

# UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Electronique et des télécommunications



Mémoire

## MASTER 2 ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par :

DIDA Houdaifa et BOUGHRARI Ala Eddine

### Thème

Conception et simulation d'antenne micro ruban  
à polarisation circulaire pour les applications  
WIFI

Soutenu publiquement

Le 29/06/2019

Devant le jury

M. BOULESBAA Mohammed	MCA	Président	UKM Ouargla
M. MEKIMAH Boualem	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M. BOUROUINA Hicham	MCB	Co-encadreur	E S Bou'saada
Melle GUEMOUH Samia	MCB	Examinatrice	UKM Ouargla
Melle BOUCHOUAREB Rachida	MCB	Invitée	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2018/2019

## Dédicaces

*Nous dédions ce travail :*

*A tous les membres de la famille Dida et de la famille  
Bouhrari.*

*À nos mères et pères qui ont été crédités de succès tout au  
long de notre carrière.*

*A notre encadreur, Mr «MEKMAH Boualem»  
pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir fait  
bénéficier de ses compétences scientifiques et  
aussi pour sa disponibilité.*

*Au docteur BOUGHARARI Moussa, père de  
BOUGHARARI Ala Eddine, décédé il y a quelques  
jours, nous lui souhaitons la miséricorde et le pardon.*

*À ma chère mère, MEKNASI Salima, pour votre  
bien et pour vous, ma mère, je suis aujourd'hui à ce  
stade de la science, merci beaucoup pour ma mère.*

*DIDA Houdaïfa et BOUGHARARI Ala Eddine.*

## *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier (ALLAH) le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer par ce modeste travail notre gratitude, notre reconnaissance, nos grands remerciements à notre encadreur, Mr «MEKIMAH Boualem» pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et aussi pour sa disponibilité.*

*Nous remercions les membres de jury, le Co-encadreur les gens qui vous aidez pour réaliser ce travail*

*Nous remercions également nos chers parents, qui ont tenu à nous élever à ce niveau d'éducation, ainsi qu'à tous les membres de la famille de BOUGHRARI et à la famille du Dida.*

*Nous remercions particulièrement Dr. BOUGHRARI Moussa, à qui nous souhaitons la miséricorde et le pardon.*

*Je voudrais remercier ma chère mère, MEKNESI Salima, qui a été invitée à rejoindre mes études et m'aider à atteindre ce niveau.*

*Merci à tous et à toutes.*

***DIDA Houdaïfa et BOUGHRARI Ala Eddine***

**Table des matières**

Dédicaces .....	I
Remerciements.....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	VI
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Liste des symboles .....	XI
Introduction générale .....	1
<b><i>Chapitre I : Généralités sur les antennes patches</i></b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition d'une antenne .....	3
I.2.1 Antenne d'émission .....	3
I.2.2 Antenne de réception .....	3
I.3 Paramètres caractéristiques d'une antenne .....	4
I.3.1 Diagramme de rayonnement .....	4
I.3.2 Directivité .....	5
I.3.3 Gain.....	6
I.3.4 Impédance d'entrée.....	7
I.3.5 Bande Passante .....	8
I.3.6 Facteur de qualité.....	8
I.3.7 Efficacité de l'antenne .....	9
I.3.8 Coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire .....	10
I.4 Antennes microbandes.....	11
I.4.1 Description d'antenne microbande .....	11
I.4.2 Alimentation des antennes microbandes.....	12

---

## Table des Matières

---

I.4.2.1 Alimentation par câble coaxial.....	13
I.4.2.2 Alimentation par ligne microbande.....	13
I.4.2.3 Alimentation par ouverture .....	14
I.4.2.4 Alimentation de proximité .....	15
I.4.2.5 Comparaison entre les types d'alimentation .....	16
I.4.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch .....	16
I.4.4 Les avantages et les inconvénients des antennes microbandes .....	17
I.4.5 Les applications des antennes microbandes.....	18
I.4.5.1 Communication mobile et par satellite .....	18
I.4.5.2 Systèmes Radar .....	18
I.4.5.3 Applications médicales .....	18
I.4.5.4 Systèmes avioniques .....	18
1.4.5.5 Système de positionnement global (GPS).....	19
1.4.5.6 Systèmes sécurisés.....	19
I.5 Conclusion.....	19
 <b><i>Chapitre II : Polarisation des ondes électromagnétiques</i></b>	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Propagation des ondes électromagnétiques.....	20
II.2.1 Vecteur de Poynting .....	22
II.3 Polarisation d'une onde électromagnétique .....	22
II.3.1 Définition de la polarisation .....	22
II.3.2 Types de polarisations .....	23
II.3.2.1 Polarisation elliptique .....	23
II.3.2.2 Polarisation Linéaire .....	25
II.3.2.3 Polarisation circulaire .....	27
II.3.3 Rapport axial .....	29
II.3.4 Antennes patches à polarisation circulaire .....	29

---

## Table des Matières

---

II.3.5 Facteur de perte de polarisation et efficacité.....	30
II.4 Conclusion.....	32
<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b>	
III.1 Introduction.....	33
III.2 Logiciels de simulation utilisés.....	33
III.2.1 Logiciel CST .....	33
III.2.2 Logiciel HFSS .....	33
III.3 Conception de l'antenne .....	34
III.3.1 Antenne patch à la fréquence 2.5 GHz.....	35
III.3.2 Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz.....	36
III.3.3 Antenne patch double bandes à 2.5 et 5.5 GHz .....	37
III.4 Résultats et discussions.....	38
III.4.1 Antenne patch à la fréquence de 2.5 GHz.....	38
III.4.1.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS .....	40
III.4.2 Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz.....	42
III.4.2.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS .....	44
III.4.3 Antenne patch double bandes de fréquences 2.5 et 5.5 GHz.....	46
III.4.3.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS .....	49
III.5 Conclusion .....	52
Conclusion générale.....	53
Bibliographie .....	54
Annexe.....	I
Résumé.....	IV

Liste des Figures

**Chapitre I : Généralités sur les antennes patches**

Figure I. 1 : Système de transmission ----- 4

Figure I. 2 : DDR d'antenne ----- 4

Figure I. 3 : DDR des antennes (a) Omnidirectionnel (b) directionnel et (c) isotrope ----- 5

Figure I. 4 : Antenne en mode d'émission ----- 7

Figure I. 5 : Bande passante à partir du TOS (ou S11)----- 8

Figure I. 6 : Antenne patch alimentée par ligne microbande----- 12

Figure I. 7 : Différentes formes du patch ----- 12

Figure I. 8 : Alimentation par câble coaxial ----- 13

Figure I. 9 : Alimentation par ligne microbande----- 14

Figure I. 10 : Circuit équivalent d'une antenne patch alimenté par sonde coaxiale et ligne micro ruban----- 14

Figure I. 11 : Alimentation à travers une fente----- 14

Figure I. 12 : Circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture----- 15

Figure I. 13 : Alimentation de proximité----- 15

Figure I. 14 : Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité----- 16

Figure I. 15 : Distribution de charge de champ dans l'antenne patch ----- 17

Figure I. 16 : Configuration du champ électrique du radiateur ----- 17

**Chapitre II : polarisation des ondes électromagnétiques**

Figure II. 1 : Onde électromagnétique à polarisation linéaire----- 20

Figure II. 2 : Polarisation elliptique----- 23

Figure II. 3 : Différents types de polarisation:(a) polarisation elliptique (b) polarisation linéaire (c) polarisation circulaire ----- 25

Figure II. 4 : Polarisation linéaire ----- 25

Figure II. 5 : Polarisation linéaire de l'onde électromagnétique : (a) n pair (b) n impair----- 26

Figure II. 6 : Polarisation linéaire : (a) horizontale et (b) verticale----- 27

Figure II. 7 : Polarisation circulaire à séquence spatiale et à séquence temporelle dans un plan fixe----- 27

Figure II. 8 : Convention de polarisation : (a) polarisation main droite et (b) polarisation main gauche ----- 28

Figure II. 9 : Antennes patch à polarisation circulaire simple excitation (a) carré à coins coupés (b) alimenté dans le coté, (c) avec une fente, (d) circulaire coupé ----- 29

---

## Liste des Figures

---

Figure II. 10 : Antennes à polarisation circulaires à double excitations. -----	30
Figure II. 11 : Vecteurs unitaires de l'onde incidente ( $\mathbf{uw}$ ) et l'antenne ( $\mathbf{ua}$ ) et le facteur de perte de polarisation (PLF)-----	31
Figure II. 12 : Facteurs de pertes de polarisation linéaire (PLF) pour les antennes à ouvertures et antennes filaires-----	32
<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b>	
Figure III. 1 : Interface du logiciel CST Studio suite-----	34
Figure III. 2 : Interface du logiciel HFSS -----	34
Figure III. 3 : Antenne patch à fréquence 2.5 GHz à polarisation circulaire-----	35
Figure III. 4 : Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz à polarisation circulaire-----	36
Figure III. 5 : Antenne patch globale, fonctionne aux fréquences 2.5 GHz et 5.5 GHz-----	37
Figure III. 6 : Coefficient de réflexion S11 de la première antenne proposée en fonction Fréquence pour les trois formes du patch -----	38
Figure III. 7 : Gain de la première antenne proposée en fonction de la fréquence pour les trois formes du patch -----	39
Figure III. 8 : Rapport axial de la première antenne proposée pour les trois formes du patch-----	39
Figure III. 9 : Efficacité de la première antenne proposée-----	40
Figure III. 10 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée à 2.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	40
Figure III. 11 : Gain de l'antenne proposée à 2.5 GHz -----	41
Figure III. 12 : Rapport axial de l'antenne proposée à 2.5 GHz simulé par CST et HFSS-----	41
Figure III. 13 : DDR 3D de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	42
Figure III. 14 : DDR 2D polaire de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	42
Figure III. 15 : Coefficient de réflexion S11 de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch -----	43
Figure III. 16 : Gain de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch -----	43
Figure III. 17 : Rapport axial de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch	43
Figure III. 18 : Efficacité de la deuxième antenne proposée pour la quatrième forme du patch -----	44
Figure III. 19 : Coefficient de réflexion S11 de la deuxième antenne proposée, simulé par CST et HFSS -----	44



---

## Liste des Figures

---

Figure III. 20 : Gain de la deuxième antenne proposée, simulé par CST et HFSS-----	45
Figure III. 21 : Rapport axial de la deuxième antenne proposée à 5.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	45
Figure III. 22 : DDR 3D de la deuxième antenne proposée à fréquence de 5.5 GHz, simulé par le simulateur CST et HFSS -----	46
Figure III. 23 : DDR 2D polaire de la deuxième antenne proposée à la fréquence de 5.5 GHz, simulé par le simulateur HFSS et HFSS -----	46
Figure III. 24 : Antenne globale double bande: (a) sans coupure (b) avec coupure -----	47
Figure III. 25 : Coefficients de réflexion S11 de l'antenne proposée globale-----	47
Figure III. 26 : Gain de l'antenne proposée globale -----	48
Figure III. 27 : Rapport axial de l'antenne proposée globale-----	48
Figure III. 28 : Efficacité de l'antenne globale double bandes avec coupure -----	48
Figure III. 29 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne double bandes globale simulé par CST et HFSS -----	49
Figure III. 30 : Gain de l'antenne double bandes globale, simulé par CST et HFSS -----	49
Figure III. 31 : Rapport axial de l'antenne double bande globale, simulé par CST et HFSS -	50
Figure III. 32 : DDR 3D de l'antenne globale double bandes simulé par CST -----	50
Figure III. 33 : DDR 3D de l'antenne globale double bandes simulé par HFSS -----	50
Figure III. 34 : DDR 2D polaire de l'antenne globale double bandes à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	51
Figure III. 35 : DDR 2D polaire de l'antenne globale double bandes à la fréquence 5.5 GHz simulé par CST et HFSS -----	51

**Liste des tableaux**

***Chapitre I : Généralités sur les antennes patchs***

*Tableau I. 1 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation-----* 16

***Chapitre III : Résultats et discussions***

*Tableau III. 1 : Valeurs des dimensions de l'antenne patch proposée à la fréquence 2.5 GHz  
-----* 36

*Tableau III. 2 : Valeurs des dimensions de l'antenne patch proposée à la fréquence 5.5 GHz  
-----* 37

*Tableau III. 3 : Valeurs des dimensions de l'antenne globale double bandes -----* 37

*Tableau III. 4 : Comparaison de l'antenne proposée avec les antennes disponibles dans  
littérature pour les applications Wi-Fi -----* 52

## Liste des abréviations

- **DDR** : Diagramme De Rayonnement.
- **IEEE** : Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- **ROS** : Rapport D'onde Stationnaire.
- **RLC** : Resistance L'inductance Capacité.
- **ULB** : Ultra Large Bande.
- **TCAS** : Traffic Collision Avoidance System.
- **GPS** : Global Positioning System.
- **TOS** : Taux d'Onde Stationnaires.
- **2D et 3D** : Deux dimensions et trois dimensions.
- **HPBW** : Half-power beamwidth.
- **FNBW** : First Null Beamwidth.
- **CP** : Circular Polarization.
- **WLAN** : Wireless Local Area Network.
- **RADAR** : RAdio Detection And Ranging.
- **GSM** : Global System for Mobile communication.
- **TE** : Transverse Electrique.
- **TE** : Transverse Magnétique.
- **AR** : Axial Ratio.
- **PLF** : Polarization Loss Factor.
- **Wi-Fi** : Wireless Fidelity.
- **S-parameters** : Scattering Parameters.
- **CST** : Computer Simulation Technology.
- **HFSS** : High Frequency Structure Simulator.
- **EM** : Electromagnétique.
- **CW** : ClockWise.
- **CCW** : CountercloCkWise.

