage d'angle), prise en charge de certaines directions, dépend des caractéristiques requises, et les autres caractéristiques restant inchangées fonctionnement (fréquence, polarisation, etc.). Souvent, dans la littérature, les modifications du diagramme de rayonnement impliquent l'utilisation de réseaux d'antennes, où le rayonnement est classé et pondération des sources, c'est-à-dire par facteurs de réseau. Donc le pointage de l'ensemble du faisceau peut être réalisé par source du réseau. Par exemple, prenons un réseau Linéaire uniforme de 4 sources (points sur la Figure 6) espacées $d = 0,5 \lambda_0$. Si on désigne par β la différence de phase entre deux sources successives, la direction de pointage θ_0 du réseau sera donnée par la relation : $\beta = kd \sin(\theta_0)$ (12) avec, un dépointage de 30° peut être obtenu avec l'application d'une différence de phase de 90° entre les sources du réseau [11],

Cependant, il est encore compliqué de modifier les paramètres d'antenne sans affecter la structure de l'antenne, cela modifiera les performances recherchées par la présence d'éléments parasites et effectuez une sorte de reconfiguration [12].

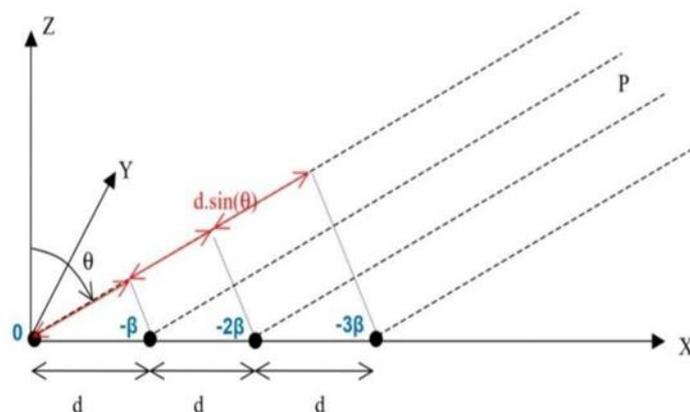


Figure II. 8 : Réseau d'éléments déphasés pointant dans la direction θ_0 [11].

II.5.3-Reconfiguration de la polarisation :

Ce dernier type d'agilité est la reconfigurabilité polarisée. Il comprend des modifications seule la direction vectorielle du champ E tout en conservant la même fréquence, le fonctionnement et les caractéristiques de rayonnement de l'antenne sont les mêmes. La direction du flux de courant sur l'antenne se traduit directement par la polarisation du champ électrique. Pour Modifier la polarisation circulaire ou linéaire de l'antenne, la direction ou la phase de l'antenne, les courants circulant sur les surfaces des éléments rayonnants doivent être modifiés sans les changer afin de ne pas interférer avec le reste des paramètres de l'antenne. Alors, pour obtenir la reconfigurabilité de la polarisation, la structure de l'antenne, les propriétés du matériau ou la configuration de l'alimentation doit être modifiée d'une manière qui change la façon dont Le courant circule sur l'antenne.

L'intégration d'antennes agiles en polarisation est très répandue dans les communications par satellite, les applications civiles et militaires. En effet, la diversité de polarisation permet d'atténuer l'influence induite par des trajets multiples et de contourner les défauts d'alignement entre le récepteur et l'émetteur.

De nombreuses études ont été menées pour réaliser une telle reconfigurabilité, en utilisant différentes techniques et méthodes. La méthode la plus classique pour modifier la polarisation d'une antenne, consiste à modifier son circuit d'alimentation. Par exemple, un patch carré sera reconfigurable en polarisation si il excité par deux ports en quadrature de phase (Figure 7 (a)) [13], qui exciteront les polarisations linéaires horizontale et verticale. Une autre méthode consiste à créer des perturbations sur l'élément rayonnant du dispositif pour obtenir une polarisation circulaire (Figure 7 (b)). Pour devenir reconfigurable, cette perturbation devra être située sur les deux coins opposés du patch et reliés à l'élément rayonnant par des diodes PIN (Figure 7 (c)). En contrôlant les états (ON/OFF) des diodes et en utilisant différents port d'alimentation, le sens de polarisation alterne entre quatre états distincts autour de 5,8 GHz.

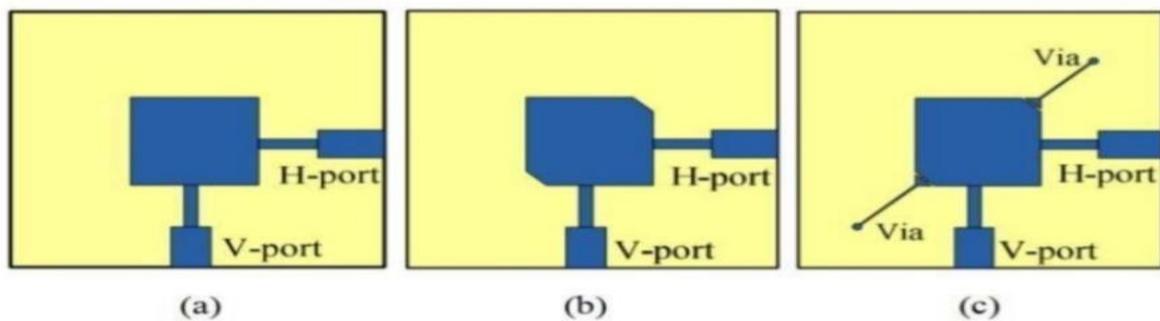


Figure II.9 : Antenne patch reconfigurable avec quatre états de polarisation [14].

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

Une antenne agile ou reconfigurable, comme tous les autres types d'antennes classiques, a des avantages et des inconvénients [15]. Parmi ses 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 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.

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

- 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 se concentre sur les antennes reconfigurables en cours de développement prospéré en raison des nouvelles fonctionnalités qu'ils offrent. Nous abordons la partie théorique des antennes reconfigurables dans ce chapitre, à savoir technologie et type de reconfiguration (en fréquence, polarisation, graphe) et à la fin de ce chapitre nous avons listé les avantages et les inconvénients de ces antennes reconfigurables.

Références :

- [1] Behloul Abla et Epouse Bachkhaznadj, « Etude et conception d'antennes à Résonateurs diélectriques. Application à la réalisation d'une antenne Reconfigurable », Doctorat en Hyperfréquences, Université Abu bakr Belkaid, 08/06/2017.
- [2] Jenshan Lin et T. Itoh, « Active integrated antennas », *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 42, no 12, p. 2186-2194, déc. 1994, doi : 10.1109/22.339741.
- [3] S. J. Sathe et J. C. Mudiganti, « A polarization reconfigurable antenna for satellite Communication », in *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, avr. 2017, p. 1774-1777, doi : 10.1109/ICCSP.2017.8286698.
- [4] Z. Liang, Z. Liang, Y. Li, J. Liu, J. Qin, et Y. Long, « Reconfigurable Microstrip Magnetic Dipole Antenna With Switchable Conical Beams for Aerial Drone Applications », *IEEE Access*, vol. 7, p. 31043-31054, 2019, doi : 10.1109/ACCESS.2019.2902844.
- [5] J. T. Bernhard, R. Wang, R. Clark, et P. Mayes, « Stacked reconfigurable antenna Elements for space-based radar applications », in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with : USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229)*, Boston, MA, USA, 2001, vol. 1, p. 158-161, doi : 10.1109/APS.2001.958816.
- [6] G. Jin, C. Deng, J. Yang, Y. Xu, et S. Liao, « A New Differentially-Fed Frequency Reconfigurable Antenna for WLAN and Sub-6GHz 5G Applications », *IEEE Access*, vol. 7, p. 56539-56546, 2019, doi : 10.1109/ACCESS.2019.2901760.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ADJILA FATIMA, M. N. « Etude et conception d'une antenne fractale reconfigurable en fréquence », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, systèmes des télécommunications, 2019
- [10] B. Allen, et al., « Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging » London, UK : Wiley, 2006.
- [11] P. Vaudon, « XI : Réseaux d'antennes ». [En ligne]. Disponible sur : <http://patrick.vaudon.pagesperso-orange.fr/analyse.pdf>.
- [12] Jehison LEON VALDES | Thèse de doctorat | Université de Limoges | 2020 31 Licence CC BY-NC-ND 3.0

[13] Xue-Xia Yang, Bing-Cheng Shao, Fan Yang, A. Z. Elsherbeni, et Bo Gong, « APolarization Reconfigurable Patch Antenna With Loop Slots on the Ground Plane », *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, p. 69-72, 2012, doi :10.1109/LAWP.2011.2182595.

[14] X.-X. Yang, B. Gong, G. Tan, et Z. Lu, « Reconfigurable patch antennas with four-polarization states agility using dual feed ports », *PIER B*, vol. 54, p. 285-301, 2013, doi : 10.2528/PIERB13073104.

[15] ADJILA FATIMA, M. N. « Etude et conception d'une antenne Fractale reconfigurable en frequence », *Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, systèmes des télécommunications*, 2019.

Chapitre III

Simulation & résultats

III.1-Introduction :

Le but de ce chapitre est de concevoir une antenne patch pour une application spatiale. Nous rappelons d'après le chapitre précédent que la reconfiguration de la fréquence et du diagramme de rayonnement consiste en la modification de la fréquence de résonance et de la forme du diagramme de rayonnement de l'antenne. Dans ce chapitre, nous proposons de concevoir une antenne rectangulaire reconfigurable en fréquence et en diagrammes de rayonnement en utilisant la technique d'insertion de diode varicap et la technique de la mise en réseau.

III.2-Choix de l'outil de simulation :

CST MICROWAVE STUDIO® (CST MWS) est un outil spécialisé pour la simulation électromagnétique 3D de composante haute fréquence, CST MWS permet l'analyse rapide et précise des dispositifs haute fréquence (HF) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planaires et multicouches et les effets SI et CEM. Il simplifie l'insertion des structures en fournissant un solide 3D pour modéliser chaque élément à la fin, c'est un simulateur électromagnétique basé sur la technique des intégrations finies (FIT).

