

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



# Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Science et technologie**

Filière : **Télécommunications**

Spécialité : **Systemes des télécommunications**

---

**Etude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant  
des composants actifs**

---

Présentée par :

**Gherbi Djihene**

Sous la direction de :

**Pr. Boualleg Ahcene**

**Juin 2023**

## *Remerciements*

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la patience et le courage afin d'arriver à la finalité de ce parcours.

Je voudrais dans un premier temps, remercier mon encadrant **Pr Boualleg Ahcene** qui a joué le plus grand rôle en me guidant pendant les étapes de l'achèvement de ce travail. Merci beaucoup pour votre patience et surtout pour vos précieux conseils.

Je remercie également les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à mes enseignants pendant mon cursus universitaire.

Un grand merci est également adressé à **Mme. Kaddeche Mounia**, celle qui m'a toujours aidé et m'a donné beaucoup de temps. Merci beaucoup mon adorable professeur.

## *Dédicace*

*« Où peut-on être mieux qu'au sein de sa famille » !*

*Jean- François Marmontel*

### **Je tien à dédier ce travail**

**A** mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

**A** ma sœur et mes frères ... pour leurs encouragements.

**A** toutes les personnes qui m'ont soutenue.

**Merci d'être toujours là pour moi**

*Djihen*

## ملخص

أصبحت إعادة التشكيل تقنية مستخدمة على نطاق واسع في الاتصالات اللاسلكية لتحسين أداء الأنظمة المختلفة.

كخطوة أولى، اقترحنا نموذجًا أساسيًا يتكون من عنصر إشعاع واحد على شكل مربع. تمنحنا نتيجة المحاكاة باستخدام برنامج CST ترددًا رنًا يبلغ 2.45 جيجاهرتز لتطبيقات الويفي. كخطوة ثانية ولتحقيق دالة إعادة التشكيل، قمنا بإدخال ثنائي الفاراكتور من النوع MA46H120 بين عنصر الإشعاع وكعب المطابقة المستطيل الشكل. وبالنظر إلى الصعوبات المصادفة عند استخدام ثنائي الفاراكتور، استبدلنا هذا العنصر بثنائي PIN نوع MPP4203. نظرًا لعدم توفر ثنائي PIN في مختبرنا، فقد استبدلناه بدبوس معدني، لأنه له نفس الوظيفة.

من أجل تحسين الأداء الإشعاعي للوسيلة الأساسية، تم اقتراح مصفوفة هوائية تتكون من عنصرين مشعين متطابقين على شكل مربع يتم تغذيتهما بواسطة فاصل طاقة. T-junction. تظهر نتائج المحاكاة أن وظيفة إعادة تشكيل التردد يتم تنفيذها بنجاح، والحصول على ترددات رنين تنتمي إلى نطاق ISM

**الكلمات الرئيسية:** هوائي قابل لإعادة التشكيل، هوائي مصفوفة، ثنائي الفاراكتور، ثنائي PIN، دبوس معدني، نطاق ISM

## Résumé

La reconfigurabilité est devenue une technologie largement utilisée dans le domaine de communications sans fil pour améliorer les performances des différents systèmes.

Dans un premier temps, on a proposé un modèle de base composé d'un seul élément rayonnant de forme carré. Les résultats de simulation par le logiciel CST nous donne une fréquence de résonance de 2.45 GHz (pour les applications Wi-Fi).

Dans un second temps et pour réaliser la fonction de reconfigurabilité, on a inséré une diode Varactor (de type MA46H120) au bord rayonnant du patch chargé par un stub de forme rectangulaire. Vue les difficultés rencontrés lors de l'utilisation de la diode Varactor, on a remplacé cet élément par une diode PIN (de type MPP4203). Vue la non disponibilité de la diode PIN au niveau de notre laboratoire, on a remplacé par un plot métallique puisqu'il a le même rôle qu'une diode PIN.

Afin d'améliorer les performances de rayonnement du modèle de base, on a proposé un réseau d'antennes composé de deux éléments rayonnants identiques de forme carré alimentés par un diviseur de puissance à jonction en T. les résultats de simulation montrent que la fonction de reconfigurabilité en fréquence est effectuée avec succès en obtenant des fréquences de résonances appartiennent à la bande ISM.

**Mots-clés :** Antenne reconfigurable, antenne réseau, bande ISM, diode Varactor, diode PIN, plots métalliques.

## Abstract

Reconfigurability has become a widely used technology in wireless communications to improve the performance of different systems.

As a first step, we proposed a basic model consisting of a single square-shaped radiating element. Simulation result using CST software give us a resonant frequency of 2.45 GHz (for Wi-Fi applications).

As a second step and to realize the reconfigurability function, we inserted a Varactor Diode (type MA46H120) between the radiating element and rectangular-shaped matching stub. In view of the difficulties encountered when using the Varactor Diode, we replaced this element with a PIN Diode (MPP4203 type). Given the unavailability of the PIN Diode in our laboratory, we replaced it with a metal pin, as it has the same function as a PIN Diode.

In order to improve the radiation performance of the basic modal, an antenna array consisting of two identical square-shaped radiating elements fed by a T-junction power divider has been proposed. Simulation results show that the frequency reconfigurability function is successfully performed, obtaining resonance frequencies belonging in the ISM Band.

**Keywords:** Reconfigurable antenna, array antenna, ISM band, Varactor Diode, PIN Diode, metal pin.

## Table des matières

Remerciements .....	I
Dédicace .....	II
ملخص.....	III
Résumé.....	IV
Abstract .....	V
Liste des figures .....	X
Liste des tableaux .....	XIII
Liste des abréviations .....	XIV
Liste des symboles .....	XVI
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les antennes imprimées</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Description de l'antenne imprimée.....	4
I.4 Caractéristiques des antennes imprimées.....	5
I.4.1 Caractéristiques électriques.....	6
I.4.1.1 Impédance d'entrée de l'antenne.....	6
I.4.1.2 Coefficient de réflexion.....	6
I.4.1.3 Le taux d'onde stationnaire (TOS).....	7
I.4.1.4 La bande passante.....	7
I.4.2 Caractéristiques de rayonnement.....	8
I.4.2.1 Diagramme de rayonnement.....	8
I.4.2.2 Angle d'ouverture.....	9
I.4.2.3 La directivité.....	10
I.4.2.4 Le gain.....	10
I.4.2.5 Le rendement.....	10

I.4.2.6 La polarisation .....	10
I.5 Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées .....	11
I.6 Techniques d'alimentation des antennes imprimées.....	11
I.6.1 Alimentation par ligne microruban .....	12
I.6.2 Alimentation par sonde coaxiale .....	13
I.6.3 Alimentation couplée par ligne microruban.....	14
I.6.4 Alimentation par couplage à travers une fente.....	14
I.6.5 Alimentation par guides d'ondes coplanaires .....	15
I.7 Méthodes d'analyses des antennes imprimées.....	16
I.7.1 Méthodes analytiques .....	16
I.7.1.1 Modèle de la ligne de transmission .....	16
I.7.1.2 Modèle de la cavité.....	16
I.7.2 Méthodes numériques .....	17
I.7.2.1 Méthode des éléments finis .....	18
I.7.2.2 Méthode des différences finies .....	18
I.7.2.3 Méthode des moments (MOM) .....	19
I.8 Applications des antennes imprimées .....	19
I.9 Avantages et limitations des antennes imprimées : .....	21
I.9 Conclusion .....	21

## **Chapitre II : Les techniques de reconfigurabilité**

II.1 Introduction .....	23
II.2 Les antennes reconfigurables.....	23
II.2.1 Historique.....	23
II.2.2 Définition des antennes reconfigurables .....	23
II.2.3 les types des antennes reconfigurables .....	24
II.2.4 Intérêts et application des antennes reconfigurables.....	24
II.3 Les techniques de reconfigurabilité .....	25

II.3.1 Diode Varacor .....	26
II.3.2 Diode PIN .....	27
II.3.3 Les transistors FET .....	28
II.3.4 Les RF-MEMS .....	29
II.3.5 Les matériaux agiles .....	30
II.4 Les types de reconfigurabilité.....	32
II.4.1 Reconfigurabilité en fréquence .....	32
II.4.2 Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement .....	33
II.4.3 Reconfigurabilité en polarisation .....	35
II.5 Avantages et inconvénients .....	37
II.6 Conclusion .....	38
 <b>Chapitre III : Conception et simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement</b>	
III.1 Introduction .....	40
III.2 Présentation du logiciel de simulation CST .....	40
III.3 La géométrie de l'antenne de base .....	41
III.3.1 Description.....	41
III.3.2 Résultats de simulation.....	42
III.4 Conception d'une antenne reconfigurable à un seul élément.....	43
III.4.1 Utilisation de la Diode Varactor .....	43
III.4.2 Utilisation de la Diode PIN .....	45
III.4.3 Utilisation d'un plot métallique .....	47
III.5 Conception d'une antenne reconfigurable à deux éléments.....	49
III.5.1 La géométrie de la nouvelle antenne proposée.....	49
III.5.2 résultats de simulation et discussions .....	51
III.6 Conclusion.....	56
 <b>Chapitre IV : Réalisation et validation expérimentale</b>	
IV.1 Introduction.....	58

IV.2 Matériels utilisés .....	58
IV.2.1 La machine LPKF ProtoMap E44 .....	58
IV.2.2 Appareil de mesure.....	58
IV.3 Prototype réalisé.....	59
IV.4 Mesures expérimentales .....	60
IV.4.1 Mesure du coefficient de réflexion.....	60
IV.5 Conclusion .....	62
Conclusion générale : .....	64
Bibliographie :.....	66
Annexe : .....	72

## Liste des figures

### Figures Chapitre I :

<b>Figure I. 1:</b> Structure d'une antenne imprimée.....	5
<b>Figure I. 2:</b> Les différentes formes d'une antenne imprimée.....	5
<b>Figure I. 3:</b> Modèle d'impédance complexe d'une antenne .....	6
<b>Figure I. 4:</b> Paramètres S pour un circuit à deux ports .....	6
<b>Figure I. 5:</b> Bande passante d'une antenne .....	8
<b>Figure I. 6:</b> Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne .....	9
<b>Figure I. 7:</b> Diagramme de rayonnement pour différents types d'antenne .....	9
<b>Figure I. 8:</b> Angle d'ouverture d'une antenne.....	9
<b>Figure I. 9:</b> Différentes types de polarisation d'une antenne .....	11
<b>Figure I. 10:</b> Distribution des charges et densité du courant sur une antenne microruban .....	11
<b>Figure I. 11:</b> Schéma représentatif des méthodes d'alimentation.....	12
<b>Figure I. 12:</b> Alimentation par ligne microruban .....	12
<b>Figure I. 13:</b> Type de la ligne microruban .....	13
<b>Figure I. 14:</b> Alimentation par ligne coaxial .....	13
<b>Figure I. 15:</b> Alimentation couplée par ligne microruban .....	14
<b>Figure I. 16:</b> Alimentation couplée par fente .....	14
<b>Figure I. 17:</b> Vue en coupe d'une ligne coplanaire.....	15
<b>Figure I. 18:</b> Représentation des modes de propagation d'une ligne coplanaire .....	15
<b>Figure I. 19:</b> Modèle de la ligne de transmission.....	16
<b>Figure I. 20:</b> Modèle de la cavité .....	17
<b>Figure I. 21:</b> Représentation des murs électriques et magnétiques dans le modèle de la cavité .....	17
<b>Figure I. 22:</b> Volume de calcul et cellule élémentaire .....	18

### Figures Chapitre II :

<b>Figure II. 1:</b> Schéma représentatif des types d'antennes reconfigurables .....	24
<b>Figure II. 2:</b> Symbole et exemples des diodes Varactor commercialement disponibles [29]	26
<b>Figure II. 3:</b> Circuit équivalent de diode Varactor .....	26

<b>Figure II. 4:</b> Capacité de jonction variable du varactor MA46H120 correspondant à la variation de la tension de polarisation inverse .....	27
<b>Figure II. 5:</b> Images des diodes PIN commercialisables et son schéma de jonction .....	28
<b>Figure II. 6:</b> Circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON-OFF .....	28
<b>Figure II. 7:</b> Schéma équivalent d'un transistor FET .....	28
<b>Figure II. 8:</b> Modèle de circuit équivalent et de commutateur RF-MEMS. ....	29
<b>Figure II. 9:</b> Schéma de l'orientation des molécules des cristaux liquides sous l'action d'un champ électrique .....	31
<b>Figure II. 10:</b> Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence indiquant les paramètres permettant d'évaluer les performances de l'antenne .....	33
<b>Figure II. 11:</b> Exemples d'antennes reconfiguration en diagramme de rayonnement par RF MEMS [40]. ....	34
<b>Figure II. 12:</b> Exemple d'antenne reconfigurable à polarisation par RF-MEMS .....	36
<b>Figure II. 13:</b> Exemple d'antenne reconfigurable à polarisation par diode PIN .....	36

### **Figures Chapitre III :**

<b>Figure III. 1:</b> L'interface graphique de logiciel CST Microwave Studio 2019. ....	41
<b>Figure III. 2:</b> Structure de l'antenne de base : (a) vus de dessus (b) vus de dessous. ....	42
<b>Figure III. 3:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne de base. ....	43
<b>Figure III. 4:</b> Antenne reconfigurable avec une Diode Varactor. ....	43
<b>Figure III. 5:</b> Coefficient de réflexion de l'antenne reconfigurable en fréquence avec trois tensions de polarisations différentes .....	44
<b>Figure III. 6:</b> Antenne reconfigurable avec une Diode PIN. ....	45
<b>Figure III. 7:</b> Antenne reconfigurable avec un plot métallique (état ON). ....	47
<b>Figure III. 8:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ à l'état ON avec un plot métallique. ....	47
<b>Figure III. 9:</b> Antenne reconfigurable avec un plot métallique (état OFF). ....	47
<b>Figure III. 10:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ à l'état OFF avec un plot métallique. ....	48
<b>Figure III. 11:</b> Diagramme de rayonnement avec un plot métallique à l'état ON. ....	48
<b>Figure III. 12:</b> Diagramme de rayonnement avec un plot métallique à l'état OFF .....	49
<b>Figure III. 13:</b> Antenne réseau à deux éléments. ....	49
<b>Figure III. 14:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne réseau. ....	50
<b>Figure III. 15:</b> Antenne réseau reconfigurable avec deux plots à l'état ON-ON. ....	51
<b>Figure III. 16:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ à l'état ON-ON. ....	51
<b>Figure III. 17:</b> Antenne réseau reconfigurable avec deux plots à l'état ON-OFF. ....	51
<b>Figure III. 18:</b> Coefficient de réflexion $S_{11}$ à l'état ON-OFF. ....	52

**Figures Chapitre IV :**

<b>Figure IV. 1:</b> La machine LPKE ProtoMap E44.....	58
<b>Figure IV. 2 :</b> L'analyseur de réseau 'R&S ®ZNB20'.....	59
<b>Figure IV. 3:</b> Connecteur SMA.....	59
<b>Figure IV. 4:</b> Prototype réalisé.....	60
<b>Figure IV. 5:</b> Configuration du test de l'antenne .....	60
<b>Figure IV. 6:</b> Comparaison du $S_{11}$ simulé et mesuré à l'état ON-ON.....	61
<b>Figure IV. 7:</b> Comparaison du $S_{11}$ simulé et mesuré à l'état ON-OFF.....	61

## Liste des tableaux

### Tableaux chapitre I :

<b>Tableau I. 1:</b> Avantages et inconvénients de la ligne microruban .....	13
<b>Tableau I. 2:</b> Avantages et inconvénients de la sonde coaxiale.....	13
<b>Tableau I. 3:</b> Avantages et inconvénients du couplage par ligne microruban .....	14
<b>Tableau I. 4:</b> Avantages et inconvénients du couplage par fente .....	15
<b>Tableau I. 5:</b> Avantages et inconvénients de la ligne coplanaire.....	15

### Tableaux chapitre II :

<b>Tableau II. 1:</b> Les paramètres de Varactor .....	27
<b>Tableau II. 2:</b> Comparaison entre les différents composants de la commutation.....	30
<b>Tableau II. 3:</b> Comparaison des performances de différents matériaux agiles.....	32

### Tableaux chapitre III :

<b>Tableau III. 1:</b> Paramètres géométriques de l'antenne proposée. ....	42
<b>Tableau III. 2:</b> Les résultats de simulation en utilisant la diode Varactor.....	44
<b>Tableau III. 3:</b> Comparaison de l'antenne reconfigurable simulée avec une autre antenne d'article.....	44
<b>Tableau III. 4:</b> Tableau représentatif des coefficients de réflexion de la diode PIN selon les différents paramètres .....	46
<b>Tableau III. 6:</b> les différents paramètres de l'antenne réseau proposée. ....	50
<b>Tableau III. 7:</b> Les résultats de simulation de l'antenne réseau avec deux plots métalliques.....	52
<b>Tableau III. 8:</b> Comparaison de l'antenne réseau reconfigurable simulée avec une autre antenne d'article. ....	53

### Tableaux chapitre IV :

<b>Tableau IV. 1:</b> Comparaison des résultats simulés et mesurés. ....	62
--	----

## Liste des abréviations

### **B**

BP                      **B**ande **P**assante

### **C**

CPW                    **C**o **P**lanar **W**aveguide

CST                    **C**omputer **S**imulation **T**echnology

### **E**

EM                    **E**lectro **M**agnétique

### **F**

FCC                    **F**ederal **C**ommunication **C**ommission

FDTD                  **F**init **D**ifference **T**ime **D**omain

FEM                    **F**init **E**lements **M**ethod

### **G**

GPR                    **G**round **P**enetrating **R**adar

GPS                    **G**round **P**ositioning **S**ystem

### **H**

HFSS                  **H**igh **F**requency **S**tructure **S**imulator

### **M**

MEMS                 **M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystem

MIMO                 **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput

MLT                    **M**éthode de la **L**igne de **T**ransmission

MOM                  **M**ethod **O**f **M**oments

### **P**

PIN                    **P**ositive **I**ntrinsic **N**egative

### **R**

RF                     **R**adio **F**requency

RFID	<b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> Dentification
<b>T</b>	
TOS	<b>T</b> aux d' <b>O</b> nde <b>S</b> tationnaire
TR	<b>T</b> uning <b>R</b> ange
<b>U</b>	
ULB	<b>U</b> ltra <b>L</b> arge <b>B</b> ande
<b>W</b>	
Wi-Fi	<b>W</b> ireless <b>F</b> idelity
WiMAX	<b>W</b> orldwide <b>I</b> nteroperability <b>M</b> icrowave <b>A</b> ccess
WLAN	<b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork

## Liste des symboles

<b><math>D(\Theta, \varphi)</math></b>	Directivité de l'antenne
<b><math>f_c</math></b>	Fréquence centrale
<b><math>G(\Theta, \varphi)</math></b>	Gain de l'antenne
<b><math>P(\Theta, \varphi)</math></b>	La puissance rayonnée par unité d'angle solide
<b><math>P_0(\Theta, \varphi)</math></b>	La puissance maximale
<b><math>r(\Theta, \varphi)</math></b>	La fonction caractéristique de l'antenne
<b><math>S_{11}</math></b>	Coefficient de réflexion
<b><math>Z_e</math></b>	Impédance d'entrée de l'antenne
<b><math>Z_c</math></b>	Impédance caractéristique de la ligne

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Les communications sans fil ont connu une évolution rapide ces dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie, pour devenir un aspect indispensable de notre vie quotidienne.

Parmi les préoccupations de domaine des télécommunications sans fil, on trouve les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques. Plus précisément, une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un récepteur.

Les antennes imprimées (patch) sont les plus utilisées dans les systèmes de communications sans fil grâce aux avantages qu'elles présentent tels que : le faible poids et la facilité d'intégration. En effet, ces antennes présentent quelques limitations, elles fonctionnent sur des bandes étroites prédéfinies. Les applications émergentes de communications sans fil nécessitent des systèmes antennaires avancées qui sont capables de satisfaire les besoins. Pour cela, l'antenne reconfigurable peut être la solution pour répondre aux nouveaux standards.

Les antennes reconfigurables sont des antennes qui peuvent modifier ses caractéristiques tels que la fréquence, le diagramme de rayonnement et la polarisation pour s'adapter à différents besoins de communication. Elles sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes de communications sans fil (Wi-Fi, WLAN, ...), les radars, les satellites.

La reconfiguration d'une antenne peut être réalisé en intégrant dans sa structure un ou plusieurs dispositifs agiles tels que des diodes PIN, des diodes Varactor, des dispositifs de types RF-MEMS ou encore des matériaux agiles.

L'objectif de ce mémoire est l'étude et la conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement en utilisant des composants actifs. La simulation de l'antenne sera réalisée sous le logiciel CST MWS (Computer Simulation Technology-Microwaves Studio).

Ce mémoire est devisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre (**Généralités sur les antennes imprimées**) sera consacré à l'étude des antennes imprimées, leurs caractéristiques et le mécanisme de rayonnement sont décrits. Les

techniques d'alimentations ainsi que les méthodes d'analyses sont également présentées. Les avantages et limitations de ces antennes sont évoqués enfin de ce chapitre.

Dans le second chapitre intitulé : **les techniques de reconfigurabilité**, nous allons au début définir les antennes reconfigurables, et leurs intérêts et applications. Puis, nous allons expliquer les différents les techniques de reconfigurabilité ainsi que les différents types de reconfiguration. On clôture le chapitre par quelques avantages et inconvénients de ces antennes.

Le troisième chapitre qui est l'axe de notre mémoire intitulé : **conception et simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence** expose deux parties. Dans la première partie, trois simulations avec Diode Varactor, Diode Pin et Plot métallique seront exploitées pour une antenne à un seul élément rayonnant. Dans la deuxième partie, une simulation d'une antenne réseau à deux éléments rayonnants avec des plots métalliques sera montrée.

Le quatrième chapitre : **Réalisation et validation expérimentale** sera consacré à la réalisation de l'antenne réseau à deux éléments rayonnants à l'aide de la machine à gravure LPKE au niveau de laboratoire de Télécommunications 8 Mai 1945 GUELMA.

Une petite comparaison entre les résultats simulés et réalisés sera montrée.

Finalement, le mémoire se termine par une conclusion générale qui récapitule les travaux réalisés.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les antennes imprimées*

## I.1 Introduction

Depuis des années, les télécommunications sans fil connaissent une évolution très rapide. Cette évolution remarquable nécessite l'utilisation de nouvelles technologies pouvant améliorer les performances des échanges de l'information.

Dans le système de télécommunication sans fil, les antennes sont devenues les éléments de base. Parmi les antennes les plus populaires de nos jours : **les antennes imprimées** (ou **micro-ruban**) ; elles sont implantées dans de nombreux dispositifs électroniques tel que le téléphone portable grâce à leurs faibles poids et la facilité de réalisation.

Le but de ce chapitre est de présenter les notions de base des antennes imprimées tels que les caractéristiques, les techniques d'alimentation et les méthodes d'analyses, ainsi que les domaines d'applications. On terminera ce chapitre par les avantages et limitations de ces antennes.

## I.2 Historique

Le concept d'antennes imprimées, appelées aussi antennes microrubans (microstrip patch en anglais) n'est pas un concept nouveau. Les premières publications apparaissent en 1953 avec Deschamps et en 1955 avec le dépôt d'un brevet français par Gutton et Baissinot. Les premières réalisations naissent avec Howell et Munson en 1970 [1].

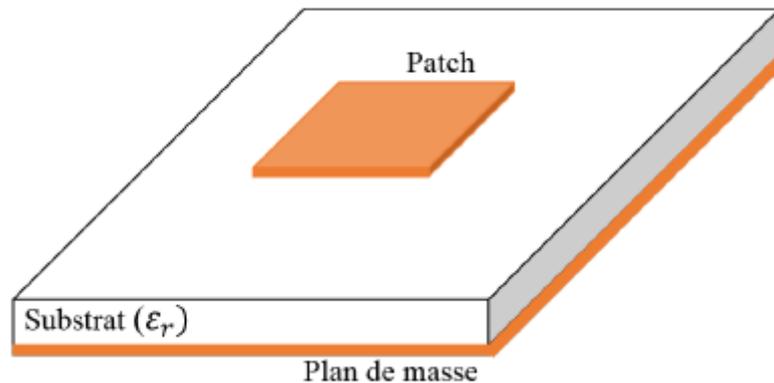
Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antennes : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs d'électronique et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communications intégrés modernes [2].

## I.3 Description de l'antenne imprimée

Une antenne imprimée se compose d'une pièce métallique rayonnante (habituellement de 17.5 à 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en hyperfréquence) sur un côté du substrat diélectrique et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la figure (I.1). L'élément rayonnant est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ( $\sigma = 5.7 \times 10^7 \text{ S/m}$ ) ou l'or ( $\sigma = 4.1 \times 10^7 \text{ S/m}$ ). En plus, le substrat est caractérisé par sa permittivité relative  $\epsilon_r$  et ses pertes diélectriques [1] [3].