## Liste des symboles

- $\eta$ : Le rendement.
- $D$ : la directivité.
- $G$ : Le gain.
- $\lambda_0$ : La longueur d'onde dans le vide.
- $D_{\max}$ : La directivité maximale.
- $U$ : L'intensité de rayonnement.
- $U_{\max}$ : L'intensité de rayonnement maximale.
- $U_{\text{moy}}$ : L'intensité de rayonnement moyenne.
- $P_{\text{ray}}$ : Puissance de rayonnement.
- $P_e$ : Puissance d'entrée.
- $\theta$ : Angle l'azimutal.
- $\Phi$ : Angle d'élévation.
- $Z_e$ : L'impédance d'entrée.
- $R_e$ : Partie réelle.
- $X_e$ : Partie imaginaire.
- $R_r$ : La résistance de rayonnement.
- $R_e$ : La résistance de perte.
- $\Delta f$ : Largeur de bande.
- $f_1$ : Fréquence minimale.
- $f_2$ : Fréquence maximale.
- $f_0$ : Fréquence centrale.
- $Q$ : Facteur de qualité.
- $\omega_0$ : La fréquence de résonance angulaire.
- $W_E$ : Energie électrique stockée.
- $W_M$ : Energie magnétique stockée.
- $P_A$ : Puissance rayonné.
- $Q_t$ : Facteurs de qualité totale.
- $Q_{\text{rad}}$ : Facteurs de qualité des pertes par rayonnement.
- $Q_c$ : Facteurs de qualité conduction.

- $Q_d$  : Facteurs de qualité diélectriques.
- $Q_{sw}$  : Facteurs de qualité des ondes de surface.
- $P_{rad}$  : Puissance rayonnée par l'antenne.
- $P_{rec}$  : Puissance fournie par l'antenne.
- $\eta_0$  : Efficacité totale.
- $\eta_r$  : Efficacité de réflexion.
- $\eta_c$  : Efficacité de conduction.
- $\eta_d$  : Efficacité diélectrique.
- $R_{ray}$  : La résistance de rayonnement.
- $R_{pertes}$  : La résistance de pertes.
- $\Gamma$  : Le coefficient de réflexion.
- $Z_A$  : L'impédance d'antenne.
- $Z_c$  : L'impédance caractéristique.
- **dB** : Décibel.
- **RLC** : Résistance, L'inductance, Capacité.
- $J_D$  : Courant de déplacement.
- $J_t$  : Courant de surface.
- $\lambda$  : La longueur d'onde.
- **S11** : Le coefficient de réflexion.
- $\vec{u}_w$  : Le vecteur unitaire de l'onde.
- $E_i$  : Le champ électrique d'onde entrant.
- $\vec{u}_a$  : Le vecteur unitaire (vecteur de polarisation).
- $\vec{E}_a$  : Champ électrique d'antenne.
- **OA** : L'axe majeur.
- **OB** : L'axe mineur.
- $\Psi_p$  : L'angle entre les deux vecteurs unitaires.
- $E_p$  : L'efficacité de polarisation.
- $\epsilon_r$  : La constante diélectrique du substrat.
- $\epsilon_{eff}$  : La constante diélectrique efficace.



# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Le développement rapide des systèmes de communication sans fil ont conduit à de nombreuses améliorations au niveau des dispositifs et des systèmes sans fil pour répondre aux exigences des applications multimédia. L'antenne est l'un de ces dispositifs qui joue un rôle important dans l'amélioration des performances des systèmes. Une antenne est un appareil utilisé pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou alternativement pour le capter [1]. Il existe plusieurs types d'antennes telles que les antennes paraboliques, les antennes patches, les antennes Yagi, les antennes dipôles, etc. L'antenne patch ou micro ruban est l'une des antennes les plus utilisées dans les communications sans fil. Elle est destinée à de nombreuses applications dans différents domaines tels que les communications par réseau local sans fil (WLAN), les communications par satellite, les récepteurs radar et elle peuvent être utilisées dans d'autres produits sans fil [2].

Les antennes micro-rubans sont très populaires en raison de leurs caractéristiques telles que la taille réduite, la facilité d'intégration, le faible poids, la fabrication à faible coût, etc. Dans un autre côté, ces antennes imposent divers inconvénients, tels qu'une bande passante étroite, un gain faible, un faible rendement et perte d'impédance d'alimentation. À ce jour, des recherches sont en cours pour réduire ces inconvénients.

Malgré l'amélioration continue du réseau wifi, et l'utilisation d'antennes patches avec leurs caractéristiques effectives pour assurer un réseau à bonne performance et à minimum de perte, il y a un problème de perte de polarisation en raison du type de polarisation utilisé [3]-[6]. Ce problème est représenté par une partie de puissance perdue à cause du déphasage angulaire entre la polarisation d'onde entrante et la polarisation d'antenne reçue. La rotation des appareils dans le cas de polarisation linéaire par exemple, surtout dans les extrémités de réseau, est l'une des principales raisons de ce déphasage.

La polarisation circulaire est la solution idéale pour éliminer le problème de perte de polarisation, car elle permet une orientation arbitraire entre les antennes émettrices et réceptrices, une meilleure mobilité et une réduction des réflexions par trajets multiples. Les antennes qui utilisent ce type de polarisation sont populaires pour de nombreuses applications telles que les communications mobiles, les communications par satellite et systèmes Radar [7].

Dans ce mémoire, nous proposerons une antenne double bandes travaillant sur les deux bandes Wi-Fi 2.5/5.5 GHz et polarisée circulairement dans les deux bandes. Cette antenne est le résultat d'intégration de deux antennes travaillant séparément à des bandes 2.5 GHz et 5.5 GHz chacune d'elles. L'objectif de ce travail est concevoir une antenne double bandes à polarisation circulaire sur les deux bandes Wi-Fi pour éliminer les pertes de polarisation qui sont très importantes dans le cas de la polarisation linéaire.

Ce travail est divisé en trois chapitres, organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons une définition générale des antennes et leurs caractéristiques, plus particulièrement les antennes patches, nous présenterons également leur configuration de base, leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi leurs avantages et inconvénients et enfin nous citerons leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons en premier lieu la propagation des ondes électromagnétiques, après nous donnerons la définition de la polarisation et ses différents types (elliptique, linéaire et circulaire), puis nous étalerons sur le calcul du rapport axial. En suite nous donnerons également quelques exemples des antennes patches à polarisation circulaire, et nous terminerons par le facteur de perte de polarisation.

Dans le troisième chapitre, on commencera premièrement par une présentation des deux logiciels utilisés dans ce travail, après nous présenterons les conceptions et configurations des antennes proposées, en suite nous discuterons les résultats de simulation, et enfin une comparaison entre nos résultats et les résultats disponibles dans la littérature [8], [3]-[6] sera effectuée.





**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur les antennes  
patches**

## **I.1 Introduction**

Dans tous les systèmes de communication sans fil, les antennes jouent un rôle très important dans l'amélioration de ses performances. Pour tels systèmes, les antennes constituent des éléments indispensables pour assurer le couplage entre les équipements et le milieu de propagation [9]. Les antennes varient entre elles à travers plusieurs choses telles que la taille, la forme, la bande de fréquences, le gain, la polarisation,...etc. Ceci tout dépend du domaine d'application.

Aujourd'hui, la technologie est très intéressée par le développement d'antenne patch, qui est actuellement utilisé dans de nombreux appareils électroniques (téléphone mobile, ordinateur, GPS, Radar,...etc).

Dans ce chapitre, nous présenterons une définition générale des antennes et leurs caractéristiques, plus particulièrement les antennes patches, nous présenterons également leur configuration de base, leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi leurs avantages et inconvénients et enfin nous citons leurs domaines d'application.

## **I.2 Définition d'une antenne**

L'antenne est un élément essentiel dans les systèmes de télécommunication. Selon la définition standard IEEE des termes relatifs aux antennes, une antenne est définie comme une moyenne de rayonner ou de recevoir des ondes radio [10]. En d'autre terme, l'antenne est un dispositif qui fait le couplage entre les ondes guidées, issue d'un générateur de puissance et les ondes rayonnées dans l'espace libre (convertisseur et transformateur de puissance). Elle est utilisée pour émettre et pour recevoir les ondes électromagnétiques.

### **I.2.1 Antenne d'émission**

Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée (transducteur) [1].

### **I.2.2 Antenne de réception**

Est le rôle inverse d'une antenne d'émission. Elle est utilisée pour capter et transformer la puissance rayonnée électromagnétique en une puissance électrique.

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes on dit que son fonctionnement est réciproque [1].

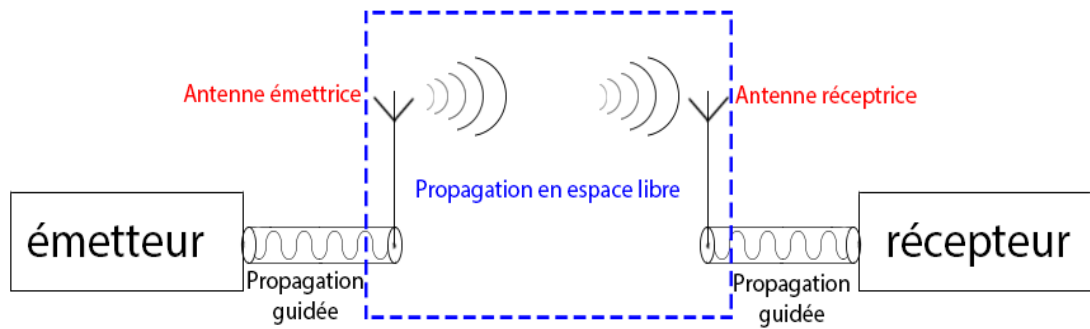


Figure I. 1 : Système de transmission.

### I.3 Paramètres caractéristiques d'une antenne

Les antennes se caractérisent généralement par des paramètres importants, ces paramètres qui permettent de comparer les structures entre elles. Les principaux paramètres sont les suivants :

#### I.3.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement (DDR) est la caractéristique principale de l'antenne. Il représente les propriétés de rayonnement d'antenne en fonction des coordonnées de l'espace. Il peut être défini comme une distribution d'énergie en fonction de la direction. Classiquement, le diagramme de rayonnement est représenté dans deux plans, le plan E contenant le champ électrique et le plan H contenant le champ magnétique, ces deux plans sont toujours perpendiculaires. Différentes parties d'un diagramme de rayonnement sont appelées lobes, qui peuvent être subdivisés en lobes principaux ou en lobes secondaires [11]. On peut présenter ces lobes dans une représentation polaire (2D ou 3D), (figure I.2), ou encore cartésienne.

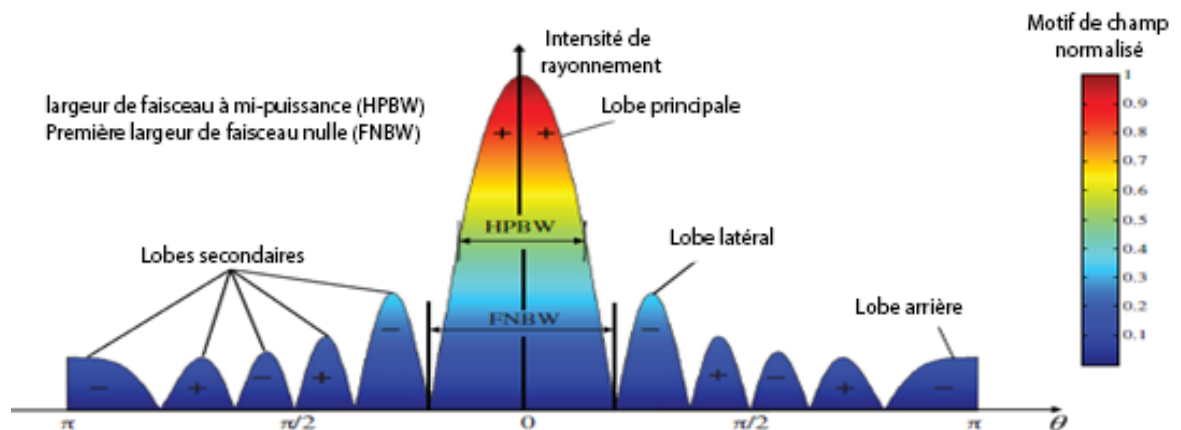
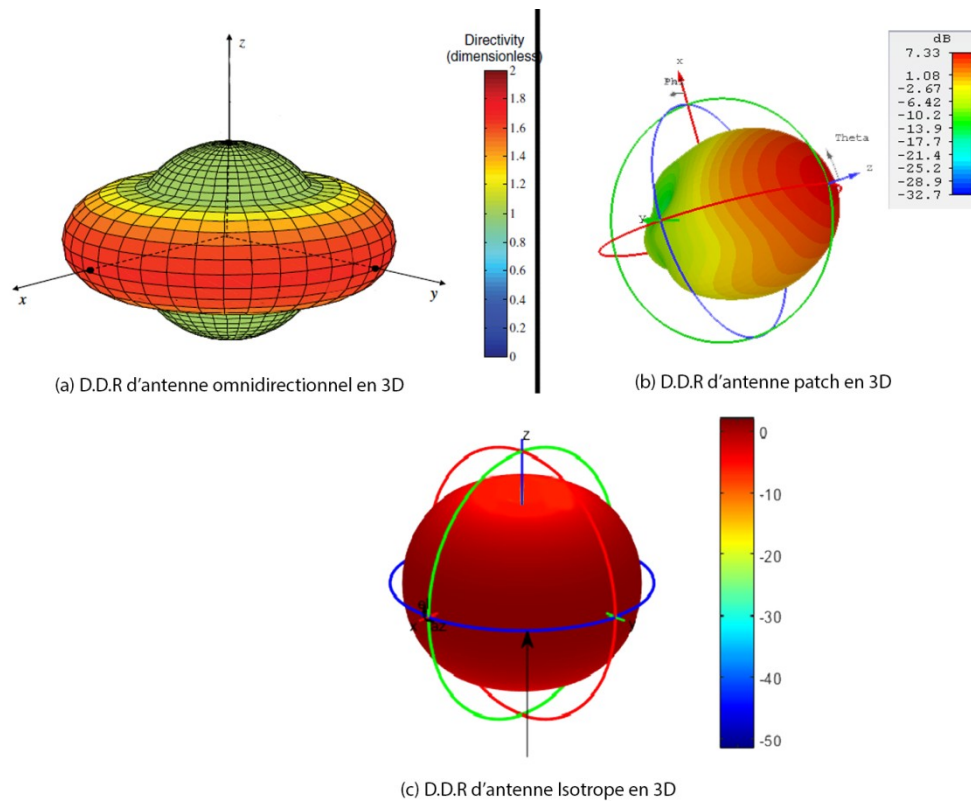


Figure I. 2 : DDR d'antenne [12].