Le logiciel CST met à disposition des solveurs de domaine temporel et de domaine fréquentiel, CST MWS propose d'autres modules de solveur pour des applications spécifiques. Les filtres pour l'import de fichiers CAO spécifiques et l'extraction des paramètres SPICE améliorent les possibilités de conception et font gagner du temps.

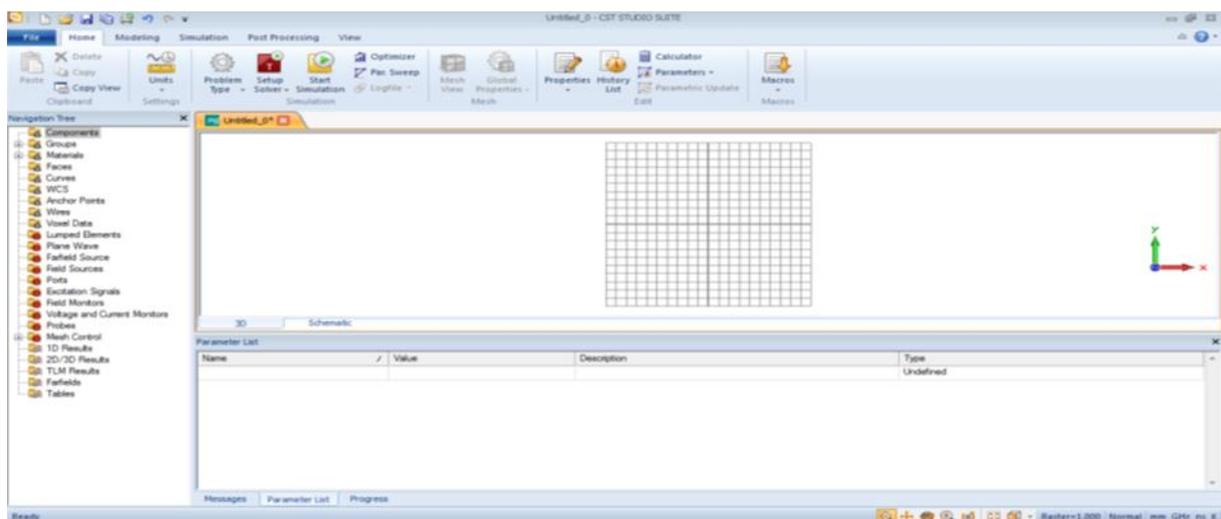


Figure III.1 : Outil de simulation CST.

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 une impédance d'entrée (50Ω), avec un substrat ($Wg \times Lg$) 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 ($Wg \times Lg$) est de la même matière que le patch (**Copper**) avec la même épaisseur $t=0.035$ mm.

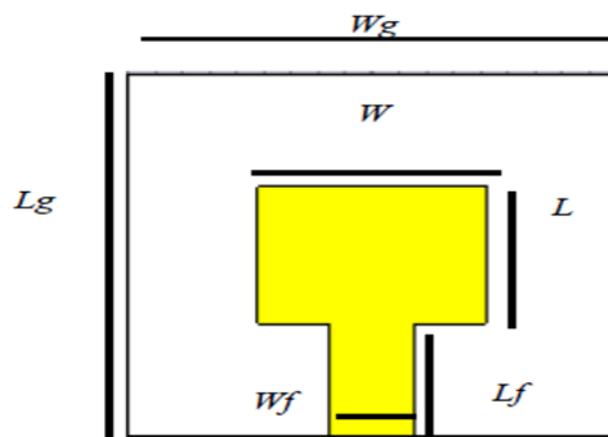


Figure III .2 : Structure d'un patch rectangulaire simple.

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	$W_f = \frac{8e^A}{e^{2A-2}} \times h$ <p>Avec $A = \frac{Z\sqrt{2(\epsilon r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon r - 1}{\epsilon r + 1} \right) \times \left(h \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon r} \times \ln \frac{4}{\pi} \right)$</p>

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

Les résultats après calculs sont mentionnés dans le Tableau III.2, en mm

Wg	Lg	W	L	Wf	Lf	h	T
17.47	15.02	7.87	5.42	3.11	5.43	1.6	0.035

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

III.3.2-Résultat de simulation :

III.3.2.1-Paramètre de réflexion S11 :

La figure III.2 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 qui est de 11,7 GHz

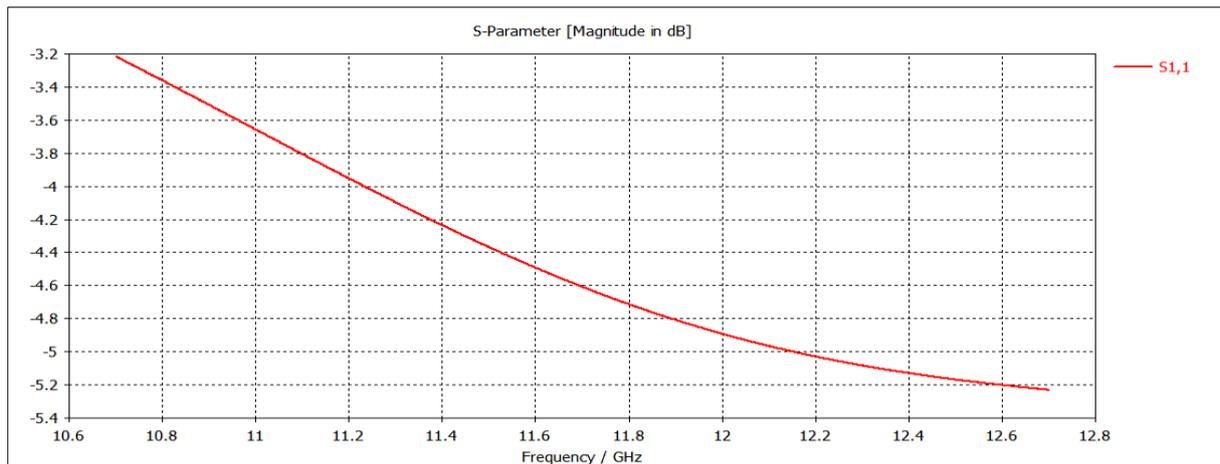


Figure III.3 : Coefficient de réflexion S11 obtenu.

III.3.2.2-Adaptation de l'antenne :

- *Par la ligne quart d'onde*

Dans cette étape, nous essayons d'adapter notre antenne à la fréquence désirée, pour cela nous avons procédé par l'utilisation de la ligne quart d'onde

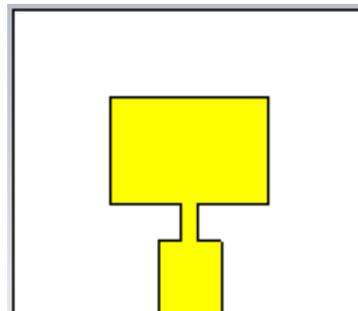


Figure III.4 : Antenne imprimée avec ligne quart d'onde

Le résultat du coefficient de réflexion obtenue par le logiciel CST Microwave studio est présenté dans la figure (III.4).

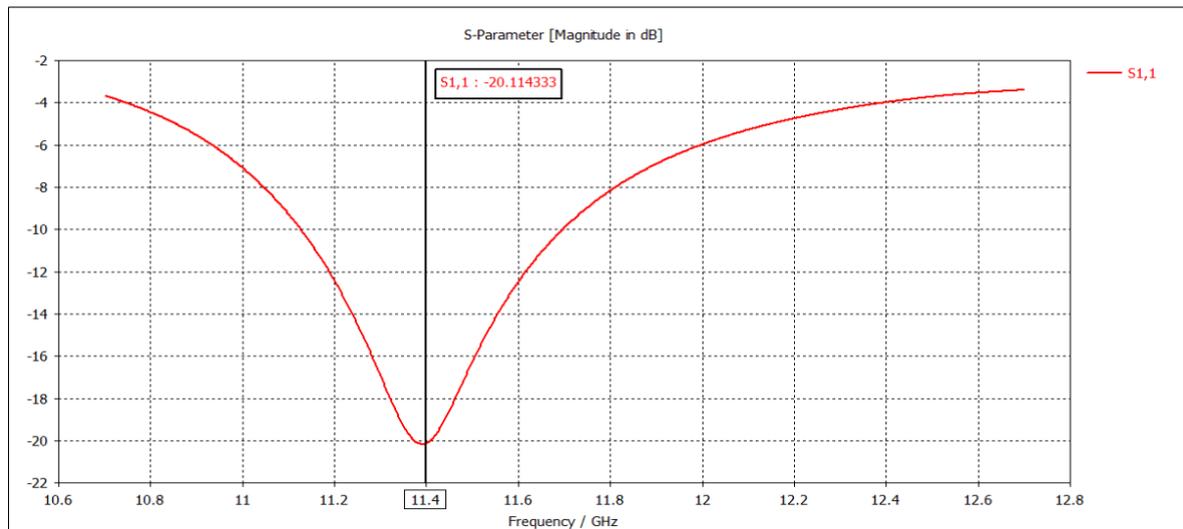


Figure III.5 : Paramètre S_{1,1} avec la ligne quart d'onde

Nous remarquons que l'adaptation est faite mais à la fréquence de 11.4GHz, et ce n'est pas la fréquence désirée.

- *Par l'ajout d'encoches*

Nous ajoutons des encoches de largeur $w_e=1.8mm$ et de longueur $l_e=0.12mm$ sur le patch, ainsi qu'une ouverture sur ce dernier (slot) de largeur $w_s=2.7mm$ et longueur $l_s=1.58mm$, comme montré sur la *figure III.6*.

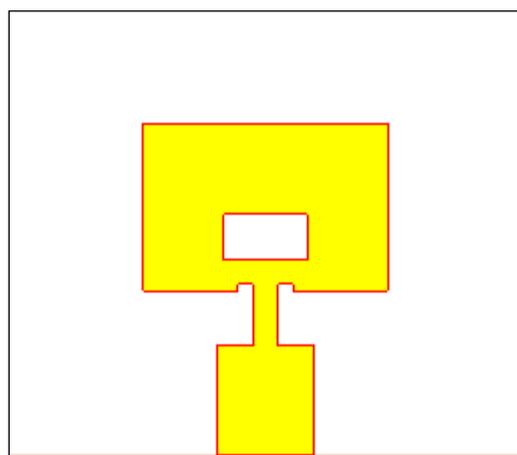


Figure III.6 : Forme de l'antenne adaptée.