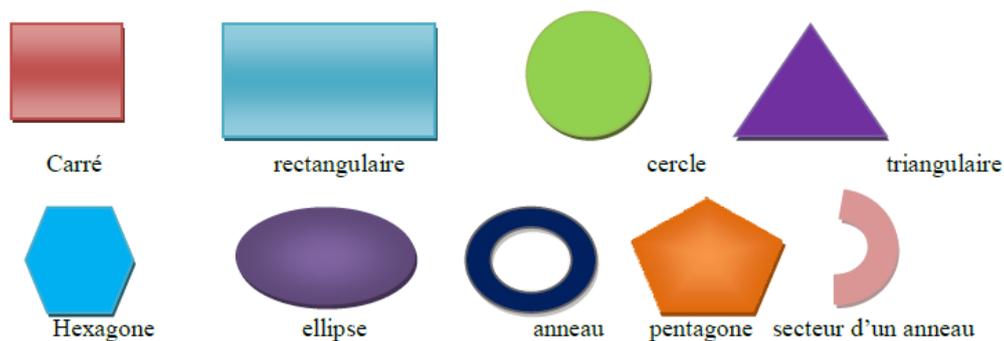
Il existe plusieurs types de substrats qui peuvent être utilisés pour la conception des antennes patches. Leurs constantes diélectriques sont en général dans la plage de 2.2 – 12. Pour la même

fréquence de résonance, plus la constante diélectrique est faible, plus l'efficacité est grande, la bande passante est large et plus la taille de l'antenne est grande [4].



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

L'élément rayonnant peut prendre plusieurs formes. En pratique, on trouve des carrés, des rectangles, des triangles ou autre comme le montre la figure (I.2) :



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

#### I.4 Caractéristiques des antennes imprimées

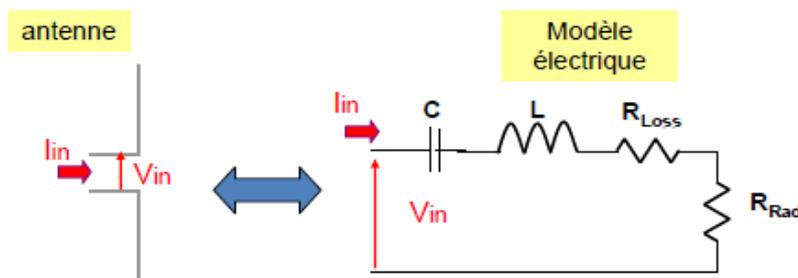
Les caractéristiques des antennes peuvent être classées en deux grandes catégories : **les caractéristiques électriques** telles que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et la bande passante ; et **les caractéristiques de rayonnement** telles que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité et la polarisation d'antenne.

## I.4.1 Caractéristiques électriques

### I.4.1.1 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée est nécessaire pour adapter l'antenne au générateur qui l'alimente, ou en réception pour assurer un transfert maximal de puissance active entre l'alimentation et l'antenne [6].

Une antenne peut être modélisée par un circuit équivalent RLC (figure I.3).



**Figure I. 3:** Modèle d'impédance complexe d'une antenne [7]

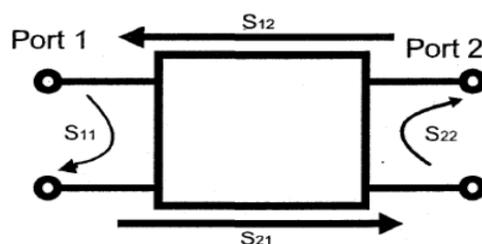
L'impédance de l'antenne  $Z_{\text{entrée}}$  représente l'impédance à l'entrée de celle-ci. Elle est représentée par :

$$Z_{\text{entrée}} = R_{\text{entrée}} + j X_{\text{entrée}} \quad (\text{I. 1})$$

La partie réelle dite active comporte une partie liée au rayonnement ( $R_{\text{Rad}}$ ) et une partie liée à la puissance dissipée en termes de pertes ohmiques et diélectriques ( $R_{\text{Loss}}$ ). La partie imaginaire est liée à la puissance réactive stockée et concentrée au voisinage de l'antenne où  $L$  et  $C$  représentent respectivement l'inductance et la capacité à l'entrée de l'antenne [5].

### I.4.1.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est équivalent au paramètre  $S_{11}$  de la matrice de dispersion, une antenne peut être analysée comme un quadripôle [8], où les paramètres  $S$  de la matrice sont illustrés dans la figure (I.4).



**Figure I. 4:** Paramètres  $S$  pour un circuit à deux ports [8]

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchi à l'entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il est directement lié à l'impédance caractéristique et l'impédance d'entrée selon la relation suivante :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{\text{entrée}} - Z_c}{Z_{\text{entrée}} + Z_c} \quad (\text{I. 2})$$

Où :

- **$Z_e$**  : impédance d'entrée de l'antenne.
- **$Z_c$**  : impédance caractéristique de la ligne.

En l'exprime en décibels par :

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

Condition d'adaptation :

<b>Pour <math>Z_{\text{entrée}} = Z_c \iff S_{11} = 0</math></b>
--

#### I.4.1.3 Le taux d'onde stationnaire (TOS)

Le taux d'onde stationnaire (TOS) ou en anglais Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre la ligne de transmission et l'antenne [9]. Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde incidente conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur) [4].

L'amplitude de cette onde stationnaire n'est pas constante le long de la ligne, en effet elle est maximale en certains endroits (ventres) et minimale à d'autres (nœuds).

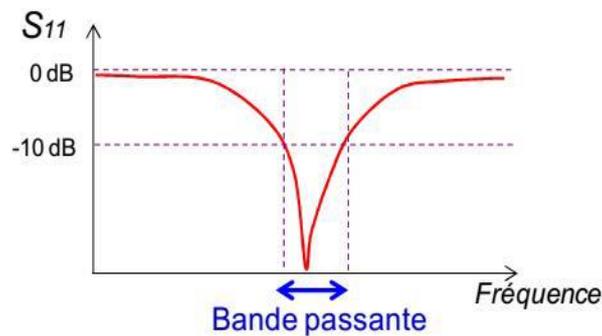
Le rapport d'onde stationnaire est le rapport entre la tension maximale et minimale de cette onde ou bien donné en fonction du coefficient de réflexion  $\Gamma$  par la relation suivante [4] :

$$TOS = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (\text{I. 4})$$

#### I.4.1.4 La bande passante

La bande passante est la plage de fréquence sur laquelle le coefficient de réflexion ne dépasse pas un certain seuil ( $S_{11} < -10$  dB) ; à condition que le diagramme de rayonnement ne

change pas sur cette bande. L'antenne est considérée comme étant suffisamment bien adapté au circuit et présente donc peu de perte par désadaptation [10].



**Figure I. 5:** Bande passante d'une antenne [11]

La bande passante est donnée par :

$$BP(\%) = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} \times 100 \quad (\text{I. 5})$$

Où :

- $f_{\max}$  : la fréquence maximale.
- $f_{\min}$  : la fréquence minimale.
- $f_c$  : la fréquence centrale.

## I.4.2 Caractéristiques de rayonnement

### I.4.2.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement décrit les variations de la puissance rayonnée par l'antenne par les différentes directions de l'espace. La direction pour laquelle la puissance rayonnée est maximale est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne [12].

La fonction caractéristique de rayonnement de l'antenne  $r(\Theta, \varphi)$  est donnée par :

$$r(\Theta, \varphi) = \frac{P(\Theta, \varphi)}{P_0(\Theta_0, \varphi_0)} \quad (\text{I. 6})$$

Où :

- $P(\Theta, \varphi)$  : la puissance rayonnée par unité d'angle solide.
- $P_0(\Theta_0, \varphi_0)$  : la puissance maximale.

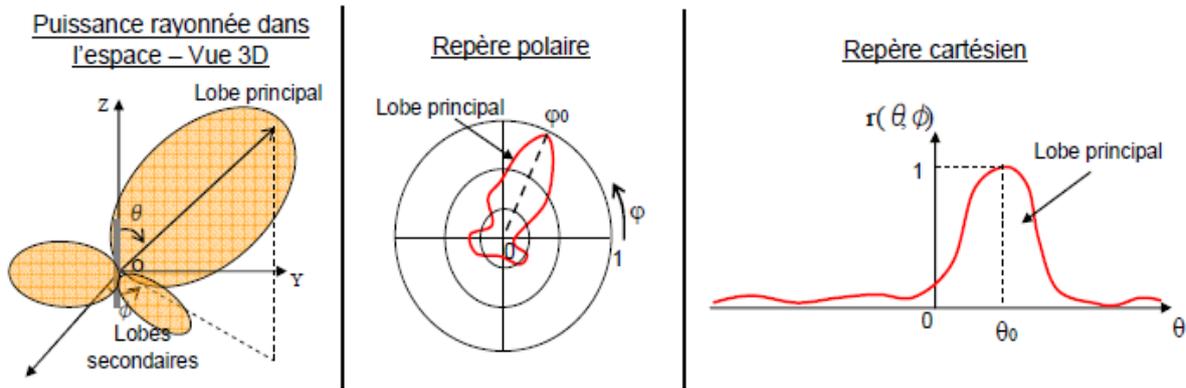


Figure I. 6: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [7]

Le diagramme de rayonnement change d'une antenne à une autre, comme le montre la figure, il existe trois modèles de rayonnement couramment employés pour décrire la propriété du rayonnement d'une antenne :

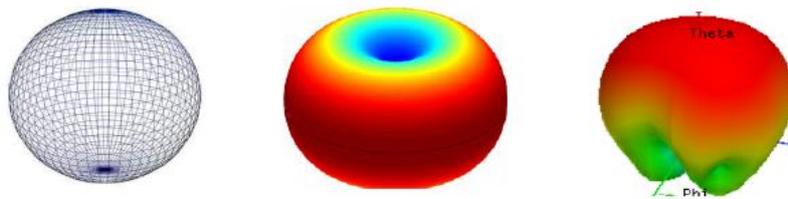


Figure I. 7: Diagramme de rayonnement pour différents types d'antenne [13]

### I.4.2.2 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (**beamwidth**) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à -3 dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les deux directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal [7].

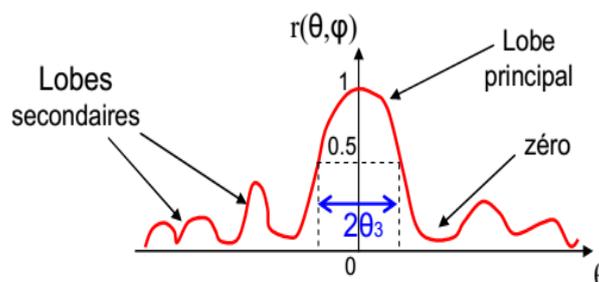


Figure I. 8: Angle d'ouverture d'une antenne [7]

### I.4.2.3 La directivité

La directivité de l'antenne est le rapport de la puissance définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances totales rayonnées soient les mêmes [14].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{tot}/4\pi} \quad (\text{I. 7})$$

### I.4.2.4 Le gain

Le gain de l'antenne dans une direction est le rapport de la puissance définie ci-dessus à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide, à condition que les puissances d'alimentation soient les mêmes [14].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a/4\pi} \quad (\text{I. 8})$$

### I.4.2.5 Le rendement

Le rendement ou l'efficacité d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation [4].

$$\eta = \frac{\text{puissance rayonnée}}{\text{puissance d'alimentation}} = \frac{G}{D} \quad (\text{I. 9})$$

D'où :  $G = \eta \cdot D$

Pour les antennes sans pertes :  $\eta = 1$ .

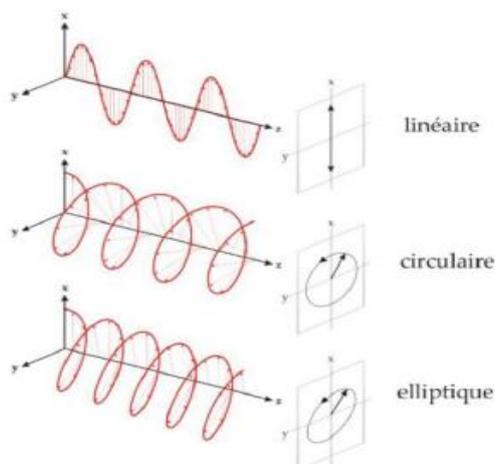
Pour les antennes avec pertes :  $\eta < 1$ .

### I.4.2.6 La polarisation

#### ❖ Comment déterminer la polarisation d'une antenne ?

La polarisation de l'antenne est déterminée par la polarisation de l'onde rayonnée dans une direction spécifique. L'onde EM peut rayonnée de trois manières différentes :

- Si le chemin du vecteur champ électrique suit une ligne, la polarisation est dite **linéaire**.
- Si le vecteur champ électrique reste constant en longueur mais tourne en cercle, alors la polarisation est dite **circulaire**.
- Si le vecteur champ électrique change mais tourne en cercle, dans ce cas la polarisation est **elliptique**.



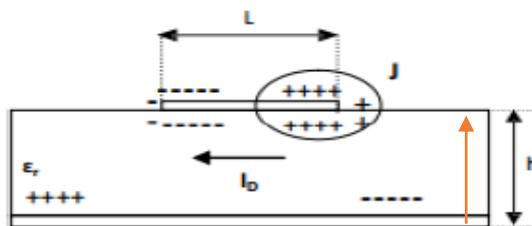
**Figure I. 9:** Différents types de polarisation d'une antenne

### I.5 Mécanisme de rayonnement des antennes imprimées

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée se comprend à partir de sa forme géométrique, la littérature scientifique s'appuie généralement sur la théorie de l'optique.

Ce paragraphe résume le principe de fonctionnement d'une antenne imprimée :

Considérons une antenne microruban rectangulaire alimentée par sonde, fonctionnant en mode fondamental et conduite par une tension entre la sonde et le plan de masse, ce qui va provoquer l'apparition et la distribution de charges qui s'établit en dessous et au-dessus de l'élément, entre le plan de masse et le substrat comme montre la figure (I.10) et crée un champ électrique vertical entre le patch et le plan de masse [3].



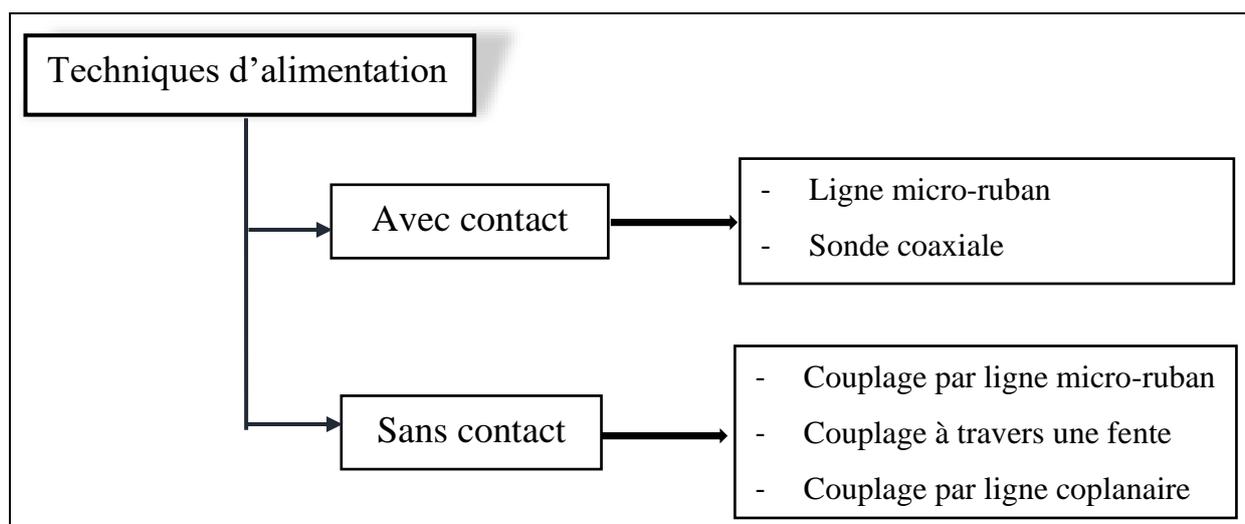
**Figure I. 10:** Distribution des charges et densité du courant sur une antenne microruban [15]

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

Adapter l'antenne à son alimentation est un point essentiel, une antenne ne peut être utilisable que si son circuit d'alimentation alloue un transfert maximal d'énergie. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les antennes imprimées peuvent être alimentées par plusieurs méthodes, elles sont classées en deux grandes catégories : les méthodes d'alimentation avec contact et les méthodes d'alimentation sans contact (par proximité). Dans la première méthode, le patch de l'antenne est directement alimenté en énergie RF. Par contre, dans la deuxième méthode ; le patch de l'antenne est indirectement alimenté par la puissance RF et la puissance RF est transportée vers le patch par couplage EM.

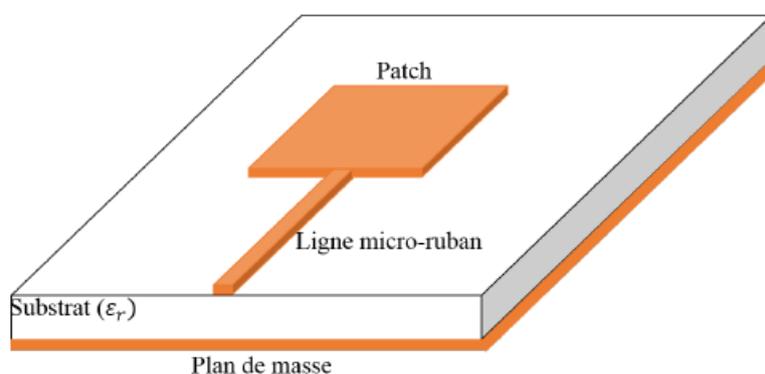
Ces méthodes d'alimentation sont présentées dans le schéma suivant :



**Figure I. 11:** Schéma représentatif des méthodes d'alimentation

### I.6.1 Alimentation par ligne microruban

Dans ce type d'alimentation, une ligne micro ruban est reliée directement au bord de l'élément rayonnant (figure I.12) dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe (figure I.13). La largeur de cette ligne est plus petite par rapport à celle du patch [1].



**Figure I. 12:** Alimentation par ligne microruban [5]

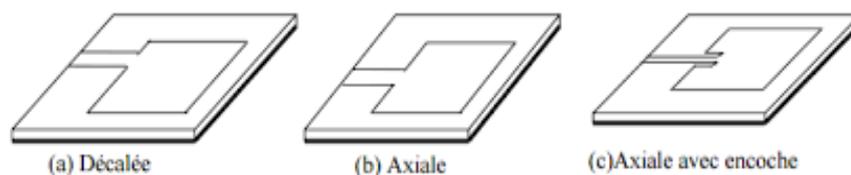


Figure I. 13: Type de la ligne microruban [16]

Tableau I. 1: Avantages et inconvénients de la ligne microruban

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins couteuse.</li> <li>- La plus simple à réaliser.</li> <li>- Gravée sur la même face que l'élément rayonnant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le rayonnement parasite produit par la ligne.</li> <li>- Structure figée après gravure.</li> </ul>

### I.6.2 Alimentation par sonde coaxiale

Cette technique est largement utilisée pour alimenter les antennes imprimées. Dans cette technique, le conducteur intérieur du câble coaxial est soudé au patch ; bien que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse comme le montre la figure (I.14).

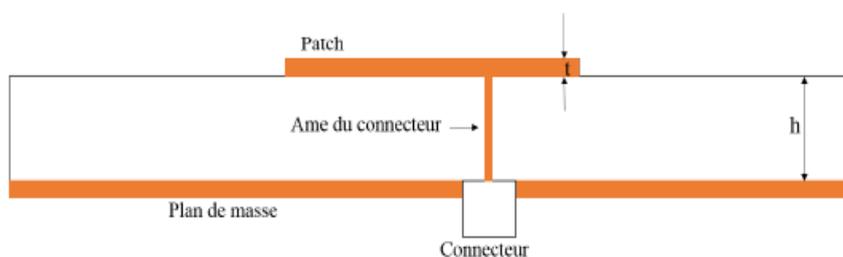


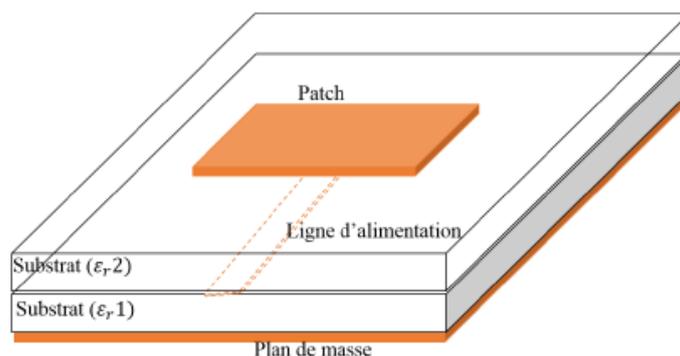
Figure I. 14: Alimentation par ligne coaxial [5]

Tableau I. 2: Avantages et inconvénients de la sonde coaxiale

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La possibilité d'appliquée la sonde coaxiale à n'importe quel emplacement à l'intérieur du patch.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique.</li> </ul>

### I.6.3 Alimentation couplée par ligne microruban

Appelée aussi alimentation par couplage électromagnétique. Dans cette technique, deux substrats diélectriques différents sont utilisés de telle sorte que la ligne microruban est placée entre les deux substrats et le patch rayonnant est situé sur le dessus du substrat supérieur (figure I.15) [17].



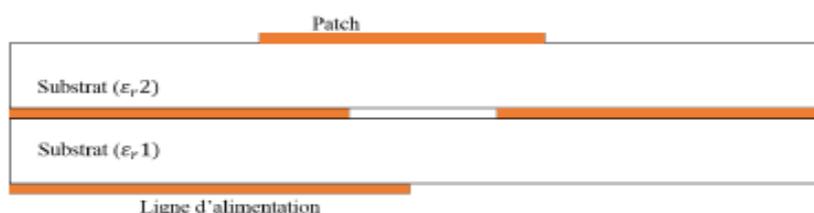
**Figure I. 15:** Alimentation couplée par ligne microruban [5]

**Tableau I. 3:** Avantages et inconvénients du couplage par ligne microruban

Avantages	Inconvénients
- Permet d'améliorer la bande passante.	- Difficile à réaliser à cause de deux substrats.

### I.6.4 Alimentation par couplage à travers une fente

Dans ce type d'alimentation, le patch et la ligne d'alimentation microruban sont séparés par le plan de masse (figure I.16). La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [1]. Généralement, afin d'optimiser le rayonnement du patch ; des matériaux à permittivité élevée sont utilisés pour le substrat inférieur, par contre des matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur.



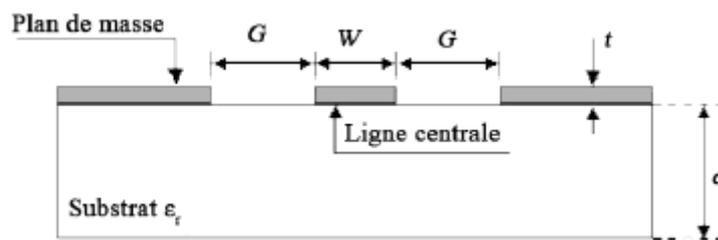
**Figure I. 16:** Alimentation couplée par fente [5]

**Tableau I. 4:** Avantages et inconvénients du couplage par fente

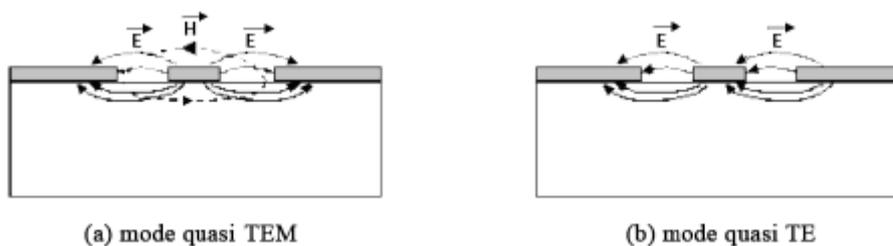
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elle offre une large bande passante.</li> <li>- Séparation électromagnétique des deux couches.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté de fabrication à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur de l'antenne et son coût.</li> </ul>

**I.6.5 Alimentation par guides d'ondes coplanaires**

La ligne coplanaire : **CPW** (CoPlanar Waveguide en anglais), comme son nom l'indique ; présente le plan de masse au même niveau que la ligne de transmission (figure I.17). La disposition des conducteurs fait apparaître deux modes de propagation : un mode quasi TEM (dit mode impair) et un mode quasi TE (dit mode pair) (figure I.18) [18].