Il existe trois formes typiques de diagrammes de rayonnement utilisées pour décrire la propriété de rayonnement d'une antenne :

- **Antenne isotrope** : Est une antenne virtuelle à distribution de puissance uniforme dans toutes les directions, utilisée comme référence pour mesurer la propriété de rayonnement d'antenne réelle directive (figure I.3 (c)).
- **Antenne directionnel** : Emet une puissance plus grande dans une direction par rapport aux autres directions (figure I.3 (b)).
- **Antenne omnidirectionnel** : Est une antenne ayant un motif essentiellement non directionnel dans un plan donné de l'antenne et un motif directionnel dans un plan orthogonal quelconque (figure I.3 (a)) [13].



**Figure I. 3 : DDR des antennes (a) Omnidirectionnel (b) Directionnel et (c) Isotrope.**

### I.3.2 Directivité

La directivité de l'antenne est sa capacité à concentrer l'énergie dans une direction. La norme IEEE 145-1983 définit la directivité comme suit : «La directivité d'une antenne dans une direction donnée est le rapport entre l'intensité de rayonnement d'antenne dans une direction donnée et l'intensité de rayonnement moyenne calculée dans toutes les directions».

$$D = \frac{U}{U_{moy}} = \frac{4\pi U}{P_{ray}} \quad (I.1)$$

L'intensité moyenne du rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par  $4\pi$ . Lorsque la direction n'est pas spécifiée, on applique la direction de l'intensité maximale du rayonnement comme suit :

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_{moy}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{ray}} \quad (I.2)$$

Avec :

- ❖  $D$  : la directivité.
- ❖  $D_{max}$  : la directivité maximale.
- ❖  $U$  : l'intensité de rayonnement.
- ❖  $U_{max}$  : l'intensité de rayonnement maximale.
- ❖  $U_{moy}$  : l'intensité de rayonnement moyenne.
- ❖  $P_{ray}$  : puissance de rayonnement.

En général, la directivité est supérieur à 1 ( $D > 1$ ), mais dans le cas d'antenne isotrope  $D=1$ , et on dit que l'antenne est une antenne directive quand  $D \gg 1$  [14].

### I.3.3 Gain

Le gain d'une antenne est défini comme le rapport entre la densité de puissance d'antenne dans une direction donnée  $P_r$  à la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope  $P_{ri}$  (sans perte).

$$G(\theta, \Phi) = \frac{P_r(\theta, \Phi)}{P_{ri}} \quad (I.3)$$

La densité de puissance rayonnée de l'antenne isotrope sans perte est égale à la puissance de l'antenne divisée par un angle solide de  $4\pi$  stéroïdiens [14], il est donné par l'équation suivante :

$$G(\theta, \Phi) = 4\pi \frac{P_r(\theta, \Phi)}{P_e} \quad (I.4)$$

Avec :

- ❖  $G$  : Le gain de l'antenne.
- ❖  $P_r$  : La densité de puissance rayonnée.
- ❖  $P_e$  : Puissance d'entrée.
- ❖  $\theta$  : Angle d'azimut.

❖  $\Phi$  : Angle d'élévation.

Une antenne à faible gain rayonne une puissance identique dans toutes les directions, tandis que l'antenne fort gain rayonne une puissance dans certaines directions. Le gain peut être donné en fonction de la directivité, il est exprimé en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope) :

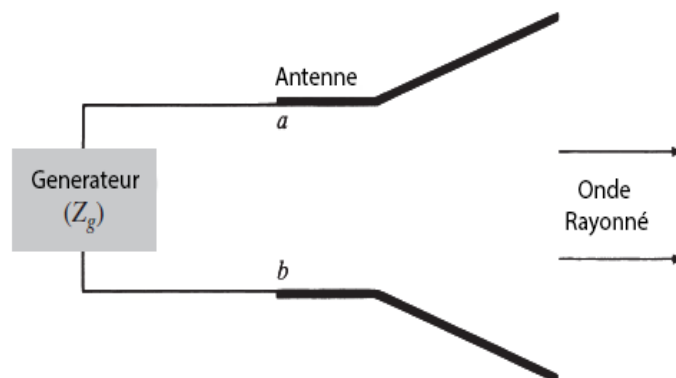
$$G = \eta D \quad (I.5)$$

Où,  $\eta$  est le rendement de l'antenne.

Si le rendement de l'antenne est égal à 100% ( $\eta = 1$ ), la directivité sera égale au gain d'antenne [15].

### I.3.4 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ou le rapport de la tension au courant à la paire de bornes ou le rapport des composants appropriés des champs électriques aux champs magnétiques à un point [15]. On peut obtenir l'impédance d'entrée d'une paire de bornes qui sont les bornes d'entrée de l'antenne (entre les points a et b), comme le montre la figure suivante :



*Figure I. 4 : Antenne en mode d'émission.*

L'impédance d'entrée  $Z_e$  constitue une partie réelle  $R_e$  et une partie imaginaire  $X_e$ , donnée comme suit :

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (I.6)$$

La partie réelle  $R_e$  de l'impédance d'entrée présente superposition de la résistance de rayonnement  $R_r$  et de la résistance de perte  $R_p$ , et la partie imaginaire  $X_e$  représente l'énergie stockée dans le champ proche de l'antenne.

L'impédance d'entrée de l'antenne est utilisée pour insérer cet élément de façon optimale dans la chaîne de l'émetteur (ou du récepteur). La plupart des applications hyperfréquences sont conçues avec une impédance d'entrée de  $50 \Omega$ , ou encore par fois de  $75 \Omega$ .

### I.3.5 Bande Passante

La bande passante d'une antenne est définie comme étant la gamme de fréquences dans laquelle les performances de l'antenne, en ce qui concerne certaines caractéristiques, sont conformes à une norme spécifiée [13]. La bande passante considérée comme la gamme de fréquences, des deux côtés de la fréquence centrale, aussi il peut définir d'autres caractéristiques exigées pour le fonctionnement d'une antenne (telles que l'impédance d'entrée, le diagramme, l'ouverture du faisceau, la polarisation, le niveau des lobes latéraux, le gain, la direction du faisceau, l'efficacité du rayonnement,...).

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale  $f_1$  et une valeur maximale  $f_2$  [1]. La largeur de bande  $\Delta f$  il donnée par :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (I.7)$$

La largeur relative de bande est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale  $f_0$ .

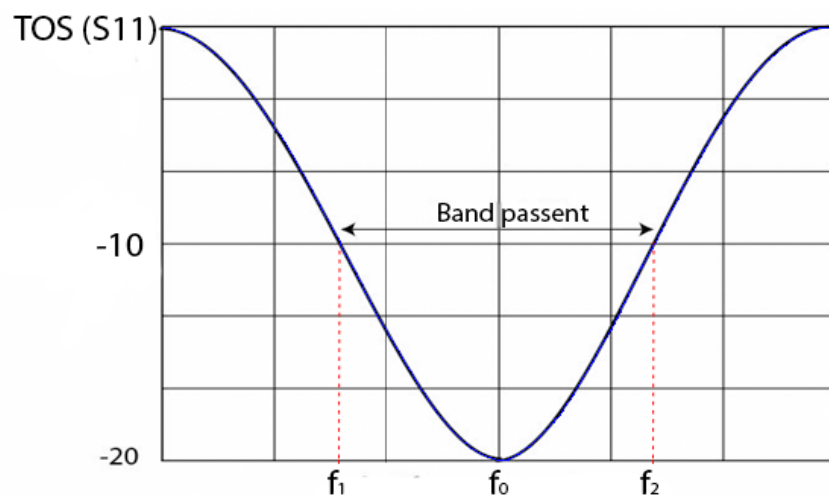


Figure I. 5 : Bande passante à partir du TOS (ou S11).

### I.3.6 Facteur de qualité

Le facteur de qualité est un facteur de mérite représentatif des pertes de l'antenne. Il est

défini comme étant le rapport entre l'énergie maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée, il est donné comme suit :

$$Q = \frac{2w_0 \max(W_E, W_M)}{P_A} \quad (I.8)$$

Avec :

- ❖  $Q$  : Facteur de qualité.
- ❖  $w_0$  : La fréquence de résonance angulaire.
- ❖  $W_E$  : L'énergie électrique stockée.
- ❖  $W_M$  : L'énergie magnétique stockée.
- ❖  $P_A$  : Puissance acceptée par l'antenne.

Autrement dit, le facteur de qualité est une mesure de largeur de bande d'une antenne par rapport à la fréquence centrale de la largeur de bande. Si l'antenne fonctionne sur une bande comprise entre  $f_1$  et  $f_2$  avec une fréquence centrale  $f_c$ , le facteur de qualité est donné par [16] :

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1} \quad (I.9)$$

Avec,  $f_c = (f_1 + f_2)/2$ .

Il existe généralement quatre facteurs de qualité, qui sont : les pertes par rayonnement, les pertes de conduction (ohmique), les pertes diélectriques et les ondes de surface. Par conséquent, le facteur de qualité totale  $Q_t$  est influencé par toutes ces pertes et s'écrit généralement comme suit :

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_s} \quad (I.10)$$

Avec :

- ❖  $Q_t$  : facteur de qualité total.
- ❖  $Q_r$  : facteur de qualité des pertes par rayonnement.
- ❖  $Q_c$  : facteur de qualité de conduction.
- ❖  $Q_d$  : facteur de qualité du diélectrique.
- ❖  $Q_s$  : facteur de qualité des ondes de surface.

### I.3.7 Efficacité de l'antenne

La détermination de l'efficacité constitue l'une des étapes fondamentales pour quantifier les performances d'une antenne [1]. Ce terme indique la quantité de puissance



rayonnée par rapport à la puissance fournie dans une antenne. L'expression générale de l'efficacité du rayonnement est la suivante :

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_a} \quad (I. 11)$$

Avec:

- ❖  $P_{rad}$  : Puissance radiée par l'antenne.
- ❖  $P_a$  : Puissance fournie à l'antenne.

L'efficacité de l'antenne peut être élevée ou faible selon les facteurs des pertes diélectrique, des pertes de conducteur, et des pertes de réflexion (rapport d'ondes stationnaires ROS), donc l'efficacité totale est donnée par :

$$\eta_0 = \eta_r + \eta_c + \eta_d \quad (I. 12)$$

Avec :

- ❖  $\eta_0$  : efficacité totale.
- ❖  $\eta_r$  : efficacité de réflexion.
- ❖  $\eta_c$  : efficacité de conduction.
- ❖  $\eta_d$  : efficacité diélectrique.

Les trois principales méthodes pour déterminer l'efficacité d'une antenne sont : La méthode de directivité/gain :

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (I. 13)$$

La méthode radiométrique : Dans cette méthode on obtient le rendement de l'antenne à partir de la puissance du bruit capté par l'antenne et une antenne de référence à faibles pertes.