• Le Coefficient de réflexion S11 :

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de 11.7 GHz avec un coefficient de Réflexion S_{11} égale à **-16.9 dB**,

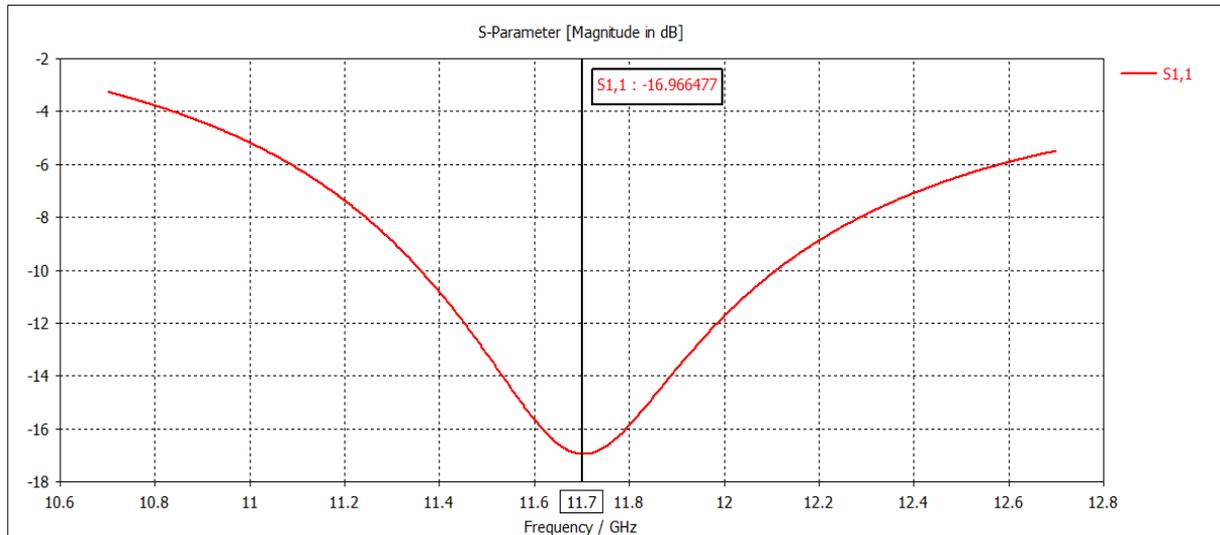


Figure III.7 : Le coefficient de réflexion de l'antenne

• Le diagramme de rayonnement

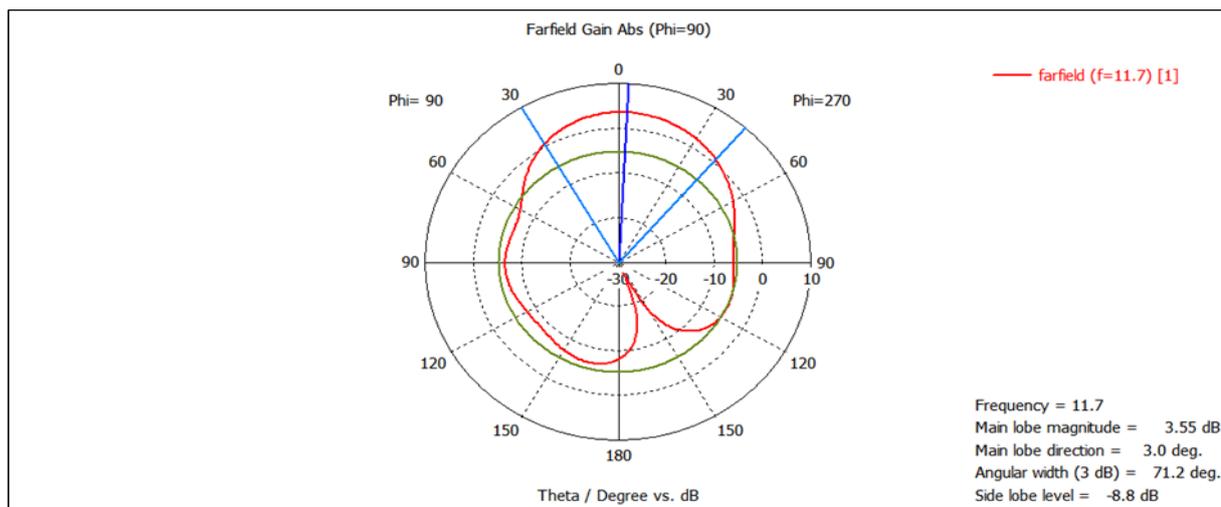


Figure III.8 : Gain d'antenne à 11.7GHz en polaire

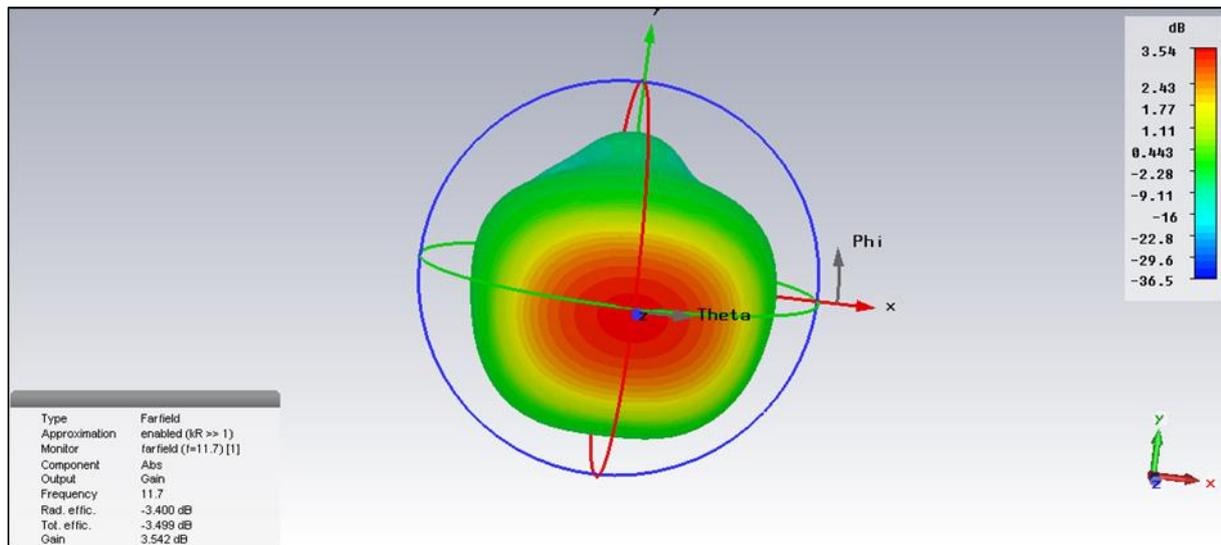


Figure III.9 : Gain de l'antenne à 11.7GHz en 3D

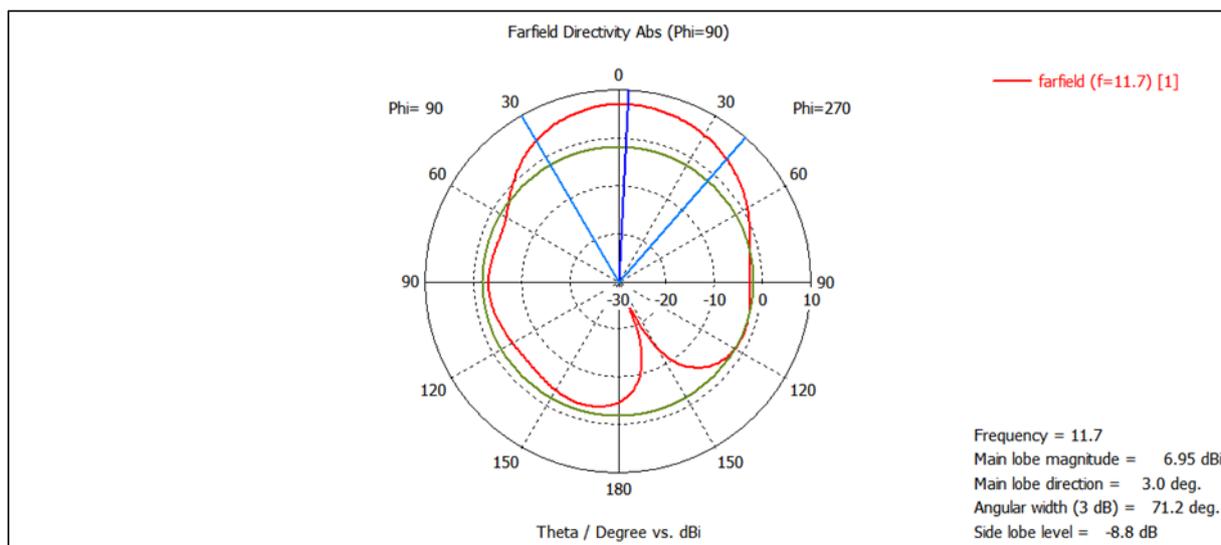


Figure III.10 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en polaire

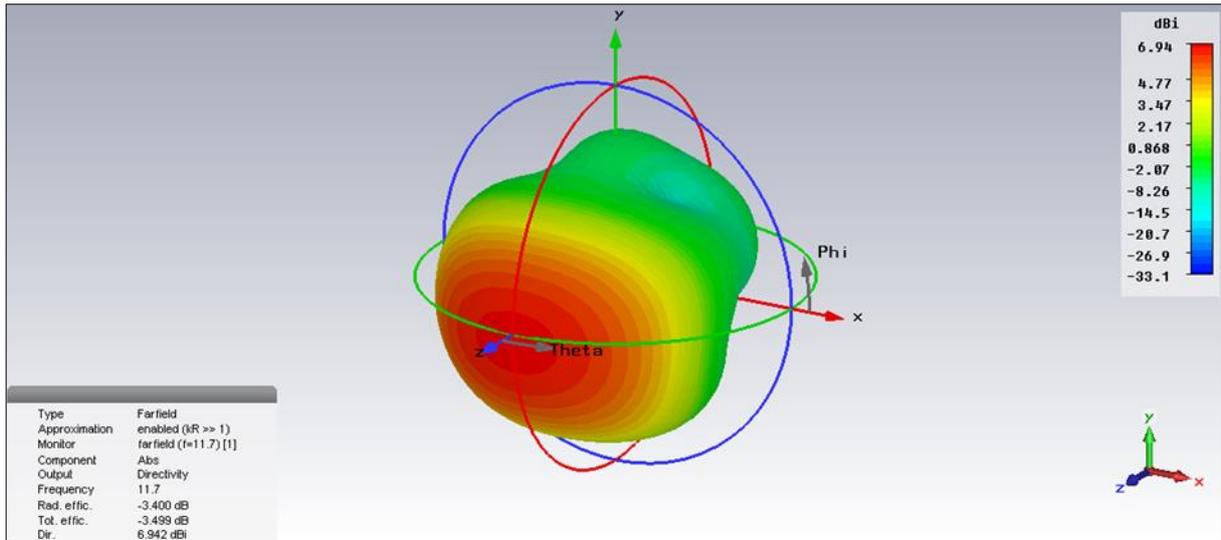


Figure III.11 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en 3D

La représentation 3D de cette antenne a montré que la directivité est égale à **6.94dB**, avec un gain égal à **3.54dB**.