**Figure I. 17:** Vue en coupe d'une ligne coplanaire



**Figure I. 18:** Représentation des modes de propagation d'une ligne coplanaire

**Tableau I. 5:** Avantages et inconvénients de la ligne coplanaire

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédé technologique simple.</li> <li>- Faible rayonnement arrière.</li> <li>- Transition simples pour l'intégration des dispositifs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'ondes coplanaires qui nécessite l'utilisation de ponts à air en millimétrique.</li> </ul>

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

Il existe plusieurs méthodes pour analyser les antennes imprimées, et elles peuvent être divisées en deux groupes : les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

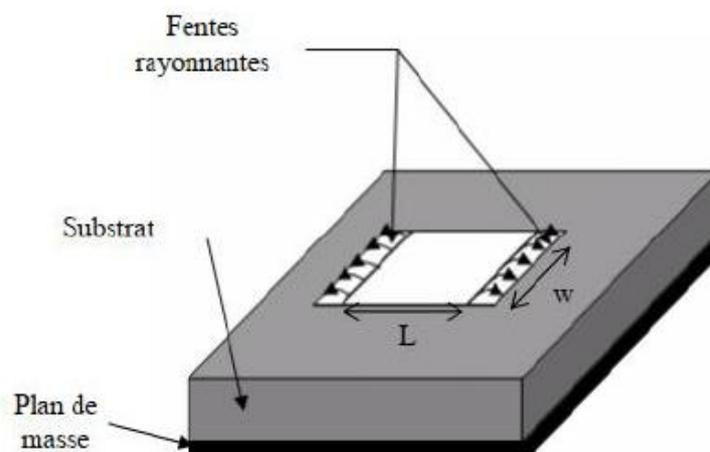
### I.7.1 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont basées sur la distribution du courant magnétique autour de l'élément rayonnant. Lorsque les antennes à analyser ont des formes géométriques simples, elles peuvent être facilement modélisées par ces méthodes ; on distingue deux modèles parmi elles :

- Le modèle de la ligne de transmission.
- Le modèle de la cavité.

#### I.7.1.1 Modèle de la ligne de transmission

Malgré que la méthode de la ligne de transmission (MLT) est la moins exacte parmi les méthodes de modélisation des antennes patch, elle reste la plus simple à appliquer. En effet, l'antenne patch rectangulaire est modélisée par une plaque métallique de largeur  $W$  et de longueur  $L$  comme le montre la figure (I.19) [4].



**Figure I. 19:** Modèle de la ligne de transmission

#### I.7.1.2 Modèle de la cavité

La méthode de la cavité résonante est plus précise que la MLT [4]. Bien qu'il est simple à employer, il présente certains inconvénients, plus précisément il est utile que pour les antennes rectangulaires et il ignore les variations de champ le long des bords rayonnants. Ces inconvénients peuvent être surmontés en utilisant le modèle de la cavité proposé par Lo et al. Un bref aperçu de ce modèle est donnée ci-dessous (figure I.20). Le patch rectangulaire peut se

modéliser comme une cavité avec deux murs électriques (formés par le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux (bords de la cavité) comme le montre la figure.

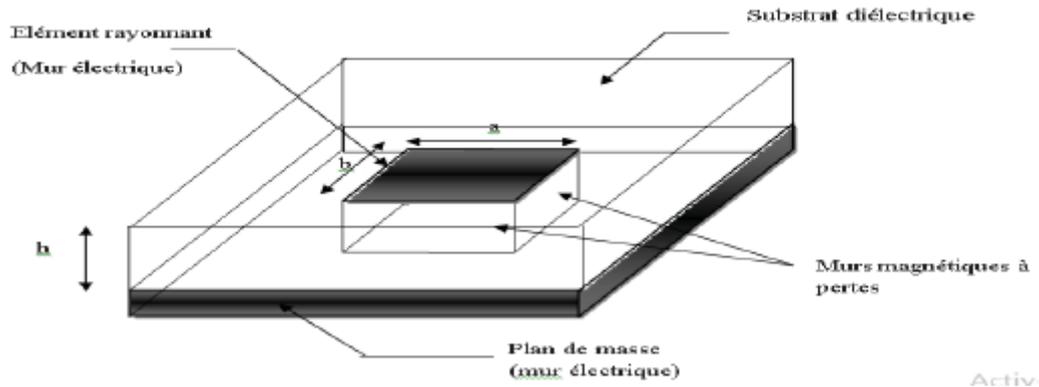


Figure I. 20: Modèle de la cavité

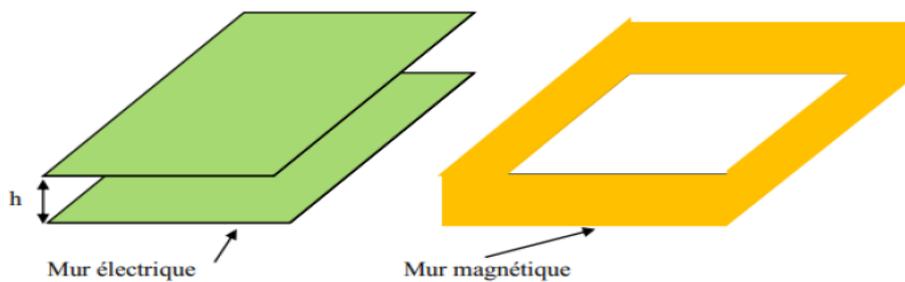


Figure I. 21: Représentation des murs électriques et magnétiques dans le modèle de la cavité

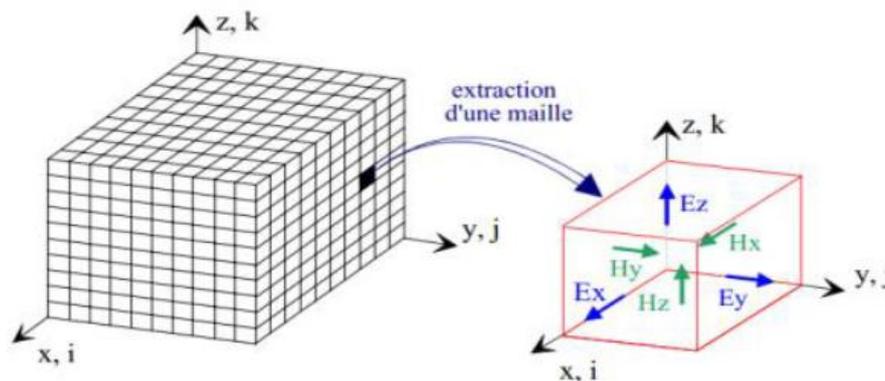
### I.7.2 Méthodes numériques

Toutes les caractéristiques des antennes découlent des équations de Maxwell qui ont été développées grâce à des méthodes analytiques. Ces méthodes ont comme seules limites la complexité mathématique sur laquelle on s'arrête à partir d'un certain degré de difficulté. Les méthodes numériques prennent alors le relais des méthodes analytiques. Ces méthodes permettent d'étudier des antennes de formes très variées (formes complexes). Elles sont basées sur la distribution du courant électrique sur l'élément rayonnant et le plan de masse. Les plus utilisées sont :

- Méthode des éléments finis.
- Méthodes des différences finies.
- Méthode des moments.

### I.7.2.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (Finit Element Method) est une méthode fréquentielle utilisée lorsque la complexité des structures est trop grande. Elle s'appuie sur un maillage de l'espace 3D et sur une formulation différentielle des équations de Maxwell. Elle est, de ce fait, très robuste. C'est une méthode générale, utilisée dans tous les domaines de la physique. Elle permet de traiter des structures très complexes, mais demande une puissance de calcul très importante. Les simulateurs HFSS et FEKO utilisent cette méthode.



**Figure I. 22:** Volume de calcul et cellule élémentaire [19]

En général, le principe de cette méthode est de remplacer l'ensemble du domaine de calcul par un certain nombre de petits sous-domaines.

Une analyse par éléments finis des problèmes aux limites comprend principalement les étapes de bases suivantes [20] :

- Déterminer les équations différentielles appropriées et des conditions aux limites.
- Génération de maillage FEM appropriées.
- Sélection des fonctions de pondération et interpolation et de transformer les équations différentielles en équations matricielles par la méthode variationnelle de Ritz ou la méthode de Galerkin.
- Résoudre le système linéaire et Traitement des résultats.

### I.7.2.2 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies, dans le domaine temporel **F.D.T.D** (Finit Difference Time Domain) est une technique numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temporel. La méthode s'appuie sur un maillage en trois dimensions et sur une formulation différentielle des équations de Maxwell. Les simulateurs FEKO depuis sa version 7.0, HFSS et CST Microwave Studio utilisent cette méthode.

Elle présente les avantages suivants [4] :

- La simplicité de mise en œuvre.
- La place mémoire réduite qu'elle requiert.
- Les calculs s'effectuent directement dans le domaine temporel.
- Les résultats obtenus dans le domaine temporel, peuvent s'exprimer dans le domaine fréquentiel par une transformée de Fourier en une seule opération.
- Il est facile de déterminer les caractéristiques des antennes en fonction de leur fréquence sans avoir à effectuer une simulation par point de fréquence.

### **I.7.2.3 Méthode des moments (MOM)**

C'est la méthode la plus adaptée pour la détermination du rayonnement des antennes. Elle s'appuie sur une formulation intégrale des équations de Maxwell et l'étude des fonctions de Green. Les développements analytiques sont poussés le plus loin possible selon une méthode intégrale. En dernier recours, cette méthode est utilisée pour exprimer la solution sous forme matricielle. Elle donne des résultats fréquentiels. Le simulateur ADS Momentum ainsi que le logiciel FEKO utilisent cette méthode [4].

Cette méthode offre plusieurs avantages, on peut citer [3] :

- La précision et la souplesse.
- Elle peut traiter un élément seul ou plusieurs éléments en réseau ou empilés.
- Les formes arbitraires et le couplage.

## **I.8 Applications des antennes imprimées**

Les antennes imprimées sont bien connues pour leur performance, leur conception robuste, leur fabrication et leur utilisation étendue. Grâce à leurs nombreux avantages, les antennes imprimées sont utilisées dans de nombreux domaines.

On résume ci-dessus les principales applications des antennes imprimées et les systèmes correspondant dans le domaine des communications et des radars [21] :

### **Satellites :**

- Télévision directe domestique ou embarquée sur véhicules.
- Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable.
- Détection des ressources terrestres : imagerie par radar à ouverture de synthèse.

**Télémétrie guidages :**

- Systèmes mono-pulse.
- Réseaux sous radômes.

**Réseaux adaptatifs :**

- Acquisition multi-cible.
- Réseaux intègres à semi-conducteurs.

**Radio mobile ou communications avec les mobiles terrestres :**

- Téléphonie mobile (terminaux portatifs GSM, DCS, UMTS, ...).
- Antennes sur station de base.

**Aéronautique (avions, engins spatiaux, missiles) :**

- Communication.
- Navigation.
- Systèmes d'atterrissages.

**Biomédical :**

- Dispositifs implantables.
- Applications thermique pour thérapie micro-ondes des cancers.
- Tomographie.

**Applications militaires :**

- Antennes montées en surface sur véhicules.
- Capteurs embarquées.
- Radars Doppler.

**Identification :**

- Etiquettes radiofréquences RFID.
- Capteurs miniaturisés.

**Réseaux sans fil WLAN :**

- Communication Ultra Large Bande intra-bâtiments.
- Technologie radio courte distance (Standards Bluetooth et Wi-Fi) pour équipements électroniques (PC, PDA, ...).

**Sécurité :**

- Antenne de détection (alarmes anti-intrusion).

**I.9 Avantages et limitations des antennes imprimées :**

Actuellement, les antennes imprimées sont largement utilisées ; leurs applications couvrent un large domaine de fréquence : 100 MHz à 100 GHz.

Les principaux avantages des antennes imprimées sont les suivants [3] [8] :

- Fabrication à faible coût.
- Poids léger et profil mince.
- La possibilité d'intégration avec les circuits microondes.
- Il est facile de fabriquer des antennes à dual-band, multi bandes et à double polarisation (circulaire et linéaire).
- Les lignes d'alimentation et les réseaux d'adaptation peuvent être fabriqués simultanément avec la structure de l'antenne.
- Le fonctionnement dans deux ou trois bandes de fréquences.

Cependant, les antennes imprimées présentent également certaines limites telles que [22] :

- Bande passante très étroite (5% à 10 %).
- Gain un peu plus faible (6 dB).
- Faible puissance.
- La pureté de la polarisation est difficile à obtenir.
- Les pertes par diélectrique, par conducteur et par onde de surface.

**I.9 Conclusion**

Nous avons commencé notre chapitre par les concepts généraux des antennes imprimées tels que leurs caractéristiques et leur mécanisme de rayonnement, suivies par les techniques d'alimentations et les méthodes d'analyses, et on a fini par quelques avantages et limitations des antennes imprimées.

*Chapitre II*  
*Les techniques de reconfigurabilité*

## II.1 Introduction

Traditionnellement, les systèmes sans fil sont conçus pour une application prédéfinie. L'accroissement des besoins en moyen de télécommunications passe par la création de nouveaux standards en fréquence (3G, 4G, Wi-Fi, WiMax, ...) et pose des contraintes de plus en plus importantes sur les systèmes de télécommunications. En effet, les antennes miniatures classiques ne peuvent pas répondre à ces nouvelles exigences ; car elles fonctionnent sur des bandes étroites prédéfinies. Les applications émergentes de communications sans fil nécessitent des systèmes antennaires avancée qui sont capables de satisfaire les besoins en termes de diversification fréquentielle, efficacité, faible encombrement et consommation. Pour cela, l'antenne reconfigurable peut être la solution pour répondre aux nouveaux standards [23].

Une antenne reconfigurable peut modifier une ou plusieurs de ces caractéristiques fondamentales comme sa fréquence, le diagramme de rayonnement ou la polarisation.

Ce chapitre définit dans un premier temps les antennes reconfigurables et leurs intérêts et applications, ainsi que les différentes techniques de reconfiguration tels que les diodes PIN et les diodes Varactor et enfin les types de reconfiguration.

## II.2 Les antennes reconfigurables

### II.2.1 Historique

L'idée d'antennes reconfigurables est apparue au début des années 1930. En 1979, une antenne reconfigurable à motif a été conçue pour la communication par satellite. L'antenne proposée est capable de reconfigurer six angles de faisceau différents. La reconfiguration du faisceau par satellite a également été rapportée. En 1999, une antenne patch reconfigurable en utilisant une Diode PIN a été présentée.

De 1999 à nos jours, l'antenne micro ruban a été utilisée comme plateforme pour concevoir une antenne reconfigurable [24].

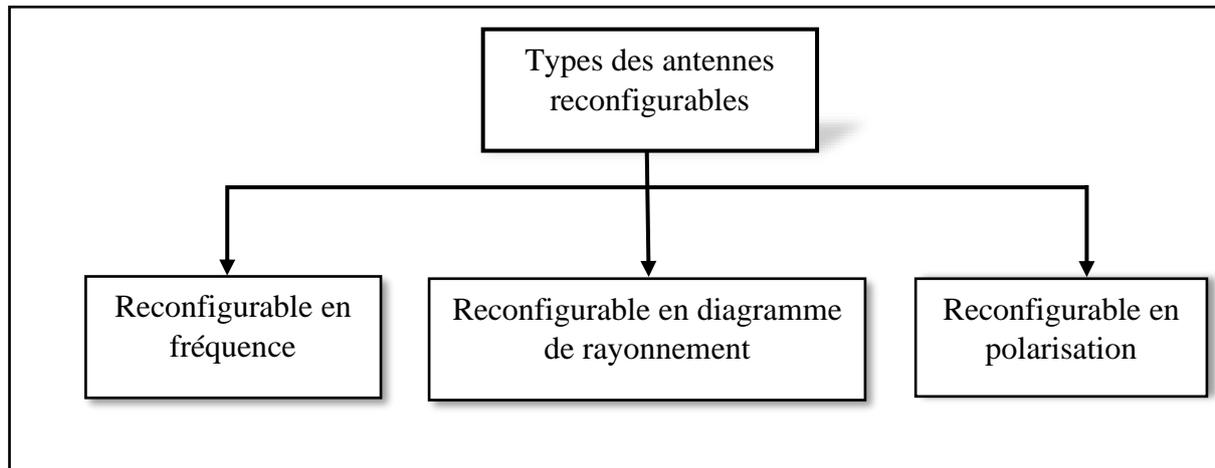
### II.2.2 Définition des antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables sont des antennes capables de reconfigurer ses caractéristiques telles que la fréquence, le diagramme de rayonnement et la polarisation d'une manière dynamique après la fabrication pour s'adapter à l'environnement, la reconfiguration ne se limite pas à une seule caractéristique mais peut être une combinaison de différentes caractéristiques selon l'application [24].

Une antenne reconfigurable est dite idéale si elle est capable de varier de façon immédiate toutes ses caractéristiques sur une très large plage.

### II.2.3 les types des antennes reconfigurables

Les différents types d'antennes reconfigurables qui existent sont résumés de manière schématique dans la figure (II.1).



**Figure II. 1:** Schéma représentatif des types d'antennes reconfigurables

#### ❖ **Groupe 1 :** Antennes reconfigurables en fréquence

Ces antennes permettent de modifier la fréquence de résonance sous une commande extérieure pour couvrir une bande de fréquence déterminée sans aucun changement dans la structure physique [23].

#### ❖ **Groupe 2 :** Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement sont capables de modifier la forme, le pointage et le gain des diagrammes de rayonnement tout en gardant une fréquence de fonctionnement fixe [25].

#### ❖ **Groupe 3 :** Antennes reconfigurables en polarisation

La reconfiguration d'une antenne en polarisation consiste à modifier sa polarisation (linéaire ou circulaire) sans modifier sa fréquence de résonance ni son diagramme de rayonnement.

### II.2.4 Intérêts et application des antennes reconfigurables

L'intérêt principal des antennes reconfigurables réside dans leur capacité à apporter des fonctionnalités et des degrés de liberté supplémentaires aux systèmes de communications et de télédétection, en améliorant leur performance. Par exemple, dans le cas d'une liaison entre un

dispositif portable et une station de base ; l'antenne du dispositif est fortement contrainte dans sa conception par l'énergie et l'espace disponible, ainsi que par les restrictions de coût, et il n'est pas toujours possible d'utiliser plusieurs antennes pour améliorer la diversité. Typiquement, le dispositif se trouve dans des conditions imprévisibles ou difficile, ce qui peut affecter la qualité de la liaison. Dans ce contexte, les antennes reconfigurables peuvent être très utiles car elles permettent de modifier la bande de fonctionnement ou la fréquence de résonance, de filtrer les interférences, ou encore de s'adapter les propriétés d'un nouvel environnement.

Avec une reconfiguration du diagramme de rayonnement, il est possible de diriger le faisceau vers la station de base, par conséquent une puissance d'émission réduite et donc des économies d'énergie au niveau de la batterie.

Les antennes reconfigurables sont également utiles dans des systèmes complexes et exigeants en reconfiguration tel que la radio logicielle (ou SDR : Software Defined Radio) qui est défini comme une technologie qui apporte la flexibilité, la rentabilité et la puissance nécessaires pour gérer les communications vers l'avant. La radio cognitive, qui va encore plus loin, permet d'ajouter de l'intelligence artificielle et de la conscience de son environnement aux SDRs. Les radios cognitives peuvent communiquer entre elles pour optimiser les liaisons en limitant les interférences avec les utilisateurs proches, ou en prenant en compte l'encombrement spectral à un instant donné, en scannant une large bande [10].

### II.3 Les techniques de reconfigurabilité

La reconfigurabilité est devenue une technologie largement utilisée dans le domaine de communications sans fil pour améliorer les performances des différents systèmes.

Afin de démontrer les antennes reconfigurables, diverses techniques de mis en œuvre efficaces ont été proposées pour être utilisées dans différentes systèmes sans fil, qui sont classées comme suit [26] :

- Reconfiguration électrique.
- Reconfiguration optique.
- Reconfiguration physique.
- Antennes reconfigurables avec des matériaux intelligents.

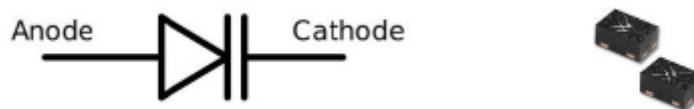
Dans cette section, **les méthodes de réglage électrique** seront décrites plus en détail puisqu'elles sont les plus pertinentes aujourd'hui, et elles font l'objet de ce mémoire.

Dans ce type de reconfiguration électrique, les caractéristiques de l'antenne sont modifiées à l'aide de composants de commutation tels que [27] :

- Les diodes Varactor.
- Les diodes PIN.
- Les transistors FET.
- Les MEMS.
- Les matériaux agiles.

### II.3.1 Diode Varacor

Une diode varactor (nommée aussi varicap) est un composant semi-conducteur qui consiste en une jonction PN [28]. Elle se comporte comme un condensateur dont nous pouvons contrôler sa capacité en appliquant une tension inverse à ses bornes. Elle offre une variation continue contrairement aux diodes PIN qui offre une variation discrète des caractéristiques des antennes [18].

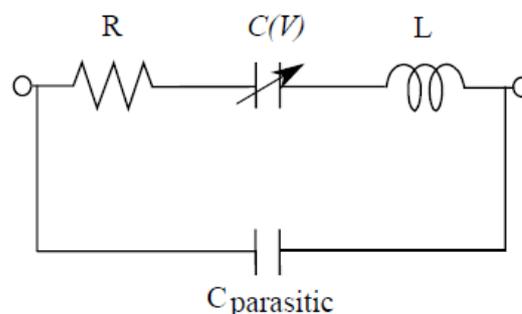


**Figure II. 2:** Symbole et exemples des diodes Varactor commercialement disponibles [29]

La figure (II.3) montre un circuit équivalent d'une diode varactor.

La capacité de jonction variable  $C(V)$  peut être calculée comme suit :

$$C(V) = \frac{C_{J0}}{(1 + V / V_j)^M} + C_{par} \quad (\text{II. 1})$$



**Figure II. 3:** Circuit équivalent de diode Varactor [30]

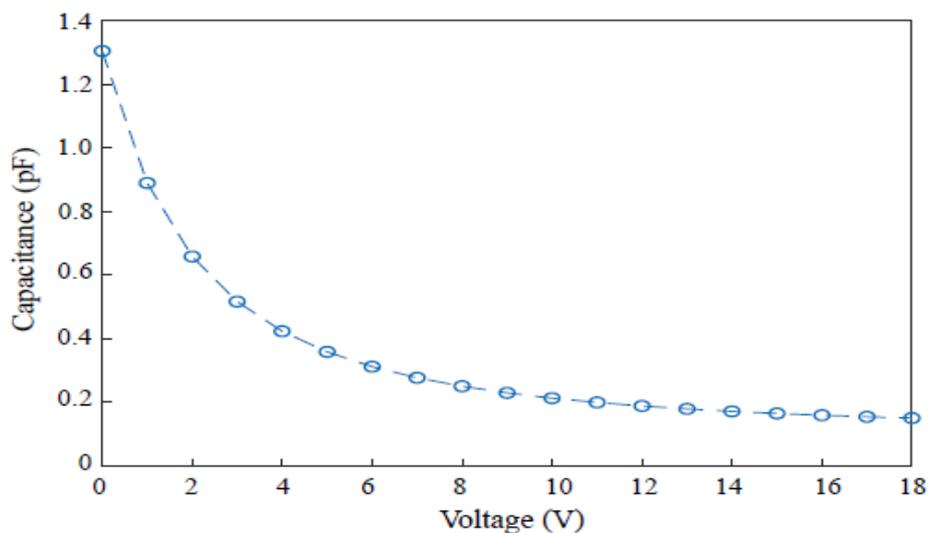
**Tableau II. 1:** Les paramètres de Varactor [31]

$R$	$L$	$C_{JO}$	$V_J$	$M$	$C_{par}$
$2 \Omega$	0.05 nH	1.2 pF	4.155 V	1.97	0.1044 pF

Où :

- $C_{JO}$  : la capacité des jonctions hyperabruptes
- $V_J$  : la tension potentielle intégré
- $M$  : le paramètre de la jonction abrupte
- $C_{par}$  : la capacité parasite du varactor

La figure (II.4) montre la capacité du varactor  $C(V)$  variant de 1.304 à 0.149 pF lorsque la tension de polarisation inverse passe de 0 à 0.149 pF, en changeant la tension de polarisation inverse de 0 à 18 V.



**Figure II. 4:** Capacité de jonction variable du varactor MA46H120 correspondant à la variation de la tension de polarisation inverse [28]

### II.3.2 Diode PIN

Une diode PIN est un composant semi-conducteur comprenant des régions de type P et de type N séparés par une région intrinsèque (figure II.5) [28].

La diode PIN est utilisée comme un interrupteur rapide pour les signaux de hautes fréquences. Lorsqu'elle est polarisée en direct, la diode présente une impédance relativement faible, et par conséquent, elle se comporte comme un circuit fermé (l'état ON). En revanche,

lorsqu'elle est polarisée en inverse, elle offre une très grande impédance en parallèle, avec une très faible conductance, elle se comporte donc comme un circuit ouvert (l'état OFF) [18].