La méthode de Wheeler cap s'exprime l'efficacité à partir des résistances de pertes  $R_{pertes}$  et des résistances de rayonnement  $R_{ray}$ .

$$\eta = \frac{R_{ray}}{R_{pertes} + R_{ray}} \quad (I. 14)$$

### I.3.8 Coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire

En général, lorsqu'une onde incidente se déplace d'un milieu de propagation à un autre, où rencontre une nouvelle interface, elle est divisée en deux parties, l'une est réfléchie et l'autre transmise dans le second milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchie et l'onde incidente. Il est identique à celui du S11 lorsque l'antenne est connectée au port 1 d'analyseur de réseau. Pour

une impédance d'antenne  $Z_A$ , reliée à la source par une ligne d'impédance  $Z_c$  ( $Z_c$ : impédance caractéristique souvent égale à  $50\Omega$ ), le coefficient de réflexion peut être exprimé comme suit :

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_c}{Z_A + Z_c} \quad (\text{I. 15})$$

Si le coefficient de réflexion est plus faible, l'antenne est plus adaptée. Ainsi, avec un coefficient de réflexion à  $-10\text{dB}$ , 90% de puissance est transmise à l'antenne (faible perte) [17]. Il est exprimé souvent en décibel (dB) et noté par  $|S_{11}|$  et défini comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |\Gamma| = 20 \log |S_{11}| \quad (\text{I. 16})$$

Le rapport d'ondes stationnaires en tension (ROS) est le rapport entre la tension maximale et la valeur minimale de l'onde stationnaire existant aux bornes d'entrée de l'antenne :

$$ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{I. 17})$$

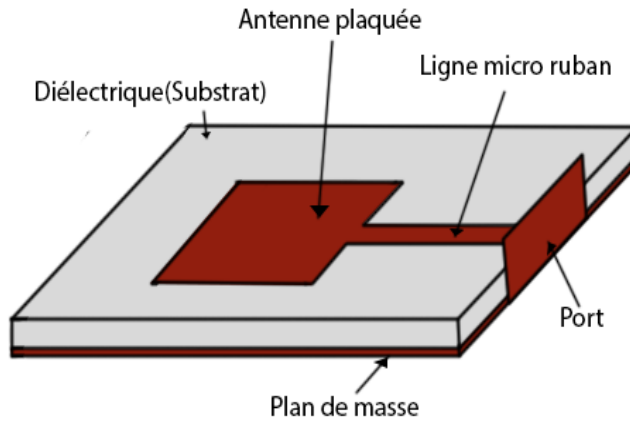
## I.4 Antennes microbandes

Le concept d'antenne micro-ruban, ou antenne imprimée, a été proposé par Deschamps en 1953 [18], mais au milieu des années 70, les premières véritables contributions au domaine de la technologie des micro-rubans ont été apportées. Les antennes micro-ruban ont attirées l'attention d'un grand nombre de chercheurs et des ingénieurs et ont été largement utilisées dans les systèmes Radiofréquences et hyperfréquences. C'est un type d'antenne qui a un faible volume, un faible poids, un faible coût, hautes performances et facilité de mise en œuvre.

### I.4.1 Description d'antenne microbande

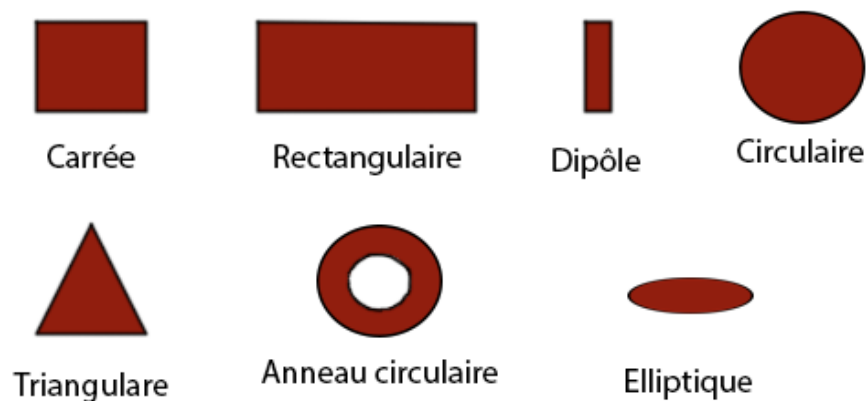
Une antenne micro ruban (patch) est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents [1]. Sa configuration de base est constituée d'un substrat diélectrique et un plan de mass métallique situé dans l'interface inférieure (situé en bas).

Dans l'autre face, un patch qui permet de créer le rayonnement électromagnétique lorsque les courants circulent dans sa surface, le courant injecté par l'alimentation à travers une ligne (Figure I.6). Les courants sont amenés du générateur à l'antenne généralement par une ligne micro ruban.



**Figure I. 6 : Antenne patch alimentée par ligne microbande.**

Le patch et le plan de masse sont généralement en cuivre. Le patch peut prendre différentes formes, telles que le rectangle, le carré, l'ellipse, le cercle, le triangle, l'anneau, le pentagone,...etc [19].



**Figure I. 7 : Différentes formes du patch.**

Le choix de la forme du patch dépend des caractéristiques souhaitées, comme la polarisation, le gain, la directivité, largeur de bande passante,...etc. D'une manière générale, les caractéristiques de l'antenne sont définies par les modes de fonctionnement excités [19] qui dépendent de la forme et la dimension du patch, du substrat diélectrique et de son épaisseur, et de dispositif d'alimentation.

#### **I.4.2 Alimentation des antennes microbandes**

La technique d'alimentation représente un élément important sur la conception d'antenne microbande, il peut être transféré l'énergie en hyperfréquence du système de transmission vers l'antenne. L'adaptation d'impédance d'entrée, la polarisation, les modes de

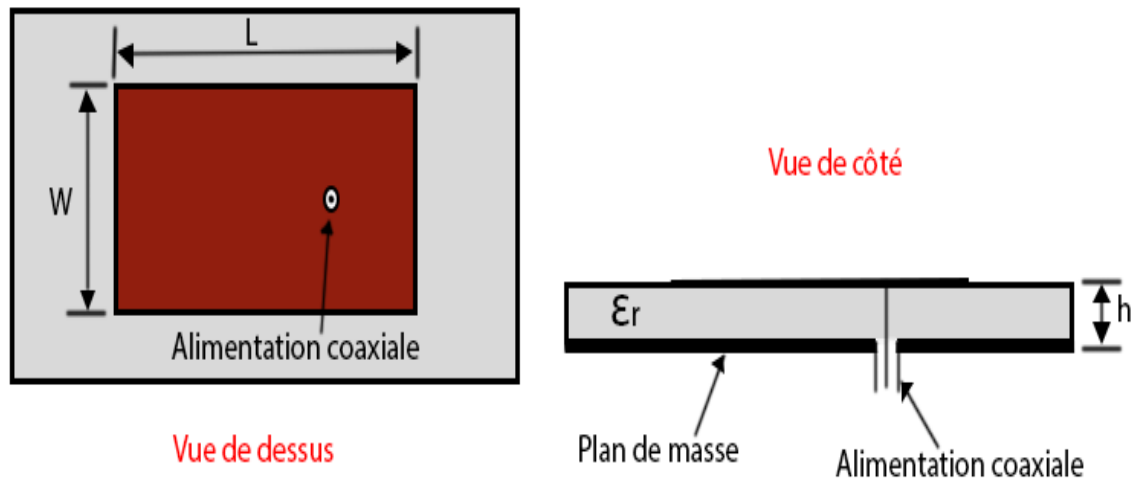
fonctionnement, le parasite de rayonnement, les ondes de surface et la géométrie de l'antenne sont affectés par ces techniques d'alimentation.

Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories :

- Alimentation par contacte (par sonde ou ligne micro-ruban).
- Alimentation sans contacte (couplage électromagnétique par ligne ou par fente).

#### I.4.2.1 Alimentation par câble coaxial

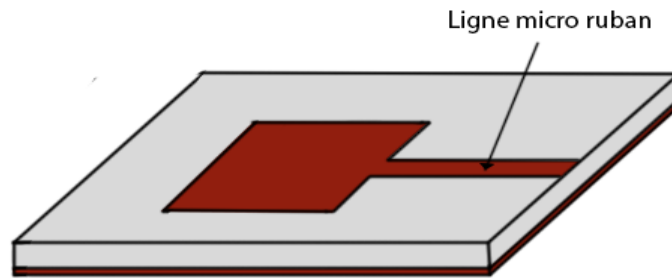
Le conducteur du câble coaxial connecté à l'extérieur du plan de masse jusqu'au patch (figure I.8). Ce type d'alimentation présente des avantages tels que la facilité de fabrication, faible parasite de rayonnement et l'adaptation. Mais il offre une bande passante étroite et il est difficile à modéliser particulièrement pour des épaisseurs du substrat supérieures à  $0.02\lambda_0$  [20]. Cette alimentation occupe moins d'espace par rapport à l'alimentation par ligne micro ruban.



*Figure I. 8 : Alimentation par câble coaxial.*

#### I.4.2.2 Alimentation par ligne microbande

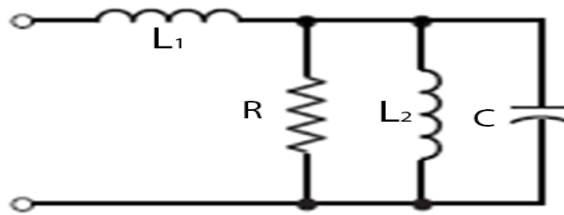
Un patch micro ruban excité par une ligne microbande (figure I.9), cette ligne est définie comme une bande conductrice de largeur plus petite que celle du patch [19]. La ligne microbande est connectée directement au bord du patch pour transférer la puissance maximale, il faut que l'impédance de bord soit adaptée à l'impédance de la ligne d'alimentation [21].



*Figure I. 9 : Alimentation par ligne microbande.*

Cette technique d'alimentation présente l'avantage d'être graver la ligne sur le même substrat avec le patch [22], et d'être aussi facile à fabriquer et facile à modéliser.

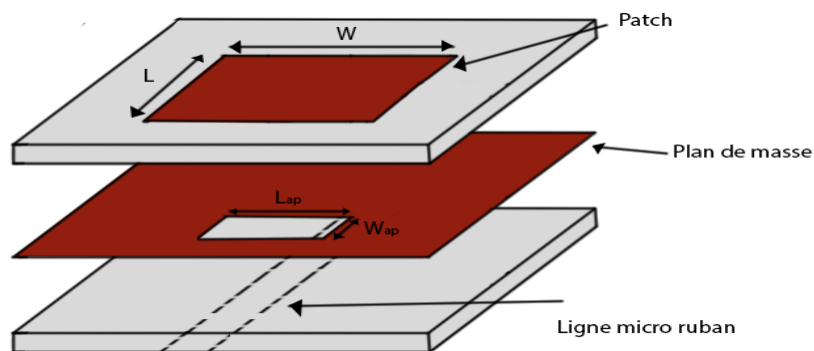
Les deux types d'alimentation (sonde coaxial et ligne micro ruban) ont le même circuit équivalent. Ce circuit est formé par un réseau RLC parallèle qui représente la pièce métallique (patch) rayonnante et un inducteur série représentant l'inductance de la sonde coaxiale d'alimentation ou de la ligne d'alimentation micro-ruban (figure I.10) [23].



*Figure I. 10 : Circuit équivalent d'une antenne patch alimenté par sonde coaxiale et ligne micro ruban [12].*

#### I.4.2.3 Alimentation par ouverture

Ce type d'alimentation est constitué par deux substrats séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure du substrat, se trouve une ligne d'alimentation micro-ruban dont l'énergie est couplée au patch par l'intermédiaire d'une fente située sur le plan de masse [19].



*Figure I. 11 : Alimentation à travers une fente.*

Cette technique présente des avantages tels la modélisation facile et le parasite de rayonnement modéré [19]. Mais, il est difficile à fabriquer à cause de la multiplicité des couches, ce qui augmente également l'épaisseur de l'antenne, et bande passante étroite [22]. Cette méthode d'alimentation est représentée par un circuit équivalent RLC comme montré dans la figure I.12.

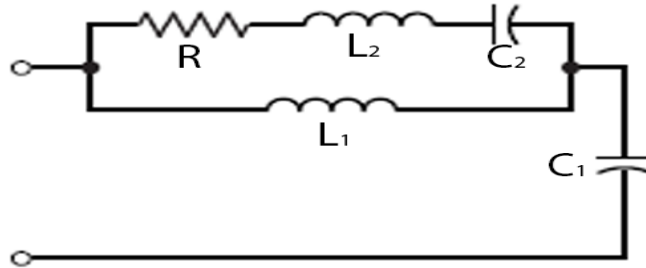


Figure I. 12 : Circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture [12].

#### I.4.2.4 Alimentation de proximité

On appelle en anglais (Proximity coupled feed). Cette technique d'alimentation faite par couplage électromagnétique d'une ligne microbande à un élément rayonnant (figure I.13). Il fournit deux substrats diélectriques, un pour l'élément rayonnant et l'autre pour la ligne d'alimentation.

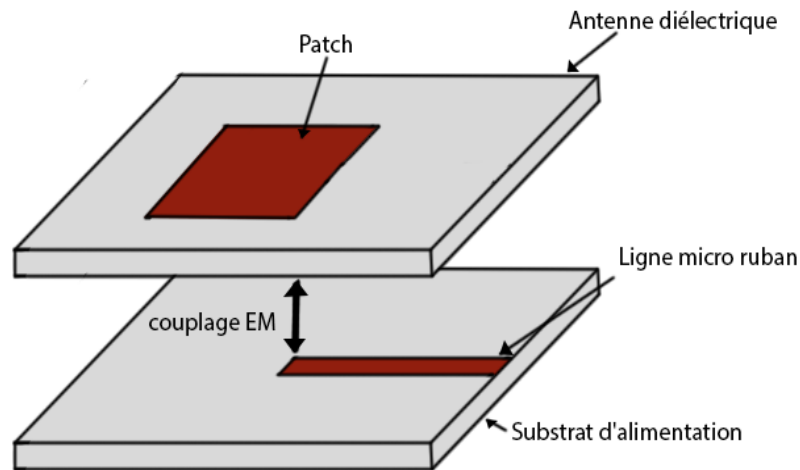


Figure I. 13 : Alimentation de proximité.