III.4-Conception d'une nouvelle structure d'antenne imprimée :

Après avoir réalisée une antenne patch qui résonne a 11.7 GHz de forme rectangulaire, nous avons proposé un nouveau design de l'antenne, pour cela nous avons opté pour une forme octaèdre parce qu'elle occupe moins de surface sur le substrat que d'autre formes existantes telles que le patch rectangulaire et circulaire, en lui rajoutant une fente de forme U et à l'intérieur une fente centrale pour arriver enfin a un design nouveau et originale tout en obtenant de bonnes performances .

La structure de l'antenne proposée est montrée sur la **Figure III.12**.

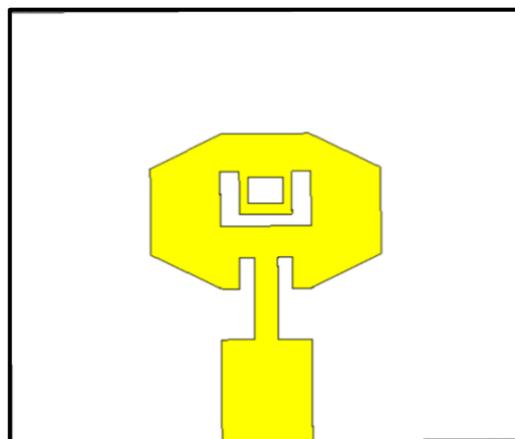


Figure III.12 : Géométrie de l'antenne octaèdre.

III.4.1-Résultat de simulation :

- Le coefficient de réflexion S_{11}

Nous avons bien une adaptation à la fréquence de 11,7GHz avec un coefficient de réflexion S_{11} égale à $-21,11dB$, qui est meilleur que l'antenne précédente

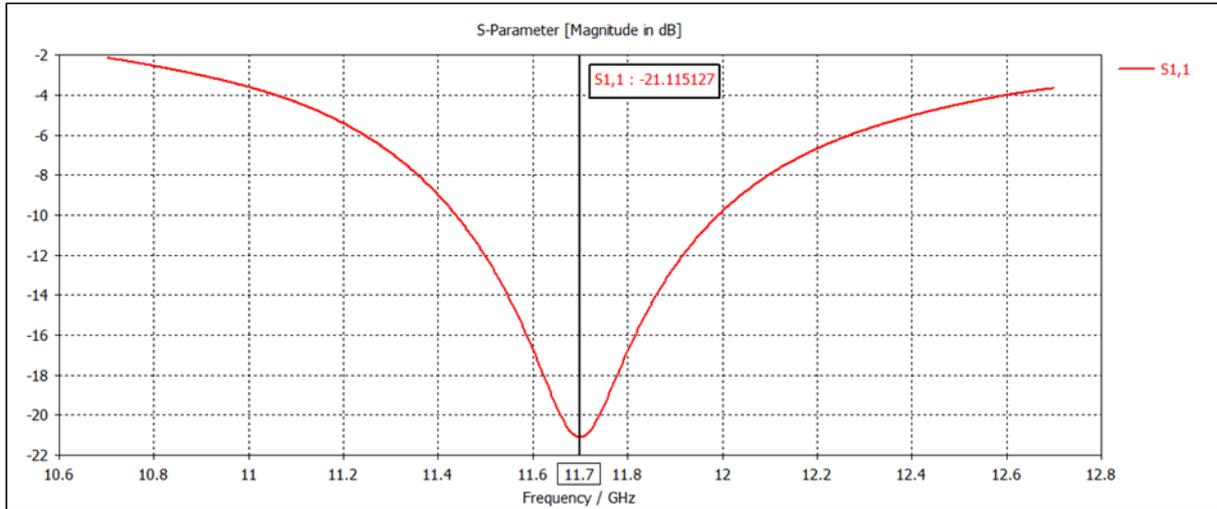


Figure III.13 : Le coefficient de réflexion de l'antenne.

- Le Voltage Standing Wave Ratio (VSWR):

Comme montré sur la figure suivante, le Taux d'onde stationnaire est < 2 à la fréquence 11.7GHz, ce qui signifie que l'antenne es bien adaptée à la fréquence désirée.

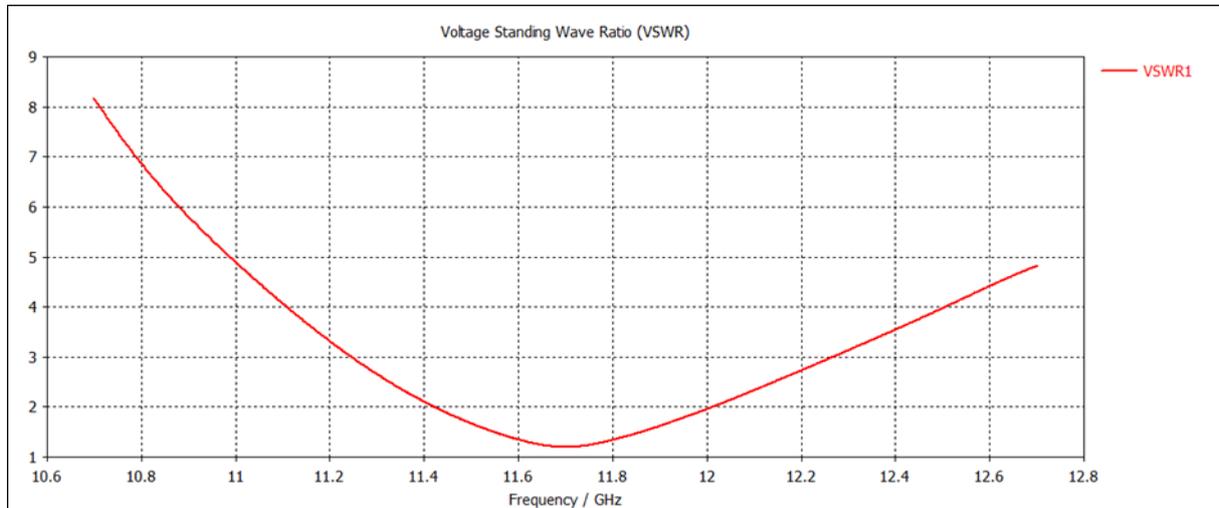


Figure III.14: Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).

• Le diagramme de rayonnement

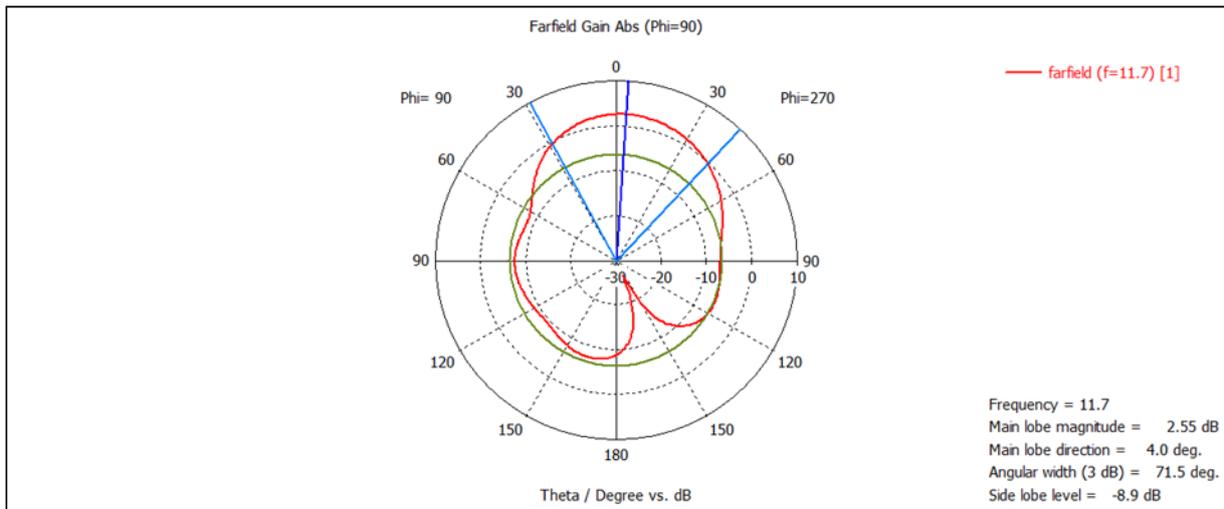


Figure III.15 : Gain d'antenne à 11.7GHz en polaire.