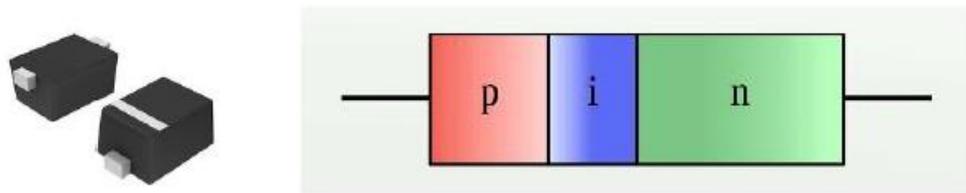


Figure II. 5: Images des diodes PIN commercialisables et son schéma de jonction [32]

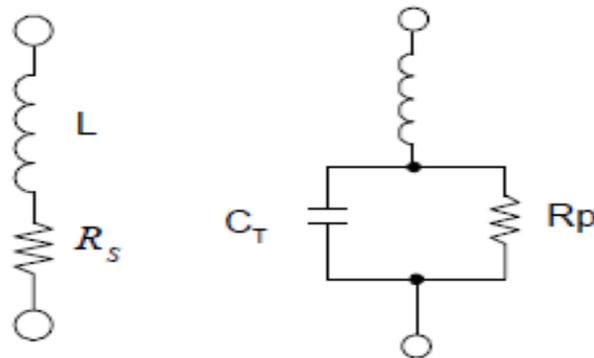


Figure II. 6: Circuit équivalent d'une diode PIN dans les états ON-OFF [33]

### II.3.3 Les transistors FET

Le transistor à effet de champ ou Field Effect Transistor (FET) est un commutateur commandé et utilisé pour des applications hyperfréquences. Il est constitué d'un canal entre la source et le drain [23].

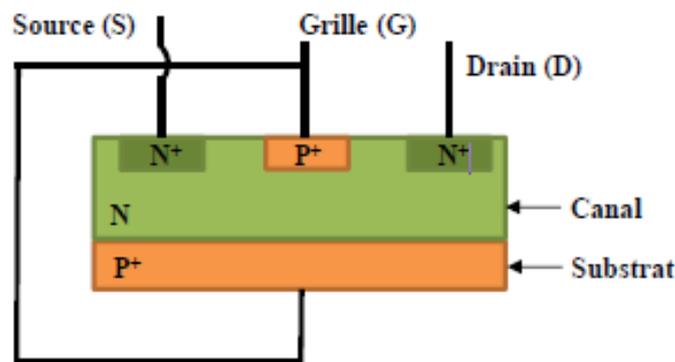


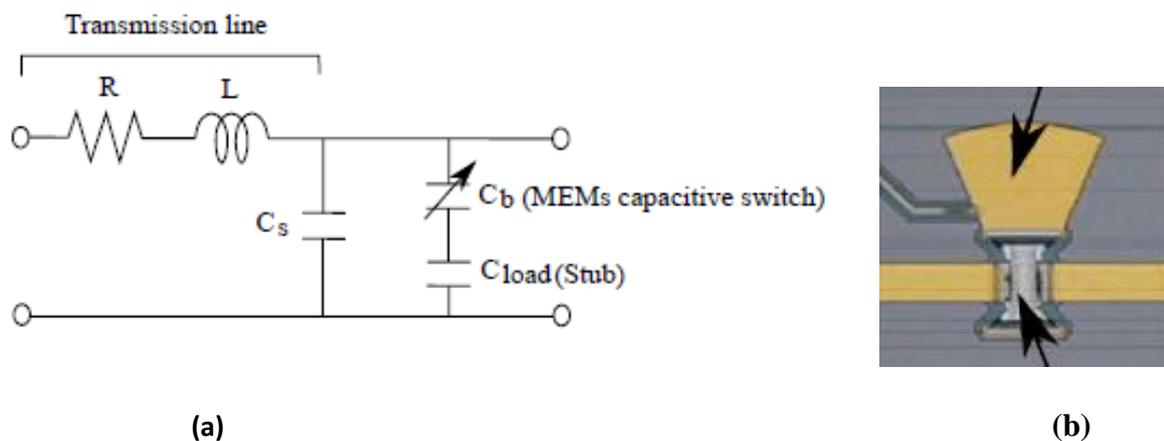
Figure II. 7: Schéma équivalent d'un transistor FET [34]

Elément actif à 3 accès [34] :

- **Grille (G)** : électrode de commande,
- **Source (S)** : électrode par laquelle les porteurs majoritaires entrent dans le canal,
- **Drain (D)** : électrode par laquelle les porteurs majoritaires quittent le canal.

### II.3.4 Les RF-MEMS

Les antennes reconfigurables avec commutateurs MEMS (**Micro Electro Mechanical System**) ont gagné énormément d'intérêt pour la recherche. MEMS interrupteurs sont des dispositifs qui fonctionnent par l'utilisation de mouvement mécanique pour atteindre un CC ou CO dans les circuits RF. Les commutateurs MEMS peuvent être conçus dans différentes configurations en fonction du chemin du signal (série ou shunt), du mécanisme d'actionnement (électrostatique, thermique ou magnétostatique), du type du contact (ohmique ou capacitif) et du type de structure. Les commutateurs RF MEMES capables de gérer jusqu'à 20 W et fonctionnant à un cycle de 1012 on les trouve dans les systèmes radar, les analyseurs de réseau, les systèmes de communication par satellite et les stations de bases. Les commutateurs MEMS pour les applications RF fonctionnent via des circuits courts et ouverts pour transmettre des signaux [35].



**Figure II. 8:** Modèle de circuit équivalent et de commutateur RF-MEMS [36].

(a) Modèle de circuit équivalent

(b) Exemple de commutateur RF-MEMS intégré

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de ces composants :

**Tableau II. 2:** Comparaison entre les différents composants de la commutation [35] [23]

Techniques de reconfiguration	Avantages	Inconvénients
<b>Diode Varactor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Petit courant.</li> <li>- Réglage continu.</li> <li>- Facilité d'intégration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non linéaire.</li> <li>- Plage dynamique faible.</li> <li>- Circuit de polarisation complexe.</li> </ul>
<b>Diode PIN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très fiable.</li> <li>- Très faible cout.</li> <li>- Choix commun pour la reconfiguration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitesse de réglage élevée.</li> <li>- Polarisation CC à l'état ON.</li> </ul>
<b>Transistor FET</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible tension de polarisation.</li> <li>- Courant de commande très faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pertes élevés.</li> <li>- Implémentation difficile.</li> <li>- Consommation de puissance élevé.</li> </ul>
<b>RF-MEMS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation et linéarité élevé.</li> <li>- Large bande passante d'impédance.</li> <li>- Faibles pertes de puissance et faible chiffre de bruit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute tension de commande.</li> <li>- Vitesse de commutation lente.</li> <li>- Cycle de vie limité.</li> </ul>

### II.3.5 Les matériaux agiles

Une autre solution pour atteindre la reconfigurabilité consiste à utiliser des matériaux « agiles » ou « commandables » dont les propriétés EM peuvent être modifier via une commande externe (par l'application d'un champ électrique ou magnétique). Ces matériaux sont utilisés le plus souvent comme un substrat par lequel sont réalisées les éléments rayonnants [23].

D'après les avantages de ces matériaux, on peut citer :

- Le faible encombrement.
- Faible consommation d'énergie nécessaire à la commande.

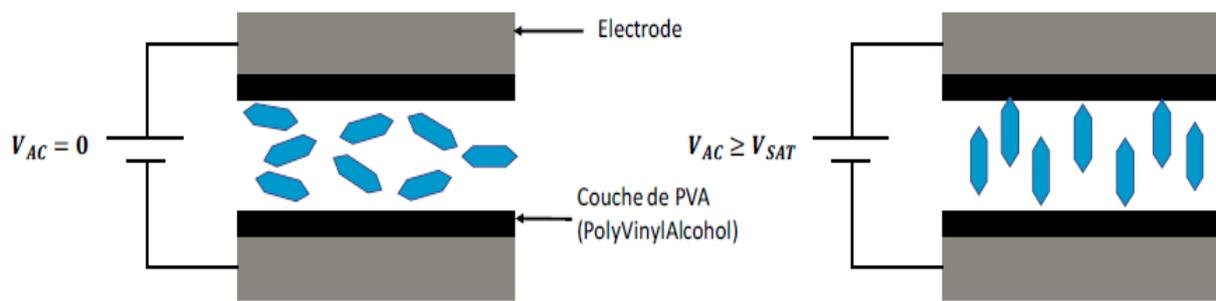
Cependant, parmi ces inconvénients :

- Intégration difficile.
- Temps de réponse élevé.
- Les réseaux d'alimentation sont complexes.

Dans la partie ci-dessous, nous citerons différents types de matériaux qui peuvent être utilisées pour réaliser l'agilité fréquentielle d'une antenne.

#### ❖ Les cristaux liquides

Ce type des matériaux sont appelés « cristaux liquides » car leur état passe par des phases intermédiaires ou mésophases, entre un état liquide et un état solide.



**Figure II. 9:** Schéma de l'orientation des molécules des cristaux liquides sous l'action d'un champ électrique

#### ❖ Les matériaux ferromagnétiques

Les ferromagnétiques comme le CoNb, CoZr, FeMb, ... sont des matériaux dont la perméabilité peut être modifiée en fonction du champ magnétique appliqué.

#### ❖ Les matériaux ferroélectriques

Les matériaux ferroélectriques comme le BST, LaTiON, KNT ... sont des matériaux non linéaires dont la permittivité relative varie en fonction du champ électrique qu'on leur applique.

Une comparaison des performances de différents matériaux agiles est présentée dans le tableau suivant :

**Tableau II. 3:** Comparaison des performances de différents matériaux agiles [18]

	Ferromagnétiques	Cristaux	Ferroélectriques
<b>Facteur d'agilité</b>	Jusqu'à 10	1.1 - 1.5	1.5 - 4
<b>Temps de réponse</b>	$10^{-10}$	$T_{on} = \text{qq.ms}$ $T_{off} = \text{qq.s}$	$10^{-10}$
<b>Pertes diélectriques ou magnétiques</b>	$10^{-4} - 10^{-3}$	$\geq 10^{-2}$	$10^{-3} - 10^{-2}$
<b>Intégration de la commande</b>	Difficile	Aisée	Aisée
<b>Intégration du matériau</b>	Aisée	Moyenne	Aisée
<b>Potentiel d'alimentation du matériau</b>	Moyen	Elevé	Moyen

## II.4 Les types de reconfigurabilité

### II.4.1 Reconfigurabilité en fréquence

Dans la littérature consacrée à la technologie des micro-ondes, la reconfigurabilité en fréquence est définie comme l'accordabilité de la bande de fréquence d'exploitation avec correspondance acceptable, et est souvent décrite par la variation de la fréquence de résonance centrale. Cette fonctionnalité doit généralement être obtenue pour une ou plusieurs fréquences de résonance sans aucun changement substantiel du diagramme de rayonnement de l'antenne et des propriétés de polarisation dans la bande de fonctionnement [28].

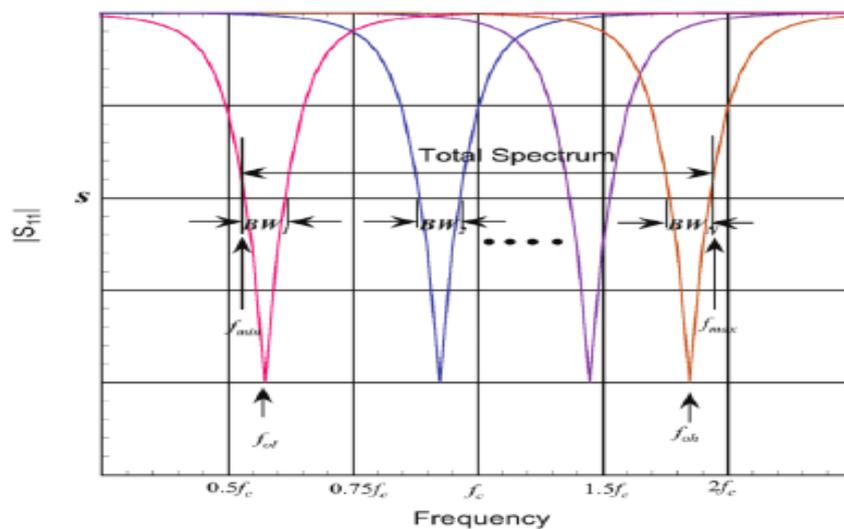
Afin de rendre une antenne agile en fréquence, il est nécessaire d'intégrer des éléments actifs accordables qui permettent de modifier la longueur électrique de l'antenne.

On trouve dans un premier lieu, des condensateurs variables dont la valeur de la capacité varie en fonction d'un champ électrique externe (diode varactor). Cette technique permet de varier la fréquence de résonance de l'antenne de manière continue.

Dans un second lieu, ces éléments peuvent être des commutateurs (les diodes PIN, les photodiodes, les MEMS ou des commutateurs à base de matériaux à transition isolant-métal). Dans ce cas, la fréquence de résonance de l'antenne est variée d'une manière discrète.

Les performances d'une antenne reconfigurable en fréquence peuvent être évaluées selon plusieurs critères (figure II.10). Ces critères peuvent être extraits à partir du coefficient de réflexion [37] :

- Le premier critère est l'accordabilité fréquentielle TR (Tuning Rang) qui définit le déplacement maximum de la fréquence de résonance de l'antenne.
- Le spectre TS (Total Spectrum) qui mesure les fréquences maximales et minimales à un niveau de coefficient de réflexion inférieur à -10 dB.
- L'efficacité de rayonnement.
- La puissance RF injectée dans l'antenne.
- La taille électrique et le coût de fabrication de l'antenne.



**Figure II. 10:** Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence indiquant les paramètres permettant d'évaluer les performances de l'antenne [37]

#### II.4.2 Reconfigurabilité en diagramme de rayonnement

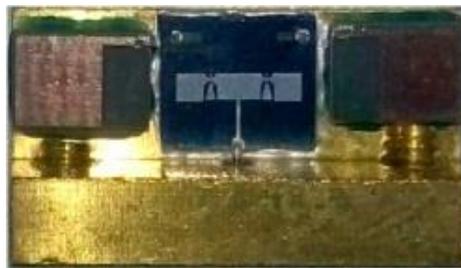
Afin d'augmenter la fiabilité d'une liaison de communications, il est souhaitable d'adapter les diagrammes de rayonnement de l'antenne pour diriger l'émission / réception dans des directions privilégiées. Dans ce contexte, la conception d'antennes reconfigurables vise à modifier la structure du rayonnement de l'antenne en termes de direction, de forme ou de gain [38] [39].

### ❖ Utilisation des MEMS

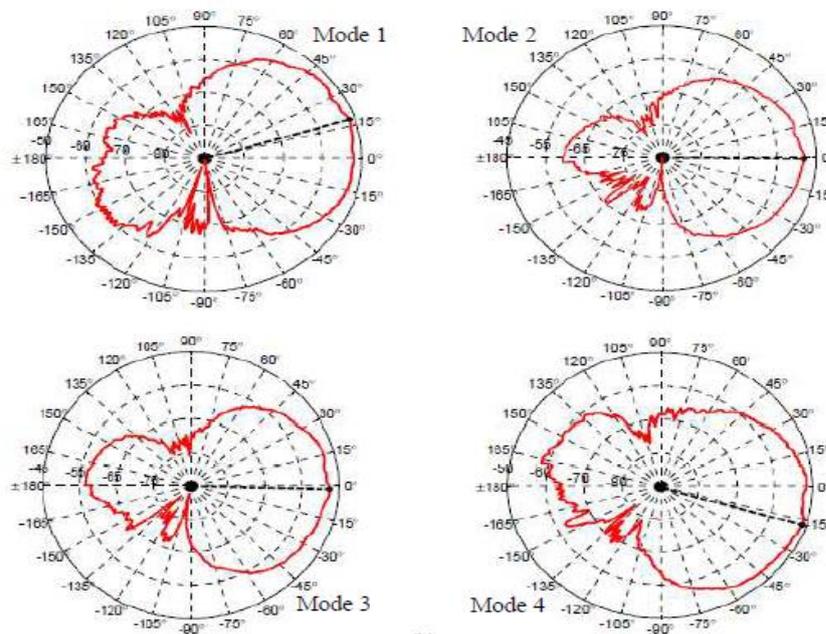
Au cours des dernières décennies, plusieurs conceptions avec des techniques de commutation pour modifier le diagramme de rayonnement des antennes ont été proposées sur la base de commutateurs MEMS.

Les dispositifs MEMS ont été intégrés directement dans un substrat de carte de circuit imprimé pour atteindre une commutation de diagrammes de rayonnement orthogonaux correspond à l'antenne fondamentale [28].

La figure (II.11) montre la photographie de l'antenne reconfigurable avec son diagramme de rayonnement caractéristique.



(a)



(b)

**Figure II. 11:** Exemples d'antennes reconfiguration en diagramme de rayonnement par RF MEMS [40].

(a) L'antenne reconfigurable RF MEMS à profil bas avec support de test.

(b) Caractères de reconfiguration de diagramme de rayonnement à différents états des commutateurs RF MEMS.

### II.4.3 Reconfigurabilité en polarisation

Les antennes reconfigurables en polarisation ont attiré de plus en plus d'attention car elles présentent certains avantages souhaitables pour les communications sans fil moderne, tel que : [41]

- L'utilité pour créer des liaisons sans fil plus fiables et robustes.
- Fournir un schéma de modulation puissant dans tous les systèmes d'étiquetage micro-ondes à lecture.
- Eviter la perte de fading causée par les effets de trajets multiples dans les réseaux locaux sans fil.

Réaliser la réutilisation de la fréquence, la capacité des systèmes de communication par satellite et être un candidat approprié dans un système à entrées multiples et sorties multiples (MIMO).

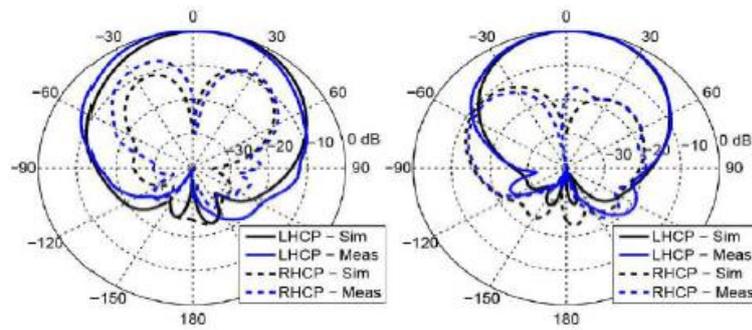
La reconfiguration d'une antenne en polarisation consiste à modifier sa polarisation (linéaire ou circulaire) dynamiquement sans modifier sa fréquence de résonance ni son diagramme de rayonnement. Cette méthode consiste à modifier le sens ou la phase de circulation des courants sur l'élément de rayonnement d'une antenne [23].

Pratiquement, les caractéristiques de rayonnement polarisé linéairement se produisent lorsque l'antenne a ses courants de rayonnement dans un plan portant la direction de propagation. En revanche, si les courants d'antenne subissent une rotation bien définie perpendiculairement à la direction du rayonnement pendant un cycle de fréquence, les caractéristiques de rayonnement correspond à un état connu sous le nom polarisation circulaire.

La figure (II.12) montre la photographie de l'antenne reconfigurable avec son diagramme de rayonnement caractéristique.



(a)



(b)

Figure II. 12: Exemple d’antenne reconfigurable à polarisation par RF-MEMS [42].

(a) Photographie de l’antenne en forme de E à polarisation

(b) Le diagramme de rayonnement dans le plan E et le plan H.

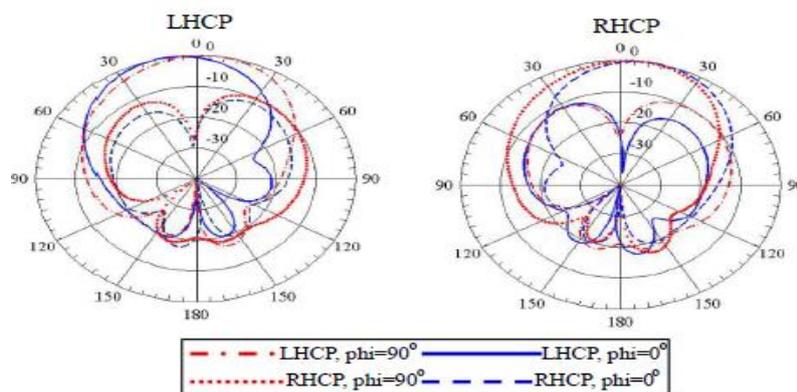


Polarisation linéaire



polarisation circulaire

(a)



(b)

Figure II. 13: Exemple d’antenne reconfigurable à polarisation par diode PIN [43].

(a) Prototypes de configuration d’antenne à fente en anneau fendu pour polarisation linéaire et circulaire

(b) Les caractéristiques du diagramme de rayonnement de l’antenne pilotées par les états de commutation de la diode PIN.

## II.5 Avantages et inconvénients

### ❖ Avantages

Les antennes reconfigurables offrent plusieurs avantages par rapport aux antennes conventionnelles, parmi elles on peut citer :

#### ▪ **Adaptabilité :**

Les antennes reconfigurables peuvent modifier leur forme, leur fréquence de résonance ou leur polarisation pour s'adapter à différents besoins de communication.

#### ▪ **Polyvalence :**

Les antennes reconfigurables peuvent être utilisées dans une variété d'application de communication ; telles que les réseaux sans fil, les radars, les satellites, les drones et les véhicules hotonomes.

#### ▪ **Economie d'espace :**

Les antennes reconfigurables peuvent remplacer plusieurs antennes conventionnelles avec une seule antenne reconfigurable. Cela permet de réduire l'encombrement et le poids du système.

#### ▪ **Amélioration de la performance du système :**

Les antennes reconfigurables peuvent améliorer la performance du système en optimisant le rayonnement de l'antenne pour les conditions de communication spécifiques.

### ❖ Inconvénients

Malgré les avantages qu'elles présentent, les antennes reconfigurables présentent également certains inconvénients :

#### ▪ **Le coût :**

Il est plus élevé que d'antennes conventionnelles, à cause des composants actifs nécessaire pour la reconfiguration.

#### ▪ **La complexité :**

La complexité de conception ou bien la complexité géométrique, la conception des antennes reconfigurables est souvent plus complexe car elles nécessitent l'intégration des composants actifs ce qui entraînent des difficultés conceptuelles et de simulation.

- **La consommation d'énergie :**

Elles peuvent nécessiter une consommation d'énergie plus élevée que les antennes conventionnelles en raison de la nécessité de composants supplémentaires pour la reconfiguration.

## **II.6 Conclusion**

En raison de ces caractéristiques attrayantes, les antennes reconfigurables ont reçu une attention considérable, elles restent la solution la plus utilisée pour répondre aux normes des systèmes de télécommunications. Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord les antennes reconfigurables et leurs intérêts et applications. Par la suite, nous avons exposé les différentes techniques de reconfigurations telles que les Diodes ainsi que les types de reconfigurations. Nous avons terminé ce chapitre par quelques avantages et inconvénients de ces antennes.

**Chapitre III**  
*Conception et simulation d'une antenne  
reconfigurable en fréquence*

### III.1 Introduction

Nous rappelons d'après le chapitre précédent que les antennes reconfigurables sont des antennes capables de modifier ses caractéristiques.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble du travail de simulation d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs à l'aide de logiciel de simulation CST.

Dans un premier temps, nous présentons le logiciel CST et ces avantages. Ensuite, nous allons présenter la reconfiguration en fréquence d'une antenne à un seul élément rayonnant (modèle de base) en insérant entre le patch et le stub d'adaptation une Diode Varactor, une Diode PIN et un plot métallique.

Afin d'améliorer les caractéristiques de rayonnement du modèle de base, nous allons présenter la reconfiguration en fréquence et en diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes composé de deux éléments rayonnant identiques de forme carré alimentés par un diviseur de puissance et on a placé deux métalliques entre ces éléments rayonnants et les stubs. Enfin, nous allons décrire et expliquer les résultats de simulation obtenus.

### III.2 Présentation du logiciel de simulation CST

Le logiciel **CST Microwave Studio** est un logiciel de simulation appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques 3D [46]. Il permet de réaliser des simulations dans de nombreux domaines d'applications telles que les performances et l'efficacité des antennes et des filtres, communications électroniques (Wi-Fi, 5 G, Satellite ...), transport (voitures connectées), performances des circuits imprimés. Il est basé sur la méthode d'intégration finie **FIT** (Finit Integration Technique) développé en 1977 par Weiland [46]. Cette méthode offre une discrétisation spatiale des équations de Maxwell sous leur forme intégrale sur un espace de grille. On peut effectuer une étude dans le domaine temporel ou fréquentiel à l'aide de cette méthode.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Conception de l'antenne.
- Simulation de l'antenne.

**Interface CST :** L'interface CST contient une fenêtre principale repartit en plusieurs parties (Figure III.1).

- Barre d'outils : se trouve en haut de l'interface ; qui est un ensemble de raccourcis depuis la barre de menus.
- L'arbre de navigation : sur le côté gauche de l'interface ; permet d'accéder aux éléments structuraux et résultats de simulation.
- Le plan de travail : se trouve au milieu de l'interface.
- La liste des paramètres : dont on trouve tous les paramètres utilisés dans la simulation.
- Un message indiquant si chaque étape est simulée avec succès, sinon, un message d'erreur.

