

# ***TABLE DES MATIERES***

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des Matières.....	v
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1

---

## ***Chapitre I : Généralités sur les Antennes Imprimées.***

---

I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition et historique des antennes imprimées .....	2
I.3 Structure d'une antenne imprimée .....	3
I.4 Techniques d'alimentation.....	4
I.4.1 Alimentation par ligne microbande.....	4
I.4.2 Alimentation coaxiale directe .....	5
I.4.3 Alimentation par couplage électromagnétique.....	6
I.4.4 Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse .....	6
I.5 Les caractéristiques des antennes imprimées.....	7
I.5.1 La directivité .....	7
I.5.2 Coefficient de réflexion.....	7
I.5.3 Impédance d'entrée de l'antenne.....	7
I.5.4 Rendement de l'antenne .....	8
I.5.5 Le gain.....	8
I.5.6 Polarisation de l'antenne .....	9

I.6 Méthodes d'analyse .....	9
I.6.1 Méthodes approximatives (analytiques).....	10
I.6.1.1 Modèle de la ligne de transmission.....	10
I.6.1.2 Modèle de la cavité.....	10
I.6.2 Méthodes rigoureuses (full-Wave).....	11
I.6.2.1 Méthodes des différences finies.....	11
I.6.2.2 Méthode de la matrice des lignes de transmissions.....	11
I.6.2.3 Méthode des éléments finis.....	12
I.6.2.4 Méthodes intégrales.....	12
I.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées .....	12
I.8 Les applications des antennes imprimées .....	14
I.9 Conclusion .....	14

---

## ***Chapitre II : Les Antennes reconfigurables.***

---

II.1 Introduction .....	15
II.2 Systèmes reconfigurables .....	15
II.3 Antennes reconfigurables .....	16
II.4 Techniques de reconfigurabilité .....	16
II.4.1 Diode varicap .....	17
II.4.2 Diode PIN .....	18
II.4.3 MEMS (Système Micro électromécanique).....	19
II.4.4 Matériaux agiles.....	19
II.5 Classification des antennes reconfigurables .....	20
II.5.1 Antennes reconfigurables en fréquence .....	20
II.5.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement .....	22

II.5.2.1 Utilisation des diodes PIN .....	22
II.5.2.2 Utilisation de MEMS .....	25
II.5.2.3 Utilisation de photoconducteurs .....	26
II.5.3 Antenne reconfigurable en polarisation .....	27
II.6 Conclusion .....	28

---

## ***Chapitre III : Étude et Conception des Antennes Reconfigurables.***

---

III.1 Introduction .....	29
III.2 Conception d'une antenne carrée multi-bandes reconfigurable en fréquence .....	29
III.2.1 Géométrie de l'antenne .....	29
III.2.2 Résultat de simulation .....	30
III.2.3 Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence .....	31
III.2.4 Résultats de simulation de l'antenne à fente fractale reconfigurable en fréquen...32	
III.3 Antenne dipôle reconfigurable en diagramme de rayonnement .....	37
III.3.1 Géométrie de l'antenne .....	37
III.3.2 Résultat de simulation .....	38
III.3.3 Antenne dipôle bi-faisceau reconfigurable en diagramme de rayonnement .....	39
III.3.4 Résultats de simulation de l'antenne dipôle bi-faisceau reconfigurable en diagramme de rayonnement .....	40
III.4 Conception d'une Antenne reconfigurable en Polarisation .....	44
III.4.1 Géométrie de l'antenne .....	44
III.4.2 Résultat de simulation de l'antenne patch circulaire reconfigurable en polarisation .....	46
III.5 Conclusion .....	49
Conclusion générale .....	50
Références bibliographiques .....	52

## *Liste Des figures*

Figure I.1 : Structure d'une antenne patch rectangulaire. ....	3
Figure I.2 : Antenne imprimée à plusieurs formes. ....	4
Figure I.3 : Alimentation par ligne microbande. ....	5
Figure I.4 : Alimentation par câble coaxial. ....	5
Figure I.5 : Alimentation par proximité. ....	6
Figure I.6 : Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse. ....	7
Figure I.7 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission. ....	8
Figure I.8 : Modèle de la cavité. ....	10
Figure II.1 : Différents niveaux de reconfigurabilité : (a) Système adaptatif par traitement numérique ; (b) Réseau d'antennes phasées et (c) antennes reconfigurables. ....	16
Figure II.2 : Diode varicap. ....	17
Figure II.3 : Les deux antennes agiles en fréquence proposées. ....	18
Figure II.4 : Antenne imprimée avec fente et diode PIN sur le toit. ....	18
Figure II.5 : Exemples de composants MEMS. ....	19
Figure II.6 : (a) Prototype de l'antenne utilisant un substrat de silicone extensible TC5005. (b) Vue de dessus et vue de dessous. ....	20
Figure II.7 : Illustration de l'agilité fréquentielle. ....	21
Figure II.8 : Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence. ....	22
Figure II.9 : Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme. ....	23
Figure II.10 : Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF. ....	24
Figure II.11: Diagrammes de rayonnement à 3,5 GHz selon les trois modes de configuration. ....	24
Figure II.12 : Antenne à spirale reconfigurable en diagramme. ....	25
Figure II.13 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne en spirale selon les 5 configurations. ....	26
Figure II.14 : Photographie de l'antenne dipôle commutée. ....	26
Figure II.15 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne dipôle reconfigurable. ....	27
Figure II.16 : (a) Antenne patch à bord commuté et (b) Antenne PASS de l'UCLA. ....	28

Figure III.1 : Antenne à fente fractale. ....	30
Figure III.2 : (a) L'antenne à fente fractale. (b) Coefficient de réflexion $S_{11}$ . ....	30
Figure III.3 : Représentation des diagrammes de rayonnement de l'antenne aux fréquences (a) $f_1 = 2.37$ GHz ; (b) $f_2 = 3.30$ GHz ; (c) $f_3 = 4.005$ GHz et (d) $f_4 = 5.19$ GHz. ....	31
Figure III.4 : Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence. ....	32
Figure III.5 : Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence : (a) Mode M1 ; (b) Mode M2 ; (c) Mode M3 et (d) Mode M4. ....	33
Figure III.6 : Les coefficients de réflexion $S_{11}$ : (a) Mode M2 ; (b) Mode M3 ; (c) Mode M4. ....	33
Figure III.7 : Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M2 : (a) $f_1 = 1.59$ ; (b) $f_2 = 2.41$ ; (c) $f_3 = 3.62$ et (d) $f_4 = 4.42$ GHz. ....	35
Figure III.8 : Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M3 : (a) $f_1 = 1.71$ ; (b) $f_2 = 3.61$ ; (c) $f_3 = 3.91$ et (d) $f_4 = 5.36$ GHz. ....	36
Figure III.9 : Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M4 : (a) $f_1 = 3.74$ ; (b) $f_2 = 4.33$ ; (c) $f_3 = 5.39$ GHz. ....	36
Figure III.10 : (a) Antenne dipôle ; (b) Face supérieure et (c) Face inférieure. ....	37
Figure III.11 : Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) de l'antenne dipôle. ....	38
Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne. ....	38
Figure III.13 : Représentation polaire du diagramme de rayonnement de l'antenne. ....	39
Figure III.14 : Intégration des diodes PIN. ....	39
Figure III.15 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne pour le mode M1. ....	41
Figure III.16 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne (a) : mode M2, (b) : mode M3. ....	41
Figure III.17: Diagramme de rayonnement en 2D et en 3D en mode M2 et. ....	42
Figure III.18 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne pour les deux modes. ....	43
Figure III.19 : Diagramme de rayonnement en 2D et en 3D en mode M4 et mode M5. ....	44
Figure III.20 : Géométrie de l'antenne patch circulaire : (a) vue de face ; (B) vue de côté. ....	45
Figure III.21 : Antenne patch reconfigurable en polarisation : (a) Configuration 1 ; (b) Configuration 2 ; (c) Configuration 3. ....	45
Figure III.22 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire. ....	46
Figure III.23 : Rapport axial : (a) Configuration 3, (b) Configuration 2, ....	47
Figure III.24 : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D pour les 3 modes à. ....	49

## ***Liste Des Tableaux***

Tableau III.1: Les modes de fonctionnement de l'antenne reconfigurable.....	32
Tableau III.2 : Récapitulatif des fréquences de résonances. ....	34
Tableau III.3 : Paramètres de conception du dipôle.....	37
Tableau III.4 : Les modes de fonctionnement de l'antenne reconfigurable.....	40
Tableau III.5 : Configurations des commutateurs de l'antenne simulée. ....	45
Tableau III.6 : Type de polarisation en fonction de l'état des commutateurs.....	48

## ***LISTE DES ABREVIATIONS***

**BP** : Bande Passante.

**CST** : Computer System Technology.

**CPW** : CoPlanar Waveguide : guide d'onde coplanaire.

**DSP** : Digital Signal Processing.

**dB** : décibel.

**$\epsilon_r$**  : Permittivité diélectrique.

**FDTD** : Finite Difference Time Domain.

**$f_r$**  : Fréquence de résonance.

**h** : Epaisseur du substrat.

**FR4** : Flame Retardant 4.

**LHCP** : left-hand circular polarization.

**LP** : linear polarization.

**L** : Longueur.

**MEMS** : Micro-Electro-Mechanical-Systems.

**MOM** : Method Of Moment.

**PIN** : Positive Intrinsic Negative.

**RF-MEMS** : microsystèmes radiofréquences.

**R** : Résistance.

**ROS** : Rapport d'ondes stationnaires.

**RHCP** : right-hand circular polarization.

**$S_{11}$**  : Coefficient de réflexion.

**SMA** : SubMiniature version A.

**TLM** : Méthode de la matrice des lignes de transmissions.

**TEM** : Transverse électromagnétique.

**TE** : Transverse électrique.

**TM** : Transverse magnétique.

**$\tan(\delta)$**  : Tangente des pertes.

**WLAN** : Wireless Local Area Network.

**Wi-Fi** : Wireless Fidelity.

**W** : Largeur.

**$\omega$**  : La pulsation de résonance.

# *Introduction générale*

---

# Introduction générale

La multiplication future des systèmes sans fil exige des antennes à plus de fonctionnalités que ne le permettent des conceptions classiques. Les antennes agiles en fréquence, en diagrammes de rayonnement ou en polarisation, se présentent alors comme des candidates pour satisfaire aux exigences imposées.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et la conception d'antennes reconfigurables. Il s'agit alors de concevoir une antenne capable de s'adapter à des conditions changeantes en ajustant sa fréquence de fonctionnement, sa polarisation ou son diagramme de rayonnement. Pour atteindre cet objectif, le présent travail est réparti sur trois chapitres, dont nous donnons une brève description dans les lignes suivantes :

Le premier chapitre est consacré aux rappels théoriques sur les antennes imprimées. Nous présenterons la structure, les différentes techniques d'alimentation ainsi que les méthodes d'analyse de ces antennes.

Dans le deuxième chapitre, nous allons dans un premier temps définir les antennes reconfigurables. Ensuite, nous présenterons les techniques utilisées pour obtenir la reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation. La dernière partie de ce chapitre détaille le principe de reconfigurabilité appliqué aux antennes et donne quelques exemples d'antennes reconfigurables qui ont conduit à la conception d'antennes reconfigurables présentées dans ce mémoire.

Le dernier chapitre de ce mémoire de master s'intéresse à la conception d'antennes reconfigurables. Trois types d'antennes reconfigurables ont été conçus. La première antenne optimisée et caractérisée est une antenne multi-bandes reconfigurable en fréquence basée sur un patch carré avec fente fractale au centre. La seconde antenne, reconfigurable en diagramme de rayonnement, est composée par deux dipôles élémentaires. Finalement la troisième antenne conçue est un patch circulaire reconfigurable en polarisation.

Enfin, ce document se termine par une conclusion générale et une bibliographie qui comprend les références relatives à notre travail.

## ***CHAPITRE I :***

### ***Généralités sur les Antennes Imprimées***

---

## I.1 Introduction

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

Ce chapitre se propose de présenter la technologie imprimée de manière générale. On commence tout d'abord par la structure et les techniques d'alimentation déployées, par la suite, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière et les méthodes d'analyse pouvant tirer profit de ces performances. On clôture le chapitre par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients des antennes imprimées.

## I.2 Définition et historique des antennes imprimées

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

Le concept des antennes micro rubans fut initialement proposé en 1953 par Deschamps aux Etats Unis d'Amérique et en France par Guttan et Baissimot en 1955. Un peu plus tard le phénomène de rayonnement provenant des discontinuités dans les strip-lines fût observé et étudié par Lewin en 1960 [2]. Au début des années 70, Byron décrit une piste rayonnante conductrice gravée sur un substrat diélectrique ( $\epsilon_r < 10$ ) et repose sur un plan de masse.

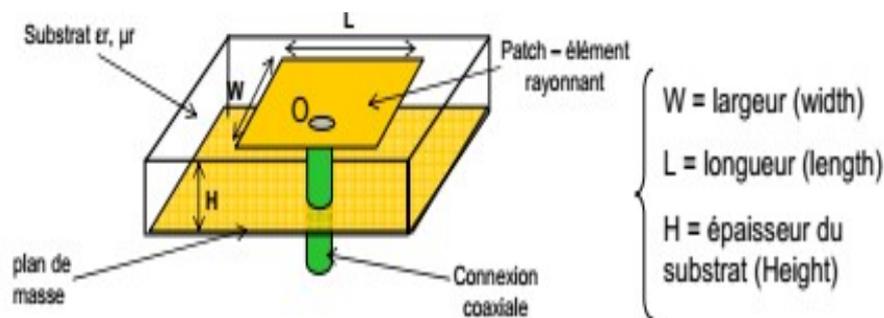
Par la suite, les caractéristiques des patches micro-ruban rectangulaires furent publiées par Howell. De son côté, Weinschel, développa plusieurs géométries de patches micro-ruban pour l'usage en réseau cylindrique. Les travaux additionnels sur les éléments basiques du micro-ruban furent publiés en 1975. Le travail de Nunson dans le développement des antennes micro rubans a montré que celui-ci était un concept pratique s'étalant à d'autres problèmes relatifs à d'autres systèmes d'antennes.

Le modèle mathématique d'un micro-ruban basique fut initialement réalisé à travers l'application de l'analogie avec les lignes de transmission pour patchs rectangulaires simples.

Le diagramme de rayonnement d'un patch circulaire fut analysé et le résultat publié par Corver. La première analyse mathématique d'une grande variété de patchs de micro-ruban fut publiée en 1977 par Lo et Al. A la fin des années 70, les antennes micro-ruban sont devenues plus connues et utilisées dans divers systèmes de communications. De nos jours, elles sont très utilisées dans les appareils téléphoniques, les ordinateurs portables, les systèmes embarqués (missiles, fusées, satellites, etc.....).

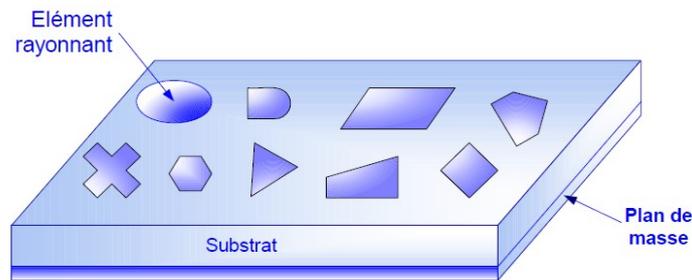
### I.3 Structure d'une antenne imprimée

La configuration la plus simple d'une antenne imprimée est constituée d'un plan de masse, un substrat diélectrique caractérisé à la fois par une permittivité électrique  $\epsilon_r$ , et une perméabilité magnétique  $\mu_r$ , et un élément rayonnant de forme quelconque appelé patch.



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

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



**Figure I.2** : Antenne imprimée à plusieurs formes.

Les antennes imprimées sont caractérisées par une faible masse, un encombrement réduit et une facilité de réalisation par la technique du circuit imprimé. Ces avantages les rendent particulièrement intéressantes pour les systèmes de télécommunication, de mobiles terrestres, de télédétection et de télémessure (Radar embarqué, avion, fusées, missiles, navires, véhicules routiers...).

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

#### I.4 Techniques d'alimentation

L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les principales techniques d'alimentation utilisées sont :

- Alimentation par une ligne microbande.
- Alimentation coaxiale directe.
- Alimentation par couplage électromagnétique.
- Alimentation par couplage à ouverture dans le plan de masse.

L'alimentation par ligne microbande (Figure I.3) et l'alimentation par câble coaxial (Figure I.4) sont les techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées [3].

##### I.4.1 Alimentation par ligne microbande

L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne microbande dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance.

Cette technique est facile à réaliser et permet une adaptation simple d'impédance, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite des lignes [4].

L'adaptation est obtenue soit en insérant un transformateur quart d'onde, soit en déplaçant le point d'alimentation (Figure I.3).

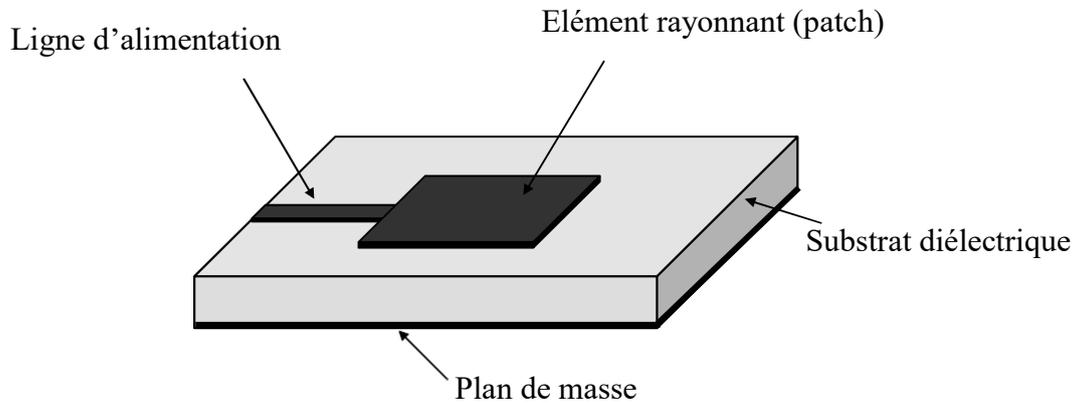


Figure I.3 : Alimentation par ligne microbande.

#### I.4.2 Alimentation coaxiale directe

Elle est effectuée par connexion directe à une ligne coaxiale dont le conducteur central est connecté en un point situé sur l'axe de symétrie de l'élément, dont la distance au bord, de l'antenne permet d'adapter les impédances.

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication.

Pendant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué [5].

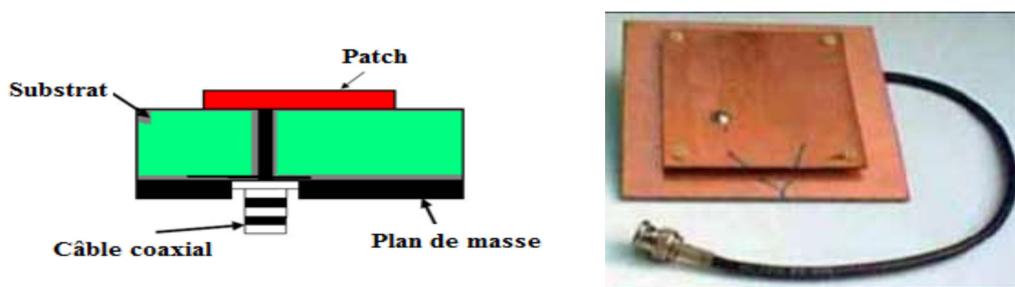


Figure I.4 : Alimentation par câble coaxial.

### I.4.3 Alimentation par couplage électromagnétique

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

L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [6].