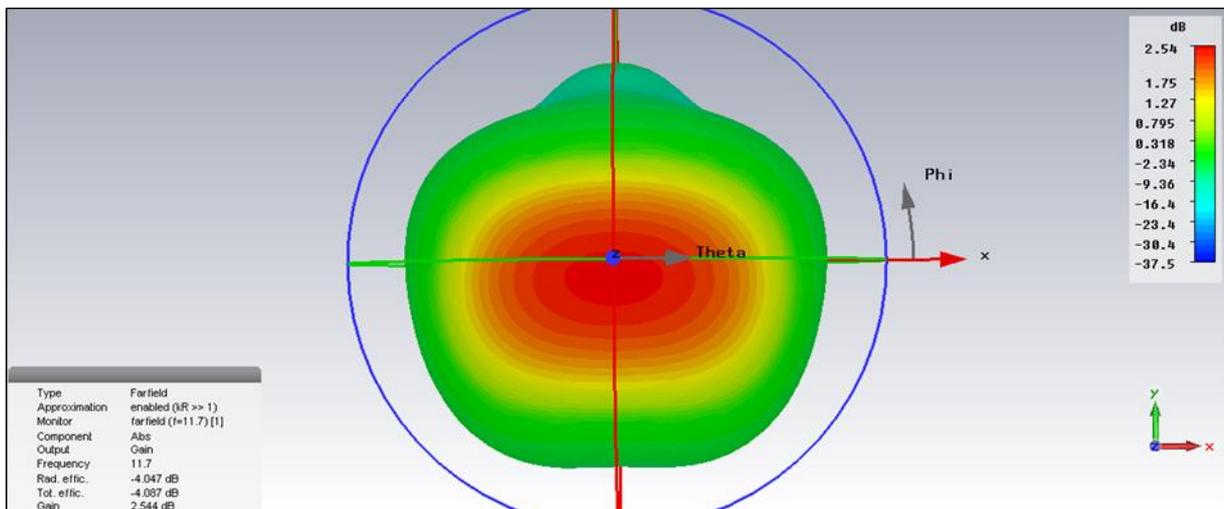


Figure III.16 : Gain de l'antenne à 11.7GHz en 3D

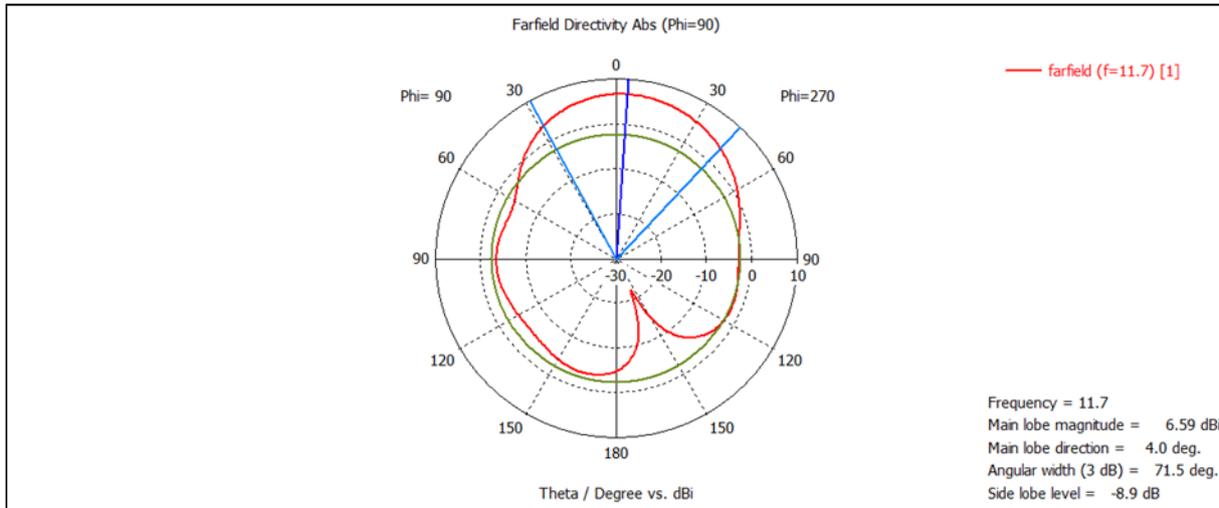


Figure III.17 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en polaire

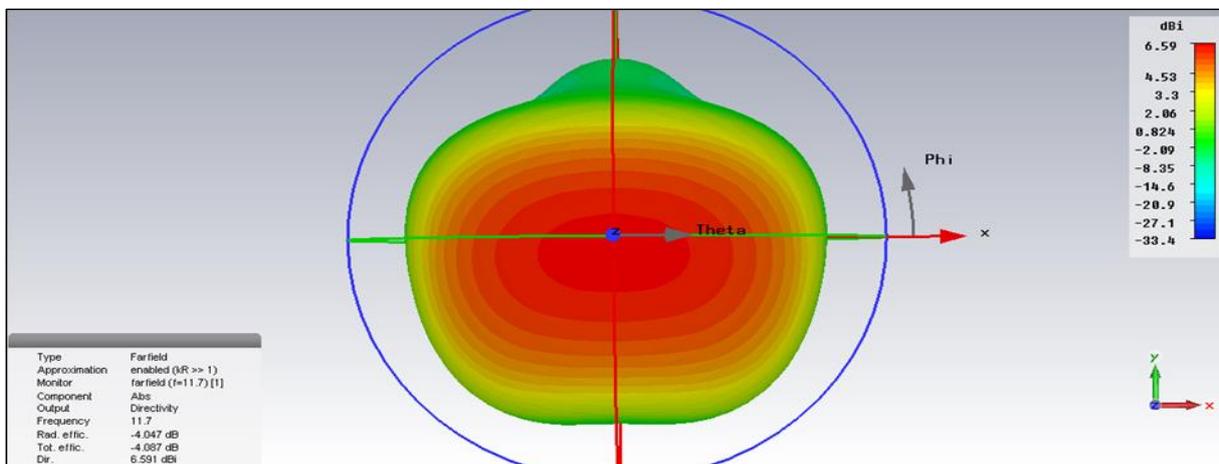


Figure III.18 : Directivité de l'antenne à 11.7GHz en 3D .

La représentation 3D de cette antenne a montré que la directivité est égale à **6.59dB** avec un gain égal à **2.54 dB**.

III.5-Antenne imprimée agile sur la bande Ku :

Comme déjà dit auparavant, l'agilité est faite soit en fréquence, soit en diagramme de rayonnement soit en polarisation. Pour notre étude nous allons faire l'agilité (la reconfiguration) en fréquence et en diagramme de rayonnement comme suit:

III.5.1-Agilité en fréquence :

Pour entamer ce type de reconfiguration sur notre antenne patch, nous allons insérer une diode varicap sur la fente du patch, qui a une capacité variable qui se varie dans la *bande Ku* entre $[0.5fF-1pF]$, avec une résistance de $0.07\ Ohm$ et une inductance de $0.2\ nH$.

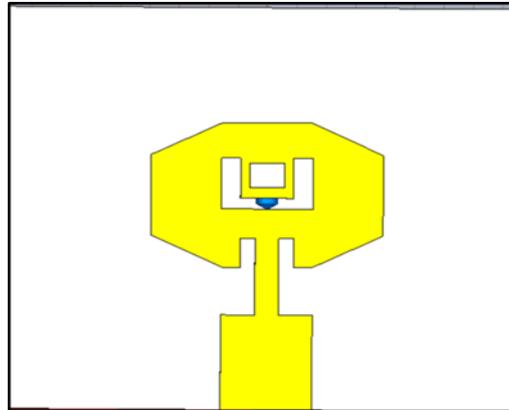


Figure III.19 : Antenne patch avec diode varicap.

La *figure III.20* montre la variation de la valeur de la capacité de la diode varicap en fonction de la fréquence.

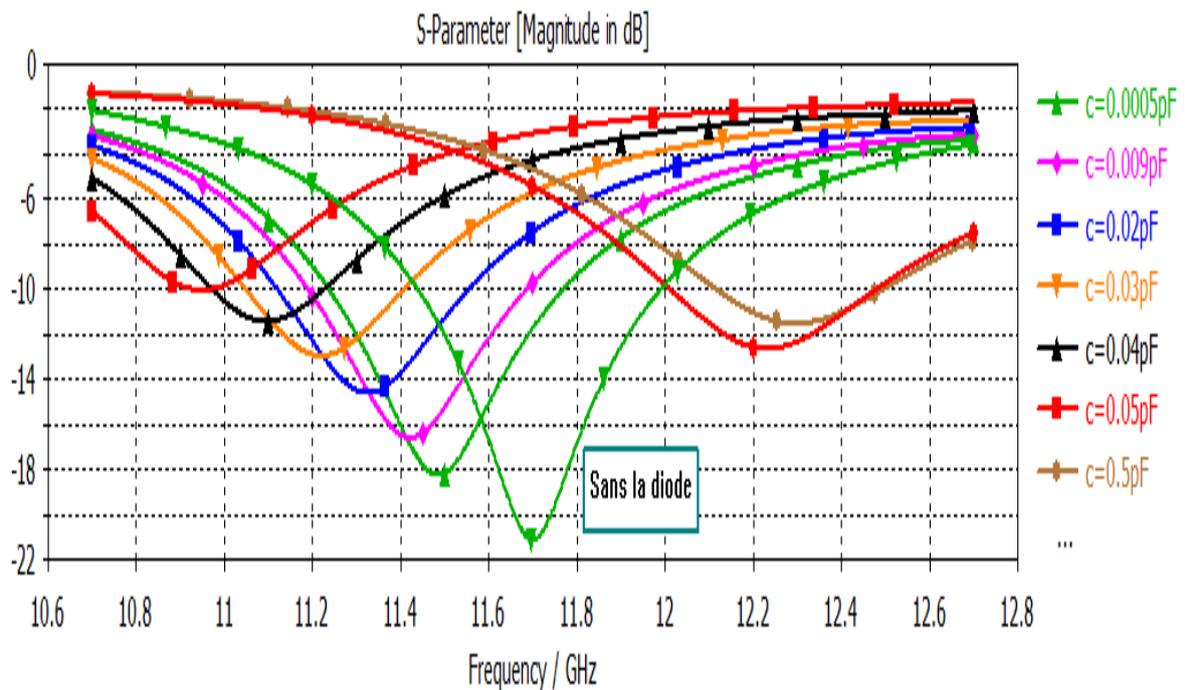


Figure III.20 : Le paramètre S11 pour différentes valeurs de la Capacité.