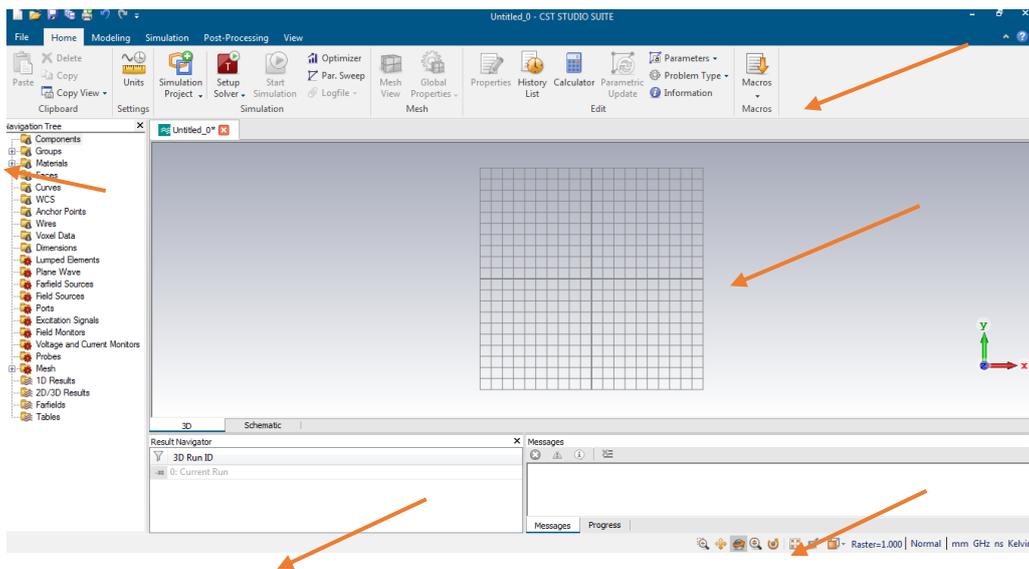


Figure III. 1: L'interface graphique de logiciel CST Microwave Studio 2019.

#### ❖ Avantages du logiciel CST

- La possibilité de traiter toutes les structures homogènes et inhomogènes (les antennes, les structures planaires, les structures multicouches, les filtres et les coupleurs) avec une bonne précision et une rapidité de résolution.
- Permet de calculer différents paramètres tels que : les paramètres S, le diagramme de rayonnement, la distribution du courant ...
- Le traitement sur une gamme de fréquence élevée, par rapport à d'autres simulateurs.

### III.3 La géométrie de l'antenne de base

#### III.3.1 Description

La géométrie de l'antenne Patch de forme carré proposée est présentée sur la figure (III.2).

Les paramètres géométriques de l'antenne proposée sont définis de la façon suivante : un substrat de type **FR-4** d'une épaisseur de **1.5 mm** avec une permittivité relative  $\epsilon_r$  de **4.3** et une tangente de pertes de **0.0025**, qui a des dimensions **72.54×72.54 mm<sup>2</sup>**(largeur ×longueur).

L'épaisseur de cuivre  $t$  est de 0.035 mm. L'antenne est alimentée par une ligne micro ruban d'impédance caractéristique  $Z= 50 \Omega$ .

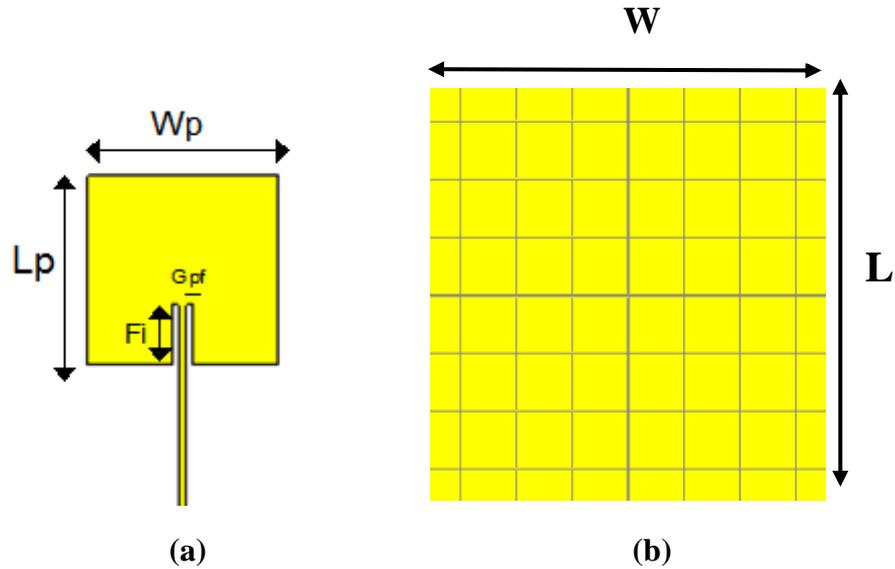


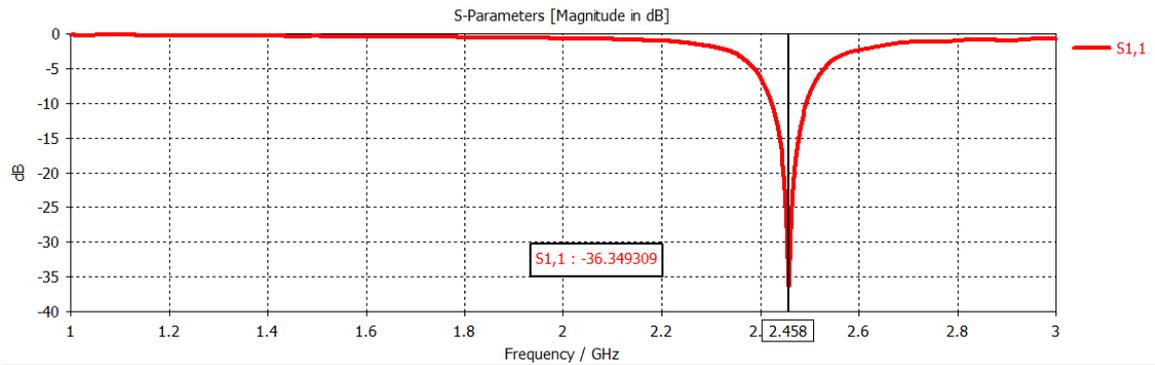
Figure III. 2: Structure de l'antenne de base : (a) vus de dessus (b) vus de dessous.

Tableau III. 1: Paramètres géométriques de l'antenne proposée.

Paramètres	Valeur (mm)
W	72.54
L	72.54
Wp	28.45
Lp	28.45
Gpf	1
Wf	1.137
Fi	9

### III.3.2 Résultats de simulation

Le résultat de simulation concernant le coefficient de réflexion du modèle de base est montré dans la figure (III.3).



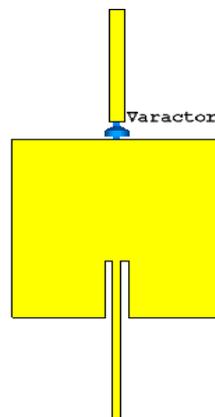
**Figure III. 3:** Coefficient de réflexion S<sub>11</sub> de l'antenne de base.

Cette figure nous montre que le niveau du coefficient de réflexion S<sub>11</sub> est égal à **-36.34 dB**, avec une fréquence de résonance de **2.45 GHz** (pour les applications Wi-Fi).

### III.4 Conception d'une antenne reconfigurable à un seul élément

#### III.4.1 Utilisation de la Diode Varactor

Pour obtenir la reconfigurabilité du modèle précédent, une Diode Varactor est insérée entre l'un des bords rayonnants du patch et le stub de forme rectangulaire de dimensions suivantes (Longueur : L= 18 mm, largeur : W= 2 mm) comme montre la figure (III.4).

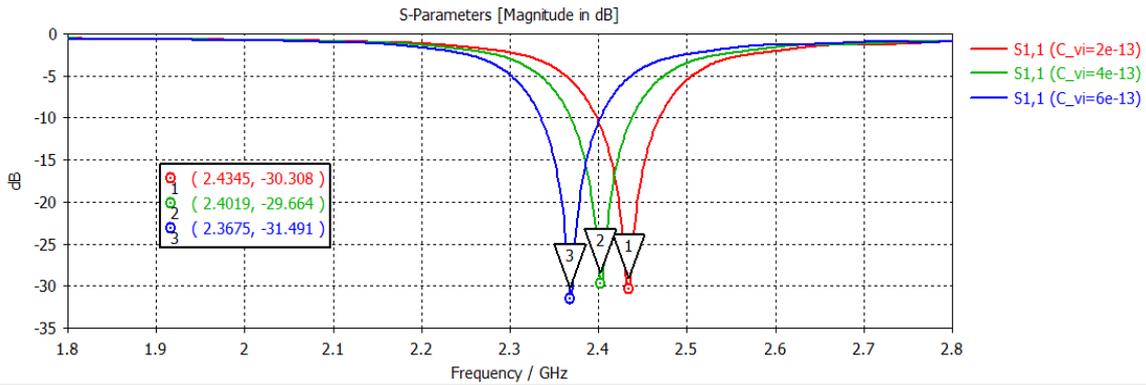


**Figure III. 4:** Antenne reconfigurable avec une Diode Varactor.

La diode Varactor utilisée est de type **MA46H120** de MACOM Technical Solution [30]. Elle est caractérisée par un condensateur de capacité variable allant de **0.149 pF** à **1.304 pF**, contrôlée par une tension de polarisation inverse de 18 V à 0 V (voir figure II.4 'chapitre II'), une résistance de **2 Ω** et une inductance de **0.05 nH**.

#### ❖ Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure (III.5).



**Figure III. 5:** Coefficient de réflexion de l’antenne reconfigurable en fréquence avec trois tensions de polarisations différentes

Les courbes indiquent que les fréquences de résonance :  $f_1 = 2.43$  GHz,  $f_2 = 2.40$  GHz et  $f_3 = 2.36$  GHz sont obtenus lorsque les tensions de polarisation inverse sont 10 V ( $C = 0.2$  pF), 4 V ( $C = 0.4$  pF) et 2.5 V ( $C = 0.6$  pF) respectivement.

Ce décalage en fréquence de résonance explique que **la fonction de reconfigurabilité en fréquence** de l’antenne conçue est effectuée.

Le tableau suivant résume les résultats de cette simulation.

**Tableau III. 2:** Les résultats de simulation en utilisant la diode Varactor.

La capacité (pF)	S <sub>11</sub> (dB)	Fréquence de résonance (GHz)
0.2	-30.30	2.43
0.4	-29.66	2.40
0.6	-31.49	2.36

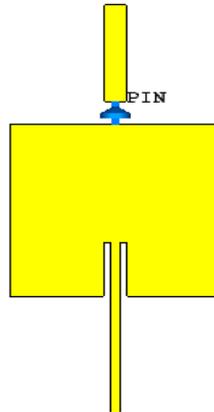
Les résultats de l’antenne simulée sont comparés avec d’autres références comme nous montre le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 3:** Comparaison de l’antenne reconfigurable simulée avec une autre antenne d’article.

Réf	Nombres de switches	Type d'alimentation	Type du substrat	Les capacités (pF)	Les fréquences de résonances (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)
Article [45]	1 varactor	Sonde coaxiale	Rogers Duroid 5880	C1= 0.15 C2= 0.30 C3= 0.44	[2.36 - 2.46] [2.35 - 2.45] [2.34 - 2.44]	S <sub>11</sub> (1) = -22.5 S <sub>11</sub> (2) = -24 S <sub>11</sub> (3) = -22.5
Antenne proposée	1 varactor	Ligne microruban	FR-4	C1= 0.2 C2= 0.4 C3= 0.6	f1= 2.43 f2= 2.40 f3= 2.36	S <sub>11</sub> (1) = -30.30 S <sub>11</sub> (2) = -29.66 S <sub>11</sub> (3) = -31.49

### III.4.2 Utilisation de la Diode PIN

Dans cette partie, on va utiliser une Diode PIN au lieu de la Diode Varactor comme indiquée dans la figure (III.6).



**Figure III. 6:** Antenne reconfigurable avec une Diode PIN.

Le fonctionnement de la Diode PIN est basé sur deux états : l'état ON (passante) et l'état OFF (bloquée).

#### ❖ Modélisation de la Diode Pin :

##### **Modélisation par un plot métallique :**

Plusieurs travaux basés sur des diodes Pin (on prend l'exemple de la Diode 4005HPND) ont confirmé l'efficacité de cette modélisation. La présence ou l'absence d'un plot métallique généralement de petite taille représente le mode passant (ON) ou bloquée (OFF) de la diode Pin [46].

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

Le circuit RLC équivalent simplifié de la diode Pin explique les polarisations directes et inverses de la diode. Le circuit série représente l'état ON et le circuit parallèle représente l'état OFF [48].

#### ❖ Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 4: Tableau représentatif des coefficients de réflexion de la diode PIN selon les différents paramètres

	R	L	C
ON	3.5 Ω	0.45 nH	0 pF
	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>Graph showing S<sub>1,1</sub> magnitude in dB vs Frequency in GHz. A resonance dip is observed at 2.602 GHz with a magnitude of -18.735 dB.</p>		
OFF	3 KΩ	0.45 nH	0.08 pF
	<p>S-Parameters [Magnitude in dB]</p> <p>Graph showing S<sub>1,1</sub> magnitude in dB vs Frequency in GHz. Two resonance dips are observed: one at 1.47 GHz with a magnitude of -17.433 dB, and another at 2.602 GHz with a magnitude of -35.475 dB.</p>		

Interprétation :

Les résultats obtenus nous montrent que lorsque la diode PIN est passante (état ON), la fréquence de résonance est égale à 2.6 GHz avec une adaptation de -18.73 dB et lorsqu'elle est bloquée (état OFF), on remarque que l'antenne a conservé la première fréquence de 2.6 GHz mais elle résonne sur une nouvelle fréquence égale à 1.47 GHz.

III.4.3 Utilisation d'un plot métallique

Dans ce cas, la diode PIN est modélisée par un plot métallique.

III.4.3.1 Le coefficient de réflexion

❖ Etat ON :

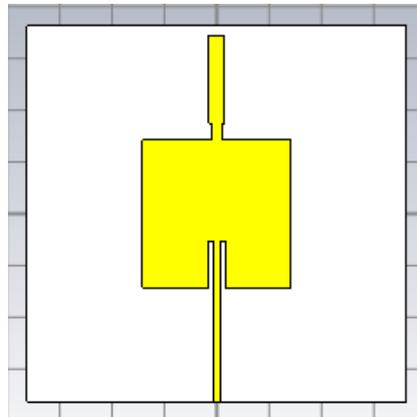


Figure III. 7: Antenne reconfigurable avec un plot métallique (état ON).

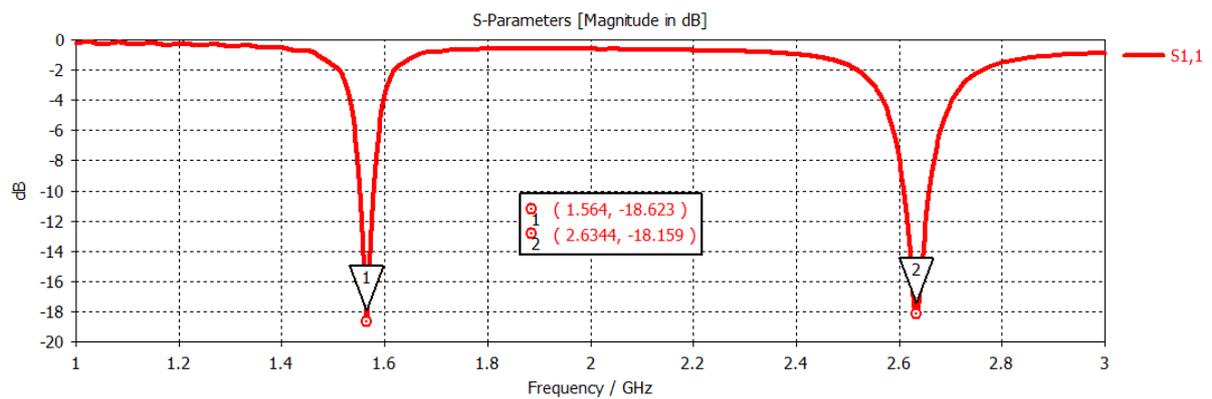


Figure III. 8: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'état ON avec un plot métallique.

❖ Etat OFF :

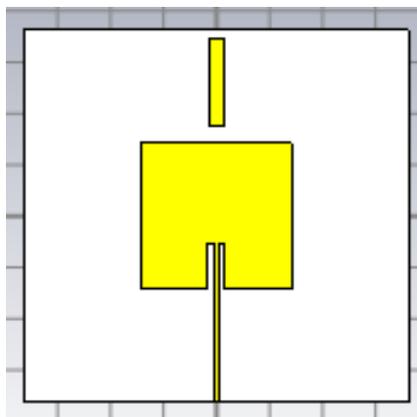


Figure III. 9: Antenne reconfigurable avec un plot métallique (état OFF).

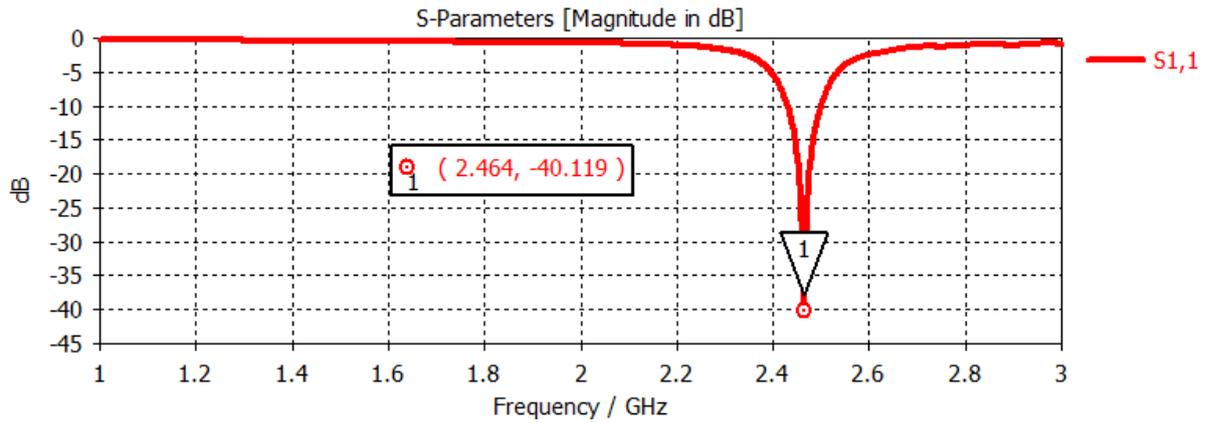


Figure III. 10: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'état OFF avec un plot métallique.

Interprétation :

D'après les résultats obtenus on remarque que l'état ON du plot métallique nous donne deux fréquences de résonance qui sont 1.56 GHz et 2.63 GHz avec adaptation de -18.62 dB et -18.15 dB respectivement, ainsi que l'état OFF nous donne une fréquence de 2.46 GHz avec une adaptation de -40.11 dB.

### III.4.3.2 Diagramme de rayonnement

#### ❖ Etat ON

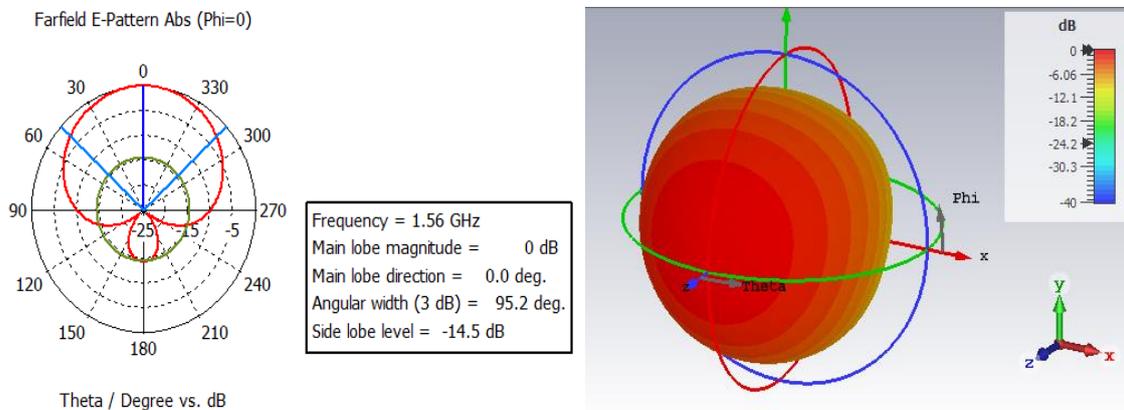
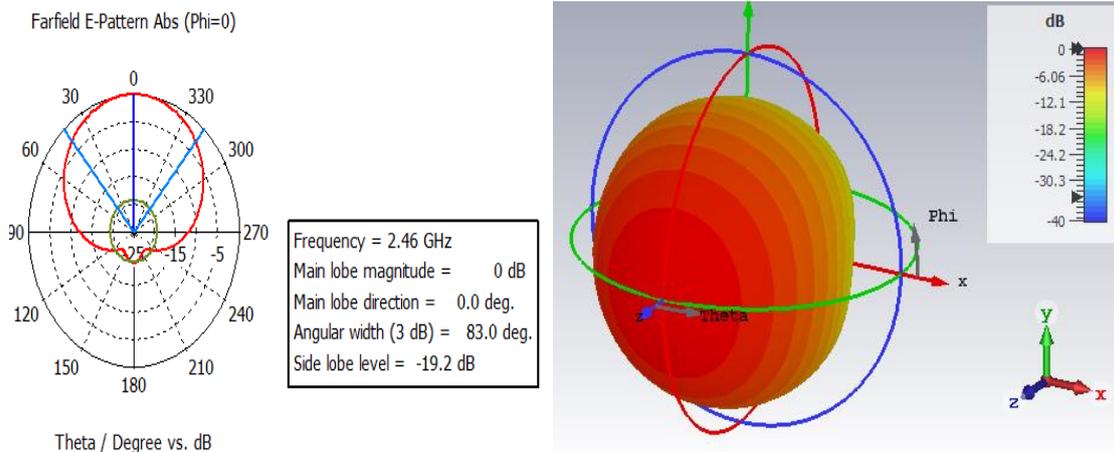


Figure III. 11: Diagramme de rayonnement avec un plot métallique à l'état ON

(a) en coordonnées polaires

(b) en 3D

❖ **Etat OFF**



**Figure III. 12:** Diagramme de rayonnement avec un plot métallique à l'état OFF

(a) en coordonnées polaires

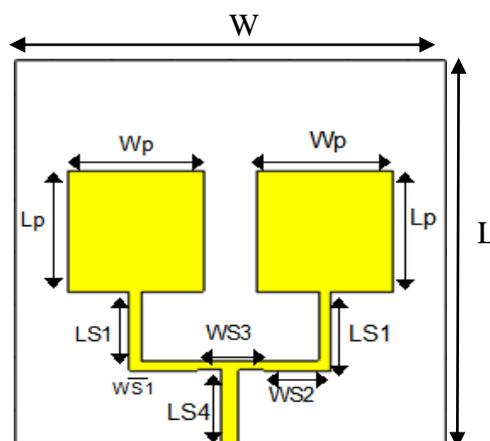
(b) en 3D

### III.5 Conception d'une antenne reconfigurable à deux éléments

Afin d'améliorer les caractéristiques de l'antenne de base (la directivité, le gain et la largeur de la bande passante), on a proposé un réseau d'antennes composé de deux éléments rayonnants identiques de forme carré alimentés par un diviseur de puissance de type Wilkinson (Alimentation parallèle).

#### III.5.1 La géométrie de la nouvelle antenne proposée

La figure (III.13) montre la géométrie de la nouvelle antenne à deux éléments. Les deux patches sont de forme carré de dimension  $L_p=23$  mm et  $W_p= 23$  mm, alimentés par un diviseur de puissance à jonction en T.

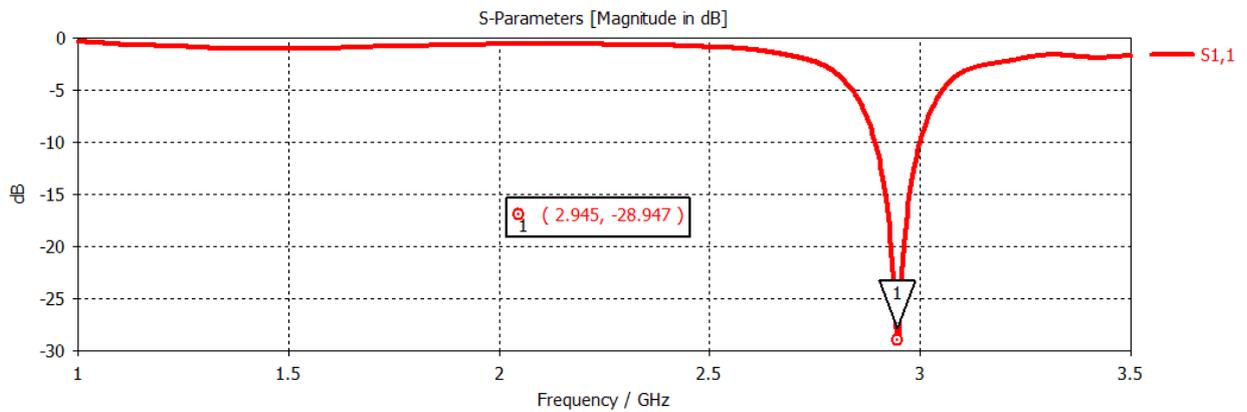


**Figure III. 13:** Antenne réseau à deux éléments.

Tableau III. 5: les différents paramètres de l'antenne réseau proposée.