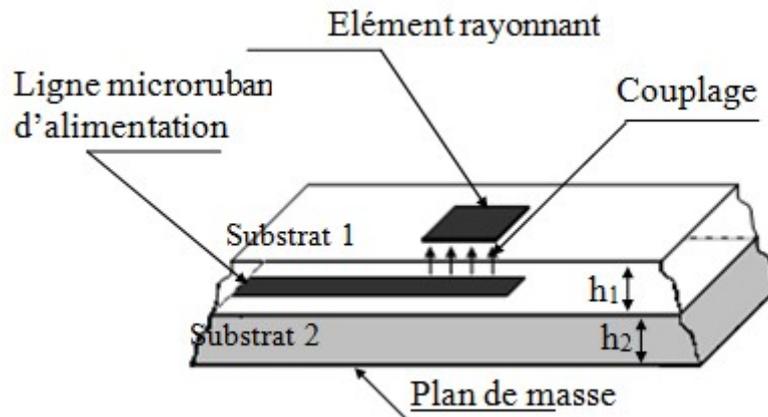


Figure I.5 : Alimentation par proximité.

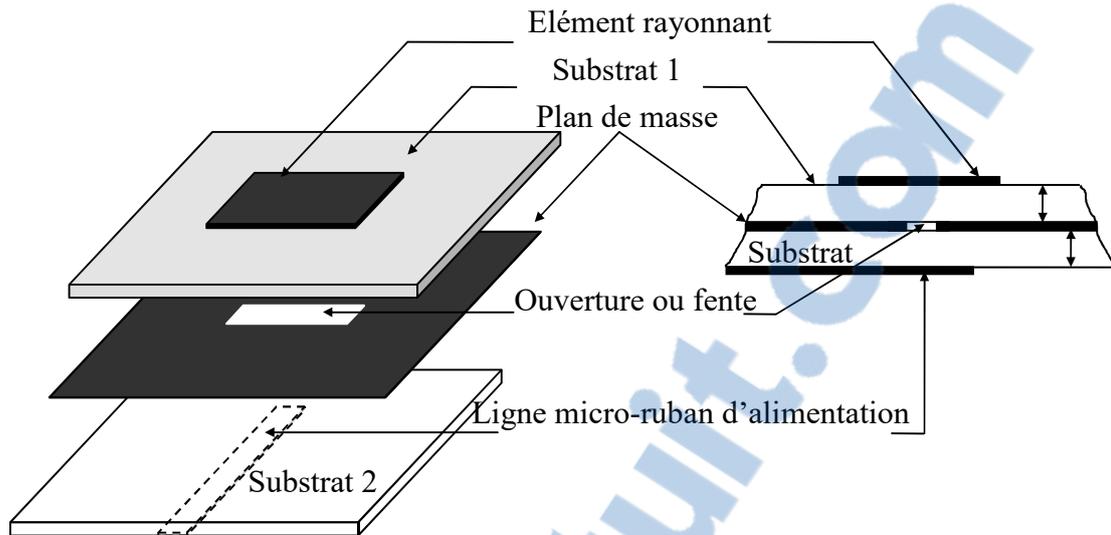
### I.4.4 Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse

L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant (figure I.6). Cette méthode nécessite un positionnement précis de la fente [7]. Elle apporte les avantages suivants :

- Isolation du circuit d'alimentation par l'intermédiaire du plan de masse. De ce fait, un rayonnement parasite faible, en fait ce rayonnement parasite se situe au-dessous du plan de masse, ce qui n'est pas la direction de propagation.
- Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Mais cette technique présente quelques inconvénients, tels que :

- Faible bande passante, mais peut être amélioré en jouant sur l'épaisseur du diélectrique et en superposant plusieurs éléments rayonnants.
- Difficile à mettre en œuvre.



**Figure I.6 :** Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.

## I.5 Les caractéristiques des antennes imprimées

Les paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et, ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation, nous définirons les principaux paramètres [8].

### I.5.1 La directivité

Caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée.

### I.5.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation.

### I.5.3 Impédance d'entrée de l'antenne

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe  $Z_e(f) = R_e(f) + jX_e(f)$  chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne :  $Z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$  (Figure I.7). Précisons que  $f$  est la fréquence de résonance de l'antenne.

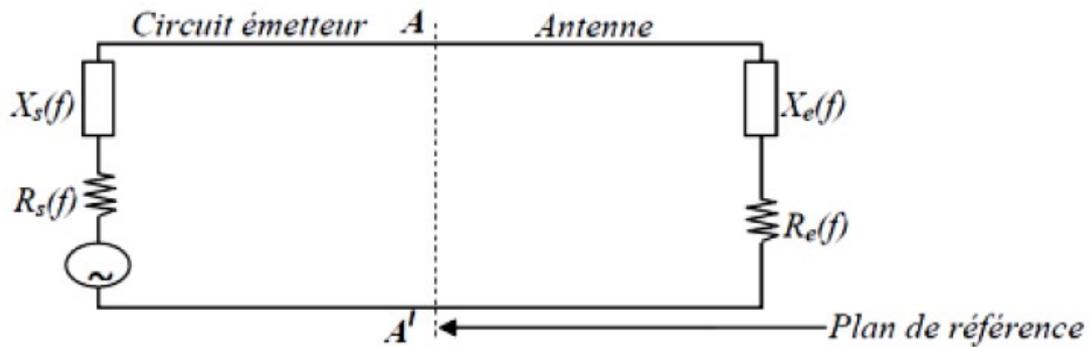


Figure I.7 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission.

D'une part, la partie réelle de l'impédance d'entrée  $Re(f)$  caractérise la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de pertes diverses dans sa structure (effet Joule, onde de surface, etc.) et d'autre part, la partie imaginaire  $Xe(f)$ , d'interprétation plus délicate est liée à la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et au déphasage. L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par l'expression:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (I-1)$$

$Z_0$  = impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Où  $S_{11}$  est fonction de la fréquence, alors  $Z_{in}$  varie aussi avec la fréquence.

#### I.5.4 Rendement de l'antenne

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

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (I-2)$$

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

#### I.5.5 Le gain

Il est défini par

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (I-3)$$

Où  $D$  = directivité de l'antenne.

### I.5.6 Polarisation de l'antenne

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identique à la direction du champ électrique, c'est à dire à celle des brins rayonnants de l'antenne. Le plan E (électrique) est parallèle au vecteur E de l'onde émise. On parle de polarisation verticale si le plan E est perpendiculaire au sol, s'il est parallèle au sol, on parle de polarisation horizontale. Aussi le vecteur du champ électrique instantané trace dans le temps une figure. On réfère à ce phénomène simplement la polarisation du champ électrique. La figure est généralement une ellipse qui présente des cas particuliers [9].

- Si le chemin du vecteur de champ électrique suit une ligne, l'antenne est dite linéairement polarisée.
- Si le vecteur champ électrique tourne selon un cercle, elle est dite à polarisation circulaire.

### I.6 Méthodes d'analyse

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse des antennes imprimées. La plupart de ces méthodes peuvent être classés dans une des deux catégories [10] :

- Méthodes approximatives.
- Méthodes rigoureuses (Full-wave).

Les méthodes approximatives sont basées sur des hypothèses simplificatrices donc elles ont des limitations et elles fournissent des solutions moins précises. Elles sont généralement utilisées pour la modélisation des antennes à élément unique à cause de la difficulté rencontrée dans la modélisation du couplage entre les différents éléments. Cependant, elles offrent un bon aperçu physique avec un temps de calcul généralement très petit.

Les méthodes rigoureuses tiennent compte de tous les mécanismes important de l'onde et s'appuient énormément sur l'utilisation d'algorithmes numériques efficaces. Lorsqu'elles sont appliquées convenablement, les méthodes rigoureuses sont très précises et peuvent être employées pour la modélisation d'une variété d'antenne y compris les antennes réseaux. Ces méthodes ont tendance à être plus complexes et fournissent moins d'aperçu physique. Souvent, elles nécessitent plus de calculs et donc un temps de calculs élevé.

### I.6.1 Méthodes approximatives (analytiques)

Les méthodes approximatives prennent en compte au départ la nature des phénomènes physiques, ce qui permet d'effectuer des approximations, permettant la modélisation du modèle en question. Parmi ces méthodes, on cite :

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

#### I.6.1.1 Modèle de la ligne de transmission

Ce modèle est le plus simple, il représente l'antenne par deux ouvertures rayonnantes séparées par une ligne de transmission de longueur  $L$  [5]. La méthode tient compte des réflexions aux extrémités de la ligne et permet une estimation des pertes dues à la présence des ondes de surface dans le substrat diélectrique. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle donne des résultats assez précis sans nécessiter de moyens de calcul importants car elle ramène l'antenne rectangulaire à une structure de propagation à une seule dimension.

#### I.6.1.2 Modèle de la cavité

La structure imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques en bas par un plan de masse en, en haut par une plaque conductrice en, et par des murs magnétiques verticaux. Une longueur et une largeur effective sont introduites pour prendre en compte les débordements des champs sur les bords de l'antenne. Pour l'excitation, on prend pour modèle un courant électrique  $J$  parallèle à l'axe (Figure I.8) et répartie uniformément [11].

Pour calculer le champ interne à la cavité, on utilise la méthode dite de raccord de mode. Elle consiste à diviser la cavité en deux régions I et II dépourvues de sources et ensuite à résoudre l'équation de Helmholtz (sans second membre) dans chaque région. Les champs lointains sont donnés par le rayonnement des ouvertures verticales et la puissance totale rayonnée est obtenue en intégrant le champ lointain dans tout le demi-espace supérieur.

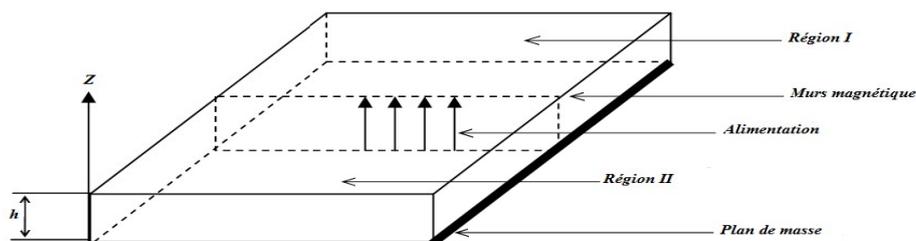


Figure I.8 : Modèle de la cavité.

## I.6.2 Méthodes rigoureuses (full-Wave)

Ces méthodes sont plus rigoureuses que les précédentes et font appel à un formalisme plus compliqué conduisant à des développements numériques souvent lourds. Elles s'appliquent dans le cas où l'antenne peut être décomposée en un ou plusieurs milieux homogènes : le champ électromagnétique peut alors s'exprimer sous forme d'une intégrale surfacique ou linéique. Les méthodes évoluées sont nombreuses, les plus utilisées sont :

### I.6.2.1 Méthodes des différences finies

La méthode F.D.T.D (Finite Difference Time Domain) ou la méthode des différences finies dans le domaine temporel est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temps. Elle consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées [12].

Cette méthode aboutit à un ensemble d'équations linéaires qui, une fois résolues, donne une distribution approximative du champ.

Cette méthode permet d'avoir sans grand travail analytique et dans des temps relativement courts, des résultats assez précis. Cependant, elle ne s'applique qu'à des volumes restreints du fait de la puissance de calcul qu'elle nécessite.

### I.6.2.2 Méthode de la matrice des lignes de transmissions

La TLM est une méthode temporelle qui simule une propagation d'onde électromagnétique dans un milieu quelconque. Elle s'appuie sur les similitudes qui existent d'une part, entre les équations de Maxwell vérifiées par les champs électromagnétiques d'une structure et d'autre part les équations de Kirchhoff vérifiées par les courants et tensions d'un réseau de lignes de transmission [13].

La méthode TLM discrétise les équations des télégraphistes appliquées de façon locale. Grâce à la TLM, on appelle sources de rayonnement, les nœuds du domaine de calcul maillés. On réalise la mise en équation du problème en considérant le réseau maillé comme une série d'intersections orthogonales de lignes de transmissions. Une cellule est reliée avec ses voisines par une matrice S. Son calcul est itéré dans le temps par incrémentation, ce qui permet de suivre la propagation d'un signal dans le réseau.

La méthode TLM ne présente pas de problème de convergence ni de stabilité. Elle est cependant exigeante en place mémoire et en temps de calcul pour deux raisons principales :

- L'étude de zones où les champs électromagnétiques présentent de fortes discontinuités nécessite un maillage plus fin, ce qui entraîne l'utilisation d'espace mémoire relativement important.
- Afin de limiter le phénomène dû à une réponse temporelle tronquée, on doit recueillir un grand nombre d'impulsions sur une longue durée. Ceci nécessite un nombre d'itérations important entraînant une augmentation du temps de calcul.

### **I.6.2.3 Méthode des éléments finis**

La méthode repose sur une formulation variationnelle du problème aux limites, qui est une expression intégrale de la solution du problème de rayonnement [14].

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation nodale par sous-domaine. La région de propagation est divisée en un nombre fini, généralement grand, de sous-domaines de formes triangulaires appelés éléments. Les fonctions approchées sur chaque élément doivent satisfaire des conditions de continuité entre les différents éléments du domaine. En assemblant toutes les équations obtenues sur chaque élément, on obtient un système linéaire avec autant d'inconnues que d'équations que l'on résout par des méthodes numériques appropriées, la taille de la matrice correspond au nombre total de nœuds.

### **I.6.2.4 Méthodes intégrales**

La représentation intégrale des champs utilise des inconnues surfaciques, les densités de courant et les fonctions de green, solutions élémentaires des équations de Helmholtz [15]. Cette méthode est bien adaptée aux problèmes ouverts car le domaine de calcul est limité à l'antenne, le rayonnement dans l'espace environnant étant pris en compte dans l'utilisation des fonctions de green.

## **I.7 Avantages et inconvénients des antennes imprimées**

Les antennes microbandes ont de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100MHz à 50GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Faible poids, petit volume, configuration planaire, faible épaisseur ;
- Faible coût de fabrication, production en masse possible ;

- Ces antennes peuvent être placées sur les missiles, les fusées et les satellites sans modifications importantes ;
- Les antennes ont de petites aires de rayonnement ;
- La polarisation linéaire comme pour le cas des antennes plaques rectangulaire et circulaire (gauche ou bien droite) est possible avec de légers changements dans la position de l'alimentation ;
- L'utilisation de deux fréquences de travail est possible ;
- Les antennes microbandes sont compatibles avec les constructions modulaires (Composants monolithiques tels que les oscillateurs, les alternateurs variables, les interrupteurs, les modulateurs, les mélangeurs, les déphaseurs et peuvent être adaptées directement sur le substrat) ;
- Les lignes d'alimentation et les circuits d'adaptation d'impédance sont fabriqués simultanément avec la structure de l'antenne.

Comme les antennes microbandes ont des avantages; elles ont aussi quelques inconvénients comparées aux antennes micro-ondes classiques tels que :

- Bande passante étroite;
- Gain plus faible dû aux pertes ;
- La plupart des antennes microbandes rayonnent par un demi-plan ;
- Limitations pratiques sur le gain (au maximum à 20dB) ;
- La performance du rayonnement longitudinal est faible ;
- L'isolation entre les éléments rayonnants et l'alimentation est faible ;
- Possibilité d'excitation des ondes de surface ;
- Capacité de manipulation à faible énergie.

Néanmoins il existe des moyens substantiels qui peuvent minimiser les effets de certains de ces inconvénients : par exemple l'excitation à onde de surface peut être éliminée, en prenant des précautions lors de la conception et de la fabrication.

L'insertion d'un trou métallisé entre l'élément rayonnant et le plan de masse permet d'élargir la bande passante et de remédier aux problèmes des décharges électrostatiques et

d'écoulement thermique [16].

### **I.8 Les applications des antennes imprimées**

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette raison, les antennes microbandes remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications [17]. Parmi ces applications on cite :

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

### **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique sur les antennes imprimées et montré le rôle et l'évolution technologique des patches, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons présenté également quelques techniques d'alimentation, ainsi que les méthodes d'analyse les plus utilisées à des structures microbandes de forme quelconque.

## ***CHAPITRE II:***

### ***Les Antennes reconfigurables***

---

## II.1 Introduction

Les antennes reconfigurables sont très intéressantes car leur fonctionnement peut être modifié dynamiquement, ce qui peut être très avantageux pour plusieurs applications. De plus, la reconfigurabilité permet à l'antenne d'offrir plus de fonctionnalités.

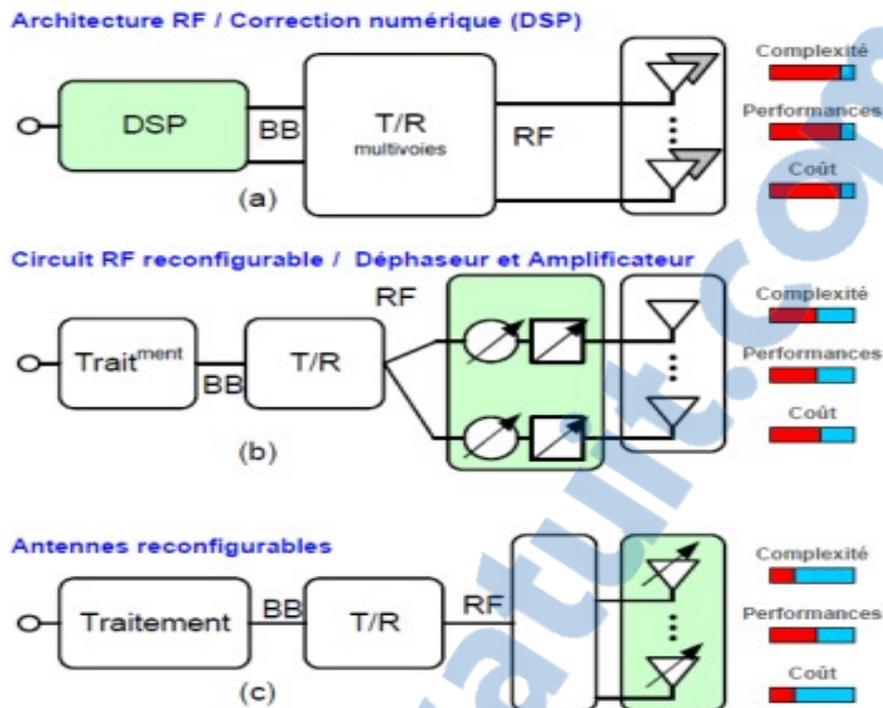
Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps définir les systèmes reconfigurables et les antennes reconfigurables. Ensuite, nous présenterons les techniques utilisées pour obtenir la reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation.

La dernière partie de ce chapitre détaille le principe de reconfigurabilité appliqué aux antennes et donne quelques exemples d'antennes reconfigurables qui ont conduit à la conception d'antennes reconfigurables présentées dans ce manuscrit.

## II.2 Systèmes reconfigurables

La reconfigurabilité des systèmes de télécommunication peut être appliquée à des niveaux différents comme le montre la Figure II.1.

La solution qui consiste à employer une architecture à base d'un processeur de signal numérique DSP, donne de très bonnes performances en termes d'amélioration de la qualité du signal. C'est néanmoins une solution complexe à mettre en œuvre (codage et correction du canal) et surtout coûteuse. Une autre solution consiste à employer un circuit reconfigurable alimentant un réseau d'antennes. Cette solution assez efficace en pratique nécessite néanmoins l'intégration d'un certain nombre d'amplificateurs ou atténuateurs commandables et de déphaseurs, ce qui en fait une solution très coûteuse. La dernière solution, qui présente un coût minime, consiste à intégrer la reconfigurabilité directement au niveau des antennes [18].