Les deux majors avantages de cette alimentation sont: une bande passante élevée à cause de l'augmentation de l'épaisseur d'antenne [22], et l'élimination de rayonnement parasite. Mais il y a une difficulté de mise en œuvre. Cette méthode d'alimentation est représentée par un circuit équivalent RLC (figure I.14).

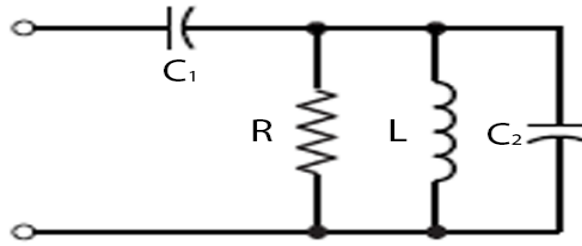


Figure I. 14 : Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité [12].

#### I.4.2.5 Comparaison entre les types d'alimentation

Les types d'alimentation les plus utilisés sont l'alimentation par câble coaxial et l'alimentation par ligne micro ruban, à cause de facilité de mise en oeuvre, par contre les autres types sont plus complexes. Le tableau suivant présente une comparaison entre les différents types d'alimentation.

Tableau I. 1 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation [24].

Caractéristiques	Alimentation Par micro ruban	Alimentation Coaxial	Alimentation Par ouverture	Alimentation Par proximité
Rayonnement parasite	plus	plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et Forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Bande passante	2 à 5%	2 à 5%	2 à 5%	13%

#### I.4.3 Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch, se comprend à partir de sa forme géométrique. Ce rayonnement d'antenne patch produit à partir des champs frangeants entre le bord du conducteur de l'antenne patch et le plan de masse (figure I.15 (b)). Lorsque on excite la ligne d'alimentation, il y a une onde électromagnétique qui va se propager sur cette dernière pour rencontrer l'élément rayonnant qui est généralement plus large que la ligne, à cause de distribution de charge s'établir sur et sous le composant rayonnant et entre le plan de masse et le substrat. Ce phénomène est illustré par la figure I.15 (a) suivante :

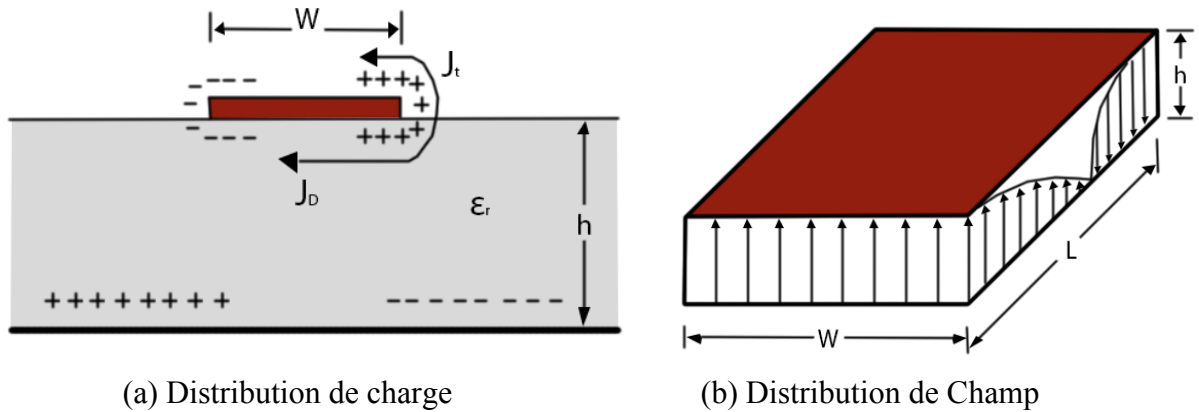


Figure I. 15 : Distribution de charge du champ dans l'antenne patch.

Avec,  $J_d$  est le courant de déplacement, et  $J_t$  le courant de surface.

En supposant qu'il n'y ait aucune variation du champ électrique le long de la largeur et de l'épaisseur de la structure à micro ruban, la configuration du champ électrique du radiateur peut être représentée comme indiqué sur la figure I.16. Les champs varient par la variation de la longueur du patch, ce qui correspond à environ une demi-longueur d'onde ( $\lambda/2$ ) pour le mode fondamental.

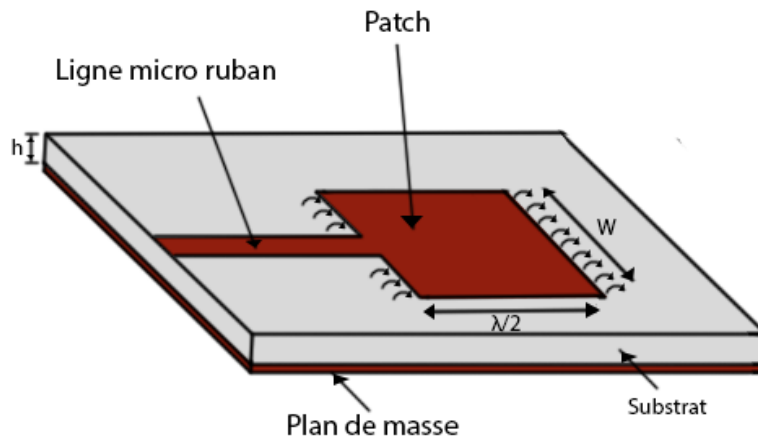


Figure I. 16 : Configuration du champ électrique du radiateur.

Pour une fréquence de résonance  $f_r$ , la longueur effective  $L_{eff}$  du patch est donnée par :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{I.18}$$

#### I.4.4 Les avantages et les inconvénients des antennes microbandes

Les antennes imprimées comportent plusieurs avantages, les plus importants sont les suivants [17] :

- Faible poids, encombrement réduit ;



- Possible de placer sur une surface courbe, comme un avion ou un véhicule ;
- Fabrication à faible coût ;
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications ;
- Antenne multi-bandes, multi-polarisations possibles ;
- Réseaux d'alimentation et adaptation fabriques simultanément avec l'antenne.

Mais il y a quelconques désavantages tels que :

- Bande passante étroite ;
- Faiblesse du gain ;
- Perte d'impédance de l'alimentation ;
- Les réseaux d'éléments imprimés à hautes performances nécessitent des systèmes d'alimentation complexes.

#### **I.4.5 Les applications des antennes microbandes**

Vu le développement technologique dans la télécommunication, l'utilisation des antennes micro-ondes est devenue nécessaire pour répondre aux nombreuses exigences dans la plupart des applications. Il y a plusieurs applications d'antenne dans le domaine des micro-ondes.

##### **I.4.5.1 Communication mobile et par satellite**

La communication mobile nécessite des antennes patches, à cause des plusieurs caractéristiques tel que la petite taille, le faible coût, le faible poids,...etc [20]. Dans les communications par satellite, la polarisation circulaire est très recommandée.

##### **I.4.5.2 Systèmes Radar**

L'Ultra Large Bande (ULB) est une technologie très importante pour les Radars haute précision. Les antennes micro-rubans représentent les candidats idéaux dans ces applications ULB, parce qu'elles ont une faible profil, faible cout et facilité d'intégration [25].

##### **I.4.5.3 Applications médicales**

Dans le domaine de la télémédecine, la chirurgie nécessite une grande vitesse de transmission des images, ce qui est possible avec une antenne micro-ruban ULB.

##### **I.4.5.4 Systèmes avioniques**

Le rayonnement des antennes dépend du type d'antenne et de sa position dans tous les systèmes avioniques. Dans ces systèmes généralement on utilise des antennes à petite taille et

fonctionnant sur des bandes de fréquences jusqu'à GHz. Le système TCAS II emploie une antenne directionnelle placée au-dessus de l'avion ainsi qu'une antenne omnidirectionnelle installée au-dessous de l'appareil, cette antennes typiquement constituées d'un réseau de quatre patches [26].

#### **1.4.5.5 Système de positionnement global (GPS)**

Parmi les antennes les plus populaires utilisées dans les récepteurs GPS sont les antennes patches [27]. Cette antenne est utilisée au niveau de réception, et placée en général dans les véhicules terrestres, aux avions et aux navires de localiser avec précision leur position.

#### **1.4.5.6 Systèmes sécurisés**

Ces systèmes sont utilisés pour faire sécuriser certaines places (Maison ou usine...etc.). Envoie un message d'avertissement lorsqu'un intrus est présent.

### **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté un contexte général sur les antennes patches. Nous avons commencé par leurs caractéristiques, après nous avons vu leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, leurs avantages et inconvénients, et ainsi leurs domaines d'application.

Les performances d'une antenne patch peuvent être contrôlées par ses paramètres constitutifs, tels que le type d'alimentation, la forme et les dimensions d'élément rayonné (patch) et du plan de masse, ainsi que l'épaisseur et le type de substrat.



**CHAPITRE II :**  
**Polarisation des ondes  
électromagnétiques**

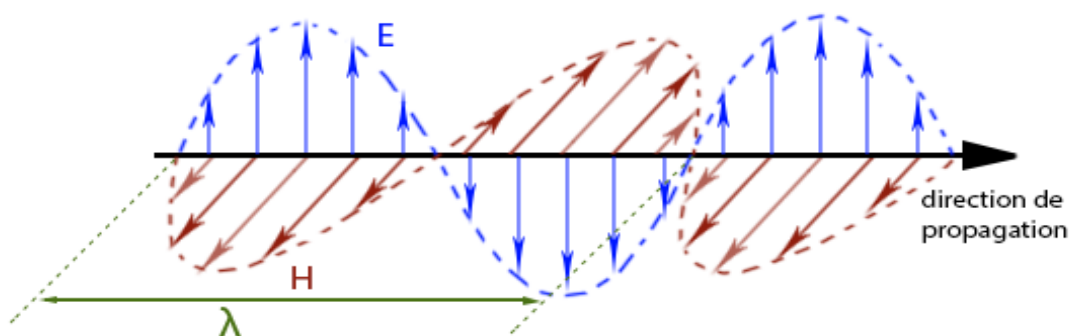
## II.1 Introduction

La polarisation découverte en 1808 par l'ingénieur physicien et mathématicien française *Etienne Malus*. Il a établi la loi de polarisation qui donne l'intensité de la lumière, lorsque la lumière est polarisée par un polariseur idéal. La polarisation des ondes électromagnétiques prend trois types (linéaire, elliptique et circulaire). Ces types de polarisations dépendent de leurs amplitudes de champ électrique, ou de champ magnétique et de la différence de phase entre les deux composantes du champ électrique ou magnétique. La polarisation circulaire est la plus utilisée dans les travaux de conception d'antennes à cause de ses avantages par rapport aux autres types de polarisations. Parmi ces avantages, la réduction de son multi trajet et elle n'exige pas une orientation privilégiée entre le signal et le récepteur [8].

Dans ce chapitre nous présenterons en premier lieu la propagation des ondes électromagnétique, après nous donnerons la définition de polarisation et ses différents types (elliptique, linéaire et circulaire), puis nous étalerons sur le calcul du rapport axial. Ensuite nous donnerons également quelques exemples des antennes patchs à polarisation circulaire, et nous terminerons par le facteur de perte de polarisation.

## II.2 Propagation des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont définies comme le résultat de la variation couplée du champ électrique  $\vec{E}$  et du champ magnétique  $\vec{H}$ . Ces ondes sont propagées, souvent, dans le vide selon une direction bien définie à la vitesse de la lumière  $C = 3.10^8 \text{ m/s}$ , et suit un mouvement ondulatoire sinusoïdal.



*Figure II. 1 : Onde électromagnétique à polarisation linéaire.*

Les ondes électromagnétiques sont utilisées pour transporter des informations à travers un média sans fil ou une structure de guidage, d'un point à un autre [12]. Le rayonnement de

champ électromagnétique est le résultat de création de champ électrique et de champ magnétique à cause de la circulation de charge. Ses phénomènes sont toutes régissent aux équations de Maxwell :

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 1})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 3})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

- ❖  $\vec{E}$  : Champ électrique.
- ❖  $\vec{H}$  : Champ magnétique.
- ❖  $\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$  : Induction électrique.
- ❖  $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$  : Induction magnétique.
- ❖  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  : permittivité diélectrique,  $\varepsilon_0$  permittivité diélectrique du vide et  $\varepsilon_r$  permittivité relative au milieu de propagation.
- ❖  $\mu = \mu_0 \mu_r$  : perméabilité magnétique,  $\mu_0$  perméabilité magnétique du dans et  $\mu_r$  perméabilité magnétique relative au milieu de propagation.
- ❖  $\vec{J}$  : Densité volumique de charge.
- ❖  $\rho$  : Densité volumique de courant.