Paramètres	Valeur (mm)	Paramètres	Valeur (mm)
W	72.54	WS2	11.5
L	72.54	LS2	2
Wp	23	WS3	11
Lp	23	LS3	1.7
WS1	2	WS4	2.9
LS1	13	LS4	14.1

## ❖ Résultat de simulation :

Figure III. 14: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne réseau.

La figure (III.14) montre que la fréquence de résonance égale à 2.94 GHz avec une adaptation de -28.94 dB.

Pour avoir la reconfigurabilité de cette nouvelle antenne, on a placé un plot métallique de dimensions 3mm × 2mm entre chaque élément rayonnant et le stub d'adaptation.

## III.5.2 résultats de simulation et discussions

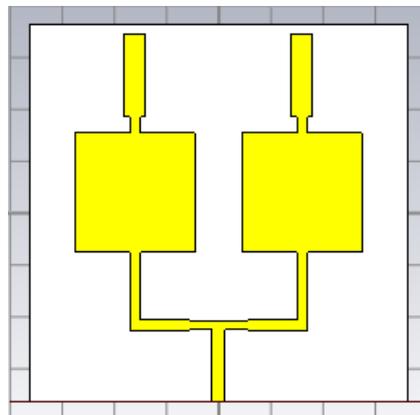
III.5.2.1 Le coefficient de réflexion  $S_{11}$ ❖ Etat ON-ON :

Figure III. 15: Antenne réseau reconfigurable avec deux plots à l'état ON-ON.

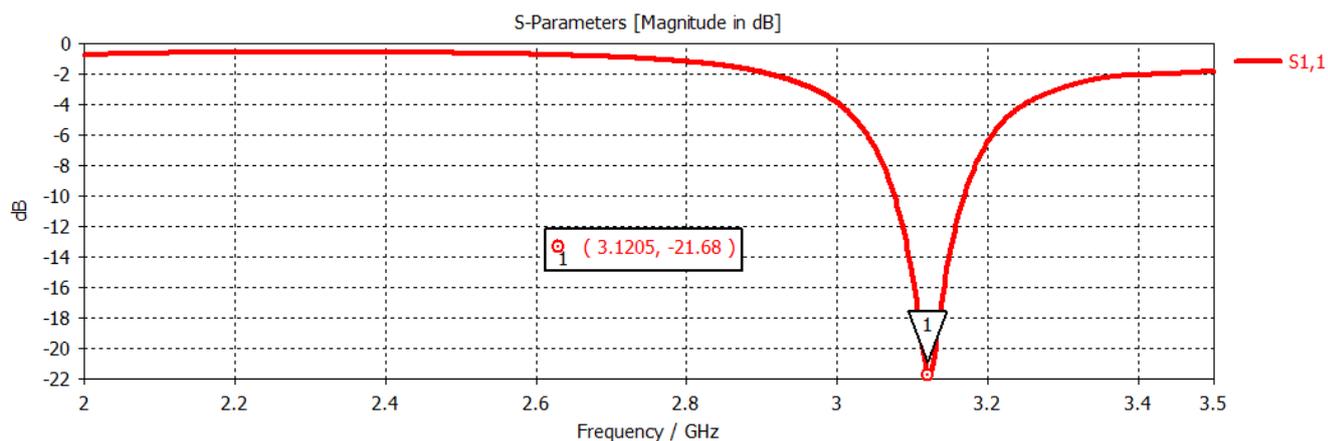
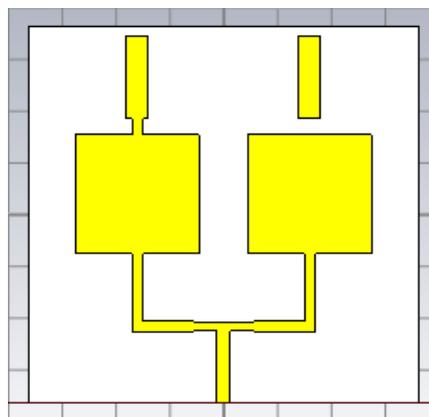
Figure III. 16: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'état ON-ON.❖ Etat ON-OFF :

Figure III. 17: Antenne réseau reconfigurable avec deux plots à l'état ON-OFF.

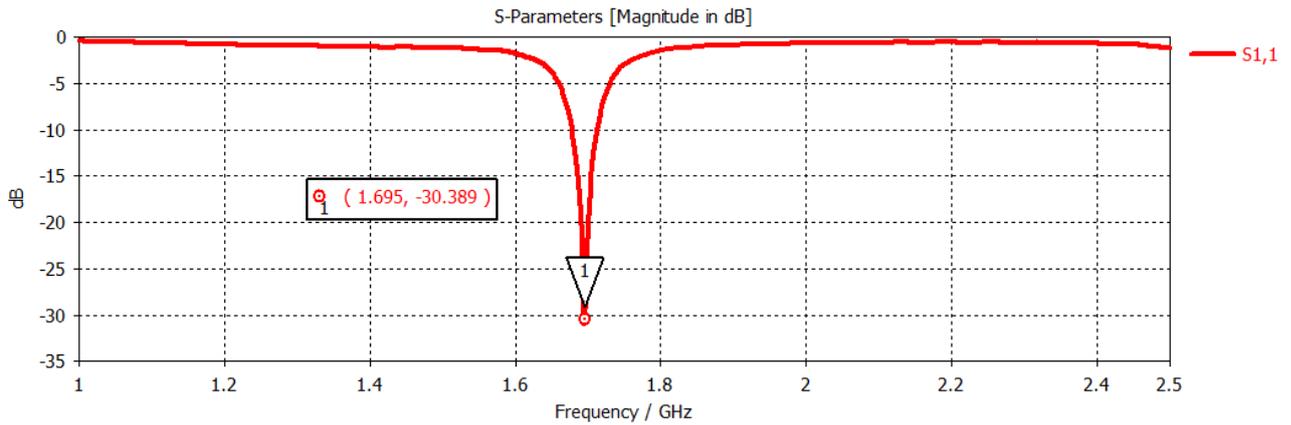


Figure III. 18: Coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'état ON-OFF.

Interprétation :

D'après les résultats montrés dans les figures précédentes, on remarque que :

- Lorsque les deux plots métalliques sont à l'état ON-ON, la fréquence de résonance est égale à 3.12 GHz avec une adaptation de -21.28 dB.
- Lorsque les deux plots métalliques sont à l'état ON-OFF, la fréquence de résonance est égale à 1.69 GHz avec une adaptation de -30.38 dB.

Donc il y a un décalage en fréquence de résonance entre ces états, ce décalage explique que **l'antenne réseau conçue est reconfigurable en fréquence.**

Les résultats de simulation de cette partie sont regroupés dans le tableau (III.7) :

Tableau III. 6: Les résultats de simulation de l'antenne réseau avec deux plots métalliques.

Plot 1	Plot 2	$S_{11}$ (dB)	Fréquence de résonance (GHz)
ON	ON	-21.28	3.12
ON	OFF	-34.69	1.69

Une comparaison de cette antenne simulée avec un autre article est présentée dans le tableau (III.8) :

Tableau III. 7: Comparaison de l'antenne réseau reconfigurable simulée avec une autre antenne d'article.

Réf	Substrat	Taille (mm <sup>2</sup> )	Types et nombres de switches	Fréquences de résonances	S <sub>11</sub> (dB)
Article [47]	Rogers Duroid 5880	L= 151.5 W= 160.9	2 varactor	f1= 2.15 f2= 2.27 f3= 2.38	S <sub>11</sub> (1) = -28 S <sub>11</sub> (1) = -23 S <sub>11</sub> (1) = -35
Antenne proposée	FR-4	L= 72.54 W= 72.54	2 plots métalliques	f1= 3.12 f2= 1.69 f3= 2.65	S <sub>11</sub> (1) = -21 S <sub>11</sub> (1) = -34 S <sub>11</sub> (1) = -32

III5.2.2. le diagramme de rayonnement

Dans cette partie, on va tracer le diagramme de rayonnement de l'antenne en utilisant deux plots métalliques insérés à l'aide de deux stubs.

❖ Etat ON-ON :

Le diagramme de rayonnement de cette état est représenté en coordonnées polaire et en 3D dans la figure (III.19) à la fréquence de résonance 3.12 GHz.

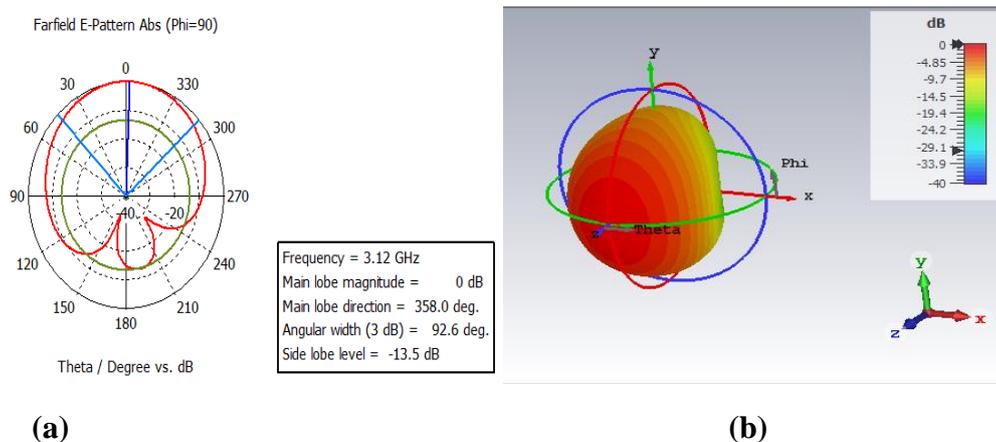


Figure III.19: Diagramme de rayonnement de l'antenne réseau (état ON-ON).

(a) en coordonnées polaires

(b) en 3D

❖ Etat ON-OFF :

Le diagramme de rayonnement de cette état est représenté en coordonnées polaire et en 3D dans la figure (III.20) à la fréquence de résonance 1.69 GHz.

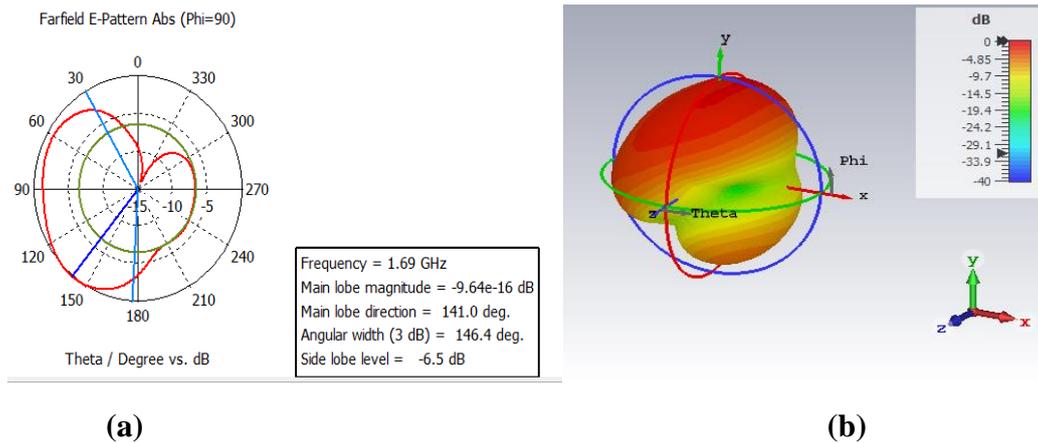


Figure III.20: Diagramme de rayonnement de l'antenne réseau (état ON-OFF).

(a) en coordonnées polaires  
 (b) en 3D

Interprétation :

D'après les résultats montrés dans les figures précédentes, on trouve que :

- Le diagramme de rayonnement représenté sur la figure III.19 est directive (la direction du lobe principal est égale à  $358^\circ$ ) et l'angle d'ouverture à -3 dB est de l'ordre  $92^\circ$ .
- Le diagramme de rayonnement représenté sur la figure III.20 est directive (la direction du lobe principal est égale à  $141^\circ$ ) et l'angle d'ouverture à -3 dB est de l'ordre  $146^\circ$ .

On remarque que le diagramme de rayonnement change sa direction (avec un angle de  $217^\circ$ ) ainsi que sa forme.

### III.5.2.3. Le taux d'onde stationnaire (VSWR)

Les figures (III.21) et (III.22) présentent le taux d'onde stationnaire (VSWR) à l'état ON-ON et l'état ON-OFF de l'antenne en fonction de la fréquence respectivement.

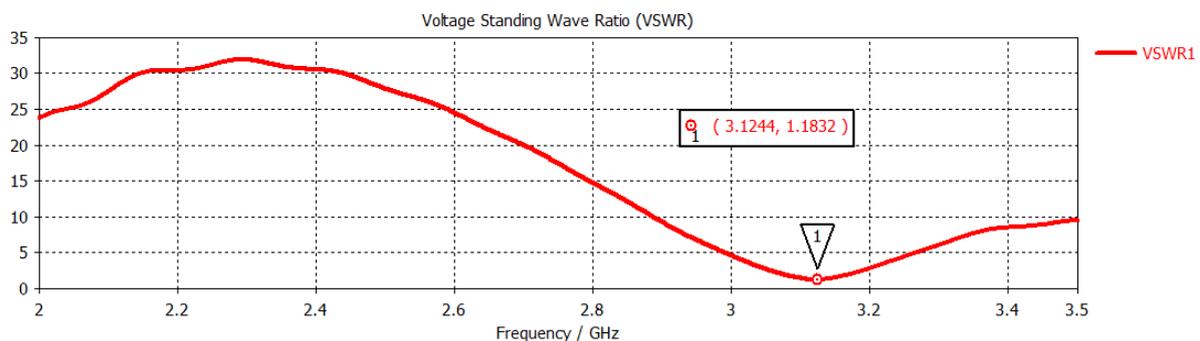


Figure III. 21: Le taux d'onde stationnaire à l'état ON-ON.

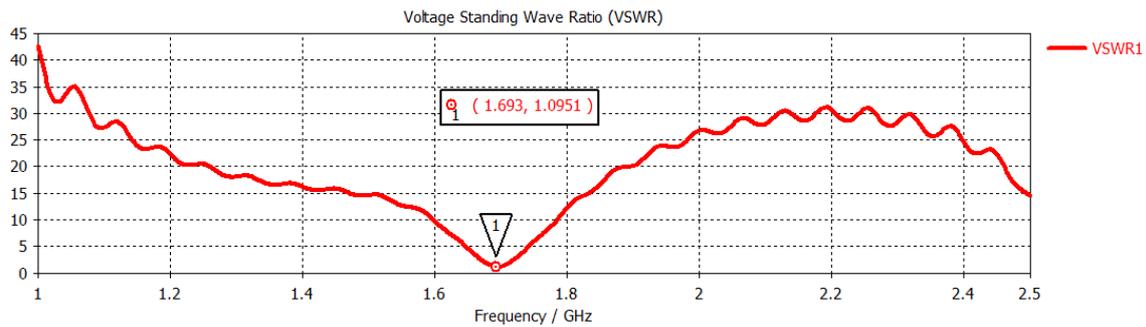


Figure III. 22: Le taux d'onde stationnaire à l'état ON-OFF.

III.5.2.4. L'impédance d'entrée

Les figures III.23 et III.24 présentent l'impédance d'entrée de l'antenne à l'état ON-ON et l'état ON-OFF respectivement.

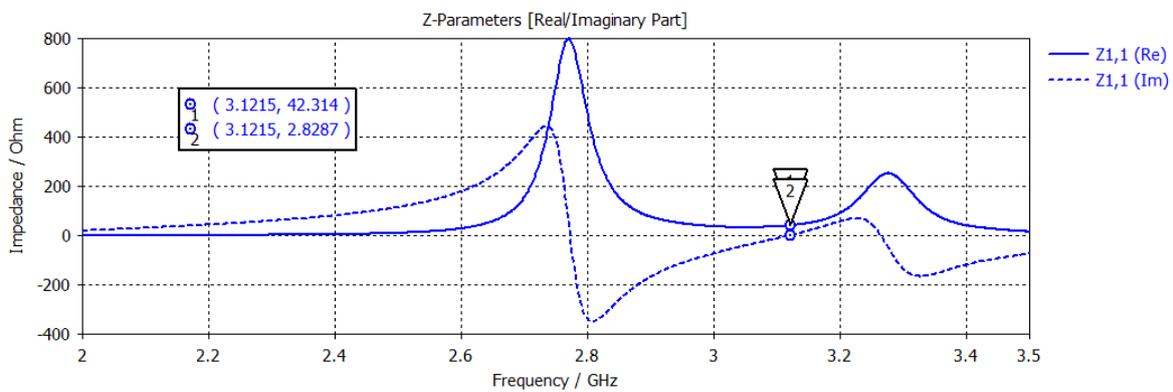


Figure III. 23: L'impédance d'entrée de l'antenne réseau à l'état ON-ON.

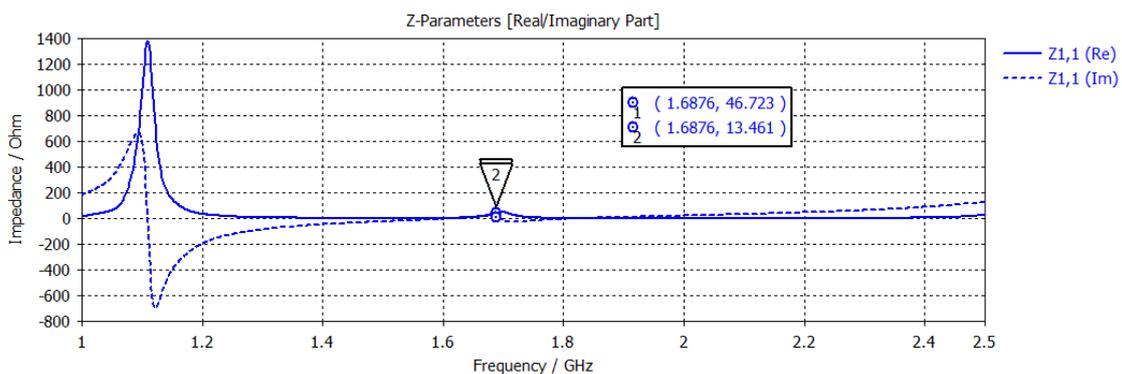


Figure III. 24: L'impédance d'entrée de l'antenne réseau à l'état ON-OFF.

Interprétation :

Les figures III.23 et III.24 montrent que la partie réelle de la caractéristique d'impédance de l'antenne est égale à 42 Ohm et 46 Ohm respectivement qui est l'impédance du port de l'antenne. Tandis que la partie imaginaire oscille presque autour de la ligne zéro qui signifie la bonne adaptation de l'antenne conçue dans toute la bande passante.

### III.6 Conclusion

Nous avons présenté au début de ce chapitre l'outil de simulation (CST Microwave Studio). C'est un outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel il intègre la simulation, la visualisation, et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement (3D) avec une bonne précision.

Dans la première partie, notre étude est basée sur un modèle de base qui est composé d'un seul élément rayonnant. Pour avoir la fonction de raconfigurabilité on a placé au bord rayonnant du patch un composant actif (diodes Varactor, diode PIN et un plot métallique) chargé par un stub. Les résultats de simulation nous montrent que la foction de reconfigurabilité est effectuée avec succès.

Afin d'améliorer les caractéristiques de l'antenne de base (antenne à un seul élément rayonnant) étudié dans la première partie de ce chapitre, on a proposé un nouveau modèle qui est composé de deux éléments rayonnants de forme carré et alimentés par un diviseur de puissance de type Wilkinson. Et pour avoir la fonction de reconfigurabilité, on a inséré au bord de chacun de patch un plot métallique de dimensions  $3\text{mm} \times 2\text{mm}$  chargé par stub d'adaptation. Les résultats de simulation de cette partie nous montrent que la fonction de reconfigurabilité est effectuée avec succès.

## **Chapitre IV**

### ***Réalisation et validation expérimentale***

## IV.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de réaliser l'antenne réseau à deux éléments simulée dans le chapitre précédent, en utilisant la machine à gravure LPKF ProtoMap E44 avec une mesure des paramètres de l'antenne sous l'analyseur de réseau. Enfin, une petite comparaison entre les résultats simulés et mesurés sera décrite.

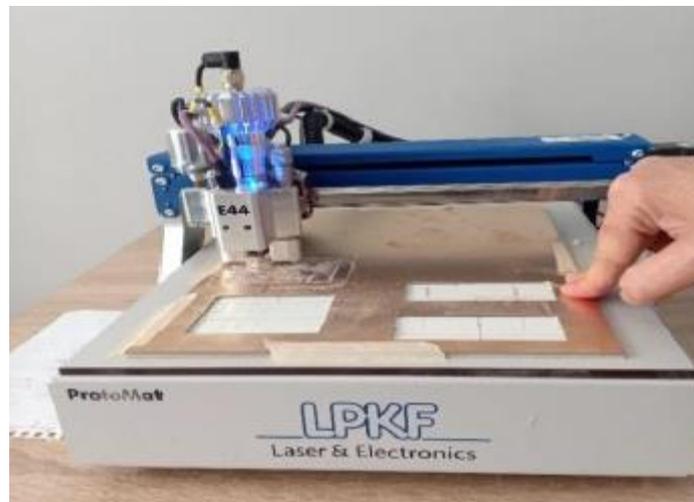
La réalisation qui sera présentée dans ce chapitre a été effectuée dans le laboratoire de Télécommunications 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.

## IV.2 Matériels utilisés

### IV.2.1 La machine LPKF ProtoMap E44

La machine LPKF ProtoMap E44 est une fraiseuse spécialement conçue pour la fabrication de circuits imprimés, grâce à sa grande flexibilité et sa rapidité de fabrication.

Le ProtoMap E44 fonctionne directement à partir des données CAO pour traiter les cartes. Les caractéristiques standard propres aux systèmes incluent une table à vide pour retravailler les circuits imprimés endommagés et la fixation de matériaux délicats ou flexibles, ainsi qu'un limiteur de profondeur sans contact, ou Air-foot, qui garantit ne rien n'entre en contact avec le matériau de la carte sauf l'outil [48].



**Figure IV. 1:** La machine LPKE ProtoMap E44.

### IV.2.2 Appareil de mesure

Un analyseur de réseau Rohde&Schwarz R&S ®ZNB20 Vector Network Analyser (figure IV.2) fonctionne dans la bande 100 KHz à 20 GHz, disponible au niveau du département d'Electronique et des Télécommunications Université 8 Mai 1945 Guelma, est utilisée pour mesurer les caractéristiques de l'antenne (les paramètres S et l'impédance d'entrée de

l'antenne). L'antenne est reliée à cet analyseur à travers deux câbles coaxiaux d'impédance  $50 \Omega$  [49].



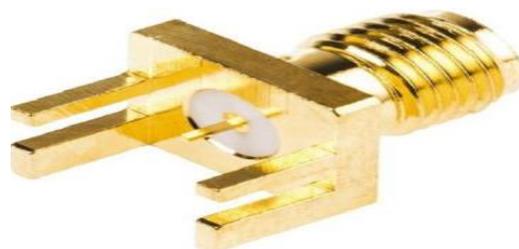
**Figure IV. 2 :** L'analyseur de réseau 'R&S ®ZNB20'.

### IV.3 Prototype réalisé

#### ❖ Etape de fabrication :

Pour la fabrication du prototype d'antenne proposée, nous utilisons la machine à gravure LPKE. Le processus de fabrication est résumé ci-dessous :

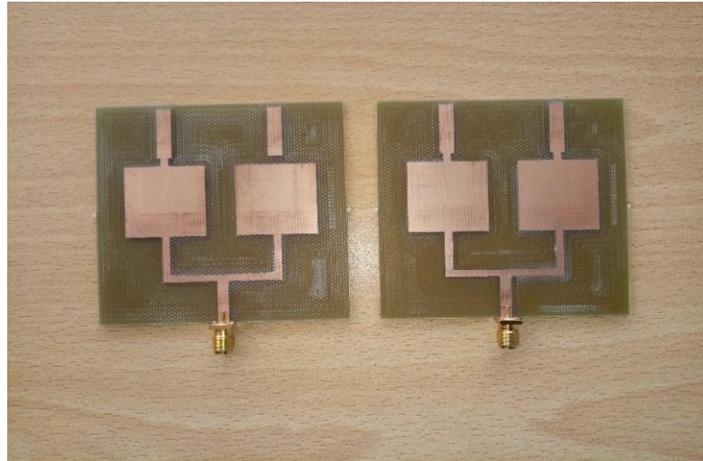
- L'exportation de la structure simulée en tant que fichier Gerber à l'aide du logiciel CST, ce type de fichier est compatible avec le logiciel de la machine LPKE ProtoMap S103.
- Fixation du substrat diélectrique dans la machine LPKE ProtoMap S103.
- Elimination du cuivre non désiré en perçant dans la plaque de cuivre.
- Découpage du substrat diélectrique par la machine
- Enfin, le soudage de connecteur SMA (illustré dans la figure IV.3) au point d'alimentation.