- **Résumé de simulation**

La valeur de capacité(PF)	0.005	0.009	0.02	0.03	0.04	0.05	0.5
La fréquence (GHZ)	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	12.2	12.3

Tableau III .3 : les paramètres S11 pour différente valeur de la capacité

Nous voyons bien qu'avec la même structure de l'antenne nous obtenons une variation fréquentielle dans la bande [10.9 à 12.3] GHz, et cela en variant juste la valeur de la diode Varicap, donc nous avons bien obtenu une agilité fréquentielle dans la bande Ku.

III.5.2-Agilité en diagramme de rayonnement :

Pour obtenir ce type de reconfiguration, nous allons utiliser le procédé des réseaux d'antennes (Annexe A), d'après la littérature ce type d'antennes a pour but de modifier la direction du diagramme de rayonnement dans des directions privilégiées.

- **Réseau de 2 éléments**

Le coefficient de réflexion obtenu à partir du réseau de 2 éléments est de -23.95dB (figure III.17), donc le réseau est bien adaptée à cette fréquence.

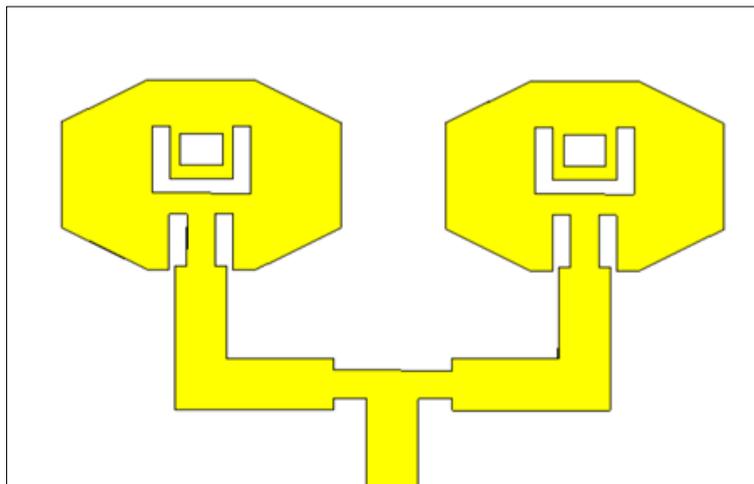


Figure III.21 : Réseau de 2 éléments

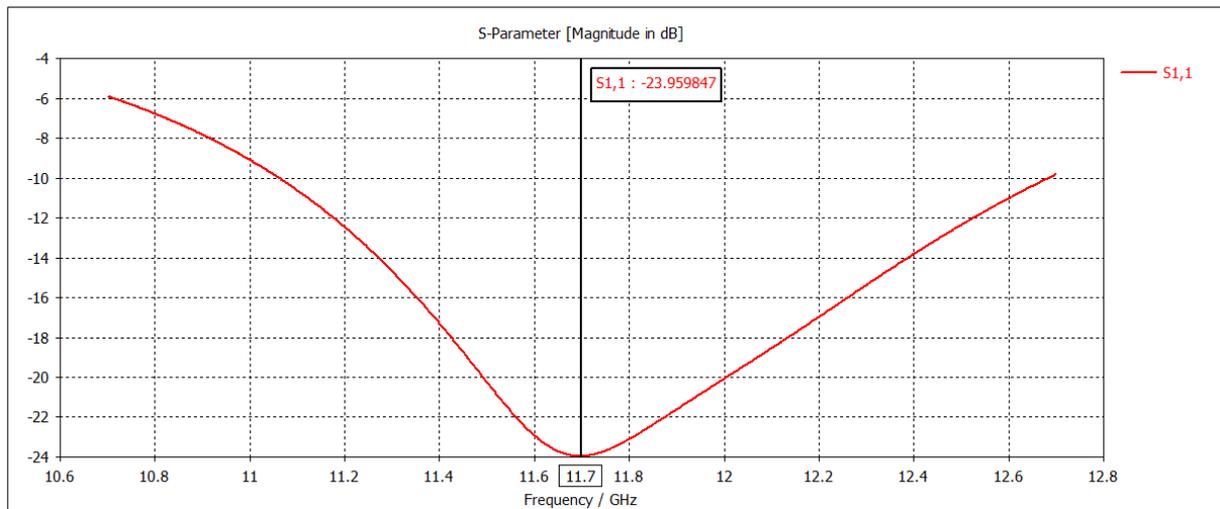


Figure III.22 : Paramètre S11 pour le réseau de 2 éléments

• Le diagramme de rayonnement

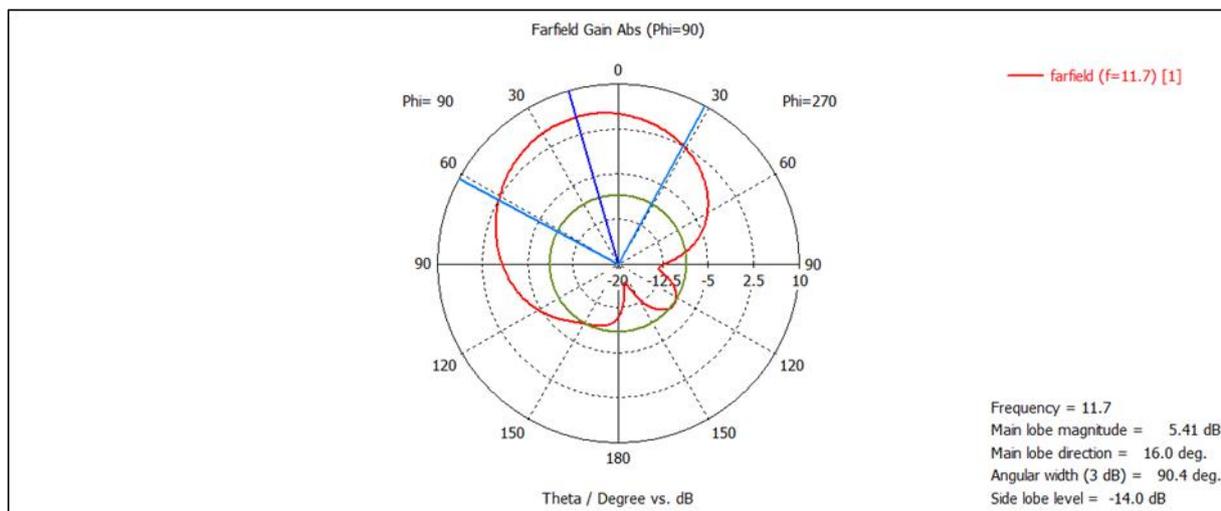


Figure III.23 : Gain de 2éléments à 11.7 GHz en polaire

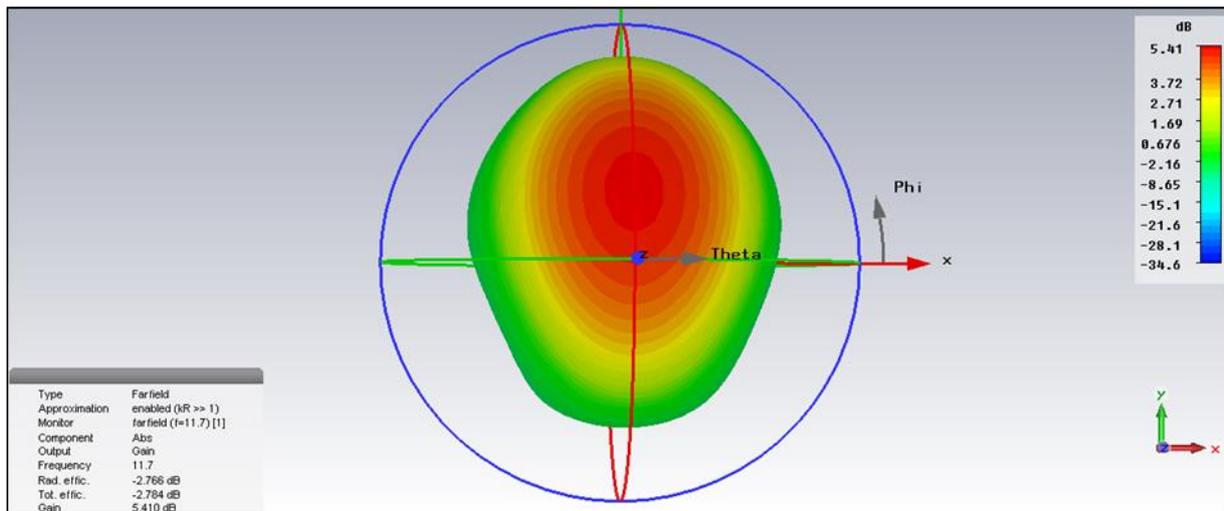


Figure III.24 : Gain de 2éléments à 11.7 GHz en 3D..

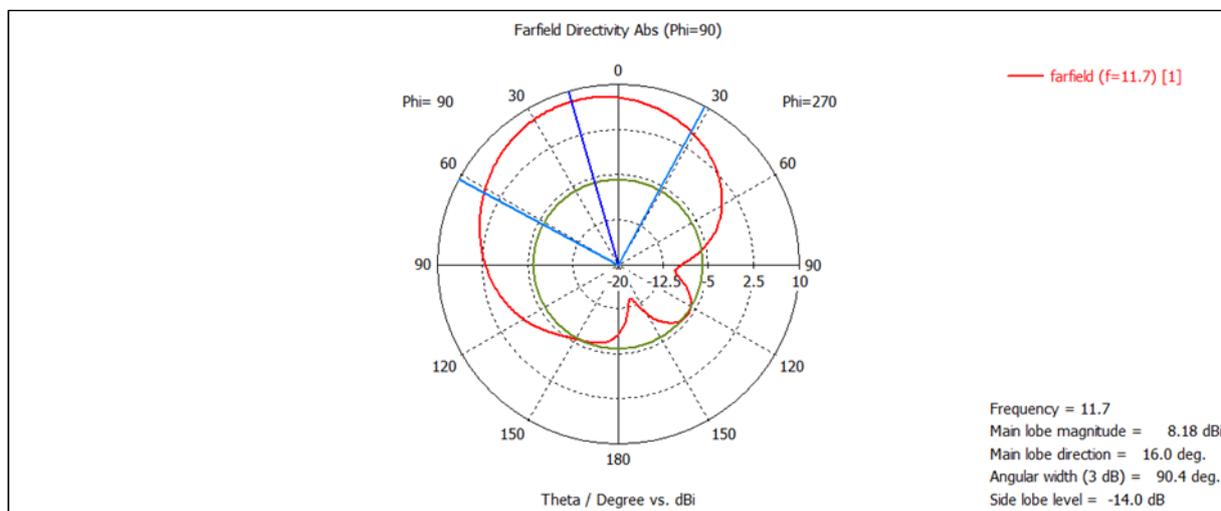


Figure III. 25 : Directivité de 2éléments à 11.7 GHz en polaire.