**Figure II.1** : Différents niveaux de reconfigurabilité : (a) Système adaptatif par traitement numérique ; (b) Réseau d'antennes phasées et (c) antennes reconfigurables.

### II.3 Antennes reconfigurables

La reconfigurabilité au niveau antennaire peut se définir comme la modification dynamique d'une ou plusieurs propriétés fondamentales de l'antenne en termes de fréquence, de polarisation et de diagramme de rayonnement. Elle permet de s'adapter à la variabilité de l'environnement et aux contraintes liées au système de communication. L'agilité des paramètres peut être envisagée par l'utilisation de composants discrets commutables ou accordables (diodes PIN, RF MEMS, diodes varicap, commutateurs photoconducteurs...), l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) ou par une modification de la structure physique de l'antenne [19].

### II.4 Techniques de reconfigurabilité

Le progrès de la microélectronique a offert de nouveaux moyens pour obtenir des antennes reconfigurables à travers de nouvelles approches plus efficaces et moins coûteuses. Certaines techniques ont eu recours à des composants localisés actifs tels que les diodes PIN, les diodes varicap, les MEMS, les commutateurs optiques... intégrés dans la structure de l'antenne, ils permettent en effet d'en modifier sa longueur électrique effective, de réaliser des

courts circuits ou des fentes commutables, d'activer ou désactiver des éléments parasites.

D'autres approches s'appuyant sur l'agilité des substrats sont aussi mises en œuvre. En fait, il s'est avéré très utile d'utiliser des matériaux "intelligents", c'est-à-dire à caractéristiques accordables notamment les substrats ferroélectriques et ferromagnétiques et les cristaux liquides.

#### II.4.1 Diode varicap

Une diode varicap (de l'anglais : variable capacity), aussi nommée varactor (acronyme de variable reactor) ou encore diode à capacité variable est une diode qui se comporte comme un condensateur dont la valeur de la capacité varie avec la tension inverse appliquée à ses bornes (Figure II.2) ; lorsque l'on change sa tension de polarisation, on change la valeur de cette capacité. Bien que les diodes varicap présentent une certaine facilité d'intégration et une grande agilité continue, les pertes introduites par ce composant sont parfois importantes et les tensions de polarisation peuvent atteindre 30V. De plus, la complexité du circuit de polarisation augmente avec le nombre de diodes varicap nécessaires pour rendre l'antenne reconfigurable [20].

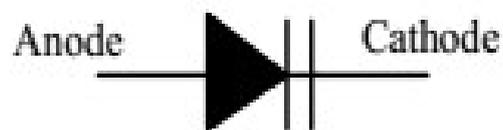
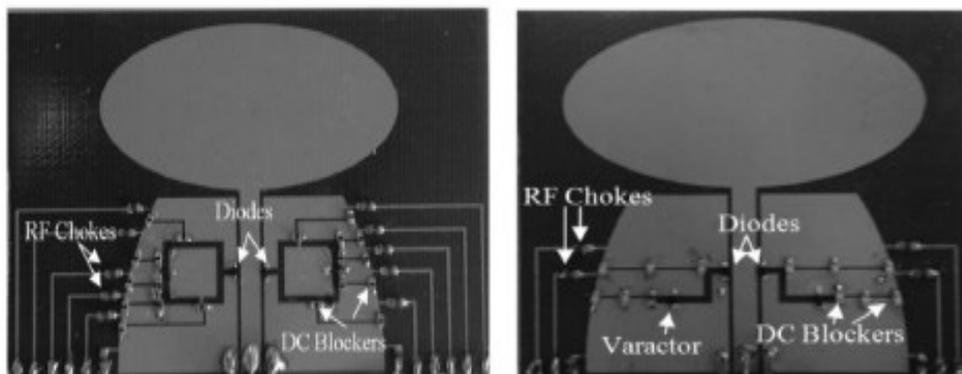


Figure II.2 : Diode varicap.

Ces diodes sont souvent utilisées pour produire l'agilité. Par exemple, dans [21], des diodes varicap ont été introduites sur deux filtres (CPW) passe-bande pour obtenir l'agilité en fréquence des deux antennes CPW large bande comme l'indique la Figure II.3. Cela permet de contrôler les deux bandes rejetées qui sont assez loin l'une de l'autre de sorte qu'il existe une bande passante entre les deux. Lorsque les bandes de fréquences éliminées sont modifiées à l'aide de varicaps, la bande passante est aussi modifiée.

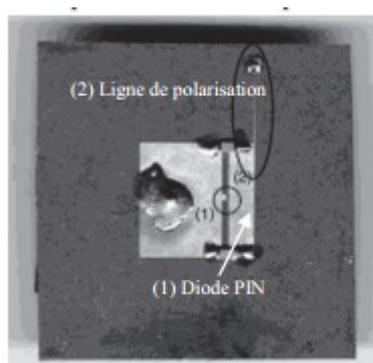


**Figure II.3** : Les deux antennes agiles en fréquence proposées.

#### II.4.2 Diode PIN

Une diode PIN joue le rôle d'un interrupteur. Lorsqu'elle est polarisée en inverse elle est non passante (état OFF), mais une polarisation dans le sens direct la rend passante (état ON). Yang et Rahmat Samii ont présenté dans [22], une antenne microruban sur laquelle est taillée une fente verticale et sur laquelle une diode PIN est ajoutée (Figure II.4).

Lorsque la diode est à l'état ON, le courant horizontal principal ne change pas beaucoup comparé au cas sans la fente. L'antenne résonne ainsi à 4,75GHz. Par contre, lorsque la diode est OFF, le courant horizontal est forcé de faire un détour autour de la fente et de parcourir ainsi un trajet plus long. Lorsque la diode est à l'état ON, l'antenne perd cependant 1 dB de gain. Cela est dû aux pertes introduites par la diode [23].



**Figure II.4** : Antenne imprimée avec fente et diode PIN sur le toit.

Il est important de souligner que les diodes PIN nécessitent une tension de polarisation faible, qu'elles sont fiables et peu chères. Elles demandent tout de même des courants à l'état ON assez importants, ce qui les rend gourmandes en puissance.



### II.4.3 MEMS (Système Micro électromécanique)

Un MEMS est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur; en partie assurée par la forme même de la structure. Selon leur conception, les MEMS peuvent servir pour diverses fonctions (Figure II.5). Typiquement, ils peuvent remplacer dans les structures antennaires des capacités ou des interrupteurs au même titre que les diodes varicap ou PIN. Ils ont cependant besoin d'une très haute tension d'activation, mais comme ils ne consomment quasiment pas de courant, les pertes sont très faibles. Leurs inconvénients restent en premier lieu la tension élevée qu'ils nécessitent (parfois jusqu'à 60V) et en second lieu, le coût relativement élevé de leur fabrication.

Cependant, les performances des MEMS ne cessent de s'améliorer. En effet, des interrupteurs MEMS avec des tensions d'actuation de 6V ont par exemple vu le jour [24].

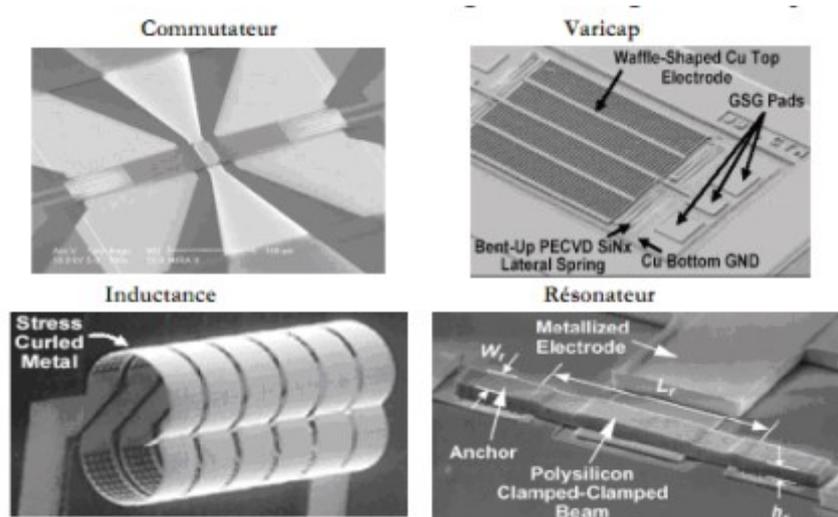


Figure II.5 : Exemples de composants MEMS [23].

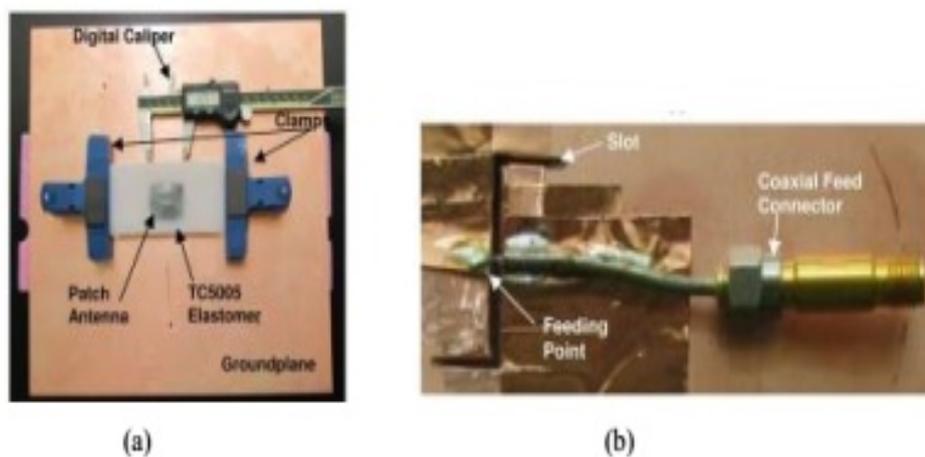
### II.4.4 Matériaux Agiles

Les matériaux dits « agiles » ou encore « intelligents » sont utilisés le plus souvent comme substrat dont les propriétés électromagnétiques (permittivité et/ou perméabilité) peuvent être modifiées via une commande externe (par l'application d'un champ électrique et/ou magnétique) assurant ainsi l'agilité des antennes. Quelques études ont été réalisées utilisant des propriétés de matériaux différents notamment les matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques et les cristaux liquides. Ils offrent l'avantage d'être peu encombrants et de plus en plus facilement intégrables. Néanmoins, rendre ces matériaux agiles n'est pas une tâche facile ; la commande est difficilement intégrable, de grandes tensions doivent être

appliquées sur les matériaux, les dispositifs d'alimentation sont complexes, les pertes sont assez importantes et les temps de réponse sont élevés.

L'antenne reconfigurable en fréquence présentée dans la Figure II.6 [25] est mise en œuvre en utilisant un substrat de silicone extensible TC5005.

Le patch extensible est fabriqué par l'injection d'un alliage de métal liquide dans un réservoir Galinstan carré fabriqué dans le substrat en élastomère de silicone. La longueur électrique de l'antenne patch varie en fonction de l'étirement. Un réglage de fréquence de 1.3 à 3 GHz et une efficacité maximale de rayonnement mesurée de 80 % sont obtenus [20].



**Figure II.6 :** (a) Prototype de l'antenne utilisant un substrat de silicone extensible TC5005. (b) Vue de dessus et vue de dessous [26].

## II.5 Classification des antennes reconfigurables

Il existe plusieurs critères pour classer les antennes reconfigurables, selon la fonctionnalité nous distinguons trois grandes familles :

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

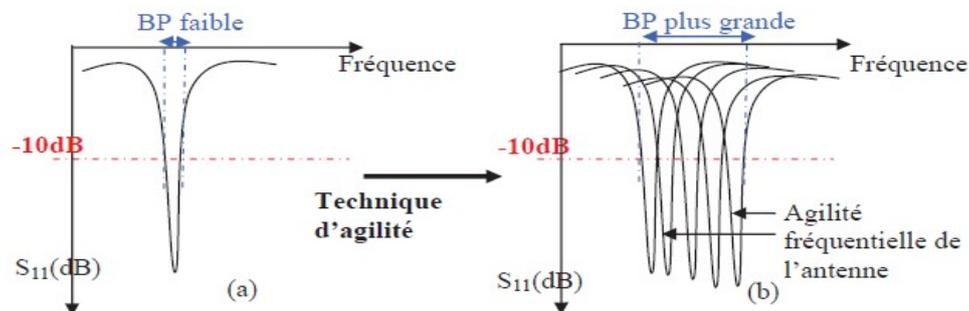
La combinaison de deux fonctionnalités ou plus reste possible.

### II.5.1 Antennes reconfigurables en fréquence

La reconfiguration en fréquence permet de modifier la ou les fréquences de fonctionnement de l'antenne, elle peut être obtenue par commutation ou de façon continue. La

commutation consiste à permettre à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes, à l'aide d'interrupteurs (diodes PIN par exemple). Les antennes accordables en fréquence offrent en revanche, à l'aide de composants de type diodes varicap, la possibilité de faire varier de façon continue une ou plusieurs fréquences de résonance.

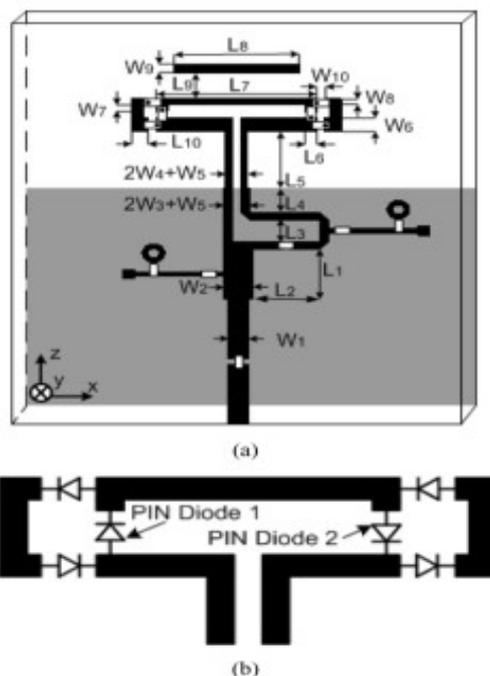
L'exemple du WIFI à 2,4GHz (Norme 802.11g) permet de bien de comprendre le contexte des antennes reconfigurable en fréquence. Ce service comprend plusieurs canaux de fréquences ISM. Une antenne miniature reconfigurable en fréquence pour l'application WIFI, doit être conçue pour recouvrir tous les canaux précédents par commutation. La bande passante instantanée doit être suffisamment grande pour couvrir chaque canal et l'agilité fréquentielle permet de se déplacer d'un canal à un autre.



**Figure II.7 :** Illustration de l'agilité fréquentielle.

La façon la plus classique de reconfigurer une antenne en fréquence consiste à modifier la longueur électrique de l'élément rayonnant. Pour cela, un ou plusieurs interrupteurs, tel que diode PIN, RF-MEMS..., sont intégrés à l'élément rayonnant.

Une antenne reconfigurable en fréquence à diodes PIN exploitant la variation de la longueur électrique est présentée par la Figure II.8 [27]. Il s'agit d'une antenne reconfigurable quasi-Yagi muni d'un dipôle replié. La fréquence centrale de l'antenne est réglée électroniquement en changeant la longueur électrique efficace du conducteur dipôle replié, ce qui est réalisé en employant des diodes PIN (Macom MA4AGBL912). Lorsque les diodes 1 et 2 sont passantes (les autres diodes étant bloquées), la longueur du dipôle est raccourcie, et l'antenne fonctionne dans la gamme de fréquences 6,4 à 8 GHz. Dans le cas contraire (diodes 1 et 2 bloquées, et diodes 3 à 6 passantes), la bande passante de l'antenne s'étend de 5,3 à 6,6 GHz. Cette antenne offre donc deux bandes passantes distinctes selon la configuration choisie.



**Figure II.8** : Antenne quasi-Yagi à dipôle replié reconfigurable en fréquence [28].

## II.5.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Une antenne reconfigurable en rayonnement est une structure rayonnante dont le diagramme de rayonnement peut être changé dynamiquement. Celui-ci peut être modifié en termes de forme, de direction ou de gain.

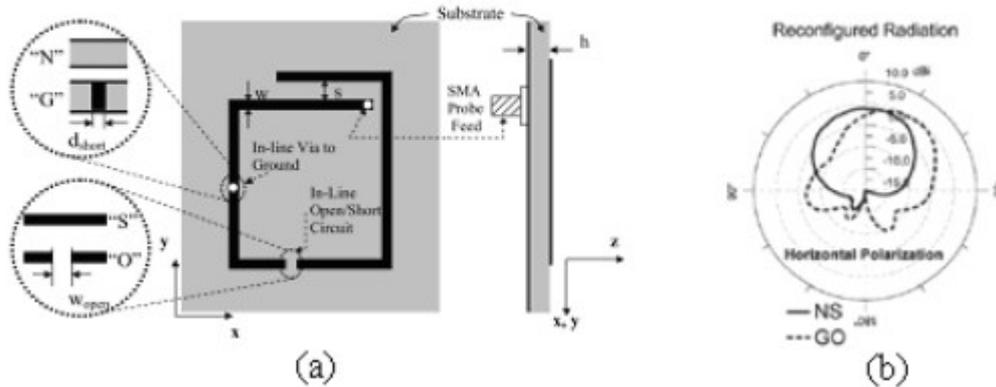
La reconfiguration de diagramme de rayonnement peut être utilisée afin de privilégier ou non certaines directions de rayonnement de l'antenne.

Il existe plusieurs concepts de reconfiguration de diagramme, parmi ces techniques, on trouve l'utilisation de diode PIN, de MEMS et des photoconducteurs.

### II.5.2.1 Utilisation des diodes PIN

Une solution possible pour concevoir une antenne reconfigurable en diagramme est d'utiliser des antennes filaires. La variation du diagramme s'accompagne d'un changement de la fréquence de résonance qu'il faut minimiser. Un exemple d'antenne microruban en forme de spirale carrée, présenté dans [29], est illustré par la Figure II.9 (a). Dans la configuration d'origine, la longueur de la spirale carrée est d'environ une longueur d'onde et la polarisation est linéaire. Pour reconfigurer le diagramme de rayonnement, deux diodes PIN sont utilisées : l'une est située à un quart de longueur d'onde du point d'alimentation et permet de réaliser un court-circuit avec le plan de masse ; l'autre est placée dans la spirale et permet de réaliser un court-circuit. Lorsque les deux diodes sont actives, le diagramme de

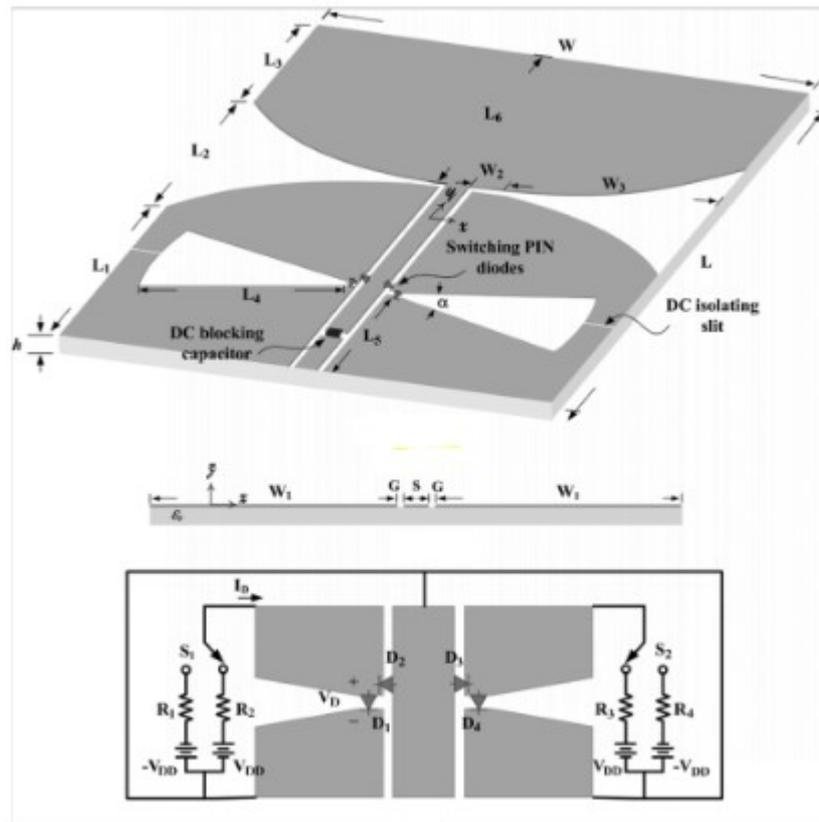
rayonnement subit une rotation de  $45^\circ$  (Figure II.9).