Dans le vide :  $\varepsilon = \varepsilon_0$  et  $\mu = \mu_0$ ,  $\vec{J} = 0$  et  $\rho = 0$ , les équations (II.3) et (II.4) deviennent dans ce cas :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 5})$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad (\text{II. 6})$$

A partir des équations de Maxwell, on peut déterminer l'équation de propagation du champ électrique et du champ magnétique. Les équations de propagations sont comme suit :

$$\overline{\nabla^2} \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II. 7})$$

$$\overline{\nabla^2} \vec{B} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II. 8})$$

Pour les variations harmoniques dans le temps sous la forme de  $e^{j\omega t}$ , nous définissons les champs complexes  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  qui sont liés à leurs équivalents instantanés  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  par [12] :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re} [ \vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t} ] \quad (\text{II. 9})$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re} [ \vec{H}(x, y, z) e^{j\omega t} ] \quad (\text{II. 10})$$

### II.2.1 Vecteur de Poynting

Le vecteur de Poynting est la quantité d'énergie du flux électromagnétique par unité de surface (*watts/m<sup>2</sup>*) [28]. La direction de propagation est donnée par la direction du vecteur de Poynting. Ce vecteur est déterminé par le produit vectoriel entre le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{H}$  et il est donné par :

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{II. 11})$$

## II.3 Polarisation d'une onde électromagnétique

La polarisation d'une onde électromagnétique est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne.

### II.3.1 Définition de la polarisation

La polarisation est l'orientation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre. Ce phénomène est défini comme la propriété d'une onde électromagnétique décrivant la direction et l'amplitude relative variant dans le temps du vecteur de champ électrique [12]. Pour obtenir une puissance maximale au niveau du récepteur, il faut assurer la même polarisation entre l'émetteur et le récepteur.

Considérant une onde électrique plane se propage selon la direction des  $z$  positifs :

$$\vec{E}(z, t) = \vec{u}_x E_x(z, t) + \vec{u}_y E_y(z, t) \quad (\text{II. 12})$$

A partir des équations (II.9) et (II.10), les composants  $E_x$  et  $E_y$  présentés sous forme réelles par :

$$E_x(z, t) = \text{Re}[E_x e^{j(\omega t - kz)}] = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (\text{II. 13})$$

$$E_y(z, t) = \text{Re}[E_y e^{j(\omega t - kz)}] = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (\text{II. 14})$$

Avec:

- ❖  $E_{x0}$  est l'amplitude de composant  $E_x$  dans l'axe x.
- ❖  $E_{y0}$  est l'amplitude de composant  $E_y$  dans l'axe y.
- ❖  $\varphi_x$  et  $\varphi_y$  sont les phases initiales des composantes  $E_x$  et  $E_y$  respectivement.
- ❖  $k$  est la constante de propagation.

A partir des équations (II.13) et (II.14), on obtient l'équation caractéristique de polarisation :

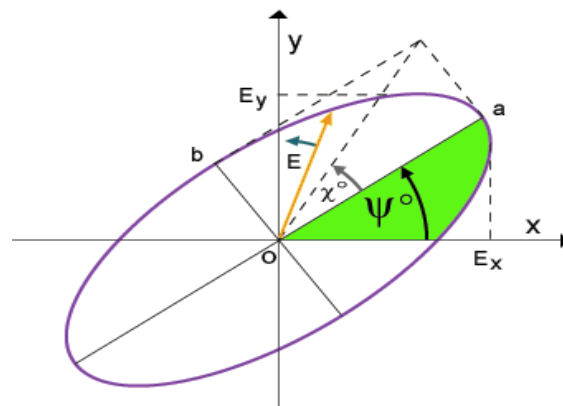
$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 - 2\frac{E_x}{E_{x0}}\frac{E_y}{E_{y0}}\cos\Delta\varphi = \sin^2\Delta\varphi \quad (\text{II. 15})$$

### II.3.2 Types de polarisations

Les ondes électromagnétiques prennent trois formes typiques de polarisations : polarisation elliptique, circulaire et linéaire.

#### II.3.2.1 Polarisation elliptique

Le champ électrique d'une onde électromagnétique plane peut être décrit comme la somme vectorielle de deux composants orthogonaux, généralement des composants horizontaux et verticaux [29]. Ces composants sont caractérisés par leurs amplitudes et leur phase relative qui les sépare. On dit que l'onde harmonique temporelle est polarisée elliptiquement si la pointe du vecteur de champ électrique trace un lieu elliptique dans l'espace (figure II.2).



*Figure II. 2 : Polarisation elliptique.*

On peut obtenir une polarisation elliptique si l'amplitude des deux composants ne sont pas égales et que la différence de phase relative entre les deux composantes est un multiple impair de  $\pi/2$ .

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_{x0} \neq E_{y0}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \text{ pour CW} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \text{ pour CCW} \end{cases} \quad n \in Z \quad (\text{II. 16})$$

On peut aussi obtenir directement la polarisation elliptique si la phase relative n'est pas égale à un multiple de  $\pi/2$ , quelles que soient les amplitudes des deux composantes.

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x \neq \pi \frac{n}{2} \quad \text{avec } n \in Z \quad (\text{II. 17})$$

Dans ce type de polarisation, on peut écrire l'équation (II.15) dans ce cas comme suit :

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = 1 \quad (\text{II. 18})$$

- **Propriétés d'ellipticité**

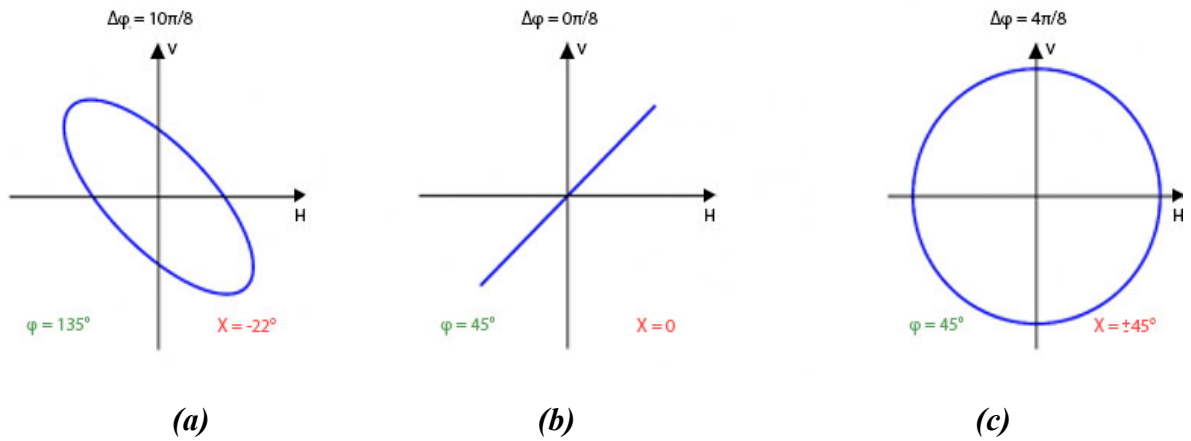
L'ellipse contient deux demi axes, demi-major axe et demi-minore axe, aussi il contient un angle d'orientation  $\varphi$  de l'onde électromagnétique qu'est compris entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  et l'angle d'ellipticité  $X$  qu'est compris entre  $-45^\circ$  et  $45^\circ$  qui donné comme :

$$X = \arctan(b/a) \quad (\text{II. 19})$$

La forme d'ellipse est déterminée par l'amplitude et la phase relative entre les composantes horizontales et verticales du vecteur champ électrique. Lorsque le taux d'ellipticité  $\tau$  égal à 1, les composantes  $E_{x0}$  et  $E_{y0}$  sont égales [29] :

- Si les deux composantes sont en phase, la polarisation est linéaire (l'angle d'ellipticité  $X = 0$  et d'orientation  $\varphi = 45^\circ$ )
- Si le déphasage relatif  $\Delta\varphi = \pi/2$ , l'angle d'orientation  $\varphi = 45^\circ$  et l'ellipticité  $X = 45^\circ$ , la polarisation est circulaire.
- Si le déphasage relatif  $\Delta\varphi = 3\pi/2$ , l'angle d'orientation devient  $\varphi = 135^\circ$  et l'ellipticité varier de  $45^\circ$  à  $-45^\circ$ .

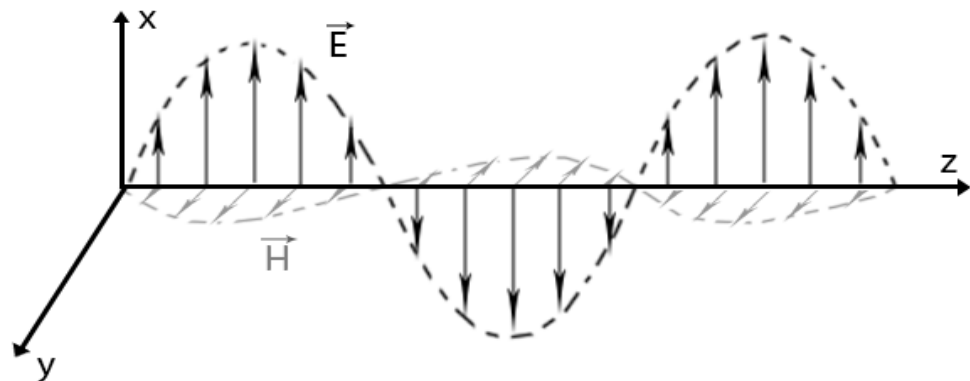




**Figure II.3 :** Différents types de polarisation:(a) Polarisation elliptique (b) Polarisation linéaire (c) Polarisation circulaire.

**II.3.2.2 Polarisation linéaire**

La polarisation linéaire est obtenue uniquement lorsque le champ électrique garde sa direction dans le temps. Autrement dit, le champ électronique garde son oriente de la même manière au cours de la propagation. (Figure II.4). Le champ électrique est parallèle au vecteur unitaire  $\vec{u}_x$  et le champ magnétique est parallèle au vecteur unitaire  $\vec{u}_y$ . Le vecteur de propagation  $\vec{k}$  est alors parallèle au vecteur unitaire  $\vec{u}_z$  [1].



**Figure II. 4 :** Polarisation linéaire.

Pour que l’onde ayant une polarisation linéaire, il faut que la différence de phase entre les deux composantes doit être un multiple de  $\pi$  [12] :

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = n\pi \text{ avec } n \in \mathbb{Z} \tag{II. 20}$$

Donc :

$$\sin \Delta\varphi = 0 \text{ et } \cos\Delta\varphi = (-1)^n \tag{II. 21}$$

Dans ce type de polarisation, on peut écrire l'équation (II.15) comme suit :

- Si  $n$  est pair :

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 - \frac{2E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} = 0 \rightarrow \left(\frac{E_x}{E_{x0}} - \frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = 0 \quad (\text{II. 22})$$

Alors,

$$E_y = \frac{E_{y0}}{E_{x0}} E_x \quad (\text{II. 23})$$

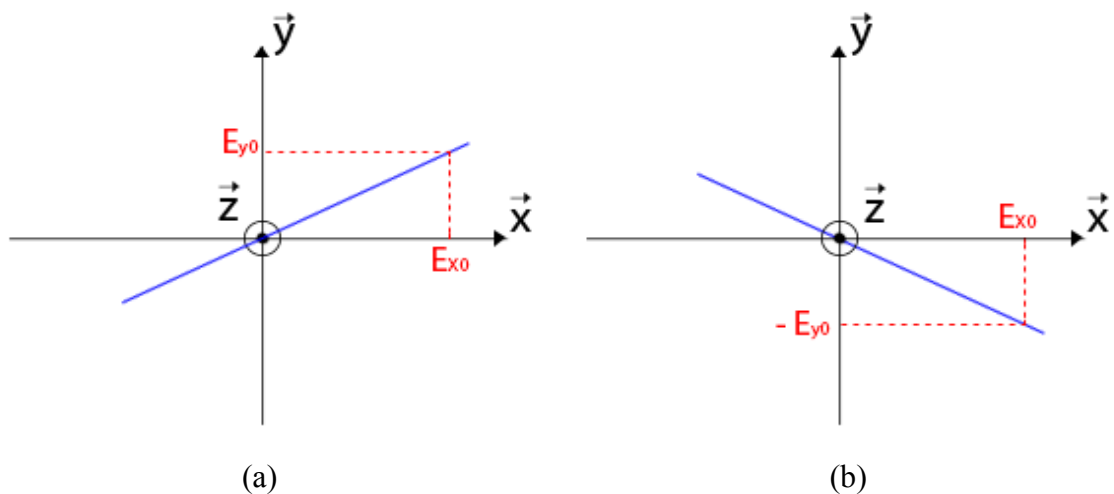
- Si  $n$  est impair :

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 + \frac{2E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} = 0 \rightarrow \left(\frac{E_x}{E_{x0}} + \frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = 0 \quad (\text{II. 24})$$

Alors,

$$E_y = -\frac{E_{y0}}{E_{x0}} E_x \quad (\text{II. 25})$$

Les deux cas de polarisation linéaire (la valeur de  $n$  soit pair ou impair) peuvent être représentés par la figure II.5.



**Figure II. 5 : Polarisation linéaire de l'onde électromagnétique : (a)  $n$  pair (b)  $n$  impair.**

- **Polarisations horizontale et verticale**

L'onde électromagnétique peut rayonnée linéairement horizontale (H) ou verticale (V), selon l'orientation du champ électrique par rapport au sol :

- Quand le champ électrique est parallèle au sol, la polarisation est horizontale (figure II.6(a)).