**Figure IV. 3:** Connecteur SMA.

Pour valider la structure d'antenne réseau proposée ; nous avons réalisé deux prototypes :

- ❖ Le premier concerne une antenne réseau à deux éléments avec deux stubs et deux plots métalliques placés entre les éléments et les stubs (état ON-ON).
- ❖ Le deuxième concerne une antenne réseau à deux éléments avec deux stubs deux plots métalliques placé entre les éléments et les stubs (état ON-OFF).



-a-

-b-

**Figure IV. 4:** Prototype réalisé

-a- état ON-OFF    -b- état ON-ON

## IV.4 Mesures expérimentales

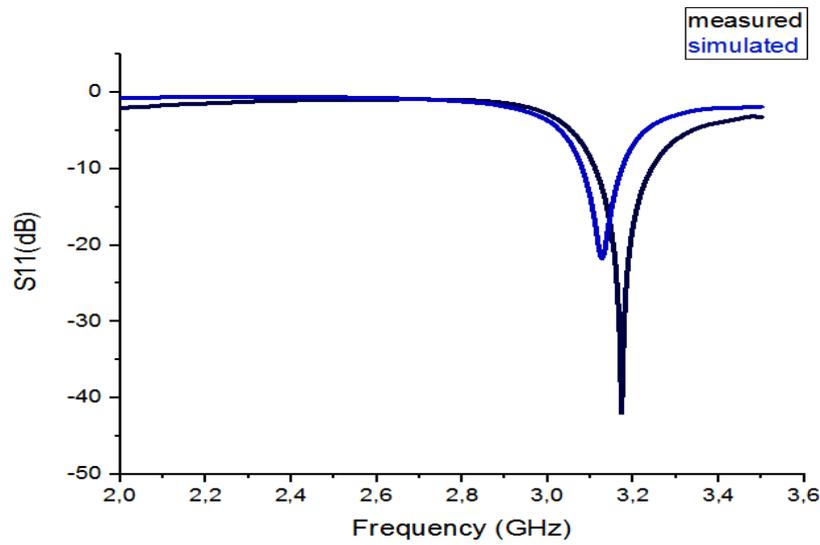
### IV.4.1 Mesure du coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est mesuré à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel 'R&S ®ZNB20'.

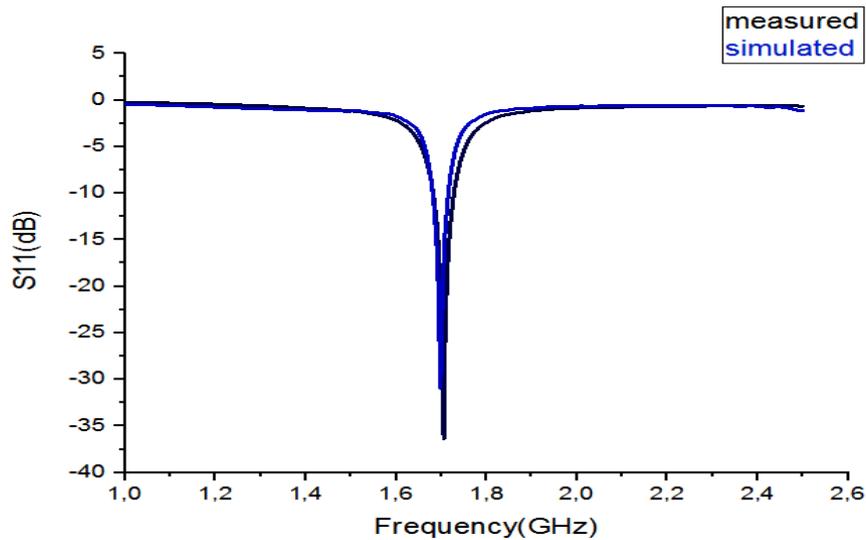


**Figure IV. 5:** Configuration du test de l'antenne

Les résultats simulés et mesurés des deux états (ON-ON) et (ON-OFF) sont illustrés dans les figures (IV.5) et (IV.6) respectivement.



**Figure IV. 6:** Comparaison du  $S_{11}$  simulé et mesuré à l'état ON-ON.



**Figure IV. 7:** Comparaison du  $S_{11}$  simulé et mesuré à l'état ON-OFF.

On trouve que les résultats de mesure sont très satisfaisants, ces résultats sont similaires aux résultats de simulation.

Les résultats de cette partie sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau IV. 1:** Comparaison des résultats simulés et mesurés.

	Etat	Fréquence de résonance (GHz)	Coefficient de réflexion (dB)
<b>Simulé</b>	ON-ON	3.12	-21.28
<b>Mesuré</b>	ON-ON	3.18	-41.5
<b>Simulé</b>	ON-OFF	1.69	-30.87
<b>Mesuré</b>	ON-OFF	1.7	-37

## IV.5 Conclusion

Ce dernier chapitre est consacré à la réalisation d'une antenne reconfigurable à deux éléments rayonnants avec deux plots métalliques.

Les résultats de mesure obtenus sont presque identiques aux résultats de simulation, avec une petite différence peut s'expliquer par les influences extérieures sur l'antenne réalisée.

## *Conclusion générale*

**Conclusion générale :**

Les antennes reconfigurables ont reçu une attention considérable en raison de ces caractéristiques attrayantes, elles restent la solution la plus utilisée pour répondre aux normes des systèmes de télécommunications.

Tout au long de ce travail, nous avons traité la technique de reconfigurabilité, particulièrement la reconfigurabilité en fréquence et en diagramme de rayonnement. Nous avons abordé ce thème afin de concevoir une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs.

Pour commencer, nous avons présenté dans le premier chapitre les antennes imprimées. Nous nous sommes occupés de leurs caractéristiques, leurs domaines d'applications ainsi que les techniques d'alimentations.

Par la suite, nous avons décrit les antennes reconfigurables, leurs intérêts et applications, les différentes techniques de reconfigurabilité ainsi que les types de reconfigurabilité.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes focalisés à la simulation d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. Ce chapitre est divisé en deux parties.

Dans la première partie, on a présenté la reconfiguration en fréquence d'une antenne à un seul élément rayonnant (modèle de base) en insérant entre le patch et le stub d'adaptation une Diode Varactor, une Diode PIN et un plot métallique.

Dans la deuxième partie, on a présenté la reconfiguration en fréquence et en diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes composé de deux éléments rayonnant identiques de forme carré alimentés par un diviseur de puissance et on a placé deux métalliques entre ces éléments rayonnants et les stubs.

Finalement, dans le quatrième chapitre on a réalisé deux prototypes de l'antenne réseau à deux éléments. Le premier concerne une antenne réseau à deux éléments avec deux stub et deux plots métalliques (état ON-ON). Le deuxième concerne une antenne réseau à deux éléments avec deux stubs et deux plots métallique (état ON-OFF).

On conclut que les résultats de mesures obtenus sont similaires avec les résultats de simulation avec des petites différences qui peuvent être expliqués par une incertitude dimensionnelle pendant la réalisation.

# *Bibliographie*

**Bibliographie :**

- [1] M. F. Bendahmane et F. T. Bendimerad, « Etude du couplage entre antennes imprimées » éditions universitaires européennes 2014 ISBN : 978-3-8417-3788-5.
- [2] V. Patrick, support de cour « Antennes » Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM, Université de Limoges.
- [3] M. Guerroui, « Conception d'une nouvelle antenne pour une application GPR » Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 GUELMA, 2022.
- [4] A. Reha, « Les antennes fractales », éditions universitaires européennes 2017 ISBN : 978-3-639-54888-4.
- [5] D. Ziani, « Réseaux d'antennes MIMO ultra large bande pour système radar micro-onde » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2019.
- [6] S. Taleb, « Simulations de systèmes d'antennes pour imagerie micro-ondes » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [7] A. Boyer, support de cour « antennes », Institut national des sciences appliquées de Toulouse.
- [8] A. Chaabane, « Conception d'une antenne big large bande a fort gain » Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2017.
- [9] Z. Barkat, « Conception et Analyse d'Antennes Combinées à Polarisation Multiples pour Différents Standards de Télécommunications » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [10] S. Souai, « Réseaux d'antennes miniatures super directifs reconfigurables basses fréquences pour l'IoT » Thèse de doctorat, Université côte d'azur, 2021.
- [11] A. Boualleg, support de cour « rayonnement des antennes », département ELN / TLC, université 8 mai 1945, Guelma.
- [12] H. Nadir, « Contribution à la conception d'antennes ultra large bande impulsives à encombrement réduit » Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2018.
- [13] Z. Hamouda, « antennes microondes souples ultra large bande à base de matériaux composites » Thèse de doctorat, Université de Blida, 2016.

- [14] P. F. Combus, « microondes 2 : cours et exercices.2, circuits passifs, propagation, antennes » Dunod, Paris, 2009, ISBN :
- [15] R. M. Lamine, “ Modélisation et simulation des antennes en onde millimétrique à base de métamatériaux ” Thèse de magister, Université Ziane Achour de Djelfa, 2018.
- [16] O. Barkat, « Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d’antennes imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique » Thèse de doctorat, Université Mentouri Canstantine, 2009.
- [17] A. Kumar, N, Gupta and P. C. Gautam, «Gain and Bandwidth Enhancement Techniques in Microstrip Patch Antenna- A review » International Journal of Computer Applications, 148(7), 9-14.2016.
- [18] H. Nachouane, « Contribution à la conception et à la réalisation d’antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération » Thèse de doctorat, Institut National des Postes et des Télécommunications Maroc, 2017.
- [19] B. Ali, “Etude de la Technologie des Antennes Multi-bandes pour les Applications Spatiales” Thèse de Magistère, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2009.
- [20] W. A. Imbriale, S. Gao and L. Boccia, «Space antenna handbook », Wiley Online Library, 2012.
- [21] J. M. Laheurte, « Petites antennes », Institut Télécom et LAVOISINIER, Paris, 2011.
- [22] R. Bancroft, « Microstrip and Printed Antenna Design (Telecommunications) » The Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [23] R. Mohamad, « Développement d’antennes agiles en fréquence intégrant un condensateur ferroélectrique » Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2017.
- [24] H. A. Majid, M. K. Abd Rahim, M. R. Hamid and M. F. Ismail, « Frequency Reconfigurable Microstrip Patch-Slot Antenna with Directional Radiation Pattern », Progress in Electromagnetics Research, Vol. 144, 319-328, 2014.
- [25] A. Oueslati, « Nouveau concept simplifié d’antennes reconfigurables utilisant les couplages inter éléments : Mise en œuvre d’un réseau hybride », phdthesis. Université de Limoges, 2015.

- [26] B. Mohamadzade, R. B. V. B. Simorangkir, S. Maric, A. Lalbakhsh, K. P. Esselle and R. M. Hashmi, « Recent Developments and State of the Art in Flexible and Conformal Reconfigurable Antennas » *Electronics*, Vol. 9, pp. 1375, 2020.
- [27] A. F. Kuate, P. N. Tchueguem and J-F. D. Essiben, « Design of a Frequency Reconfigurable Rectangular Patch Antenna for 2.4 GHz Wi-Fi Application », *American Journal of Computing and Engineering*. Vol.4, Issue 2, pp 10 - 20, 2021.
- [28] S. N. M. Zainarry, « Reconfigurable Antennas Based on Varactor-Loaded Stubs » Doctoral Thesis. University of Adelaide, 2019.
- [29] « Miniature Varactor Diodes for VCO, Phase Noise, And Voltage Tuned Filter Applications ». [Online]. Available: <https://www.rfglobalnet.com/doc/miniature-varactor-diodes-for-vco-phase-0001>. [Accessed: 11-Feb-2023].
- [30] MACOM-T. S. (2015). MA46H120 varactor datasheet, available in: <https://cdn.macom.com/datasheets/MA46H120%20Series.pdf>
- [31] N. Nguyen-Trong, T. Kaufmann, L. Hall and C. Fumeaux, « Analysis and Design of a Reconfigurable Antenna Based on Half-Mode Substrate-Integrated Cavity » *IEEE transactions on Antennas and Propagation*. Vol 63, no. 8, pp. 3345-3353, 2015.
- [32] Diodes PIN | Mouser France.” [Online]. Available: [http://www.mouser.fr/Semiconductors/Discrete-Semiconductors/Diodes-Rectifiers/PIN-Diodes/\\_/N-ax1md](http://www.mouser.fr/Semiconductors/Discrete-Semiconductors/Diodes-Rectifiers/PIN-Diodes/_/N-ax1md). [Accessed: 06-March-2023].
- [33] S. M. Rao, T. S. V. Surjana, G. B. Bindu and G. Pavani, « Design and Analysis of Reconfigurable Antenna for Wide Band Applications », *Conf. Ser.* 2161 012072, 2022.
- [34] Support de cour « Le transistor à effet de champ (TEC) Field Effect Transistor (FET) », ENSIL : Ecole Nationale Supérieure D’Ingénieur de Limoges.
- [35] N. O. Parchin, H. J. Bacherlou, Y. A. Al-Yassir, A. M. Abdulkhaleq and R. A. Abd Alhameed, « Reconfigurable Antennas: Switching Techniques-A Survey », vol. 14, no.04, pp. 01 -14, 2020.
- [36] G. Rebeiz, G. Tan and J. Hayden, « RF MEMS phase shifters: design and applications», *IEEE Microwave Magazine*, vol 3(2), pp. 72-81, 2002.

- [37] A. Petosa, "An Overview of Tuning Techniques for Frequency-Agile Antennas," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 271–296, Oct. 2012.
- [38] G. Jin, M. Li, D. Liu and G. Zeng, « A Simple Four-Beam Reconfigurable Antenna Based on Monopole », *IEEE Access*, vol 6, pp. 30309-30316, 2018.
- [39] S. L. Chen, P. Y. Qin, W. Lin and Y. J. Guo, « Pattern Reconfigurable Antenna with Five Switchable Beams Switching in Evaluation Plane », *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters* », vol 17(3), pp. 454-457, 2018.
- [40] Z. Deng, X. Guo, H. Wei, J. Gan and Y. Wang, « Design, Analysis, and verification of Ka-Band Pattern Reconfigurable Patch Antenna Using RF MEMS Switches », *Micromachines* article, vol 7(8), pp. 144, 2016.
- [41] FEI HE, « Design and implementation of reconfigurable patch antennas for wireless communications »Theses, Dissertations, and Student Research from Electrical & Computer Engineering, University of Nebraska-Lincoln, 2016.
- [42] M. J. Kovitz, H. Rajagopalan and Y. S. Rahmat, «Design and implementation of broadband MEMS RHCP LHCP reconfigurable arrays using rotated E-Shapes patch elements », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63(6), pp. 2497-2507, 2015.
- [43] K. M. Mac, H. W. Lai, K. M. Luk and K. L. Ho, « Polarisation Reconfigurable Circular Patch Antenna with a c-shaped », *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 65(3), pp. 1392, 2017.
- [44] M. Clemes and T. Weiland, « Discrete Electromagnetism with the Finit Integration Technique», *Progress in Electromagnetics Research*, PIE R 32, pp. 65-87, 2001.
- [45] S. N. M. Zainarry, S. J. Chen and C. Fumeaux, « A Pattern Reconfigurable Single-Element Microstrip Antenna », DOI: 10.23919/ RADIO.8572360.2018.
- [46] T. D. Nguyen, « Conception d’antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive », Thèse de doctorat. Université Grenoble, 2012.
- [47] S. N. M. Zainarry, N. N. Trong and C. F. Senior, « A Frequency and Pattern Reconfigurable Two-Element Array Antenna», *IEEE*, DOI: 10.1109/ LAWP. 2806355. 2018.
- [48] C. Laheg, « Etude et Conception D’une Antenne MIMO Reconfigurable », Mémoire de master. Université 8 Mai 1945, Guelma, 2022.

[49] M. Chouhbane, « Etude et Conception d'une antenne Reconfigurable En Fréquence et en Diagramme de rayonnement », Mémoire de master. Université 8 Mai 1945, Guelma, 2021.

# **Annexe**

## Annexe :

### ❖ Présentation du simulateur CST :

Le logiciel CST Microwave Studio (M.W.V Studio) est un outil de simulation électromagnétique conçue par la compagnie CST (Computer Simulation Technology). Le logiciel permet de faire la conception et la simulation d'un grand nombre de circuits microondes. Il fait usage de la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) développée par Weiland en 1977.

### ❖ Création du projet :

Pour la création d'un projet pour une antenne réseau à deux éléments, on suit les étapes mentionnées dans les figures ci-dessous :

#### 1. Cliquer sur nouveau projet :

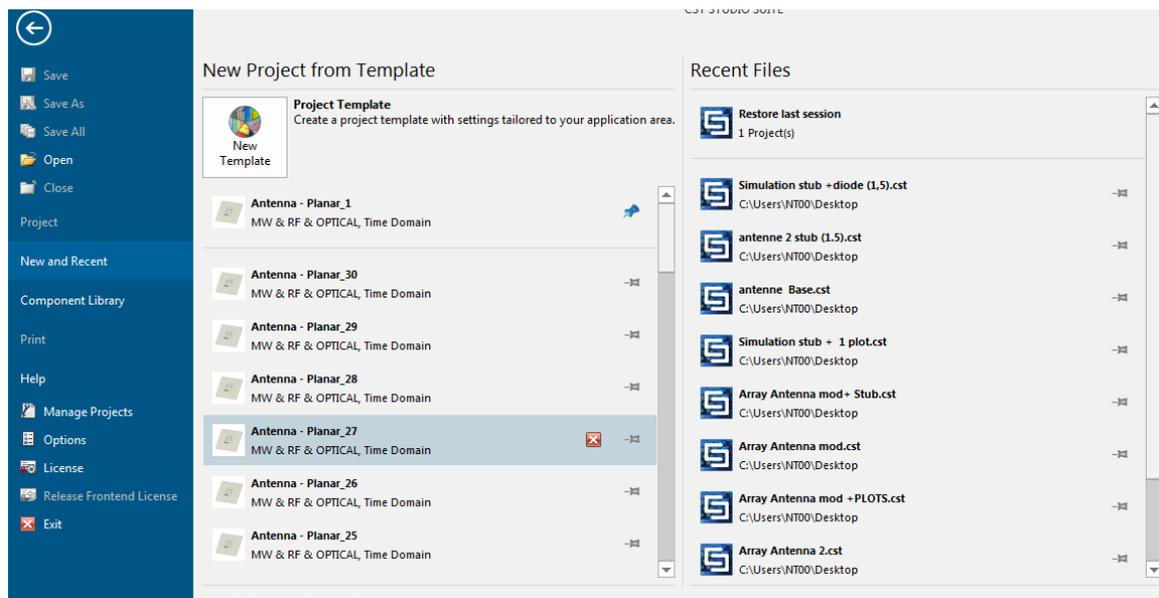


Figure -1-

## 2. Sélectionnez MW & RF/ Optical →Antennas

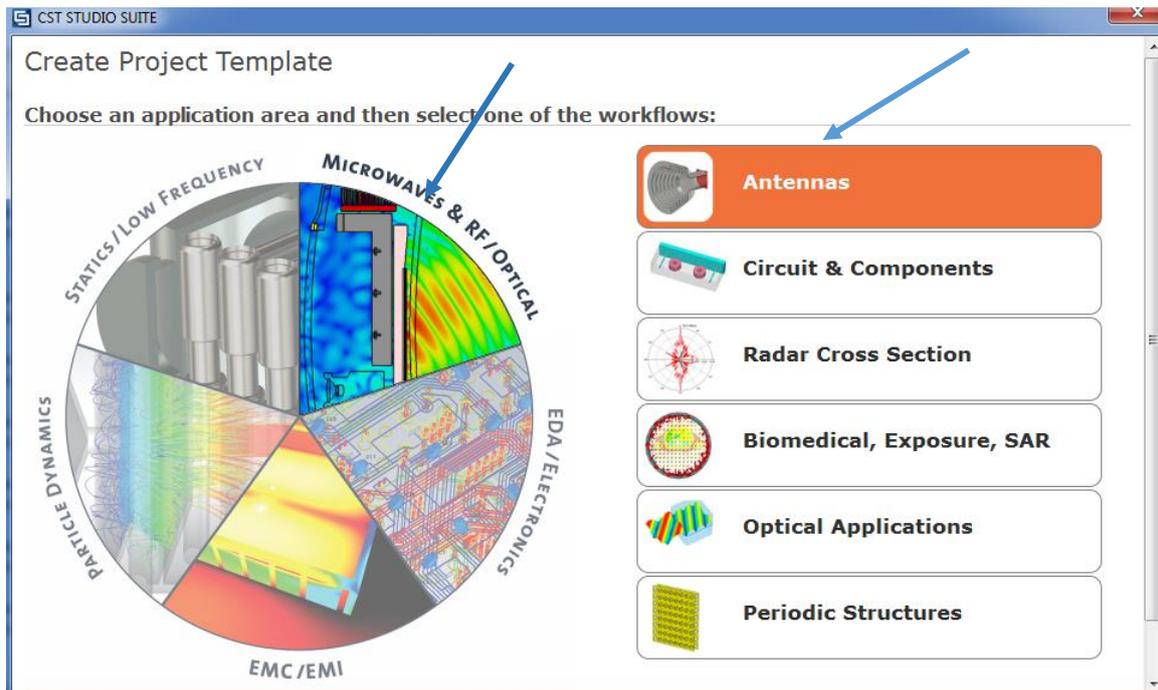


Figure -2-

## 3. Choisissez Planar :

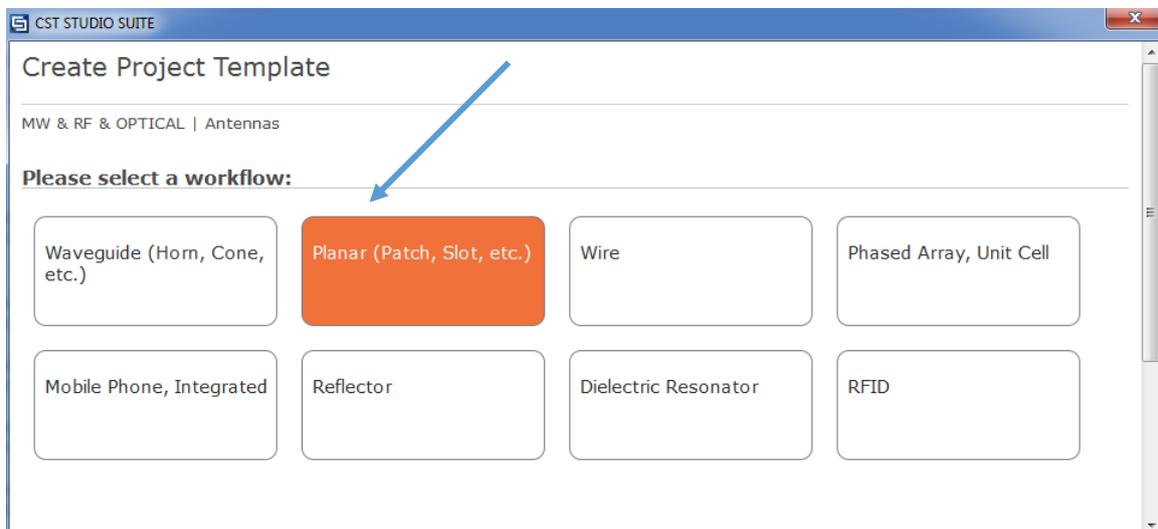


Figure -3-

#### 4. Cliquez sur Time Domain :

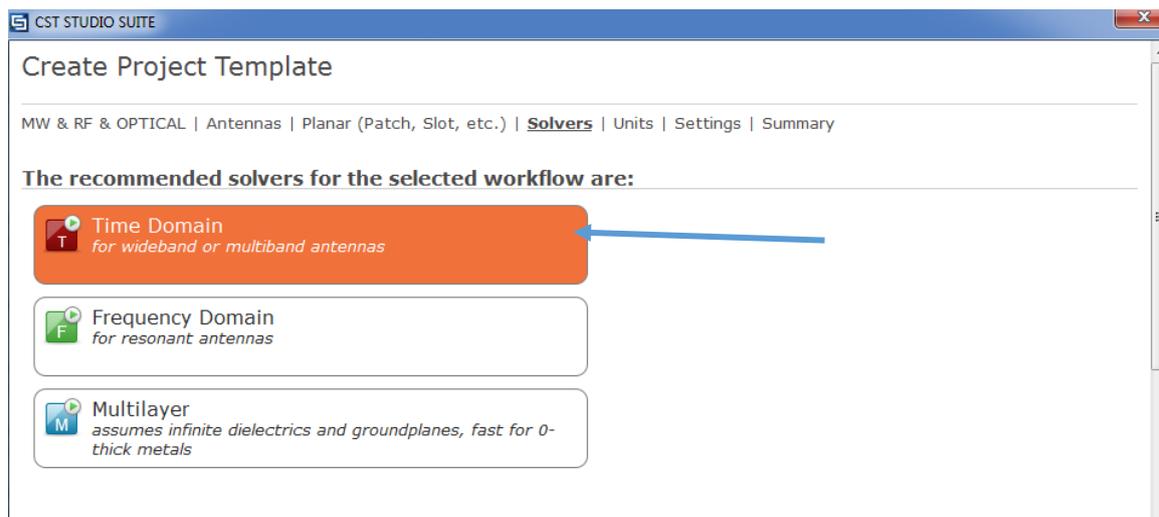


Figure -4-

#### 5. Choisissez les unités

#### 6. Définir la gamme de fréquence

#### 7. Entrer le nom du projet

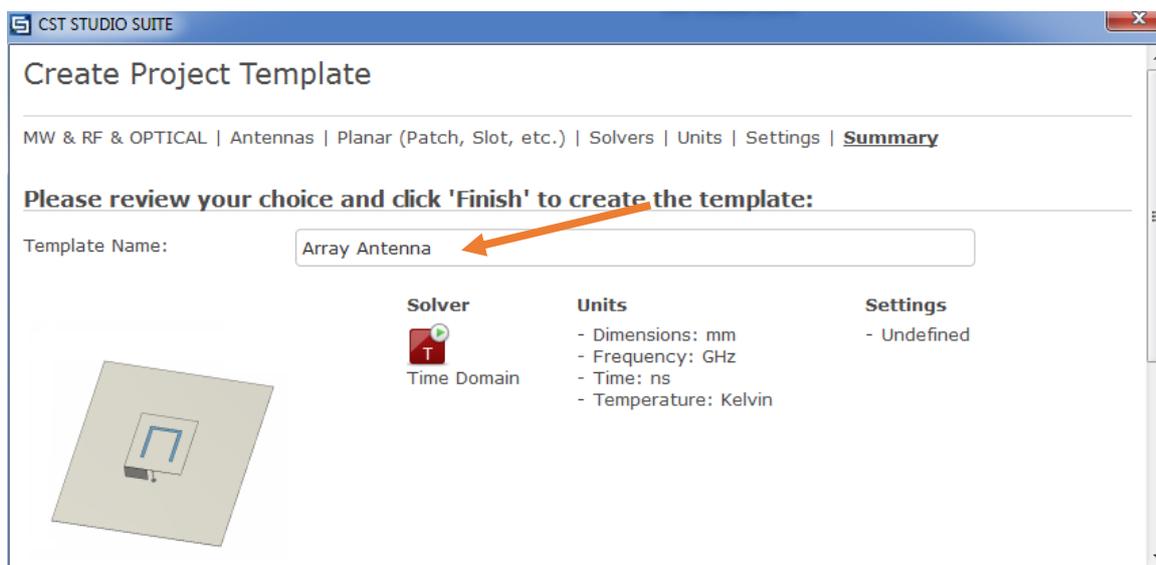


Figure -5-

### ❖ Conception de l'antenne (outil Modeling)

La deuxième étape c'est le design de la structure par l'introduction des caractéristiques diélectriques des différents matériaux utilisés tels que le substrat et l'élément rayonnant. L'outil **Modeling** permet de construire des modèles complexes en 3D facilement.