**Figure II.9** : Antenne filaire à spirale carrée reconfigurable en diagramme [30].

Dans cette configuration, la fréquence de résonance est égale à 3,7 GHz. La topologie proposée permet, en plus, une reconfiguration en fréquence de la bande S (3,7 GHz) à la bande C (6,0 GHz) en activant seulement l'une des diodes.

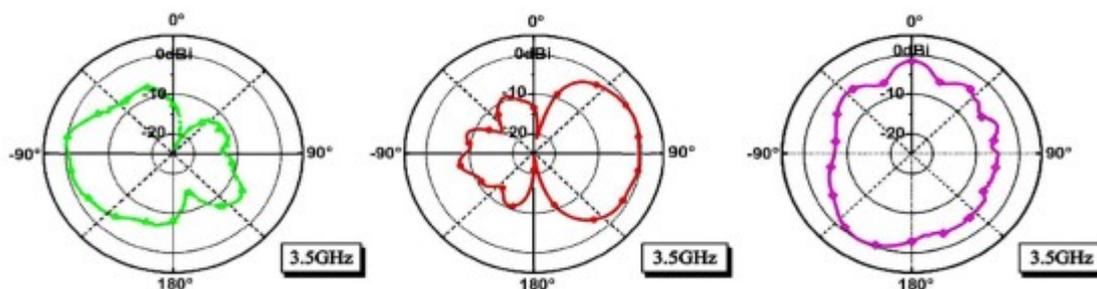
Un autre exemple pour obtenir une antenne reconfigurable en diagramme à partir de fentes sur l'élément rayonné est proposé dans [31]. Cette antenne reconfigurable est une antenne large bande qui se compose d'une entrée coplanaire (reliée à un connecteur SMA), de deux transitions coplanaire vers les lignes à fente, d'une paire de lignes coniques (de type Vivaldi) et de quatre diodes PIN (Macom MA4AGBL912). Sa géométrie et le positionnement des diodes sont illustrés par la Figure II.10.



**Figure II.10 :** Antenne reconfigurable en diagramme par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF.

Selon l'état des diodes PIN, l'antenne est alimentée selon trois configurations dites mode coplanaire, mode droit, et mode gauche selon que la fente (droite ou gauche) est court-circuitée.

La Figure II.11 : montre le diagramme de rayonnement de l'antenne selon ces trois configurations pour la fréquence 3,5 GHz. Le substrat utilisé est un substrat Roger RO4003 d'épaisseur 1,524mm et de constantes diélectriques 3,38 [30].



**Figure II.11:** Diagrammes de rayonnement à 3,5 GHz selon les trois modes de configuration.

### II.5.2.2 Utilisation de MEMS

Dans [32] est proposée une antenne reconfigurable en diagramme en forme de spirale rectangulaire dans laquelle sont intégrés quatre MEMS (Figure II.12).

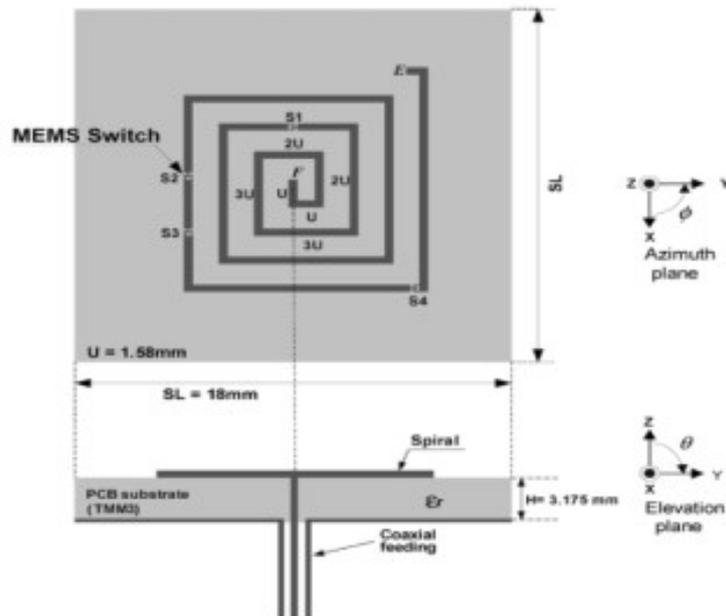
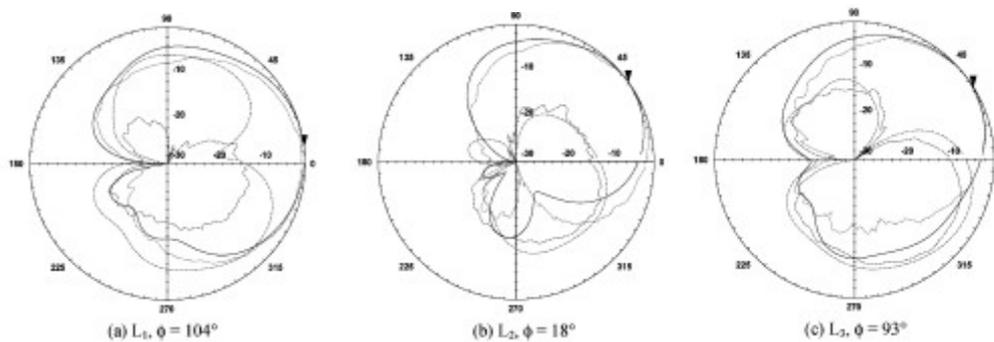
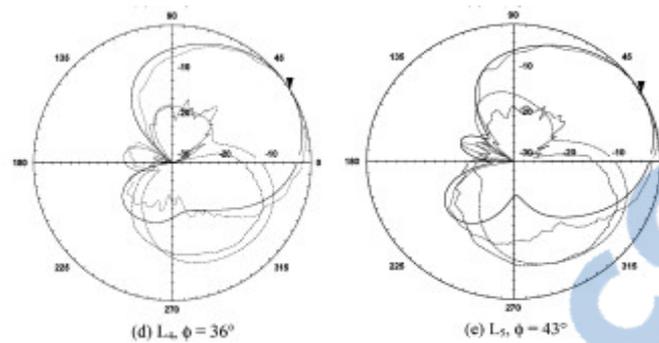


Figure II.12 : Antenne à spirale reconfigurable en diagramme.

La spirale est alimentée en son centre par un câble coaxial.

Elle est constituée de cinq sections qui sont connectées par quatre MEMS RF stratégiquement placés.



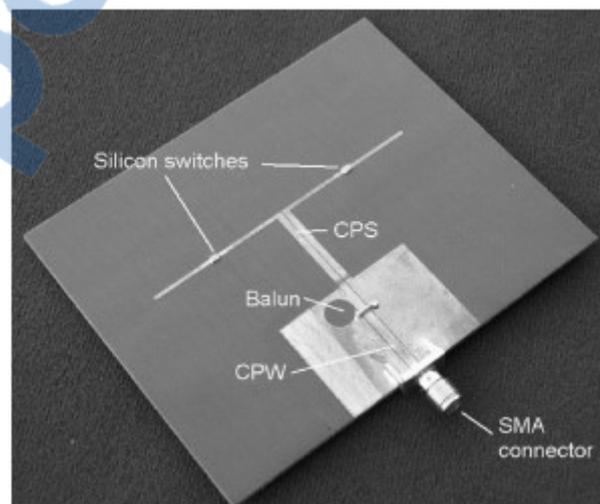


**Figure II.13** : Diagrammes de rayonnement de l'antenne en spirale selon les 5 configurations.

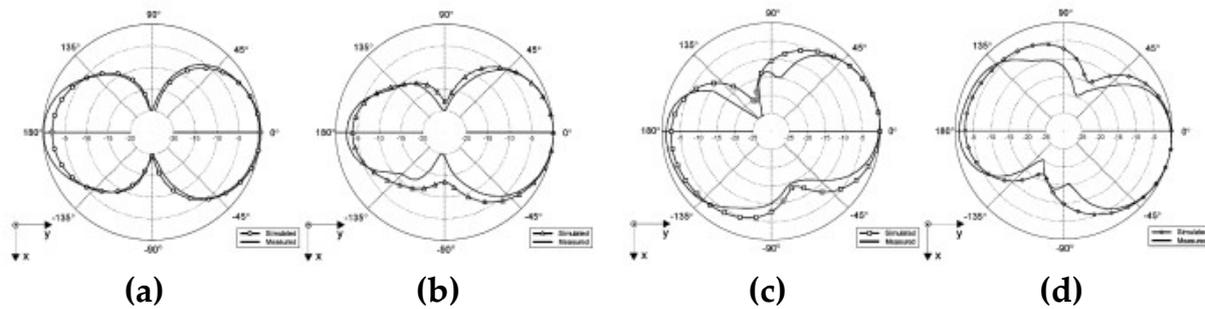
En fonction des commutateurs activés, la longueur totale de la spirale varie et le diagramme de rayonnement se trouve modifié en conséquence (Figure II.13). La fréquence de résonance est égale à 10 GHz [30].

### II.5.2.3 Utilisation de photoconducteurs

L'antenne reconfigurable présentée dans [33] comme antenne reconfigurable en fréquence offre également la possibilité de reconfiguration en diagramme Figure II.14 La Figure II.15 illustre les différents diagrammes de rayonnement selon l'état des photoconducteurs. Dans le cas où une seule diode est passante, la fréquence de résonance est égale à 2,7 GHz. Quand le commutateur de gauche est activé, le diagramme de rayonnement subit une rotation à gauche dans le plan du champ électrique ; et inversement quand celui de droite est passant [24].



**Figure II.14** : Photographie de l'antenne dipôle commutée.



**Figure II.15** : Diagrammes de rayonnement de l'antenne dipôle reconfigurable en fréquence et en diagramme.

### II.5.3 Antenne reconfigurable en polarisation

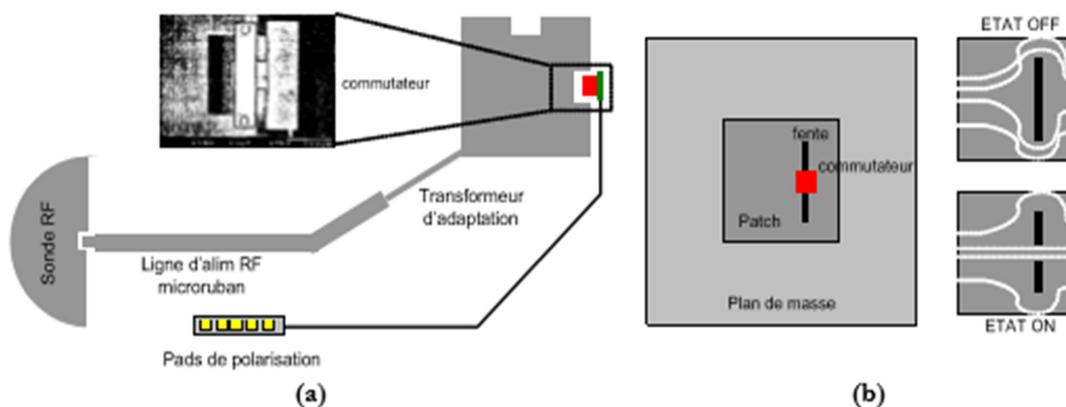
Le dernier type de reconfiguration correspond à la modification de la polarisation de l'antenne. La reconfiguration de polarisation peut s'avérer utile pour réaliser des liaisons sans fil plus fiables et robustes. Pour cela, on cherche généralement à modifier le sens ou la phase des courants circulant sur l'élément rayonnant, sans les altérer afin de ne pas perturber les autres caractéristiques de l'antenne (mêmes fréquences de résonance et même rayonnement). Il s'agit de modifier uniquement l'orientation vectorielle du champ  $E$ .

Les techniques utilisées pour les autres types de reconfigurabilité peuvent également s'appliquer ici. En effet, Il est possible de modifier la polarisation de l'antenne en ajoutant, par exemple, des fentes afin de perturber les lignes de courant.

Un exemple d'antenne à diversité de polarisation réglée à 26 GHz, employant des MEMS, est présenté dans [34]. Dans ce design, un commutateur MEMS est placé sur une antenne patch microruban avec une alimentation dans le coin pour exciter deux modes orthogonaux. Les commutateurs se composent d'une bande mobile métallique suspendue. Quand la bande métallique est suspendue au-dessus de l'encoche, l'antenne rayonne une onde polarisée circulairement. En utilisant la mise en action électrostatique, la bande en métal peut être abaissée pour créer une antenne ayant une polarisation linéaire duale (Figure II.16a).

Un autre exemple d'antenne reconfigurable est l'antenne patch avec des fentes commutables, le "patch antenna with switchable slots" ou "PASS" développée par l'UCLA

[35] (Figure II.16b). L'antenne PASS se compose d'une antenne patch en technologie microruban dans laquelle sont découpées une ou plusieurs fentes. Un commutateur (diode ou MEMS RF) est inséré au centre de la fente pour contrôler le comportement des courants. Quand le commutateur est à l'état OFF, les courants en pointillé blanc sur la Figure II.16b sont obligés de contourner la fente. Quand le commutateur est dans l'état ON, le courant peut suivre le chemin plus court ainsi créé. La reconfiguration de polarisation est réalisée en incluant deux fentes orthogonales dans le patch. L'actionnement des commutateurs entraîne une polarisation circulaire droite ou gauche. L'antenne PASS a été également utilisée pour réaliser la reconfiguration par commutation entre deux bandes de fréquence [36].



**Figure II.16** : (a) Antenne patch à bord commuté et (b) Antenne PASS de l'UCLA [18].

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes reconfigurables dont le développement est en plein essor en raison des nouvelles fonctionnalités qu'elles proposent. La définition, les techniques d'agilité ainsi qu'une classification de ces antennes reconfigurables ont alors été présentés.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier et concevoir des antennes agiles en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation pour les télécommunications multistandards.

## ***CHAPITRE III :***

### ***Étude et Conception des Antennes Reconfigurables***

---

### III.1 Introduction

Il est très important de pouvoir simuler les antennes avec précision avant la réalisation. Le but est d'avoir une antenne qui, une fois réalisé, fonctionne du premier essai.

Nous avons utilisé le logiciel Microwave Studio de CST (Computer Simulation Technologie) pour concevoir les antennes reconfigurables. Cet outil de simulation électromagnétique conçu par la compagnie CST permet de faire la conception et la simulation de plusieurs types d'antennes.

Dans ce chapitre nous allons concevoir trois antennes, une antenne agile en fréquence, une antenne agile en diagramme de rayonnement et une antenne agile en polarisation. Nous allons commencer à présenter une antenne multi-bandes reconfigurable en fréquence basée sur un patch carré avec fente fractale au centre. La seconde antenne, reconfigurable en diagramme de rayonnement, est composée par deux dipôles élémentaires. La troisième antenne est un patch circulaire reconfigurable en polarisation, qui fonctionne dans une bande de fréquence WLAN.

### III.2 Conception d'une antenne carrée multi-bandes reconfigurable en fréquence

La première antenne simulée est une antenne imprimée carrée à fente fractale, multi-bandes reconfigurable en fréquence [37]. Cette antenne peut atteindre 15 bandes opérationnelles de 1 à 6 GHz avec une bonne adaptation d'impédance et un maximum de gain qui peut atteindre jusqu'à 10.7 dB.

#### III.2.1 Géométrie de l'antenne

L'antenne carrée à fente fractale est constituée d'un patch carré de dimension  $L_p = W_p = 50$  mm, imprimé sur la couche supérieure d'un substrat en Duroid de permittivité relative  $\epsilon_r = 2.2$ , d'épaisseur  $h = 1.6$  mm, de longueur  $L = 70$  mm et de largeur  $W = 70$  mm. Une ligne microruban de longueur  $L_f = 10$  mm et de largeur  $W_f = 2.4$  mm est utilisée pour alimenter le patch comme présenté dans la Figure III.1. La fente fractale ( $L_1 = 7.5$  mm,  $L_2 = 11$  mm et  $s = 2$  mm) découpée au centre du patch est dimensionnée et optimisée pour atteindre le comportement multi-bandes. Le plan de masse de dimension  $70 \times 70$  mm<sup>2</sup> est imprimé sur la face arrière du substrat.

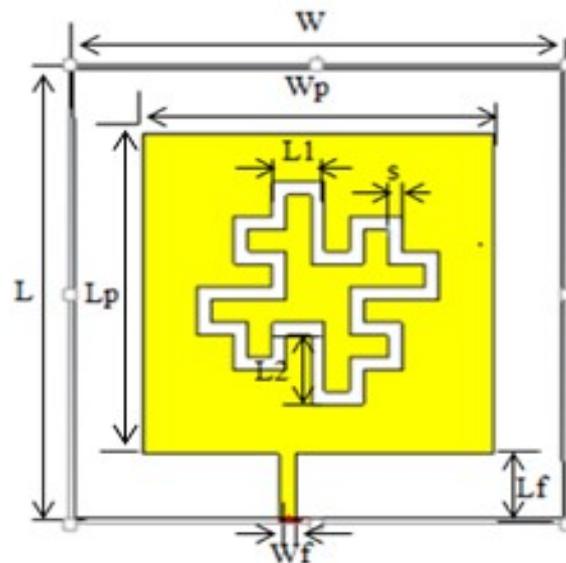


Figure III.1 : Antenne à fente fractale.

### III.2.2 Résultat de simulation

La conception de l'antenne a été faite en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique CST v.16. Nous avons optimisé l'antenne pour rayonner dans la bande 1-6 GHz. Les fréquences de résonance obtenues sont 2.37, 3.30, 4,005 et 5.19 GHz.

La figure III.2 présente la forme de l'antenne simulée et le coefficient de réflexion  $S_{11}$  obtenu.