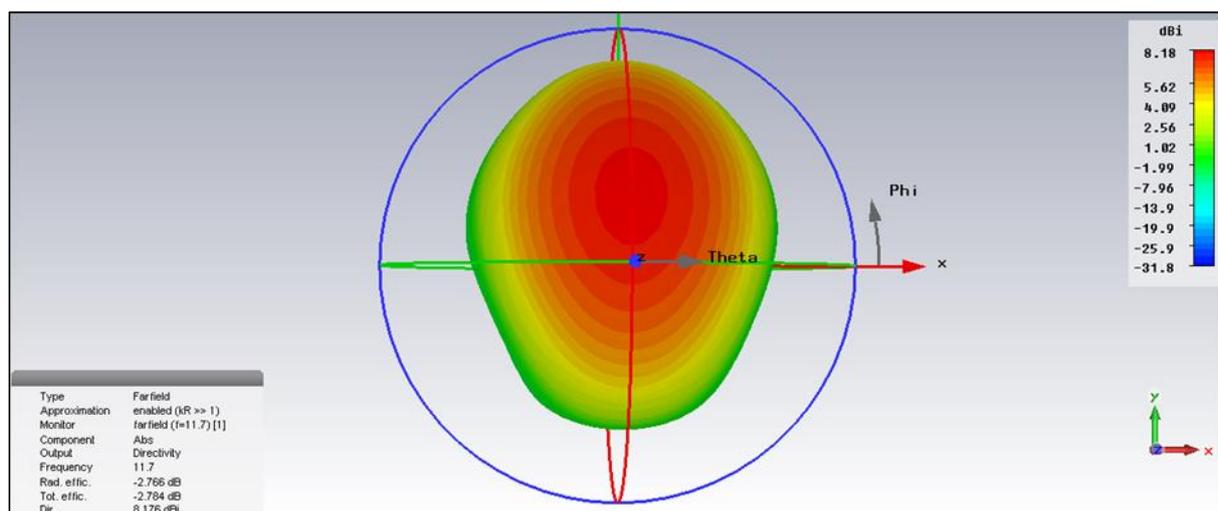


Figure III.26 : Directivité de 2éléments à 11.7 GHz en 3D

Après avoir fait le réseau de 2 éléments, nous avons obtenu une déformation de la direction du diagramme de rayonnement dans une direction de 16 deg, donc nous avons une modification du diagramme de rayonnement puisqu'il est directif.

- Réseau de 4 éléments

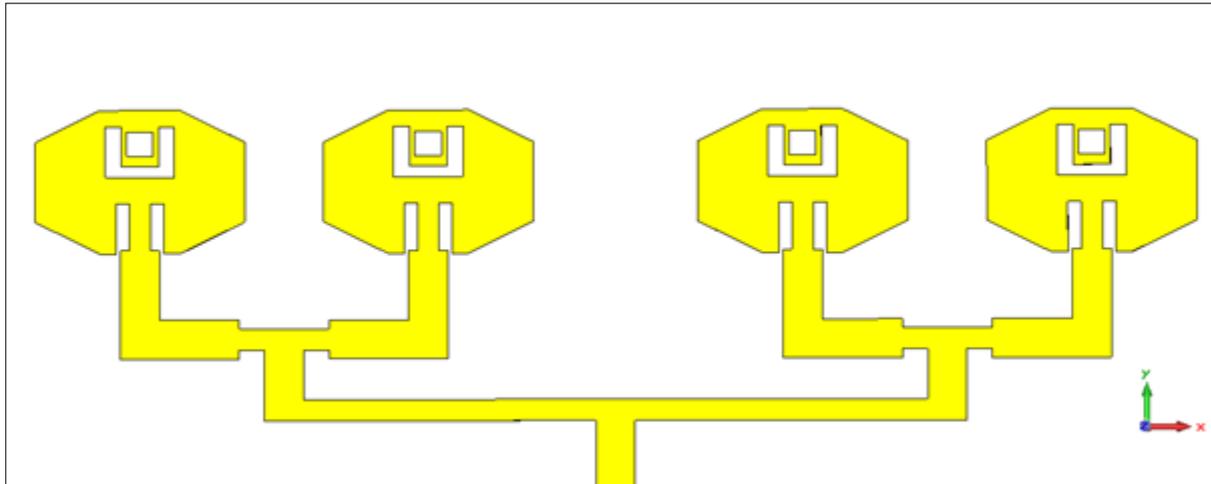


Figure III.27 : Réseau de 4 éléments

- Le coefficient de réflexion S_{11}

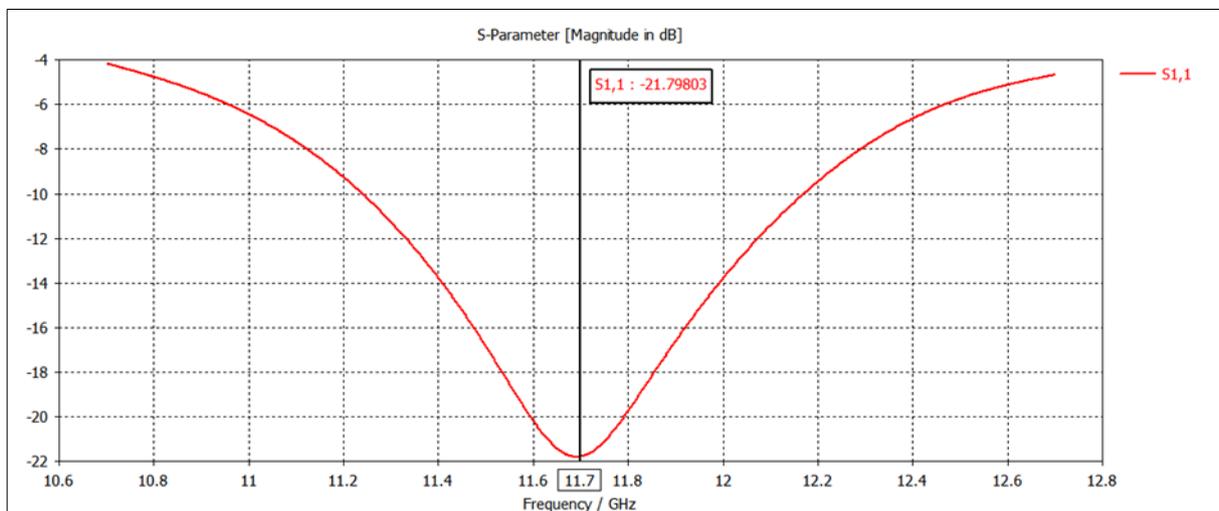


Figure III.28 : Paramètre S_{11} pour le réseau de 4 éléments

La aussi le coefficient de réflexion obtenu à partir du réseau de 4 éléments est de -21.78dB (figure III.20), donc le réseau est bien adaptée à cette fréquence.

• Le diagramme de rayonnement

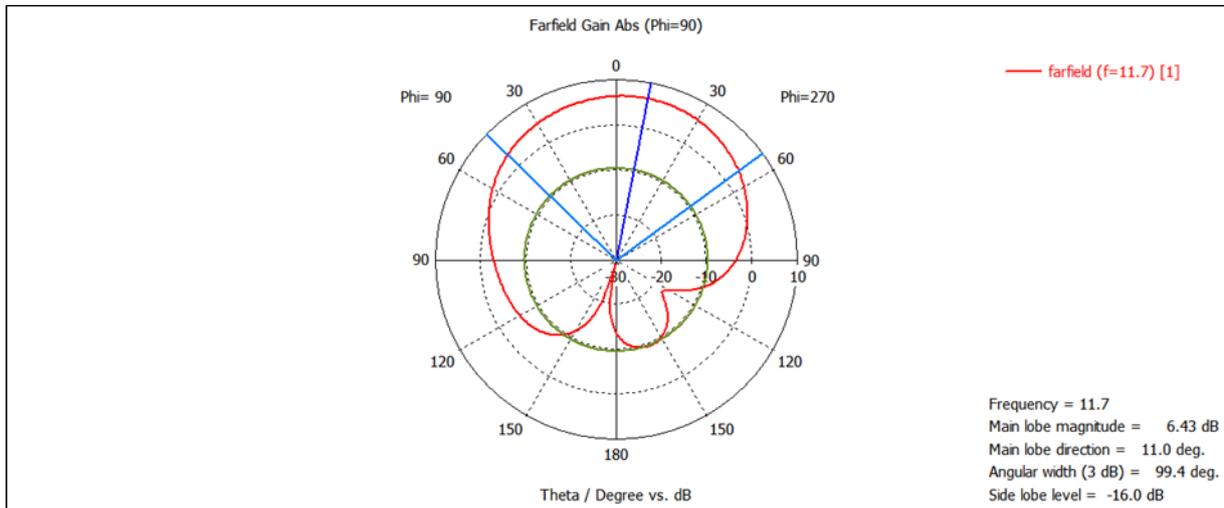


Figure III.29 : Gain de 4 éléments à 11.7 GHz en polaire.