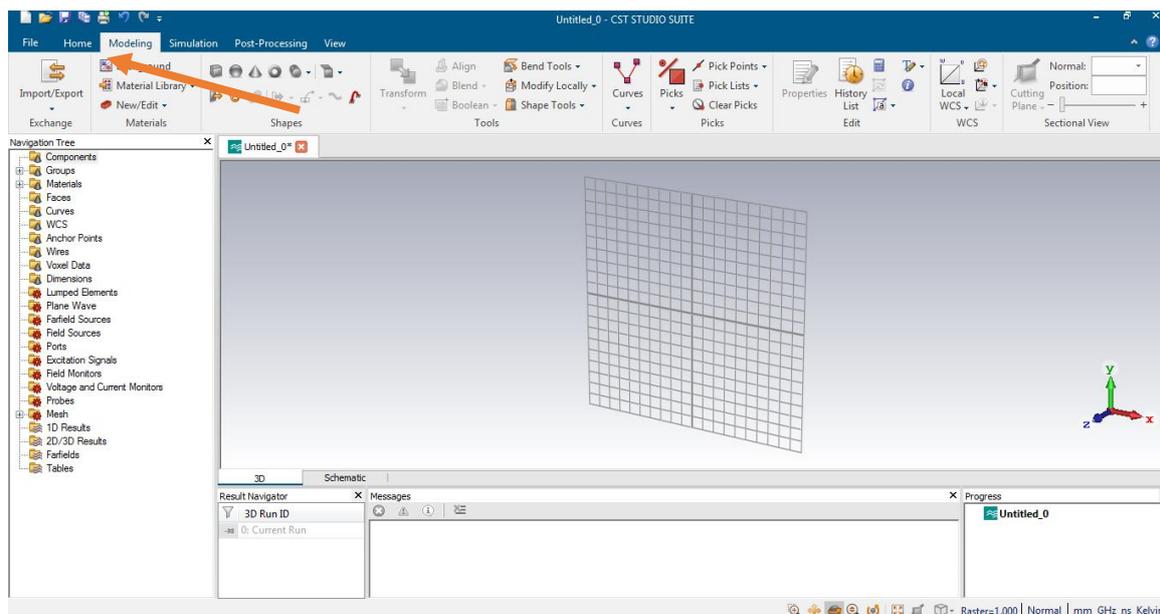


Figure -6-

### 1. Création du plan de masse (Ground) :

Modeling → Briks → Echap → Ajouter les dimensions

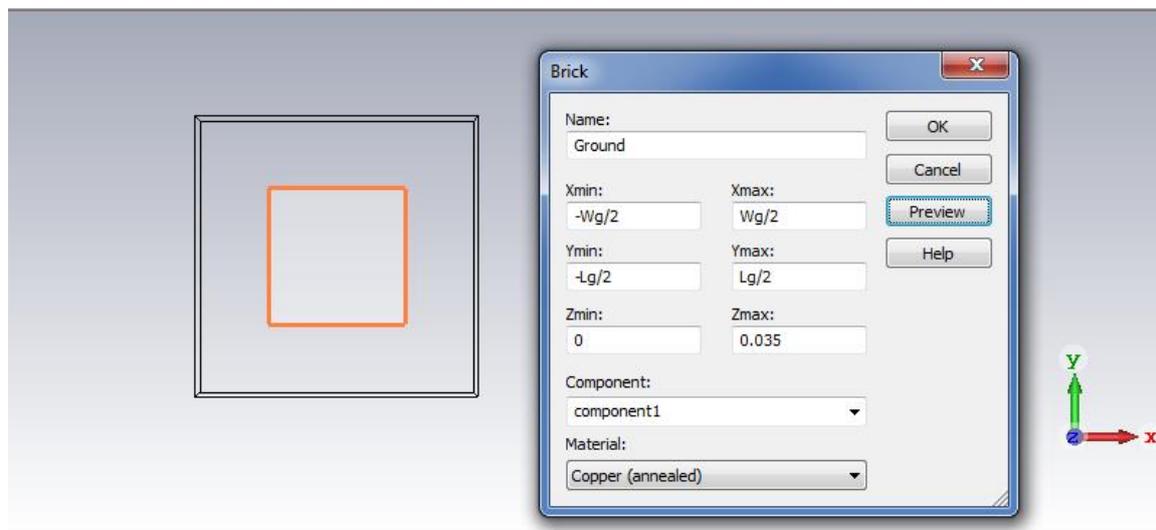


Figure -7-

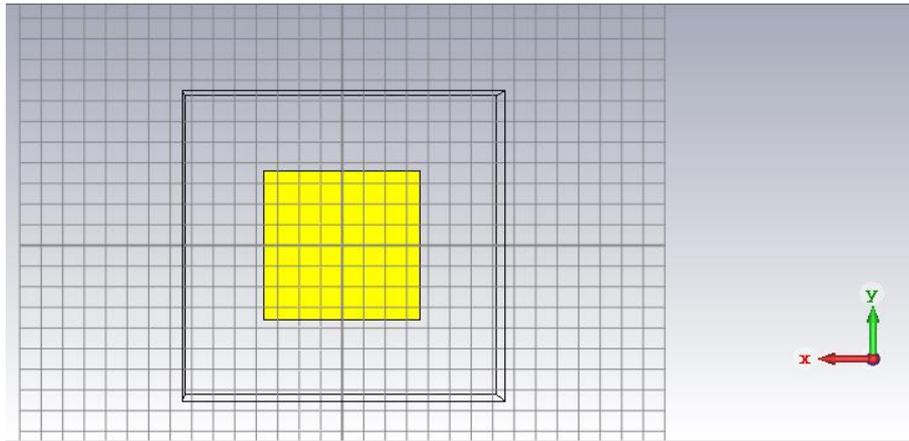


Figure-8-

## 2. Création du substrat :

Suivez les mêmes étapes précédentes, avec le choix du type du substrat.

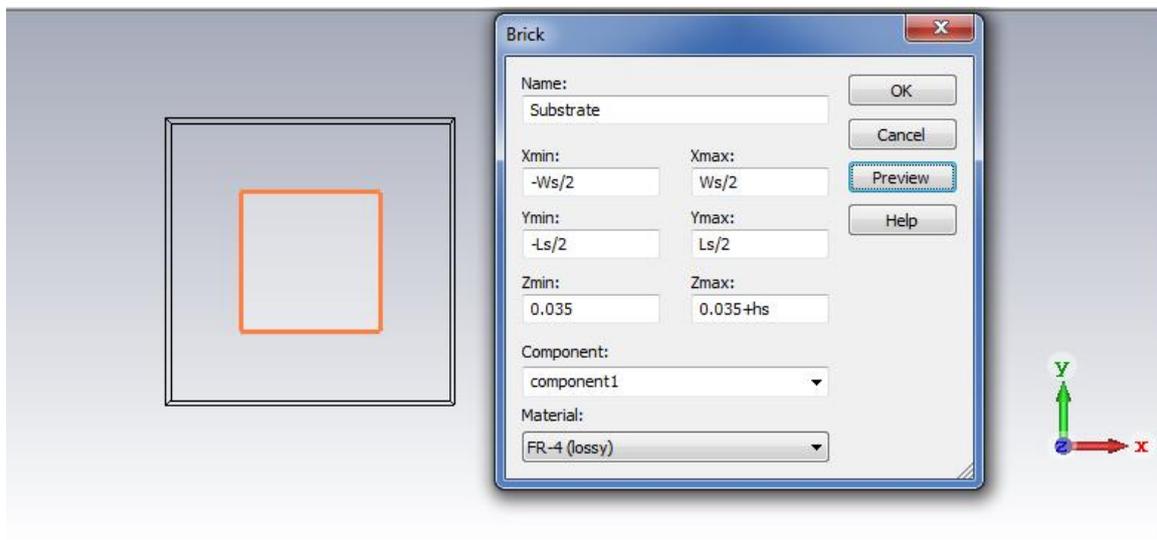


Figure-9-

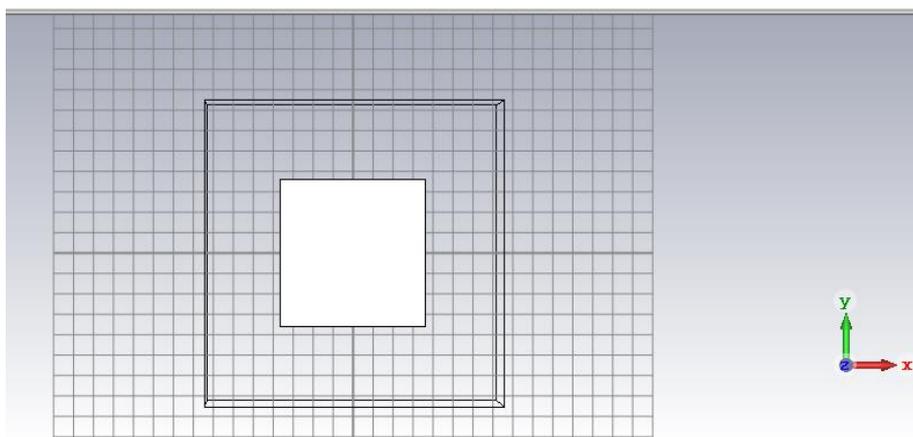


Figure-10-

### 3. Création de l'élément rayonnant (Patch) :

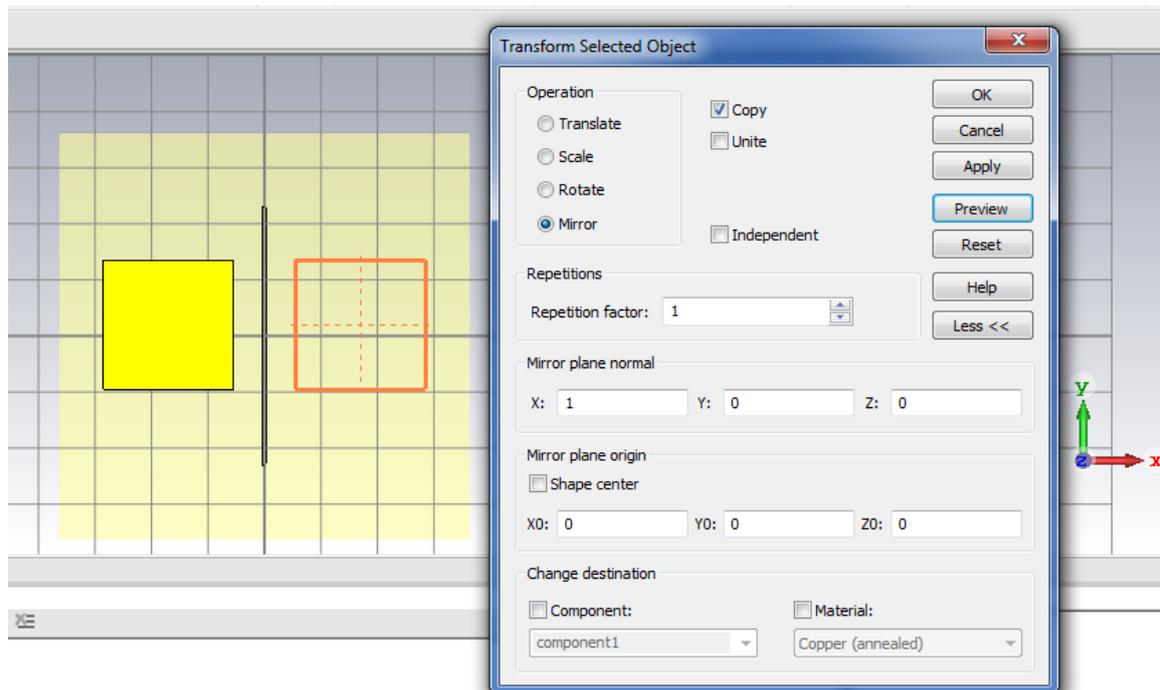


Figure -11-

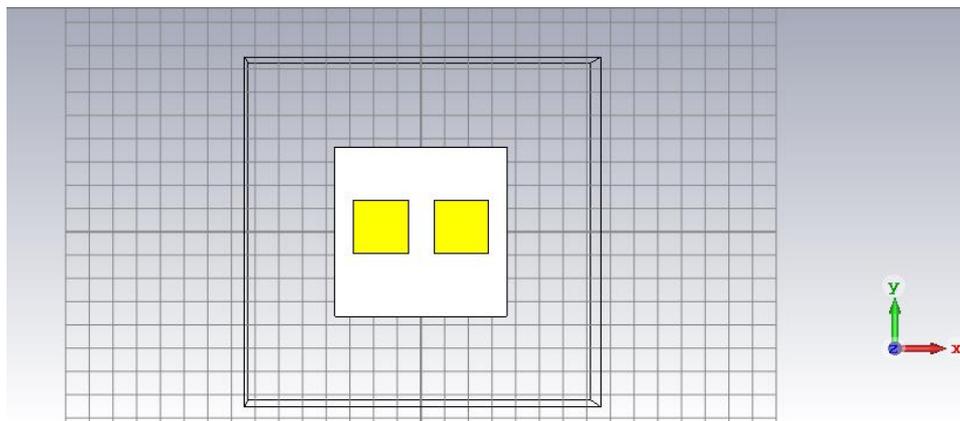


Figure -12-

#### 4. Création de la ligne d'alimentation :

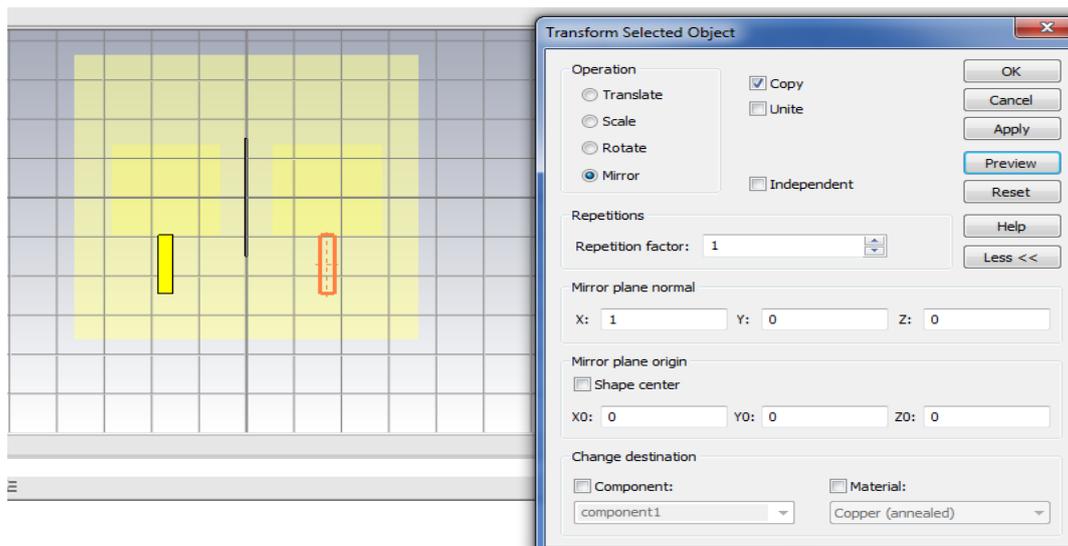


Figure -13-

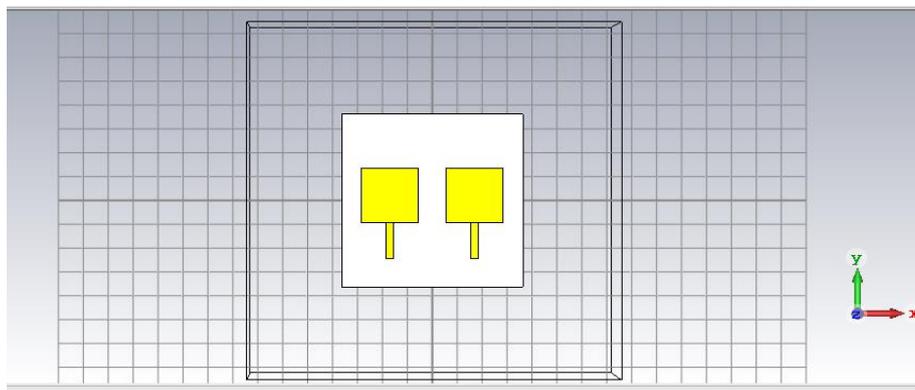


Figure -14-

Les deux patchs sont alimentés par un diviseur de puissance à jonction en T.

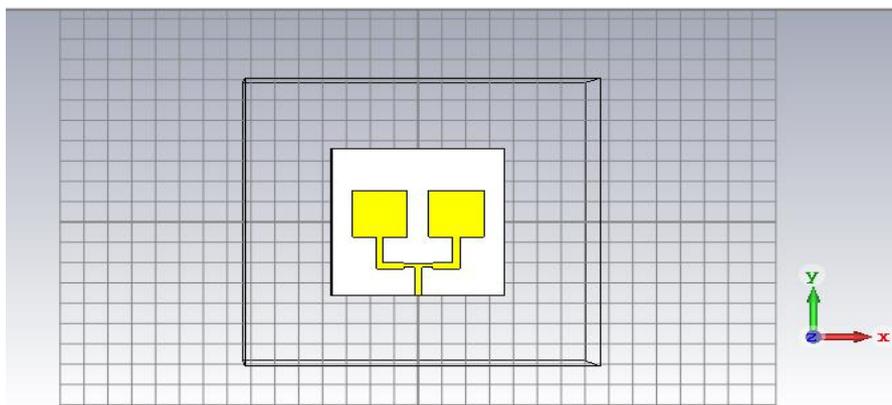


Figure -15-

## 5. Définir le port :

Simulation → Waveguide Port

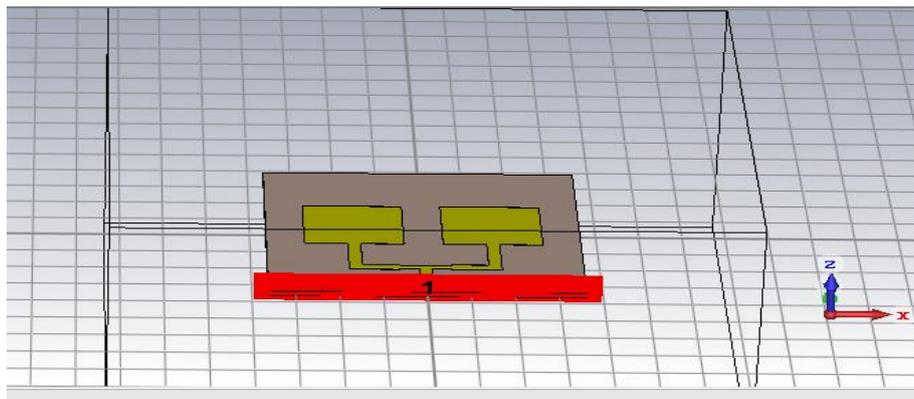


Figure -16-

## ❖ Simulation

Home → Start simulation

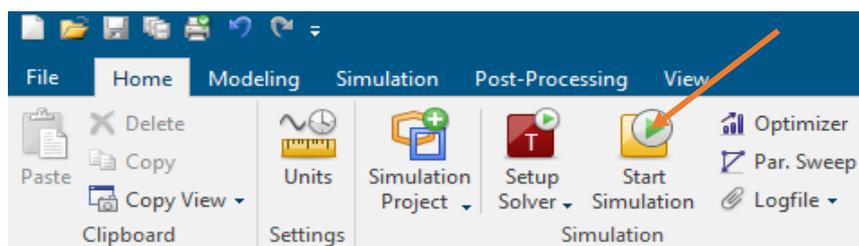


Figure -17-

Les différents résultats de simulation concernant le coefficient de réflexion :

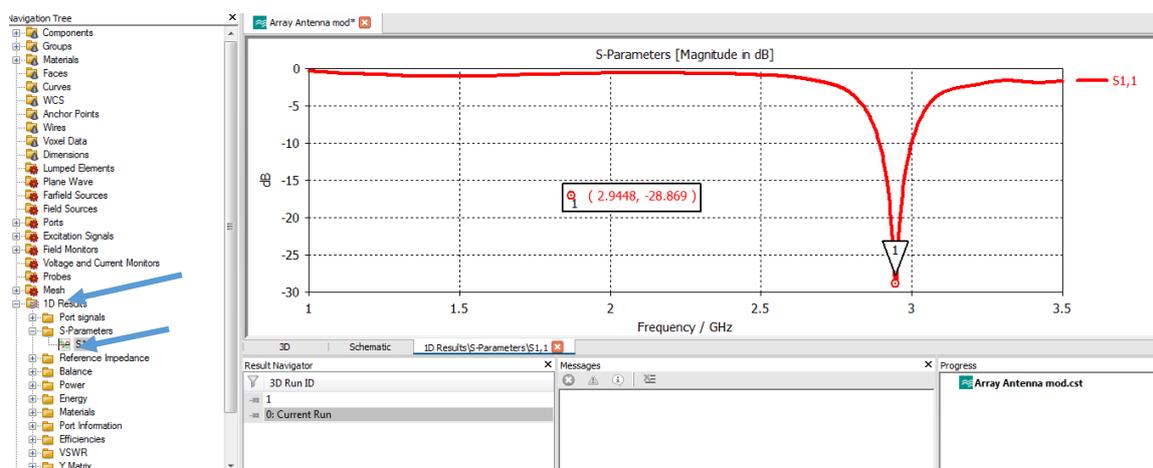


Figure -18-