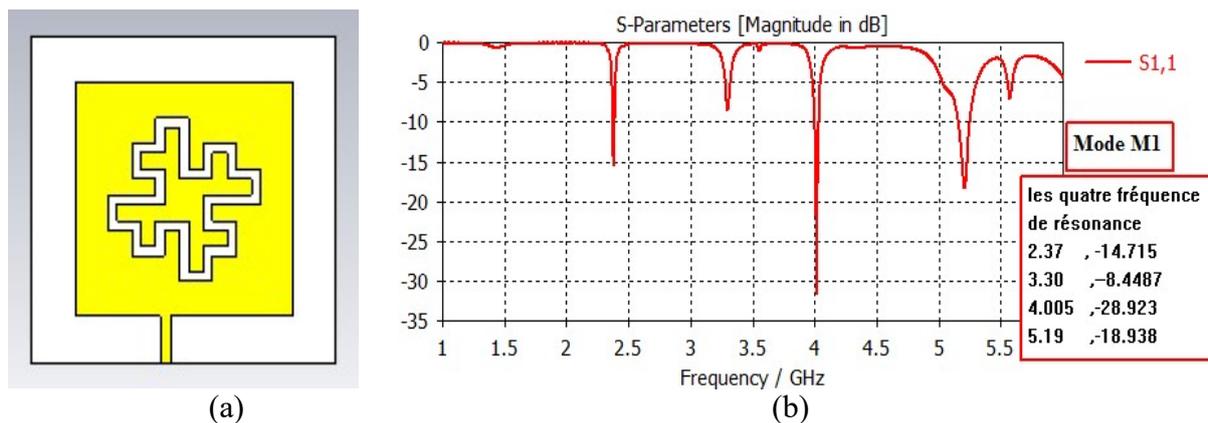
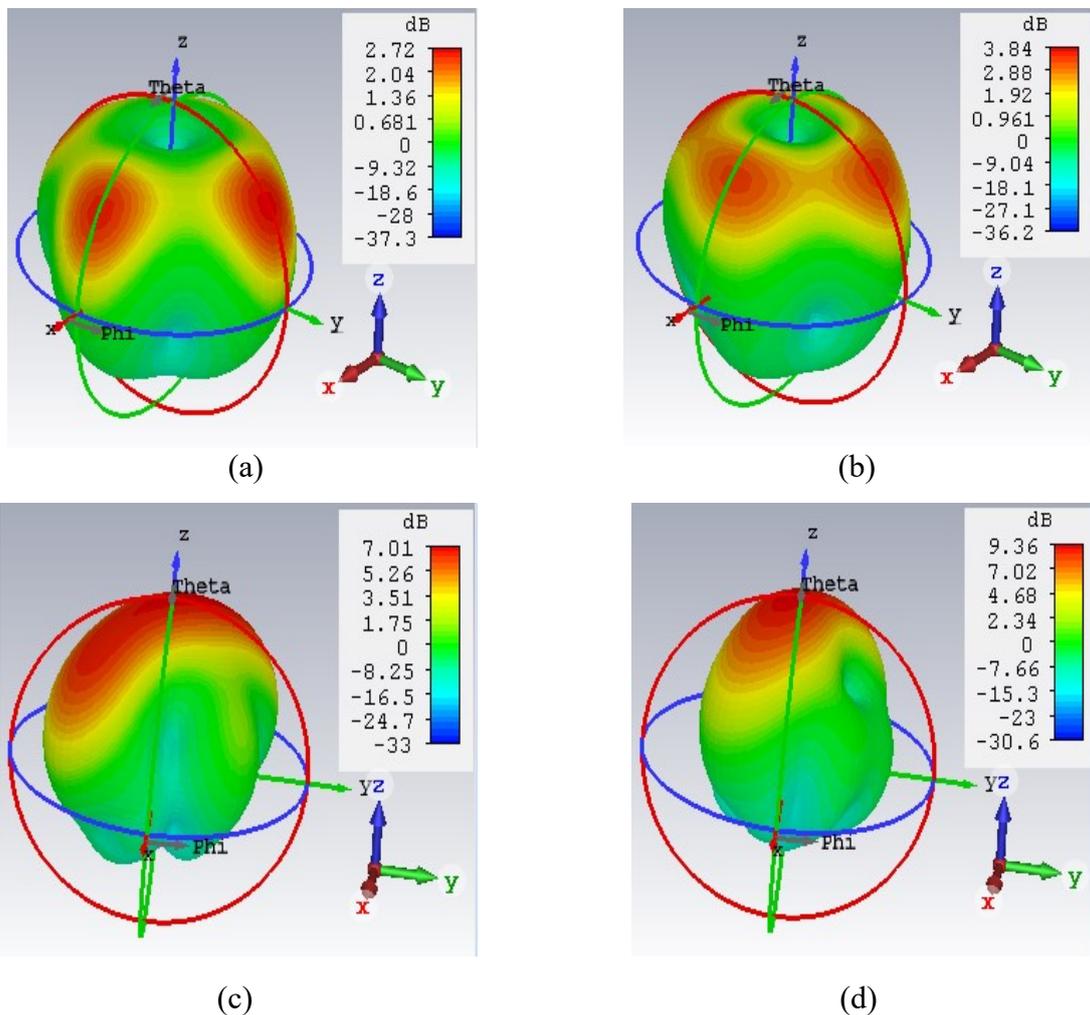


Figure III.2 : (a) L'antenne à fente fractale. (b) Coefficient de réflexion  $S_{11}$ .

Les diagrammes de rayonnement en 3D sont représentés par la figure III.3.



**Figure III.3 :** Représentation des diagrammes de rayonnement de l'antenne aux fréquences (a)  $f_1 = 2.37$  GHz ; (b)  $f_2 = 3.30$  GHz ; (c)  $f_3 = 4.005$  GHz et (d)  $f_4 = 5.19$  GHz.

### III.2.3 Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence

Pour rendre l'antenne reconfigurable en fréquence, nous avons placé seize diodes PIN sur la longueur de la fente fractale, comme le montre la figure III.4. Selon l'état des diodes, quatre modes principaux sont obtenus et résumés dans le tableau III.1. Le premier mode M1 est atteint lorsque tous les switches sont désactivés.

Le mode M2 est excité en mettant les diodes S1-S8 à l'état On. Ensuite, pour passer au mode M3, les switches S9 à S16 doivent être activés. Le dernier mode M4 est obtenu lorsque tous les switches sont activés [20].

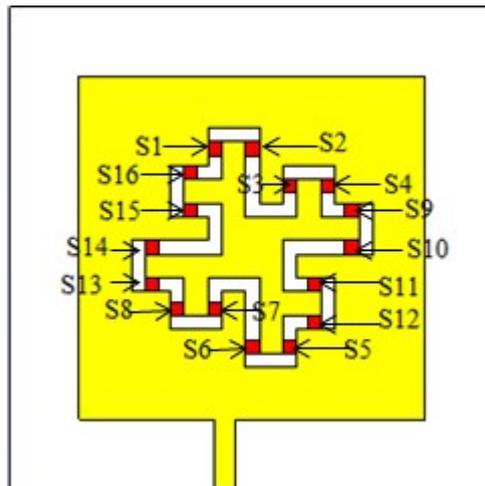


Figure III.4 : Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence.

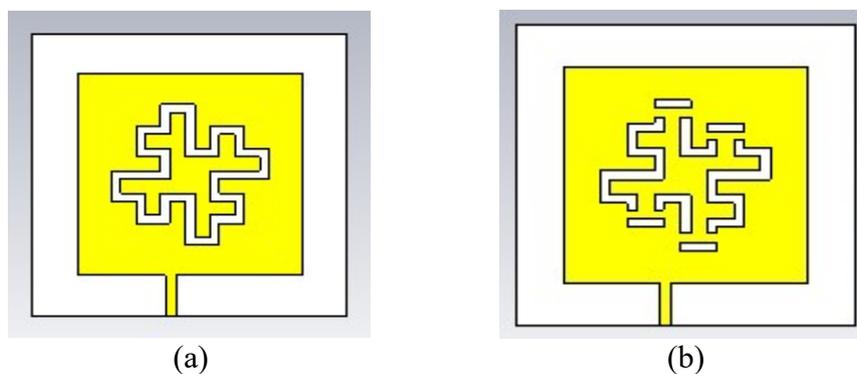
Mode	S <sub>1</sub> -S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub> -S <sub>16</sub>
M1	Off	Off
M2	On	Off
M3	Off	On
M4	On	On

Tableau III.1: Les modes de fonctionnement de l'antenne reconfigurable [20].

Nous avons modélisé les diodes PIN par des rubans de dimension  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  dans le but de prouver le concept. L'état On est illustrée par la présence du ruban correspondant, et l'état Off est présenté par l'omission de la ligne. Les pertes ne sont pas prises en compte.

### III.2.4 Résultats de simulation de l'antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence

Quatre configurations données par la figure III.5, correspondant aux quatre modes décrits ci-dessus, ont été simulées.



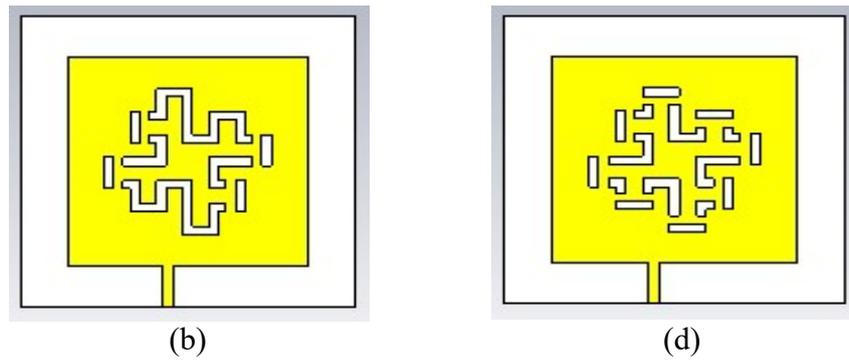


Figure III.5 : Antenne à fente fractale reconfigurable en fréquence : (a) Mode M1 ; (b) Mode M2 ; (c) Mode M3 et (d) Mode M4.

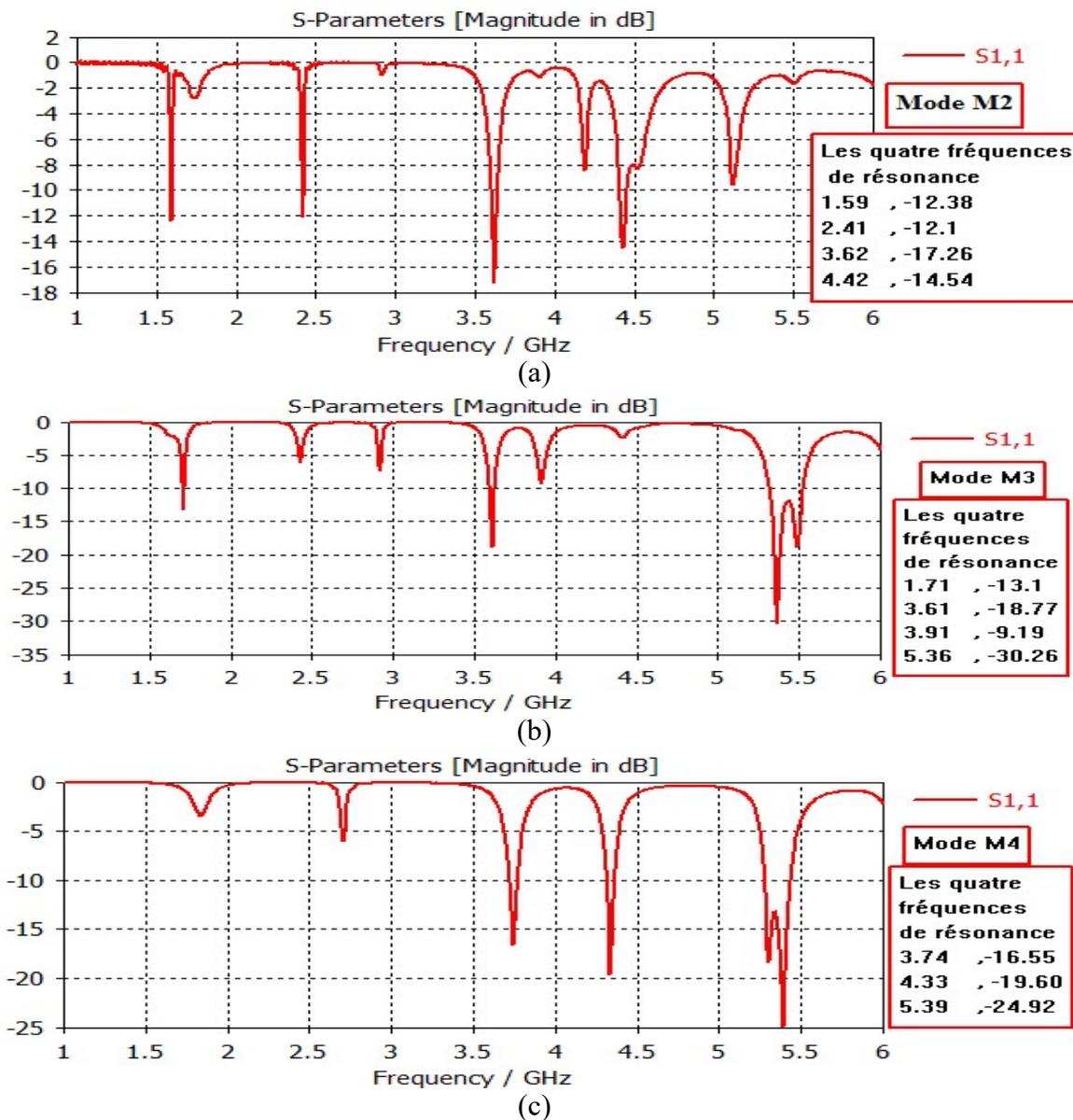


Figure III.6 : Les coefficients de réflexion  $S_{11}$  : (a) Mode M2 ; (b) Mode M3 ; (c) Mode M4.

La figure III.6 montre les coefficients de réflexion de l'antenne reconfigurable aux modes de fonctionnement M2, M3 et M4.

Lorsque tous les switches sont à l'état Off c'est-à-dire lorsque le mode M1 est activé l'antenne retrouve son état de fonctionnement initial. L'excitation du mode M2 (S1-S8 On) génère des perturbations de la distribution des courants surfaciques ce qui donne naissance à quatre nouvelles fréquences de résonance, à savoir 1.59, 2.41, 3.62 et 4.42 GHz. Si le mode M3 est sélectionné (S9-S16 On), le chemin du flux de courant est modifié et l'antenne résonne à 1.71, 3.61, 3.91 et 5.36 GHz. Enfin, en mettant tous les switch en position On, on sélectionne le mode M4 qui engendre un déplacement des fréquences de résonance vers des fréquences plus grande, et l'antenne rayonne à 3.74, 4.33 et 5.39 GHz.

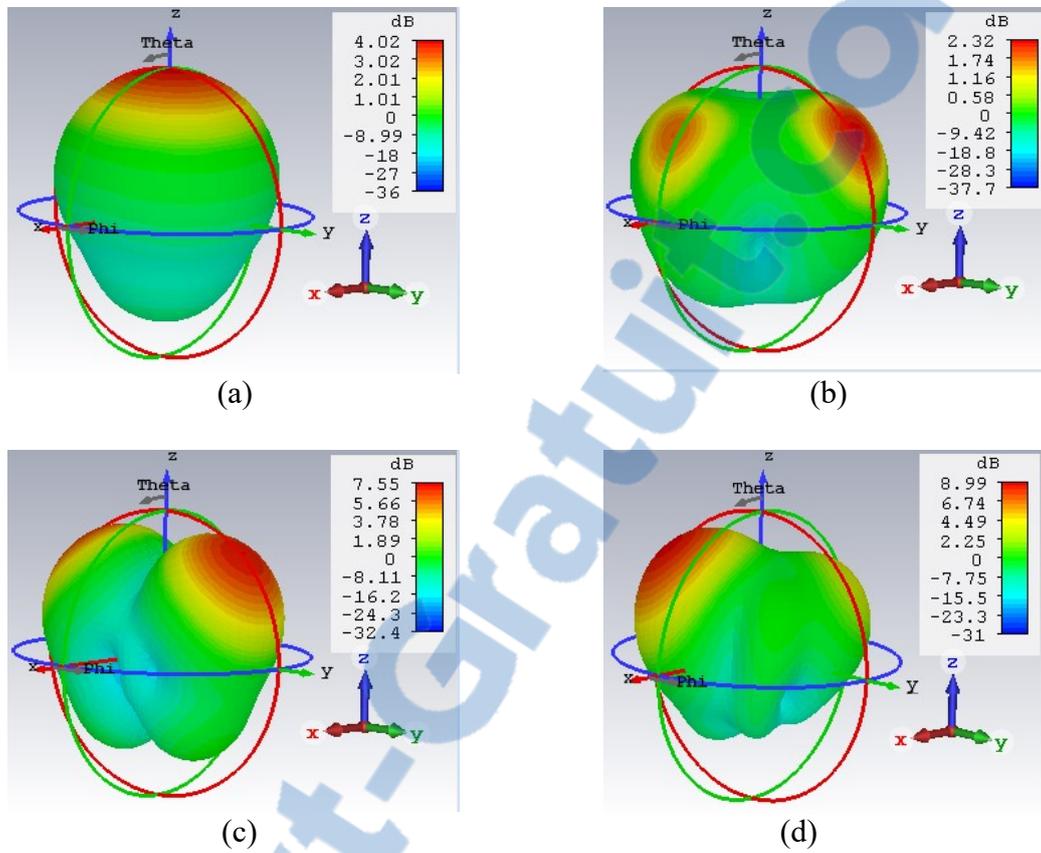
Le tableau III.2 récapitule les fréquences de résonance obtenues par simulation.

Mode	Fréquence de résonance(GHz)			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
<b>M1</b>	2.37	3.30	4.005	4.19
<b>M2</b>	1.59	2.41	3.62	4.42
<b>M3</b>	1.71	3.61	3.91	5.36
<b>M4</b>	3.74	4.33	5.39	--

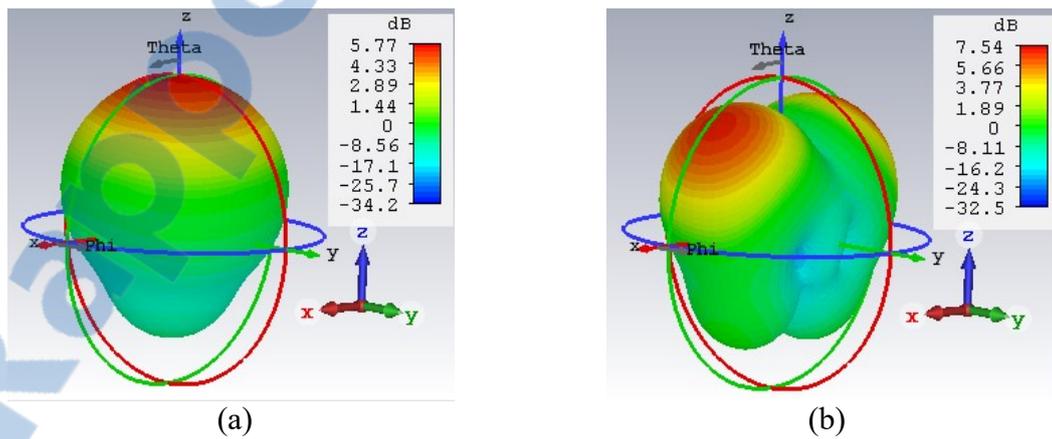
**Tableau III.2** : Récapitulatif des fréquences de résonances.

En fonction des états des diodes PIN intégrées dans la fente (On ou Off), l'antenne est capable de rediriger le flux de courant et de commuter entre quinze bandes de fréquences. Donc l'antenne conçue est bien une antenne reconfigurable en fréquence.

Les diagrammes de rayonnement en 3D, pour les trois modes sélectionnés (M2, M3, M4), sont représentés respectivement par les figures suivantes :



**Figure III.7 :** Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M2 : (a)  $f_1=1.59$  ; (b)  $f_2=2.41$  ; (c)  $f_3=3.62$  et (d)  $f_4=4.42$  GHz.