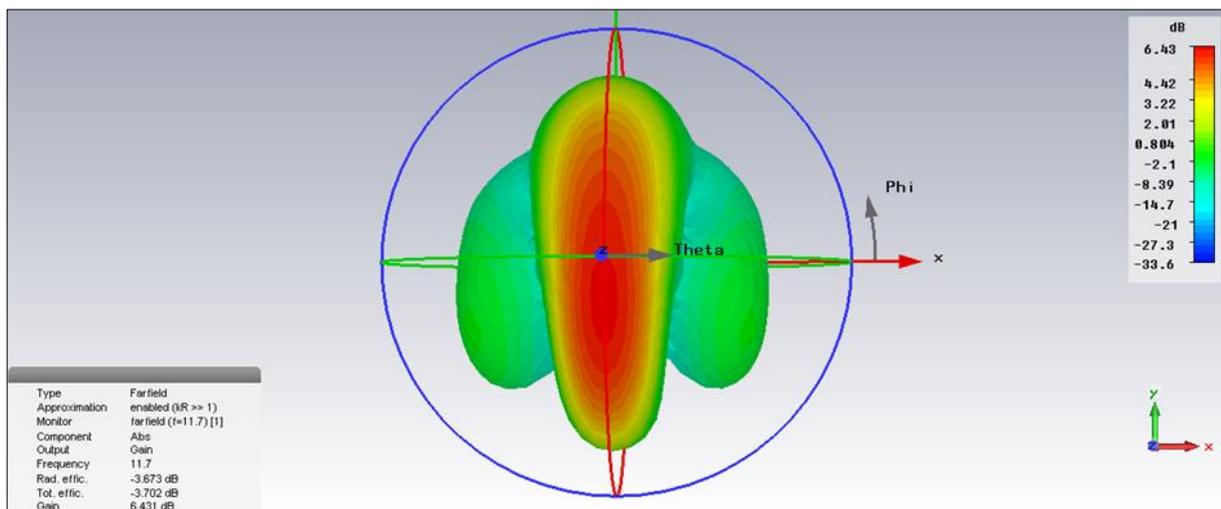


Figure III.30 : Gain de 4 éléments à 11.7 GHz en 3D.

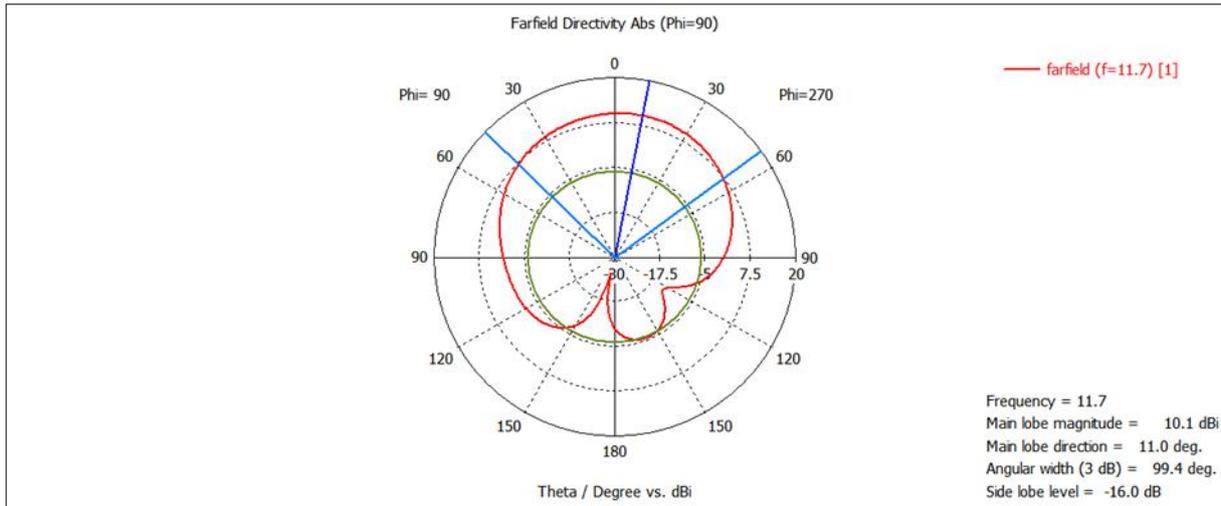


Figure III.31 : Directivité de 4 éléments à 11.7 GHz en polaire.

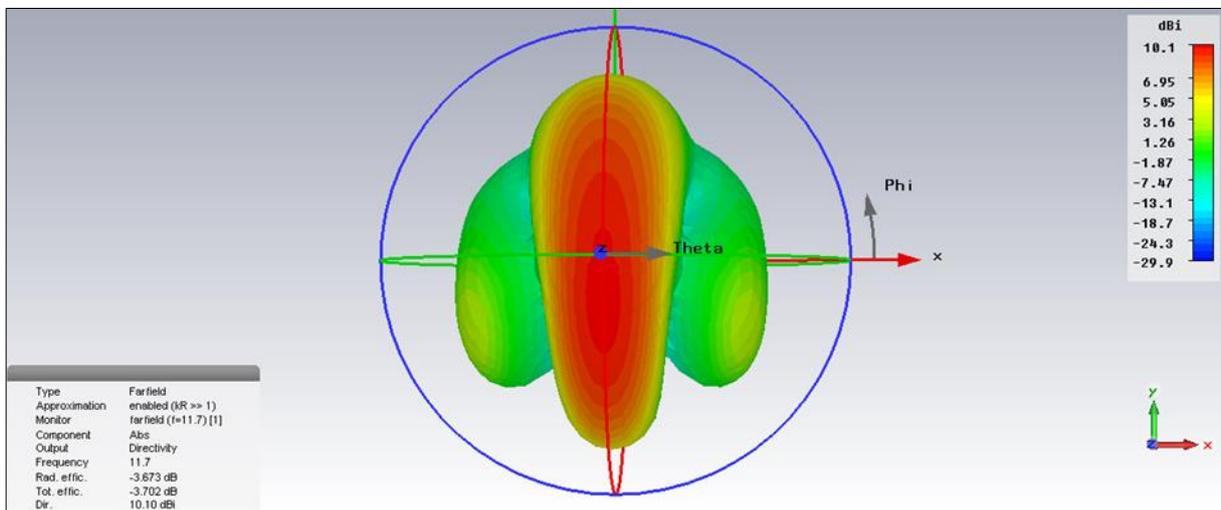


Figure III.32 : Directivité de 4 éléments à 11.7 GHz en 3D.

Le réseau de 4 éléments montre que le diagramme de rayonnement est directif avec un pointage de 11 deg, donc avons obtenu une légère déformation du diagramme de rayonnement.

• Résumé des résultats

	Le Gain (dB)	La Directivité (dBi)	Le pointage
1 seul élément	2.55	6.59	4 deg
2 éléments	5.41	8.18	16deg
4 éléments	6.43	10.1	11deg

Tableau III.4 : comparaison des résultats.

D'après le tableau nous remarquons que le gain et la directivité augmentent en augmentant le nombre des éléments, et le pointage ou l'orientation du diagramme de rayonnement change aussi.

III.6-Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'une antenne imprimée reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement .la reconfigurabilité est réalisée en utilisant des composantes actives présentées dans la diode varicap à l'aide d'un simulateur CST, l'antenne change sa fréquence dans la bande Ku chaque fois que la capacité de la diode a changée.

Ensuite, nous avons réalisé un réseau d'antenne patch reconfigurable de deux éléments et quatre éléments. Tous les coefficients de réflexion sont inférieurs à -10dB et les gains répondent aux exigences des applications spatiales qui sera un gain très élevé.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Le domaine spatiale est vaste et nécessite des antennes reconfigurables en fréquence, en polarisation et en diagramme de rayonnement. Nous avons choisi dans notre travail de développer une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement.

Dans le premier chapitre nous avons présenté une généralité sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques et leurs principales domaine d'application ;

Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons présenté la notions des antennes agiles (reconfigurables), les différentes techniques pour avoir cette agilité qui se fait en fréquence en ajoutant soit une diode PIN, diode Varicap ou MEMS, soit en diagramme de rayonnement par la mise en réseau de plusieurs éléments, ou en polarisation par l'utilisation de l'alimentation croisée.

Enfin, dans le troisième chapitre nous avons calculé les paramètres de l'antenne opérant dans la bande [10.7-12.7]GHz, et nous avons développé une nouvelle structure d'antenne adaptée par une ligne quart d'onde et encoche à la fréquence centrale de 11.7GHz. Nous avons ajouté une diode Varicap au sein de cette dernière pour modifier ces caractéristiques en fréquence, et en fin nous avons mis la structure en réseau pour modifier le diagramme de rayonnement.

Annexe A

Les Réseaux d'antennes imprimées

A.1 Principe des réseaux antennes :

L'objectif du réseau d'alimentation d'antenne est de fournir de l'énergie à différentes sources tout en respectant la loi de pondération. La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes micro ruban. Le réseau d'excitation peut avoir diverses structures selon les besoins.

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 microrubans. Nous montrons sur la figure (A.19) 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 (Figure A.19a)
- 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 (Figure. A.19b).

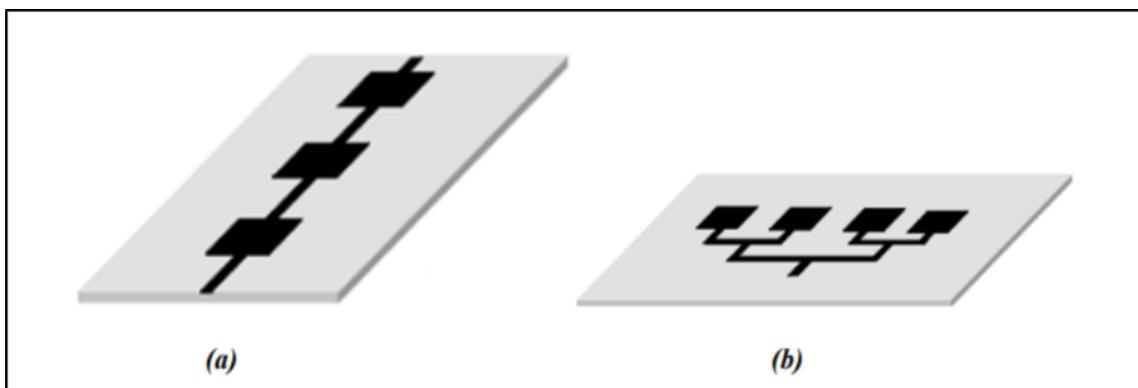


Figure A : Alimentation d'un réseau d'antennes patch. (a)-série (b)-parallèle