- Quand le champ électrique est perpendiculaire au sol, la polarisation est verticale (figure II.6(b)).

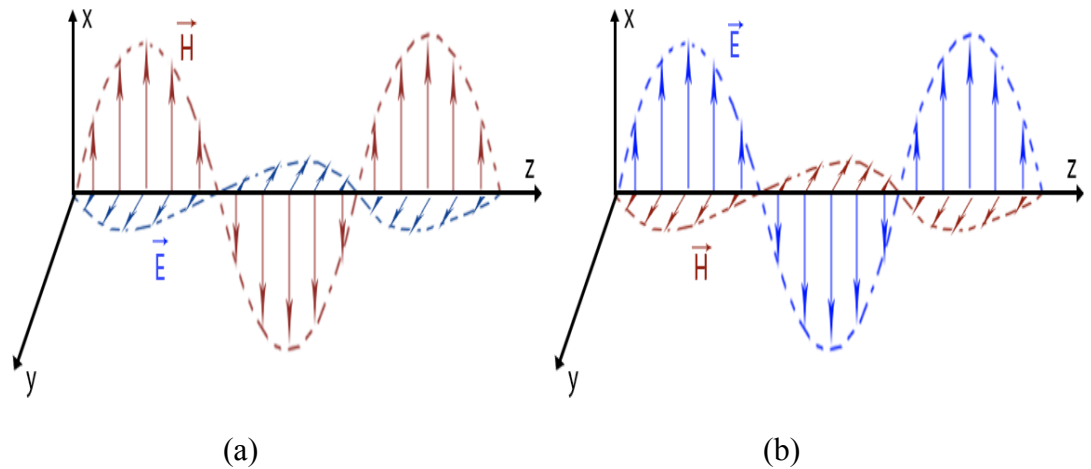


Figure II. 6 : Polarisation linéaire : (a) Horizontale et (b) Verticale.

- **Polarisations TE et TM**

La polarisation linéaire peut être définie comme le repère des champs par rapport au plan d'incidence. On appelle une polarisation transverse électrique (TE) quand le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence. Si le champ magnétique est perpendiculaire au plan d'incidence, dans ce cas, elle est appelée transverse magnétique (TM) [30].

### II.3.2.3 Polarisation circulaire

La polarisation circulaire est atteinte lorsque le vecteur de champ électrique d'une onde plane est polarisé de manière circulaire [13]. En d'autres façons, on peut dire qu'une onde électromagnétique est polarisée circulairement si le vecteur du champ électrique en un point donné de l'espace trace un cercle en fonction du temps [31].

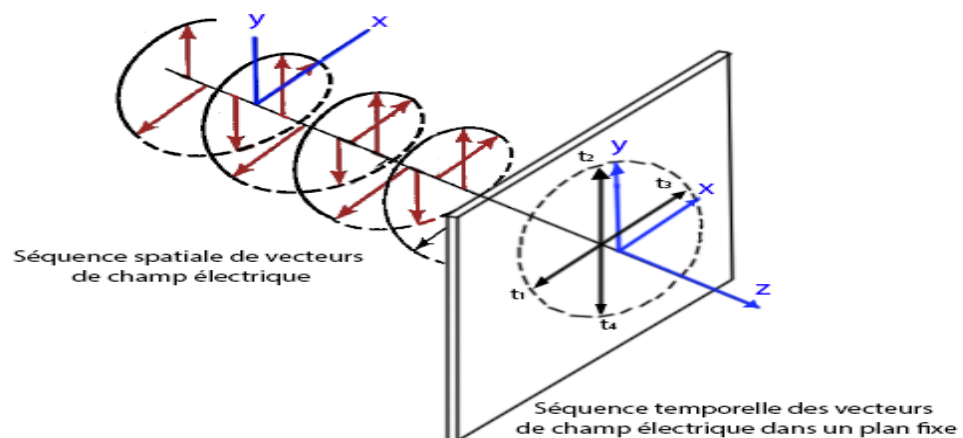


Figure II.7 : Polarisation circulaire à séquence spatiale et à séquence temporelle dans un plan fixe.

On peut obtenir une polarisation circulaire si l'amplitude des deux composantes sont égales et la différence de phase entre les deux composantes est un multiple impair de  $\pi/2$ .

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_{x0} = E_{y0}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \text{ pour CW} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \text{ pour CCW} \end{cases} \quad n \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.26})$$

Dans ce type de polarisation, on peut écrire l'équation (II.15) comme suivant :

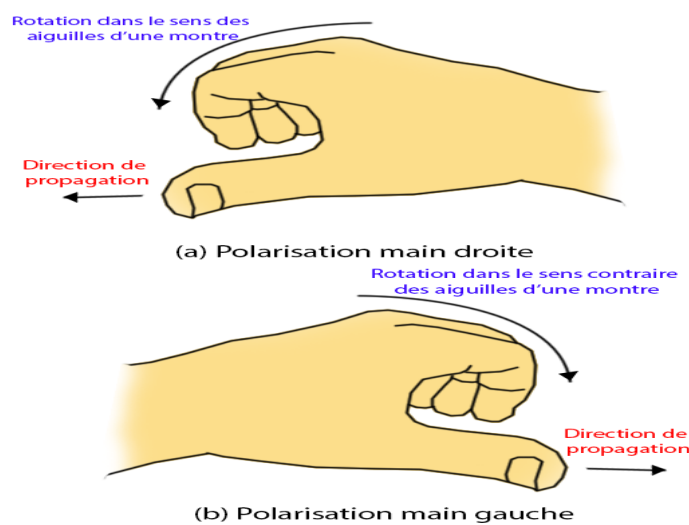
$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = 1 \quad (\text{II.27})$$

Avec  $E_{x0} = E_{y0}$ , l'équation (II.27) est devient:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_{x0}^2 = E_{y0}^2 \quad (\text{II.28})$$

Les polarisations elliptique et circulaire des ondes électromagnétiques peuvent prendre le sens de rotation droit (sens des aiguilles d'une montre) et le sens de rotation gauche (sens contraire des aiguilles d'une montre) [32]. Une onde polarisée circulairement à droite sera adaptée à une antenne polarisée circulairement à droite (l'inverse est vrai).

Ces sens de polarisation peuvent être présentés par la technique de la main droite et la main gauche (figure II.8)



**Figure II. 8 : Convention de polarisation : (a) Polarisation main droite et (b) Polarisation main gauche.**

### II.3.3 Rapport axial

Le rapport axial est défini par le standard IEEE comme le rapport entre les axes majeurs et mineurs dans une polarisation elliptique, on peut décrire ce rapport comme suit :

$$AR = \frac{\text{axe majeur}}{\text{axe mineur}} = \frac{OA}{OB} \quad \text{Avec } 1 \leq AR < \infty \quad (\text{II. 29})$$

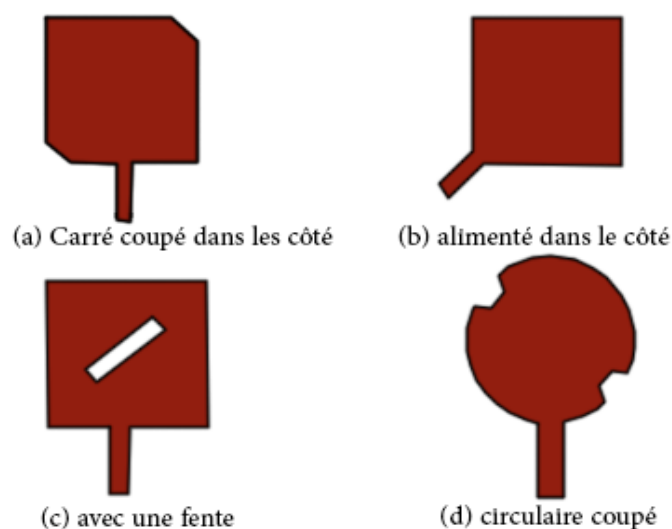
Théoriquement, le rapport axial est égal à 1 (0 dB) pour obtenir une polarisation circulaire, mais en pratique il est impossible d'obtenir une polarisation circulaire parfaite (le rapport axial égale à 0 dB). Dans ce cas, on dit que la polarisation est circulaire, lorsque la valeur du rapport axial est entre 0 à 3 dB.

Pour le sens de la main droite (polarisation elliptique droite), le rapport axial est positif. Le AR est négatif pour le sens de la main gauche [16]. Le rapport axial peut être exprimé en dB comme suit :

$$AR(\text{dB}) = 20 \log \left( \frac{OA}{OB} \right) \quad \text{Avec } 0 \leq AR < \infty \quad (\text{II. 30})$$

### II.3.4 Antennes patches à polarisation circulaire

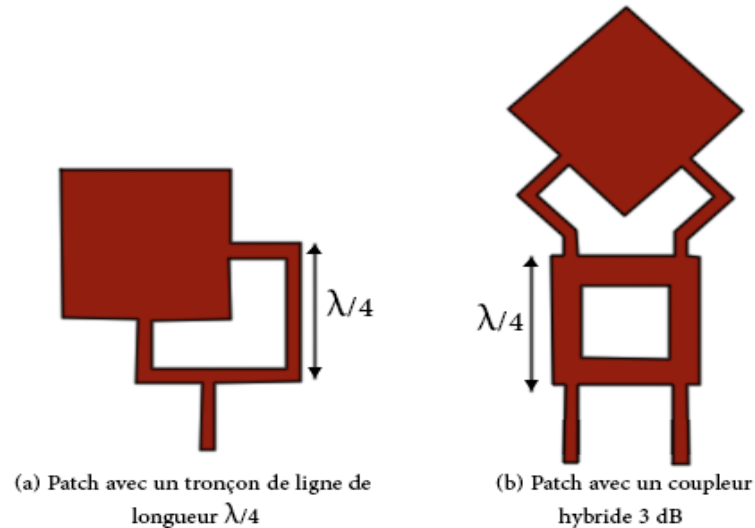
La polarisation circulaire des antennes micro-rubans peut être obtenue de plusieurs manières, selon la forme géométrique (carré, cercle,...etc.), création d'une ou plusieurs fentes sur la surface du patch, la forme de la ligne d'alimentation, et avec un deux points d'excitation pour avoir un déphasage de 90°.



**Figure II. 9 : Antennes patch à polarisation circulaire simple excitation (a) Carré à coins coupés (b) Alimenté dans le côté, (c) Avec une fente, (d) Circulaire coupé.**

On peut aussi obtenir la polarisation circulaire dans les antennes patch avec le déphasage de  $90^\circ$  au niveau du circuit d'alimentation au moyen de deux méthodes [1]:

- Ajout d'un tronçon de ligne de longueur  $\lambda/4$  (a), la bande passante sera dans ce cas limitée en fréquence.
- Avec l'utilisation d'un coupleur hybride 3 dB (b) qui permet la séparation de la puissance en deux ondes ayant des énergies égales.



*Figure II. 10 : Antennes à polarisation circulaires à double excitations.*

### II.3.5 Facteur de perte de polarisation et efficacité

En général, la polarisation de l'onde au niveau de récepteur ne sera pas la même au niveau de l'antenne de réception. La quantité de puissance extraite par l'antenne à partir du signal entrant ne sera pas maximale en raison de la perte de polarisation [12]. C'est ce qu'on appelle désadaptation de polarisation. Le champ électrique de l'onde entrante est comme suit :

$$\vec{E}_i = \vec{u}_w E_i \quad (\text{II. 31})$$

Avec :  $\vec{u}_w$  est le vecteur unitaire de l'onde et  $E_i$  est le champ électrique d'onde entrante.

La polarisation du champ électrique de l'antenne de réception peut être exprimée comme suit:

$$\vec{E}_a = \vec{u}_a E_a \quad (\text{II. 32})$$

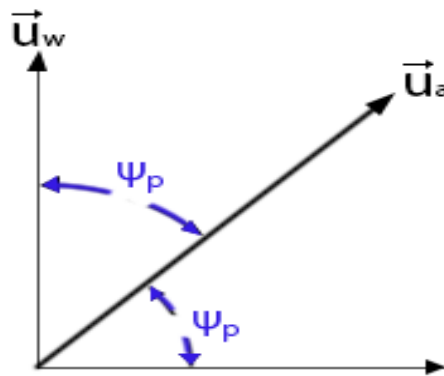
Avec :  $\vec{u}_a$  est son vecteur unitaire (vecteur de polarisation).

La perte de polarisation est donnée comme un facteur de perte de polarisation (PLF). Ce facteur peut être défini en fonction de la polarisation d'antenne dans son mode de transmission.

$$PLF = |\vec{u}_w \cdot \vec{u}_a|^2 = |\cos \Psi_p|^2 \quad (\text{II. 33})$$

Avec :  $\Psi_p$  est l'angle entre les deux vecteurs unitaires.

L'alignement relatif de la polarisation de l'onde entrante et de l'antenne est illustré à la figure II.11. Si l'antenne est adaptée à la polarisation, son PLF sera égal à 1 et l'antenne extraira la puissance maximale de l'onde entrante.