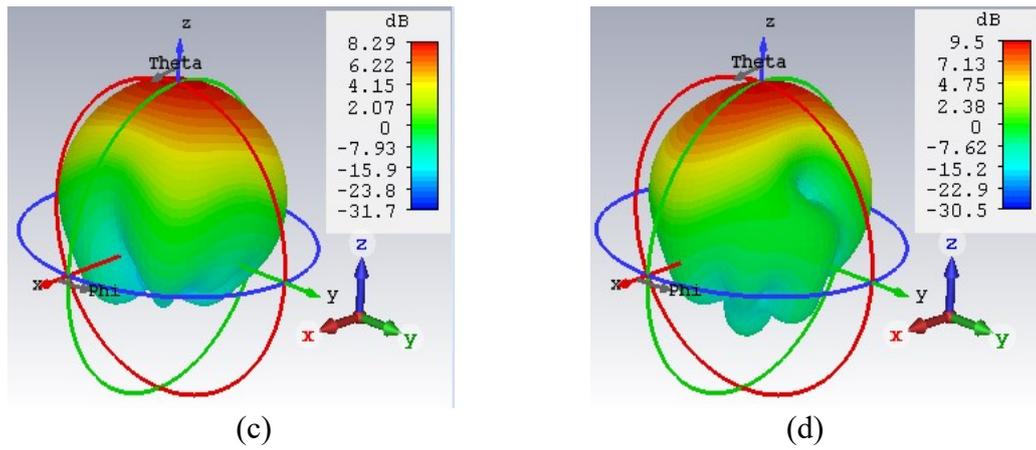


Figure III.8 : Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M3 : (a)  $f_1=1.71$  ; (b)  $f_2=3.61$  ; (c)  $f_3=3.91$  et (d)  $f_4=5.36$ GHz.

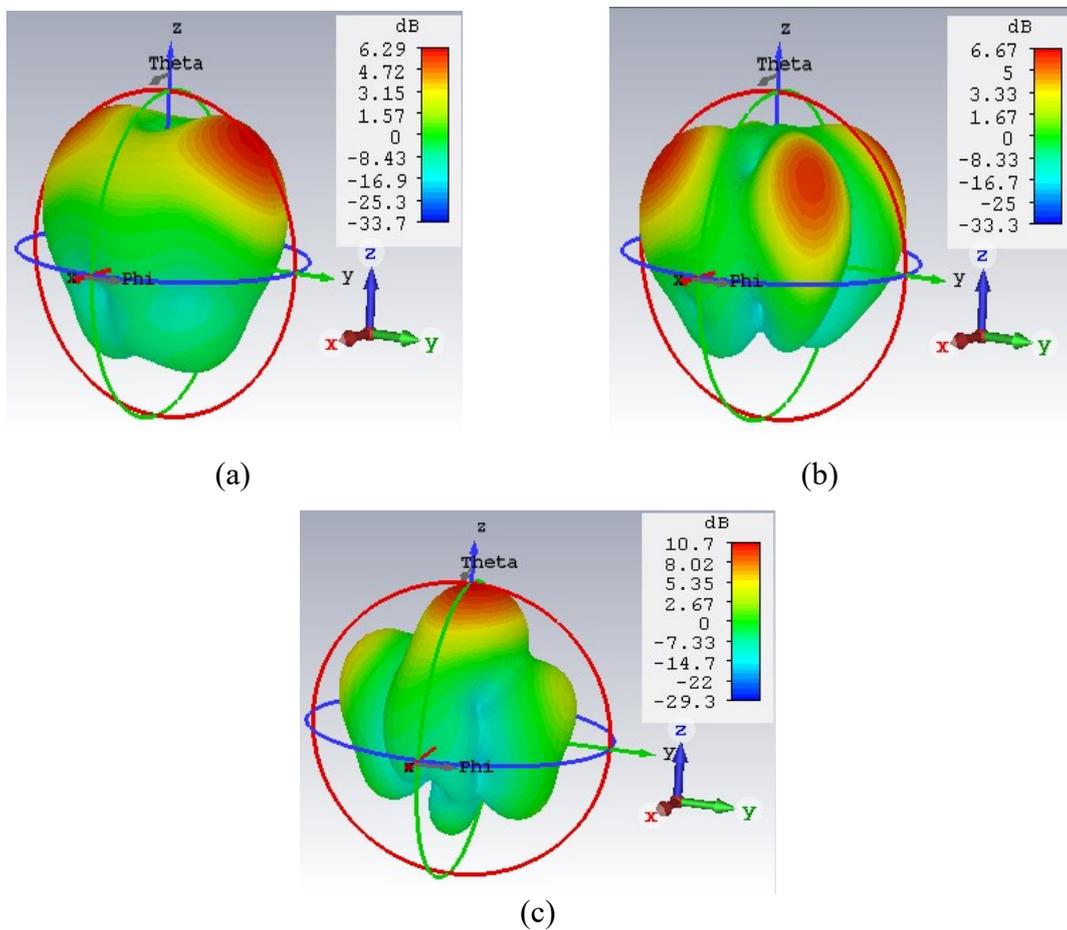


Figure III.9 : Les diagrammes de rayonnement en 3D simulés aux fréquences de résonance du mode M4 : (a)  $f_1=3.74$  ; (b)  $f_2=4.33$  ; (c)  $f_3=5.39$  GHz.

### III.3 Antenne dipôle reconfigurable en diagramme de rayonnement

#### III.3.1 Géométrie de l'antenne

L'antenne dipôle est formée de deux dipôles élémentaires imprimés dos à dos sur un substrat, le Arlon Cu 217, d'épaisseur  $h = 0.8$  mm et de permittivité relative  $\epsilon_r = 2.17$ . Elle est optimisée pour fonctionner à la fréquence 2.45 GHz [20][28][38].

La reconfigurabilité des diagrammes de rayonnement est obtenue par l'insertion de quatre diodes PIN.

Les paramètres de conception sont résumés dans le tableau III.3.

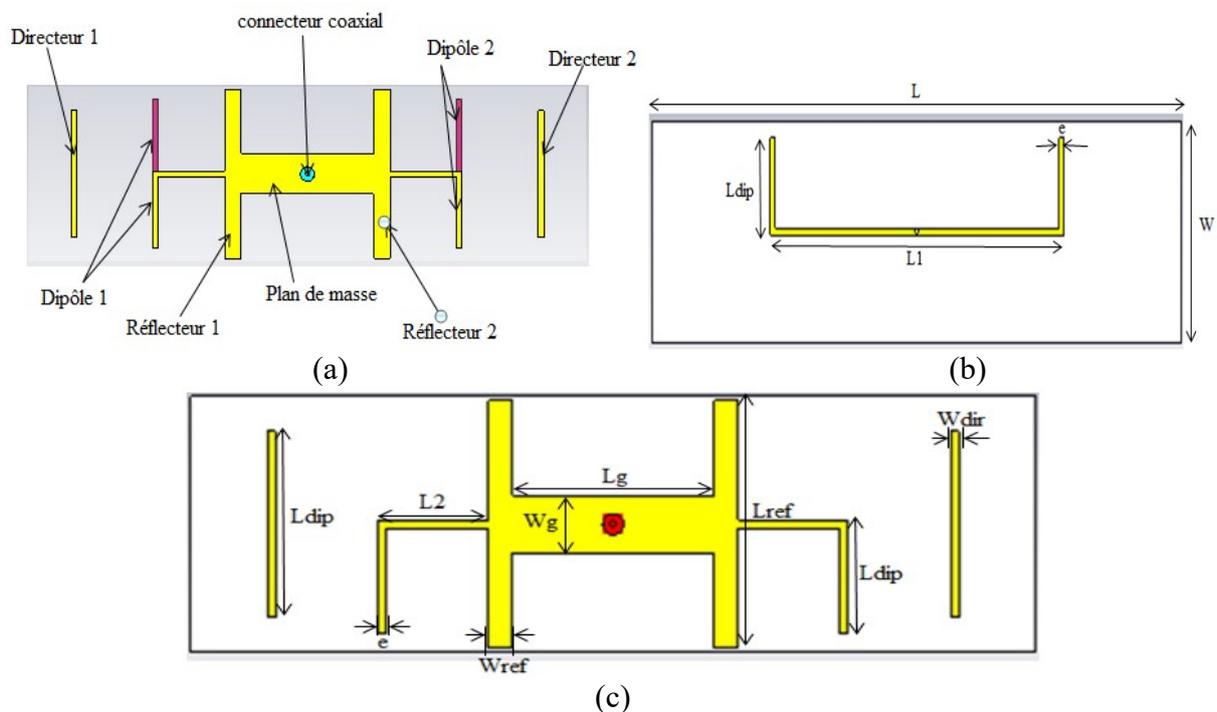


Figure III.10 : (a) Antenne dipôle ; (b) Face supérieure et (c) Face inférieure.

<i>Dimension (mm)</i>			
<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
L	209	Ldir	45
W	62	Wdir	2
Ldip	27.5	Lref	60
L1	116	Wref	6
L2	27	Lg	50
E	2	Wg	14

Tableau III.3 : Paramètres de conception du dipôle.

### III.3.2 Résultat de simulation

La simulation de cette antenne est réalisée en utilisant toujours le logiciel CST. Les figures III.11, III.12 et III.13 montrent les différentes performances de notre antenne, à savoir le coefficient de réflexion  $S_{11}$  (sur la bande de fréquence de 2 à 3 GHz) et les propriétés de rayonnement (gain et diagrammes de rayonnement).

On remarque sur la figure III.11 qu'on a une bonne adaptation à la fréquence 2.457 GHz, le coefficient de réflexion est inférieur à -19 dB.

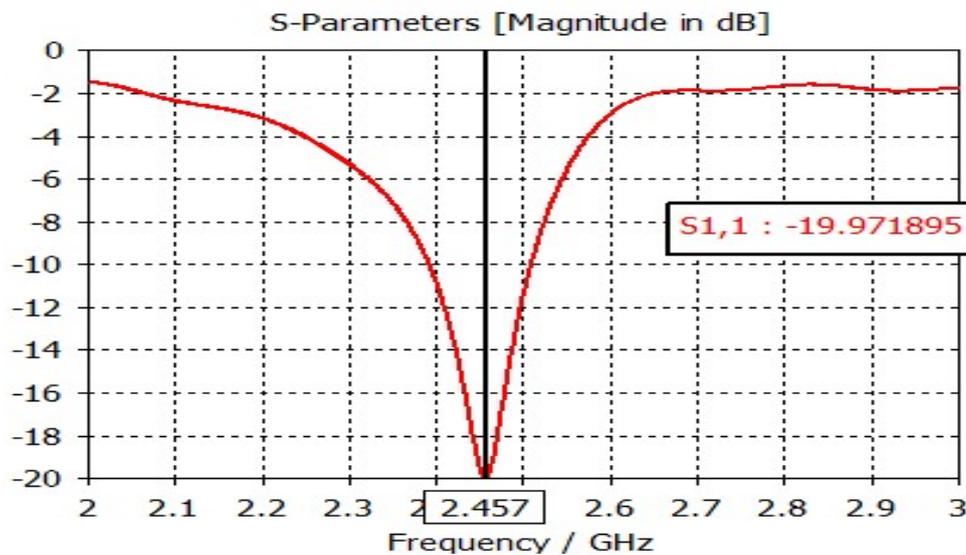


Figure III.11 : Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) de l'antenne dipôle.

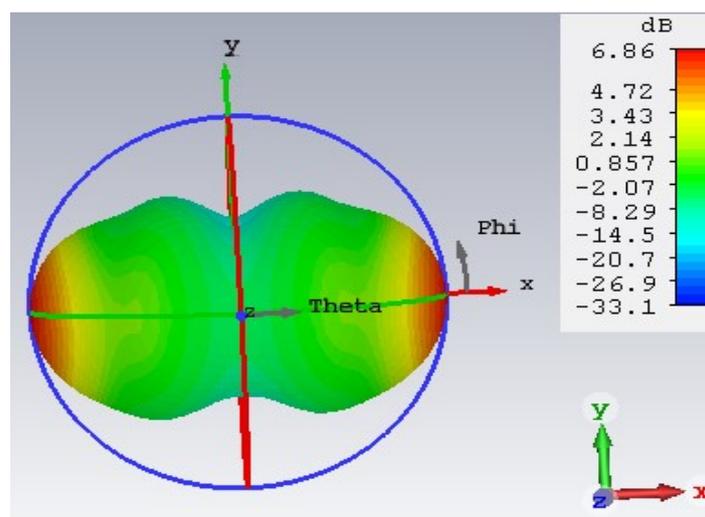
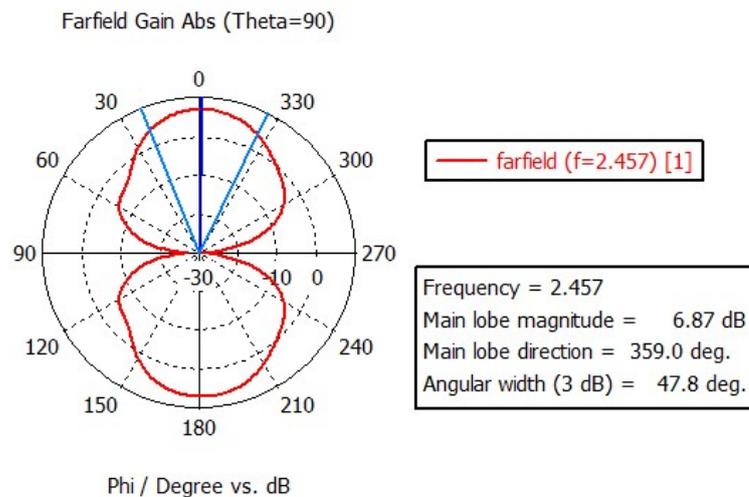


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne.

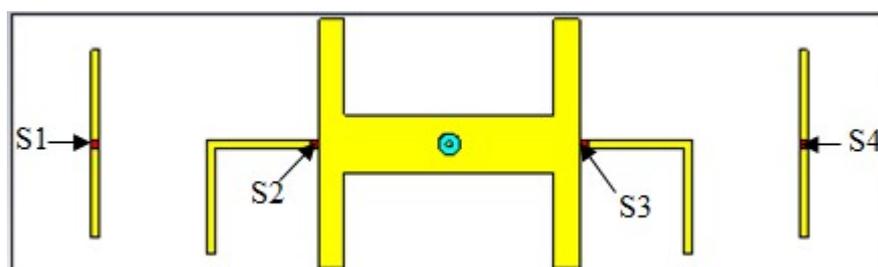


**Figure III.13** : Représentation polaire du diagramme de rayonnement de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement obtenu est formé de deux faisceaux orientés suivant la direction des x et le gain est de 6.86 dBi.

### III.3.3 Antenne dipôle bi-faisceau reconfigurable en diagramme de rayonnement

Pour obtenir la reconfigurabilité en diagramme de rayonnement, c'est-à-dire pour qu'on arrive à rediriger le diagramme de rayonnement, nous avons inséré quatre diodes PIN  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  sur la face arrière du substrat, deux de ces diodes PIN sont insérées au milieu des deux directeurs, tandis que les deux autres sont implantées entre chaque réflecteur et le bras du dipôle correspondant, comme le montre la Figure III.14.



**Figure III.14** : Intégration des diodes PIN.

Suivant l'état des diodes, l'antenne est capable de rayonner dans deux directions différentes. Les diodes PIN sont remplacées par des rubans, l'état off est traduit par l'absence du ruban alors que l'état On est traduit par la présence du ruban.

Lorsque le mode M1 est activé, tous les switches sont à l'état ON et sont remplacés par des rubans.

Le tableau III.4 donne le fonctionnement de l'antenne ainsi que l'état des switches pour chaque mode.

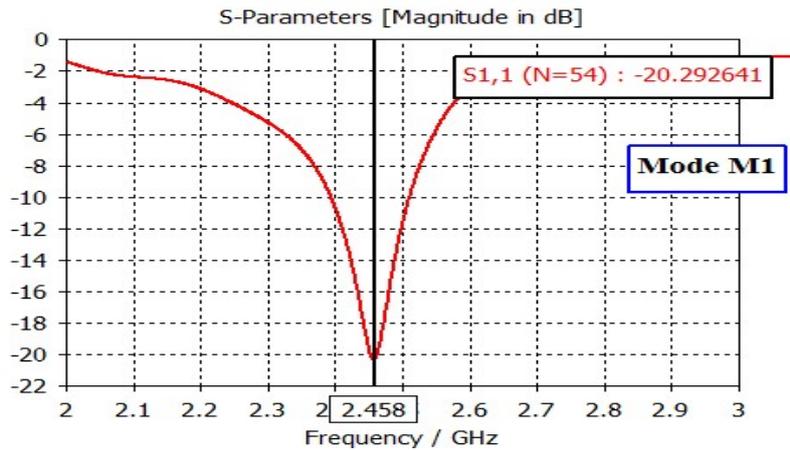
Mode	Configuration	Switch S1	Switch S2	Switch S3	Switch S4
<b>Mode1</b>	Tous les dipôles et les directeurs sont actifs	On	On	On	On
<b>Mode2</b>	Dipôle 1 et Directeur 1 actifs	On	On	Off	Off
<b>Mode 3</b>	Dipôle 2 et Directeur 2 actifs	Off	Off	On	On
<b>Mode 4</b>	Seul le dipôle 1 est actif	Off	On	Off	Off
<b>Mode 5</b>	Seul le dipôle 2 est actif	Off	Off	On	Off

**Tableau III.4** : Les modes de fonctionnement de l'antenne reconfigurable.

### III.3.4 Résultats de simulation de l'antenne dipôle bi-faisceau reconfigurable en diagramme de rayonnement

L'implantation des interrupteurs comme décrit ci-dessus permet la commande électronique des rayonnements à la fréquence de fonctionnement en activant ou en désactivant un dipôle élémentaire et / ou des directeurs. Afin de mieux comprendre le mécanisme de rayonnement de la structure, nous avons montré les coefficients de réflexion, le gain et le diagramme de rayonnement 2D / 3D pour les trois modes considérés.

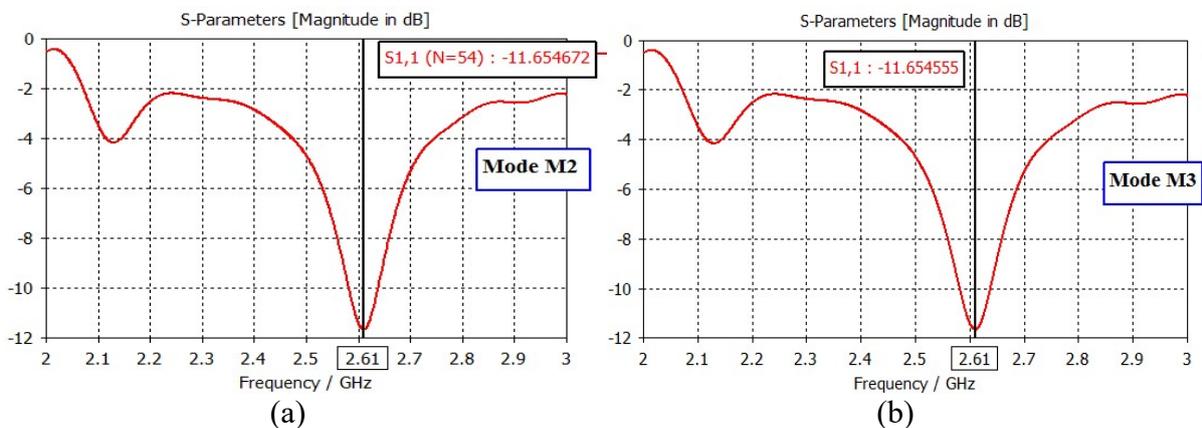
La Figure III.15 montre le coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne pour le mode M1. On remarque que l'antenne se comporte de la même manière que l'antenne initiale.



**Figure III.15** : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne pour le mode M1.

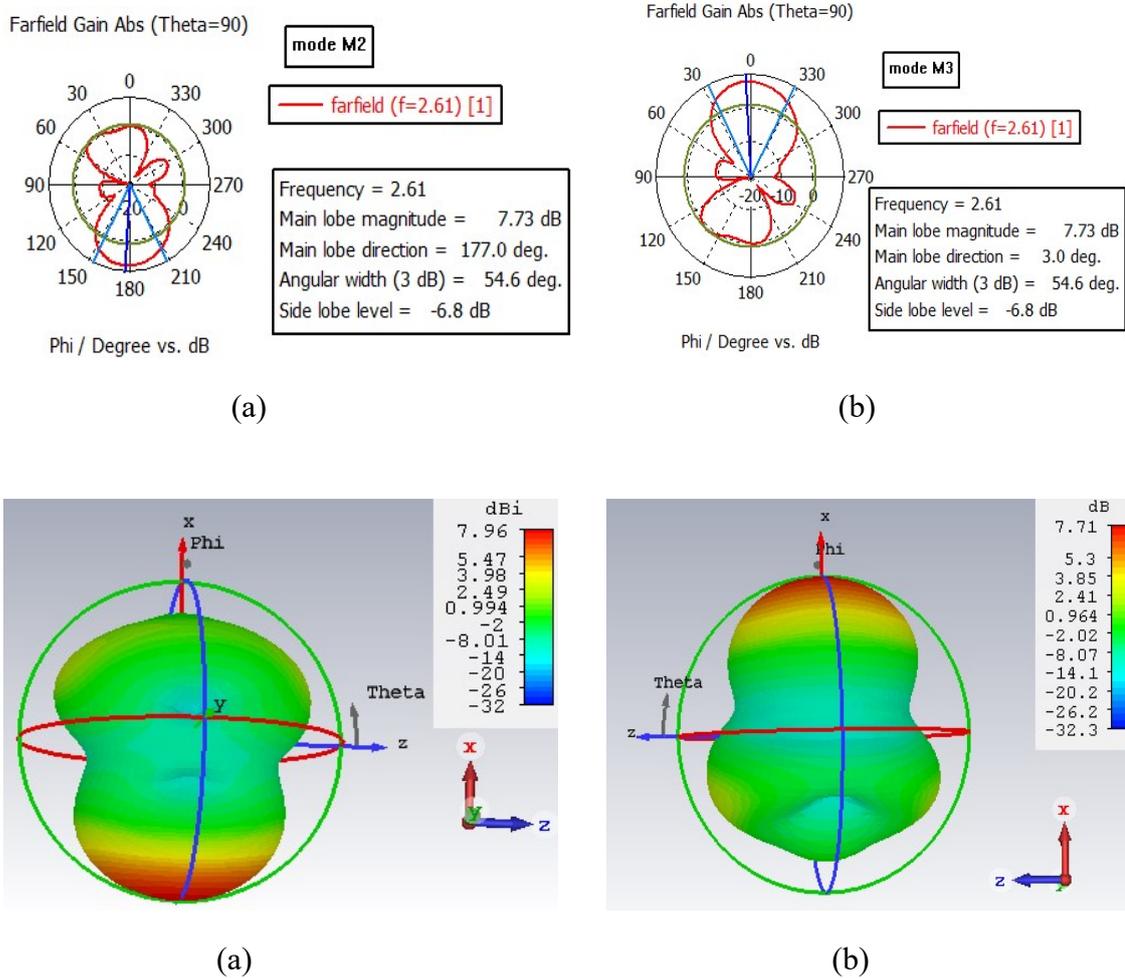
Pour le mode M2, on remarque un léger décalage de la fréquence de résonance de l'antenne dipôle vers des fréquences plus élevées comme le montre la Figure III.16.

La figure III.16 montre le coefficient de réflexion pour les deux modes M2 et M3. Nous remarquons que la fréquence de résonance de l'antenne est la même pour les deux modes et nous constatons aussi un léger décalage de cette fréquence vers des fréquences plus élevées.



**Figure III.16** : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne (a) : mode M2, (b) : mode M3.

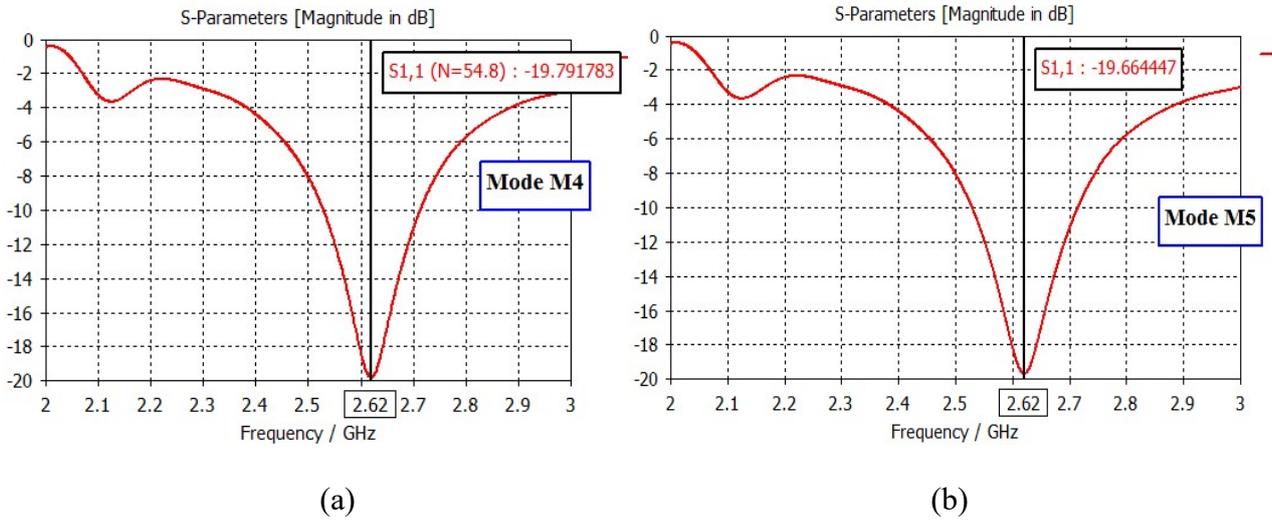
La Figure III.17 montre les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D, pour le mode M2 et M3. Nous remarquons que l'antenne se comporte de la même manière dans la direction des  $x$  croissants et des  $x$  décroissants pour les deux modes M2 et M3 et l'angle d'ouverture est d'environ  $54.6^\circ$ .



**Figure III.17:** Diagramme de rayonnement en 2D et en 3D en mode M2 et M 3 à  $f = 2.616$  GHz : (a) mode M2 et (b) mode M3.

Pour le mode M4 et M5, un seul dipôle (dipôle1 ou dipôle2) est activé. La figure III.18 présente les coefficients de réflexion  $S_{11}$ . Comme pour les modes M2 et M3, là aussi nous avons la même fréquence de résonance pour les deux modes.

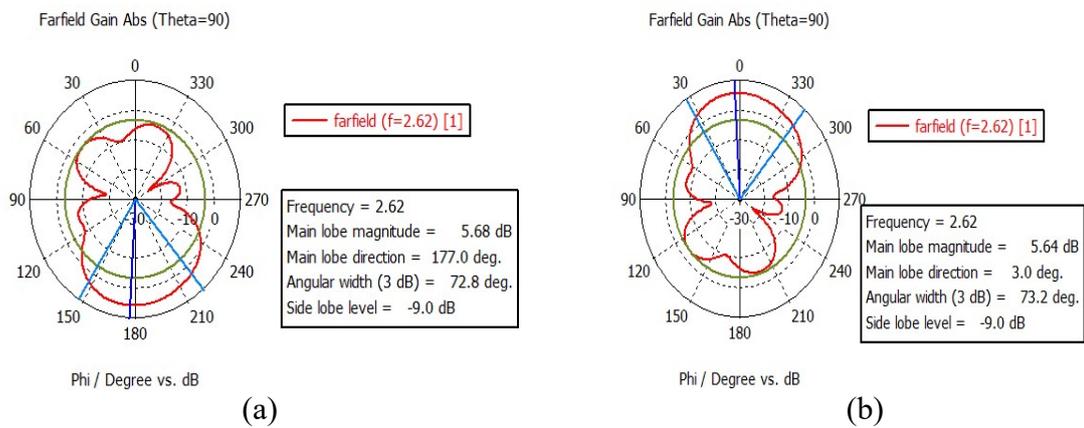
Nous remarquons un léger décalage de la fréquence de résonance vers les grandes fréquences, pour les quatre modes.

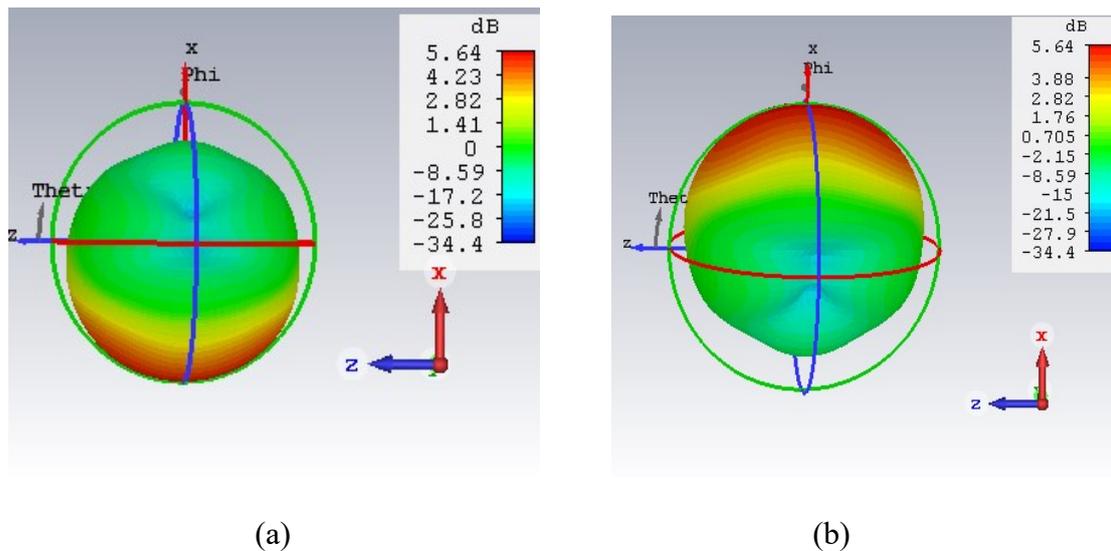


**Figure III.18** : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne pour les deux modes

(a) : mode M4 et (b) : mode M5.

Les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D correspondant au mode M4 et M5 sont représentés sur la figure 3.19. Dans les deux modes, l'antenne se comporte de la même manière dans la direction des x croissants et des x décroissants.





**Figure III.19** : Diagramme de rayonnement en 2D et en 3D en mode M4 et mode M5

à  $f = 2.62$  GHz : (a) mode M4 et (b) mode M5.

Les résultats de simulation montrent bien que l'antenne conçue est une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement.

### III.4 Conception d'une Antenne reconfigurable en polarisation

Une méthode simple qui permet d'obtenir une antenne reconfigurable en polarisation est l'insertion des fentes dans l'élément rayonnant. La longueur de ces fentes est commandée par l'utilisation des diodes PIN.

#### III.4.1 Géométrie de l'antenne

La structure de l'antenne conçue est illustrée dans la figure III.20 [39]. Elle se compose d'un patch circulaire de rayon  $r = 17.9$  mm gravé sur la face supérieure du substrat de type Taconic RF-35, d'épaisseur  $h = 1.52$  mm, de longueur  $L = 55$  mm, de largeur  $W = 55$  mm, de permittivité  $\epsilon_r = 3.52$  et de tangente de perte 0.0018.

Quatre fentes, qui ont une longueur de  $L_s = 5$  mm, et une largeur  $W_s = 1$  mm, sont gravées au coin du patch circulaire. Elles sont placées à la distance de  $L_p = 15.3$ , du centre du patch.

L'antenne est alimentée par sonde coaxiale. Le point d'alimentation (paramètre  $d = 5.5$  mm) est positionné sur la diagonale de l'élément rayonnant. Le changement de l'état des commutateurs (diode PIN) change par conséquent la longueur de la fente, créant ainsi une

différence de longueur entre la fente dans l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées. Ceci, en conséquence, déterminera les types de polarisation excités : polarisation linéaire LP, polarisation circulaire gauche LHCP ou polarisation circulaire droite RHCP (figure III.21).

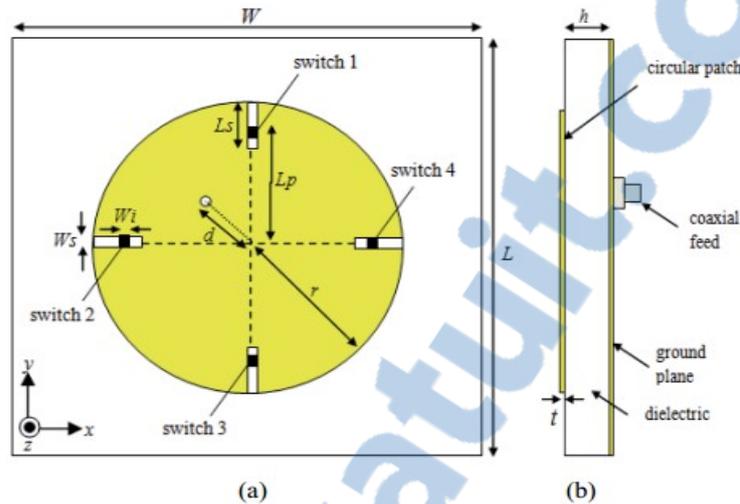


Figure III.20 : Géométrie de l'antenne patch circulaire : (a) vue de face ; (B) vue de côté.

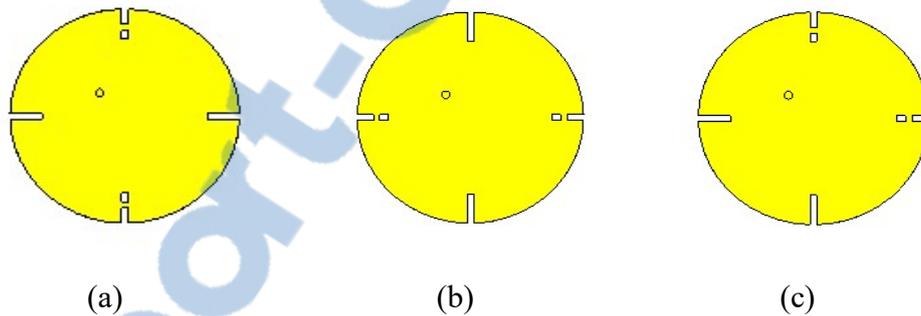


Figure III.21 : Antenne patch reconfigurable en polarisation : (a) Configuration 1 ; (b) Configuration 2 ; (c) Configuration 3.

Le tableau III.5 donne les configurations possibles en fonction de l'état des commutateurs.

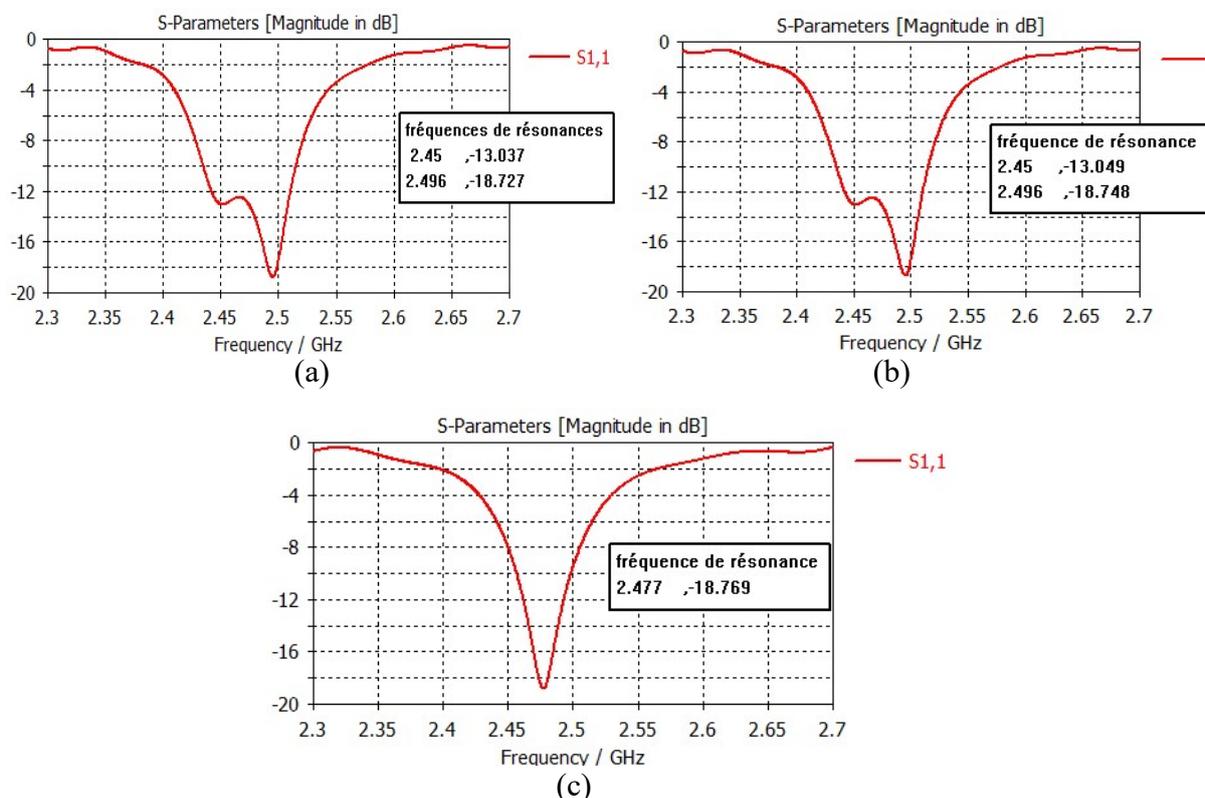
Configuration	L'état des Switches			
	S1	S2	S3	S4
C1	ON	OFF	ON	OFF
C2	OFF	ON	OFF	ON
C3	ON	ON	OFF	OFF

Tableau III.5 : Configurations des commutateurs de l'antenne simulée.

Dans la simulation nous avons remplacé les diodes PIN par des rubans, avec des dimensions de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ , l'état On est traduit par la présence du ruban et l'état Off est modélisé par l'élimination du ruban.

### III.4.2 Résultat de simulation de l'antenne patch circulaire reconfigurable en polarisation

La figure III.22 montre le coefficient de réflexion de l'antenne conçue pour les trois configurations des commutateurs. Les résultats de simulation obtenus montrent qu'on a une bonne adaptation d'impédance pour toutes les configurations.



**Figure III.22** : Coefficient de réflexion de l'antenne patch circulaire

(a) Configuration 1 ; (b) Configuration 2 ; (c) Configuration 3.

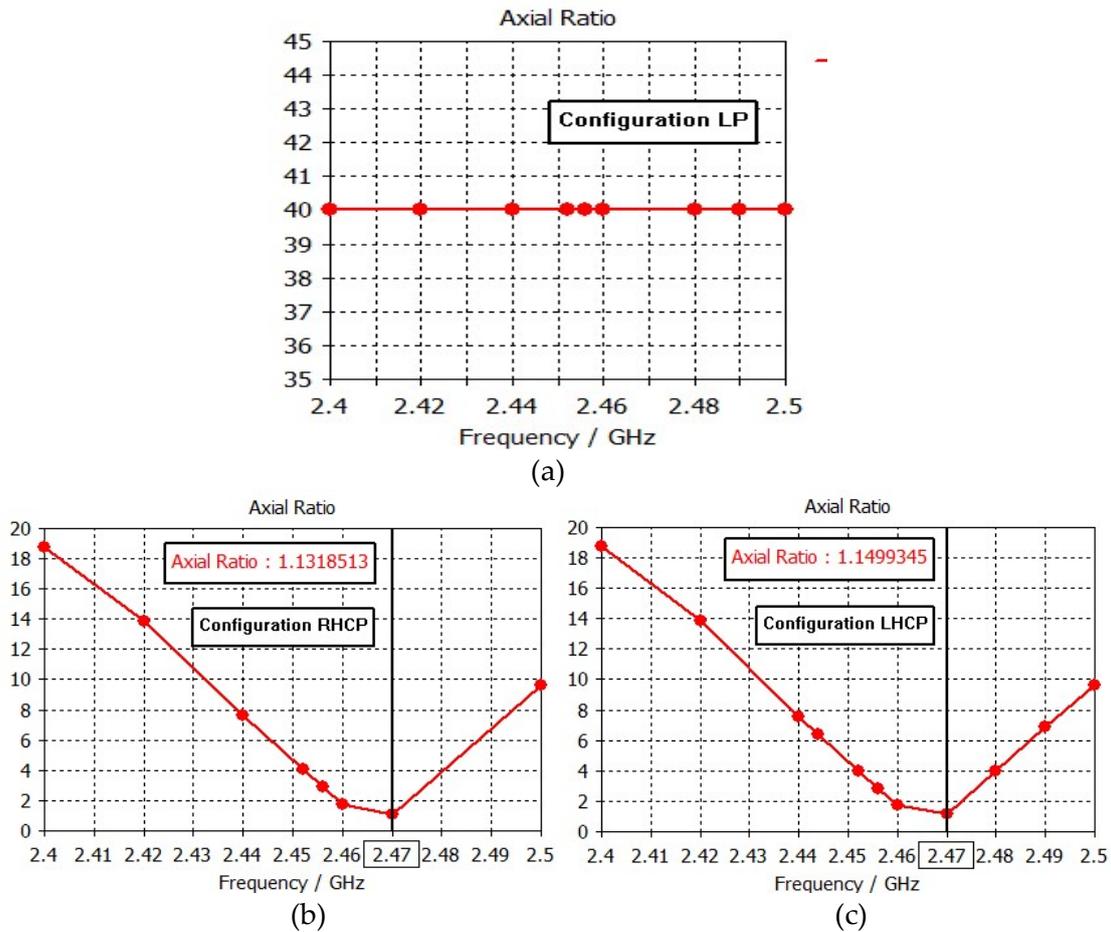
Les largeurs de bande à 10 dB (BW) de  $S_{11}$  sont de 72 MHz (2,438 ÷ 2,51 GHz), de 83 MHz (2,437 GHz à 2,52 GHz) et de 40 MHz (2,46 - 2,50 GHz) pour C1-LHCP, C2-RHCP et C3- LP, respectivement.

Pour déterminer le type de polarisation nous avons tracé, sur la figure III.23, le rapport axial (axial ratio (AR)) qui est calculé à partir de l'équation suivante :

$$AR = \frac{(|E_{RHCP}| + |E_{LHCP}|)}{(|E_{RHCP}| - |E_{LHCP}|)} \quad (III.1)$$

$$\text{Avec : } E_{RHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{\theta} + jE_{\varphi})$$

$$E_{LHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{\theta} - jE_{\varphi})$$



**Figure III.23** : Rapport axial : (a) Configuration 3, (b) Configuration 2, (c) Configuration 1.

Un rapport axial inférieur à 3 dB correspond à une polarisation circulaire gauche ou droite.

Le résultat obtenu et représenté sur la figure III.23 montre que le rapport axial est au dessous de 3dB pour les deux configurations C1 et C2, donc la polarisation est circulaire et peut être gauche ou droite.

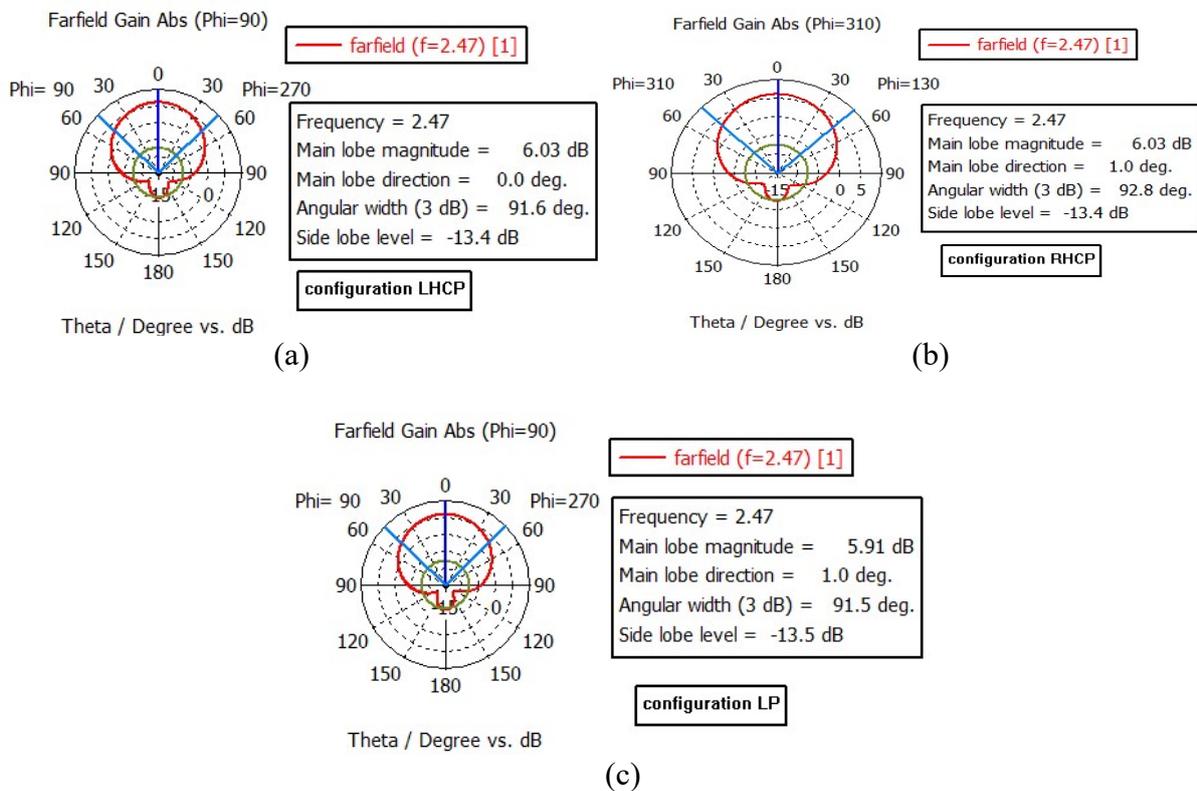
La polarisation linéaire est obtenu quand les switches S1 et S2 sont activés. On remarque que l'antenne fonctionne à la fréquence 2.477 GHz. L'activation des switches S2 et S4 engendre un basculement de l'antenne vers une polarisation circulaire droite (RHCP) aux fréquences 2.45, 2.496 GHz. La polarisation circulaire gauche (LHCP) est obtenue lorsque les switch S1 et S3 sont à l'état On, cet état correspond à la troisième configuration. Les fréquences de résonance dans ce cas sont 2.45 et 2.496 GHz.

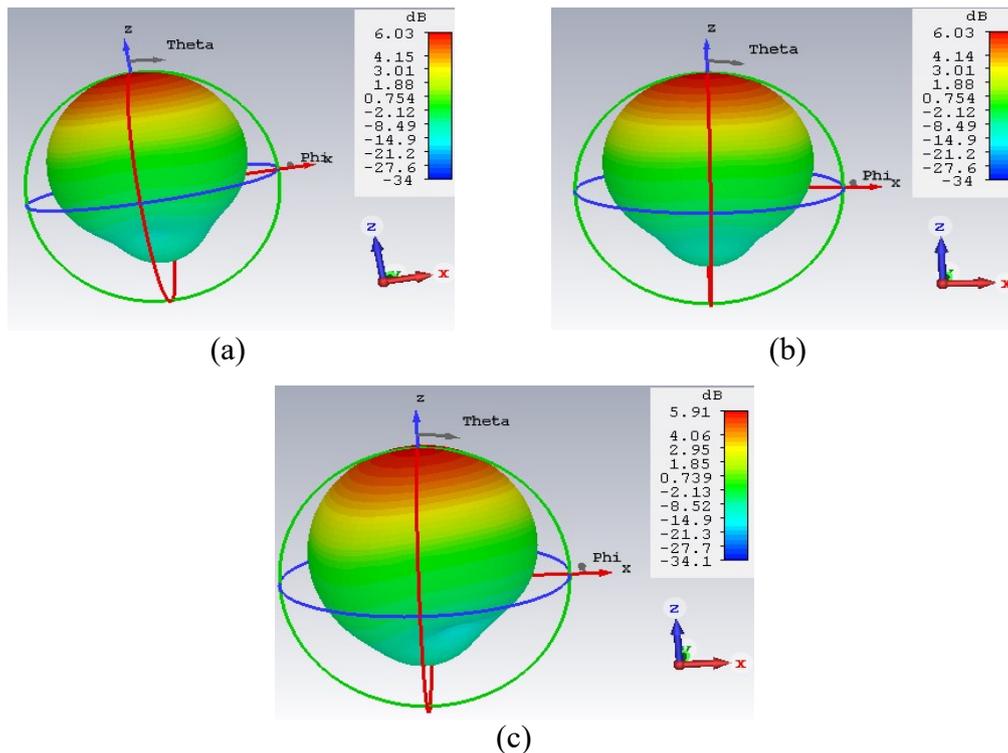
Le tableau III.6 résume le type de polarisation en fonction de l'état des commutateurs.

Configuration	L'état des Switches				Mode de Polarisation
	S1	S2	S3	S4	
<b>C1</b>	ON	OFF	ON	OFF	<b>LHCP</b>
<b>C2</b>	OFF	ON	OFF	ON	<b>RHCP</b>
<b>C3</b>	ON	ON	OFF	OFF	<b>LP</b>

**Tableau III.6 :** Type de polarisation en fonction de l'état des commutateurs.

Les diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D, pour les trois modes à la fréquence 2.47 GHz sont représentés sur la figure III.24.





**Figure III.24** : Diagramme de rayonnement en 2D et 3D pour les 3 modes à la fréquence 2.47 GHz : (a) C1-LHCP ; (b) C2-RHCP ; (C) C3-LP.

Lors du basculement d'une polarisation circulaire droite à une polarisation circulaire gauche l'antenne garde les mêmes caractéristiques de rayonnement à savoir le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , les diagrammes de rayonnement et le gain.

D'après les résultats obtenus on peut conclure que l'antenne conçue est une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation des antennes reconfigurables conçues.

Trois types d'antennes reconfigurables ont été conçus. La première antenne simulée est une antenne multi-bandes reconfigurable en fréquence basée sur un patch carré avec fente fractale au centre. La seconde antenne, reconfigurable en diagramme de rayonnement, est composée par deux dipôles élémentaires. Finalement la troisième antenne conçue est un patch circulaire reconfigurable en polarisation.

# *Conclusion générale*



## Conclusion générale

Les antennes reconfigurables suscitent depuis quelques années un intérêt croissant, dans la mesure où elles apparaissent de plus en plus apporter des solutions nouvelles et enrichissantes à l'interface entre le milieu et l'étage d'extrémité des terminaux ou stations mettant en œuvre des approches de radio flexible. En effet, les antennes reconfigurables offrent la possibilité de déléguer à l'antenne elle-même une partie des fonctionnalités généralement réservées à l'étage radio ou au traitement du signal numérique.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur les antennes reconfigurables. Les types de reconfiguration étudiés concernent la fréquence, la polarisation et le diagramme de rayonnement. Nous nous sommes intéressés à l'optimisation et à la conception d'antennes reconfigurables dédiées pour les systèmes de télécommunication multistandard.

Dans le premier chapitre nous avons présenté une généralité sur les antennes imprimées. Nous avons commencé tout d'abord par la structure et les techniques d'alimentation utilisées, par la suite, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière et les méthodes d'analyse pouvant tirer profit de ces performances. Ce chapitre clôture par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients des antennes imprimées.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les antennes reconfigurables dont le développement est en plein essor en raison des nouvelles fonctionnalités qu'elles proposent. La définition, les différentes techniques de production de l'agilité ainsi qu'une classification de ces antennes reconfigurables selon leurs fonctionnalités avec quelques exemples illustratifs, ont alors été présentés.

Trois types d'antennes reconfigurables ont été conçus dans le troisième chapitre. La première antenne optimisée et caractérisée est une antenne multi-bandes reconfigurable en fréquence basée sur un patch carré avec fente fractale au centre. La seconde antenne est composée par deux dipôles élémentaires reconfigurables en diagramme de rayonnement. Finalement la troisième antenne conçue est un patch circulaire reconfigurable en polarisation.

Les résultats de simulation obtenus par le logiciel CST ont montré que les antennes conçues présentent de bonnes performances. La perspective à notre travail est d'essayer des réseaux linéaires d'antennes reconfigurables dans le but d'augmenter la directivité de la structure globale.

# *Références Bibliographiques*



## Références Bibliographiques

- [1] Paul F. Combes, "Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes," Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [2] K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, No. 1, pp. 2–24, January 1981.
- [3] J. D. BERAMOU and B. DESPRÈS, "A domain de composition Method for the Helmholtz equation and related optimal control problems". INRIA , Feb. 1996.
- [4] K.F. Lee, "Principles of antennas theory", John Wiley& Sons,U.S.A,1984.
- [5] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", Second Edition. United States of America. John Wiley& Sons, pp. 734, 1997.
- [6] B. Belentepe, "A Simple Equivalent Model for Electromagnetically Coupled Microstrip Patch Antenna", *Journée Internationale de Nice sur les antennes, France, Symposium proceeding*, pp. 91-94, Nov1994.
- [7] D.M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line" *Elect Letters*, vol. 21, pp. 49-50, Jan.1985.
- [8] O. Barkat, "Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrice dans la bande millimétrique" Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [9] P. B. Katehi, D. R. Jackson et N.G. Alexopoulos, "Microstrip dipoles" *Handbook of microstrip antennas*, pp. 275-310, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1989.
- [10] B. Mekimah, "Etude du fonctionnement en mode bi fréquence des patches microbandes empilés et excentrés", mémoire de magister en électronique option micro-ondes et traitement du signal, Université de kasdi merbah Ouargla, 2007.
- [11] E. H. Newman and P. Tulyathan, "Analysis of microstrip antennas using moment methods," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-29, pp. 47-53, Jan. 1981.
- [12] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*,

vol. 23, pp. 377-382,1981.

[13] P. A. Tirkas, and C. A. Balanis, “ Finite-difference time-domain technique for radiation by horn antennas ”, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest, vol. 3, pp. 1750-1753,1991.

[14] S. Akhtarzad, and P. B. Johns, “Three dimensional transmission line matrix computer analysis of microstrip Resonators”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech, vol.23, pp. 990-997, December 1975.

[15] R. Mittra and T. Itoh, “Analytical and numerical studies of the relative convergence phenomenon using in the solution of an integral equation by moment method”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. MTT-20, n° 2, pp. 96-104, February 1972.

[16] Juan R. Mosing, Fred E. Gardiol, "Rayonnement d'une antenne microruban de forme arbitraire," Ann. Télécommun., vol. 40, no.3-4, 1985.

[17] H. Legay, R. Gillard, J. Citerne, Gerard, " Effet d'un trou métallisé sur les caractéristiques de rayonnement d'une antenne plaque microruban alimentée par une ligne coaxiale à travers le plan de masse," Ann. Télécommun., vol.46, no.7-8, 1991.

[18] : L. Petit, "Antennes Reconfigurables A Base De Mems Rf ". Micro et nanotechnologies / Microélectronique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007.

[19] C. G. Christodoulou, Y. Tawk, S. A. Lane, S. R. Erwin, “Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications”, Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 7, pp. 2250 – 2261, July 2012.

[20] I. Ben Trad, “Antennes Agiles pour les Télécommunications Multistandards, ” Thèse soutenue publiquement le 29.10.2014, Université de Rennes..

[21] Mowler, M.;Lindmark, B.; Oberhammer, J.; Stemme, G., "A 2-bit reconfigurable meander slot antenna with RF-MEMS switches," Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE , vol.2A, no., pp. 396-399 vol. 2A, 3-8 July 2005

[22]. F. Yang and Y. Rahmat-Samii, “Patch antennas with switchable slots (PASS) in wireless communications : Concepts, designs, and applications, IEEE Antennas Propagat. Mag., vol. 47, pp. 13–29, Feb. 2005.

[23] S. SUFYAR, ”Contribution à l'étude d'Antennes Miniatures Reconfigurables en

Fréquence par Association d'éléments actifs '' ,14 Décembre 2011,

[24]. Yuan, Y. Damgaci, H. Mopidevi and B.A. Cetiner, "RF-NIMEMS Integrated Reconfigurable Antenna for Public Safety Applications, EUCAP 2011.

[25] S. Jalali Mazlouman, X. J. Jiang, A. Mahanfar, C. Menon and Rodney G. Vaughan, "A Reconfigurable Patch Antenna Using Liquid Metal Embedded in a Silicone Substrate," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 12, pp. 4406-4412, December 2011.

[26] S. Loizeau ,''Conception et Optimisation d'antennes reconfigurables multifonctionnelles et ultra large bande'', Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2009.

[27] Pei-Yuan, Q., et al., ''Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna''. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, issue 8, pp. 2742-2747, 2010.

[28]S. DAKHLI, ''Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par métamatériaux'', Thèse soutenue à Supélec Parisle 15 Juin 2015, Université de Rennes.

[29] Huff, G.H., et al., Directional reconfigurable antennas on laptop computers: Simulation, measurement and evaluation of candidate integration positions. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, issue 12, pp. 3220-3227, 2004.

[30]: T. Duc Nguyen, ''Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive '' , Université Grenoble Alpes, 2012.

[31] Sung-Jung, W. and M. Tzyh-Ghuang, A Wide band Slotted Bow-Tie Antenna With Reconfigurable CPW-to-Slotline Transition for Pattern Diversity. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 6, issue 2, pp. 327-334, 2008.

[32] Chang won, J., et al., Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, issue 2, pp. 455-463, 2006

[33] Jung, C.W., M.J. Lee, and F. De Flaviis, " Reconfigurable dual-band antenna with high frequency ratio (1.6:1) using MEMS switches ". Electronics Letters, vol. 44, issue 2, pp. 76-77, 2008.

[34] R. N. Simons, D. Chun, and L. P. B. Katehi, " Polarization reconfigurable patch antenna using micro electromechanical systems (MEMS) actuators", Proc. IEEE/URSI, Symposium on Antennas and Propagation, vol.1, 2002, pages 6-9.

- [35] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Patch Antenna with Switchable Slots (PASS): Reconfigurable Design for Wireless Communications", 2002 IEEE AP-S Digest, vol.1, June 2002, pages 462-465.
- [36] F. Yang and Y. Rahmat-Samii: "Patch Antenna with Switchable Slot (PASS): Dual Frequency Operation", Microwave Optical and Technology Letters, vol.31, no.3, November 2001, pages 165-168.
- [37] I. Ben Trad, H. Rmili, J. Marie Floc'h, W. Zouch and M. Drissi, "Planar Square Multiband Frequency Reconfigurable Micro-strip Fed Antenna with Quadratic Koch-Island Fractal Slot for Wireless Devices," Microwave and Optical Technology Letters.
- [38] J. M. Floc'h, A. Al. S. Ahmad and Y. Kokar," Dual-Beam Antenna Design for Autonomous Sensor Network Applications," International Journal of Antennas and Propagation, vol11, pp 453-456, 2012.
- [39] M. N. Osman, M. K. A. Rahim, P. Gardner, M. R. Hamid, M. F. Mohd Yusoff, H. A. Majid, "An Electronically Reconfigurable Patch Antenna Design for Polarization Diversity with Fixed Resonant Frequency," Radio engineering, vol24, pp 45-53, 2015.