*Figure II. 11 : Vecteurs unitaires de l'onde incidente ( $\vec{u}_w$ ) et l'antenne ( $\vec{u}_a$ ) et le facteur de perte de polarisation (PLF).*

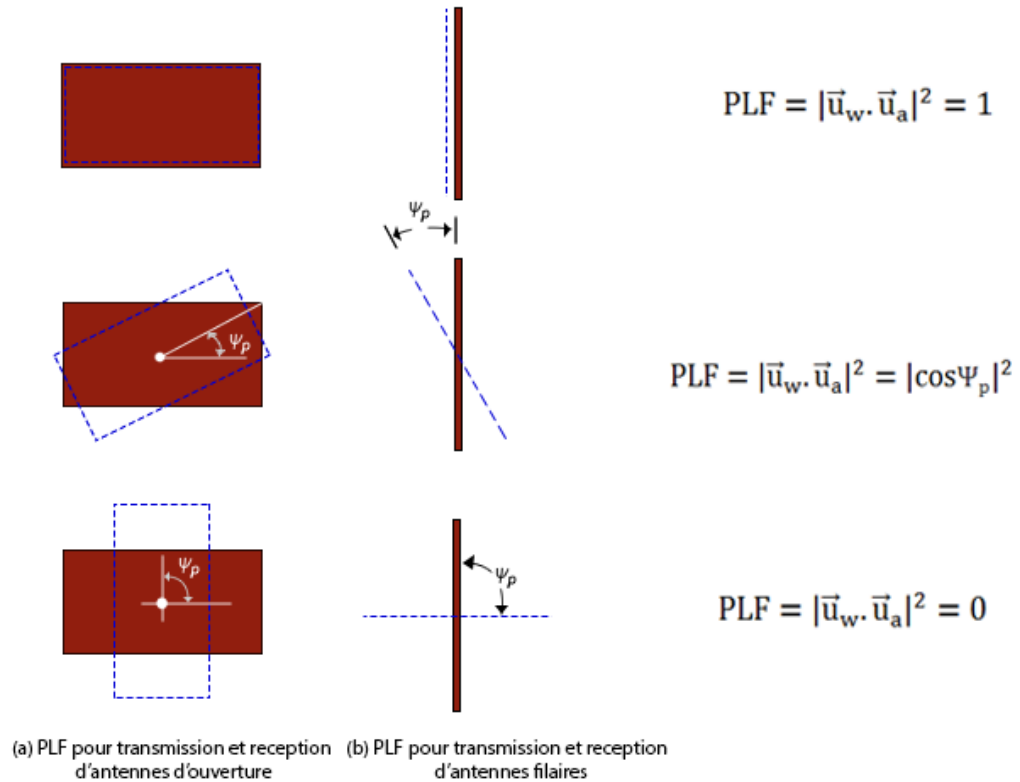
L'efficacité de la polarisation  $E_p$  est un autre facteur utilisé pour présenter les caractéristiques de polarisation d'une onde et d'une antenne. Ce dernier est défini comme le rapport entre la puissance reçue par une antenne à partir d'une onde plane de polarisation arbitraire donnée et la puissance reçue par la même antenne d'une onde plane de la même densité de flux de puissance et de même direction de propagation.

$$E_p = \frac{|\vec{L}e \cdot \vec{E}_i|^2}{|\vec{L}e|^2 |\vec{E}_i|^2} \quad (\text{II. 34})$$

Avec :

- ❖  $\vec{L}e$  : Vecteur de la longueur effective de l'antenne.
- ❖  $\vec{E}_i$  : Champ électrique de l'onde donnée.

Lorsqu'une onde entrante et l'antenne sont polarisées linéairement, il y a une perte de puissance extraite de -3 dB, car la polarisation de l'onde entrante n'est pas alignée sur la polarisation de l'antenne. Le PLF est nul dans le cas de polarisation de l'antenne est orthogonale à la polarisation de l'onde entrante. La figure II.12 s'explique les facteurs de perte de polarisation (PLF) de deux types d'antennes: les fils et les ouvertures [12].



**Figure II. 12 : Facteurs de pertes de polarisation linéaire (PLF) pour les antennes à ouvertures et antennes filaires.**

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la propagation des ondes électromagnétiques dans le cas général, puis la polarisation de ces ondes (linéaire, elliptique et circulaire), après nous avons étalé sur le calcul du rapport axial qui définit le type de polarisation. En suite nous avons donné des exemples pour les antennes patches à polarisation circulaire, enfin, les facteurs de pertes de polarisation ont été bien présentés. Malgré qu'il existe trois types de polarisation en théorie, il n'existe pas une antenne parfaitement polarisée circulairement dans la pratique, mais elle a également un rapport axial proche de un. Les antennes patches à polarisation circulaire sont largement utilisées dans les communications spatiales et radars vu leurs meilleurs caractéristiques par rapport à la polarisation linéaire.





**CHAPITRE III :**  
**Résultats et discussions**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons proposer une antenne constituée de deux patches, l'une travaille à la bande WI-FI 2.5 GHz et l'autre à la bande WI-FI 5.5 GHz. L'intégration des deux antennes nous permet de concevoir une seule antenne à double bandes avec polarisation circulaire. L'antenne proposée a la caractéristique de la polarisation circulaire sur chacune des deux bandes, ce qui est très intéressant dans la pratique. Les résultats de simulation ont été trouvés par les simulateurs CST et HFSS, a pour but d'augmenter la crédibilité du travail.

Ce chapitre commencera premièrement par une présentation des deux logiciels utilisés dans ce travail, après nous présenterons les conceptions et configurations des antennes proposées, en suite nous discuterons les résultats de simulation, et enfin une comparaison entre nos résultats et les résultats disponibles dans la littérature [3]-[6], [8] sera effectuée.

### **III.2 Logiciels de simulation utilisés**

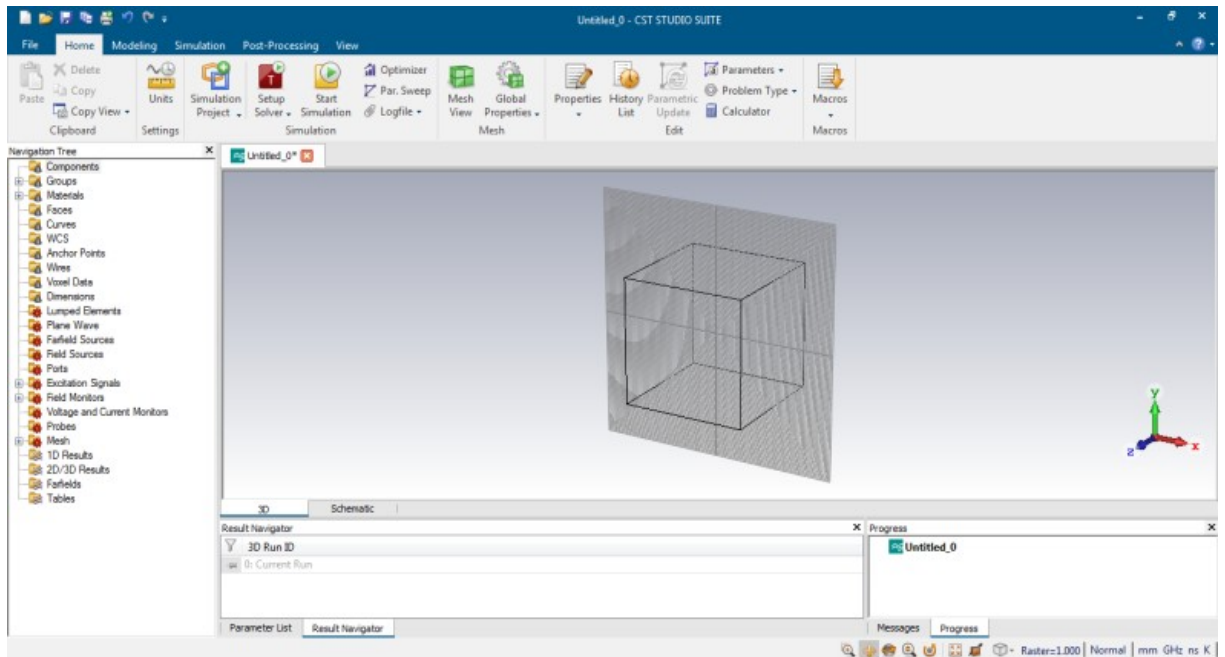
Dans la phase de conception des antennes, l'utilisation d'un simulateur électromagnétique se révèle indispensable pour réduire les coûts liés à la réalisation et à la mesure [33]. Dans ce travail, les résultats de simulation sont obtenus à travers deux logiciels: CST (Computer Simulation Technology) et HFSS (High Frequency Structure Simulator). Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu des deux logiciels.

#### **III.2.1 Logiciel CST**

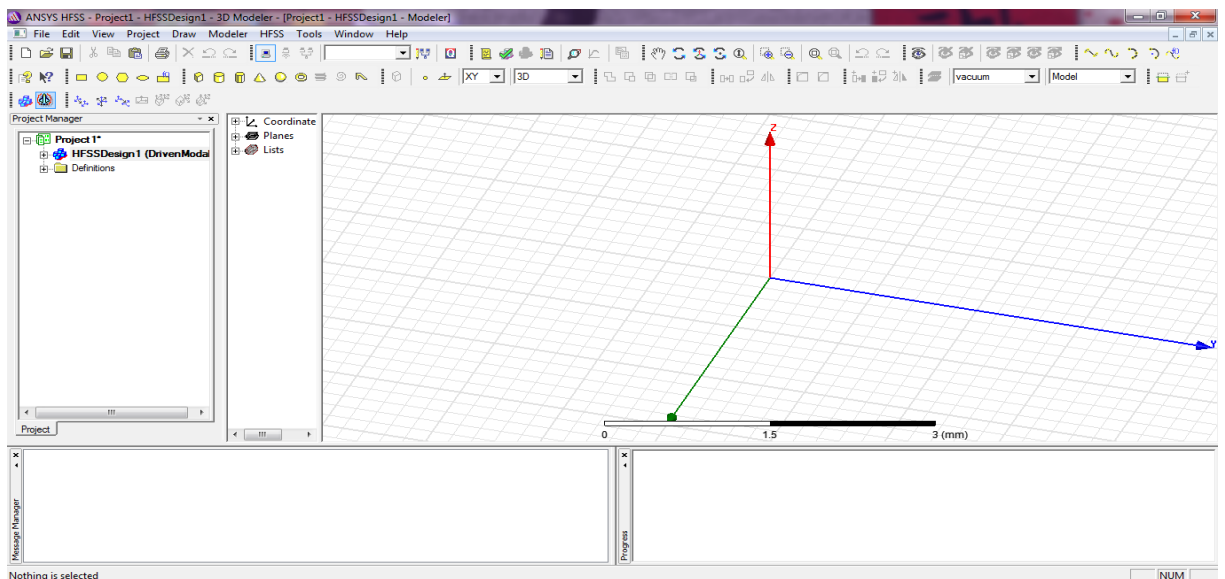
Le logiciel CST est un simulateur développé par une compagnie allemande, il est utilisé pour la simulation électromagnétique basée principalement sur la méthode des intégrations finies [33]. Il contient plusieurs modules qui sont destinés à plusieurs disciplines. La figure III.1 présente l'interface de ce logiciel.

#### **III.2.2 Logiciel HFSS**

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), est un simulateur électromagnétique basé sur la méthode des éléments finis destiné aux problèmes d'électromagnétisme [34]. La figure III.2 présente l'interface de ce logiciel.



*Figure III. 1 : Interface du logiciel CST Studio suite.*



*Figure III. 2 : Interface du logiciel HFSS.*

### III.3 Conception de l'antenne

Le travail proposé à concevoir trois antennes patchs à polarisation circulaire fonctionnant dans les bandes Wi-Fi. La première antenne fonctionne à la fréquence de 2.5 GHz, et la deuxième fonctionne à la fréquence de 5.5 GHz. L'intégration des deux antennes nous permet de construire une seule antenne ayant les deux bandes Wi-Fi 2.5 GHz et 5.5 GHz.

La matière diélectrique (Substrat) utilisée dans toutes les conceptions des antennes est de type RT5880, avec une épaisseur  $h = 1.588$  mm, un constant diélectrique  $\epsilon_r = 2.2$ , et un tangente de perte de 0.0009. La face inférieure de substrat contient un plan de masse avec une épaisseur de cuivre de 0.0175 mm.

### III.3.1 Antenne patch à la fréquence 2.5 GHz

Cette antenne est proposée pour laquelle elle fonctionne à la fréquence 2.5 GHz avec polarisation circulaire. Elle a une forme carrée, de dimensions  $W_{p1} \times L_{p1}$ . Pour avoir une polarisation circulaire, deux fentes ayant les mêmes dimensions  $W_{fe1} \times L_{fe1}$  au milieu du patch ont été réalisées, avec un angle entre elles de  $45^\circ$ . Ce patch placé sur le substrat RT5880 de taille  $W_{s1} \times L_{s1}$  avec plan de masse sur la face inférieure de substrat. Le patch est alimenté par une ligne micro-ruban de 50 Ohm, et elle est divisée en trois parties: la première avec les dimensions  $W_{f1} \times L_{f1}$ , la deuxième avec les dimensions  $W_{pc} \times L_{pc}$  et la troisième avec les dimensions  $W_{fd} \times L_{fd}$ . La figure III.3 présente la structure de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz, et le tableau III.1 présente ses dimensions après optimisation.

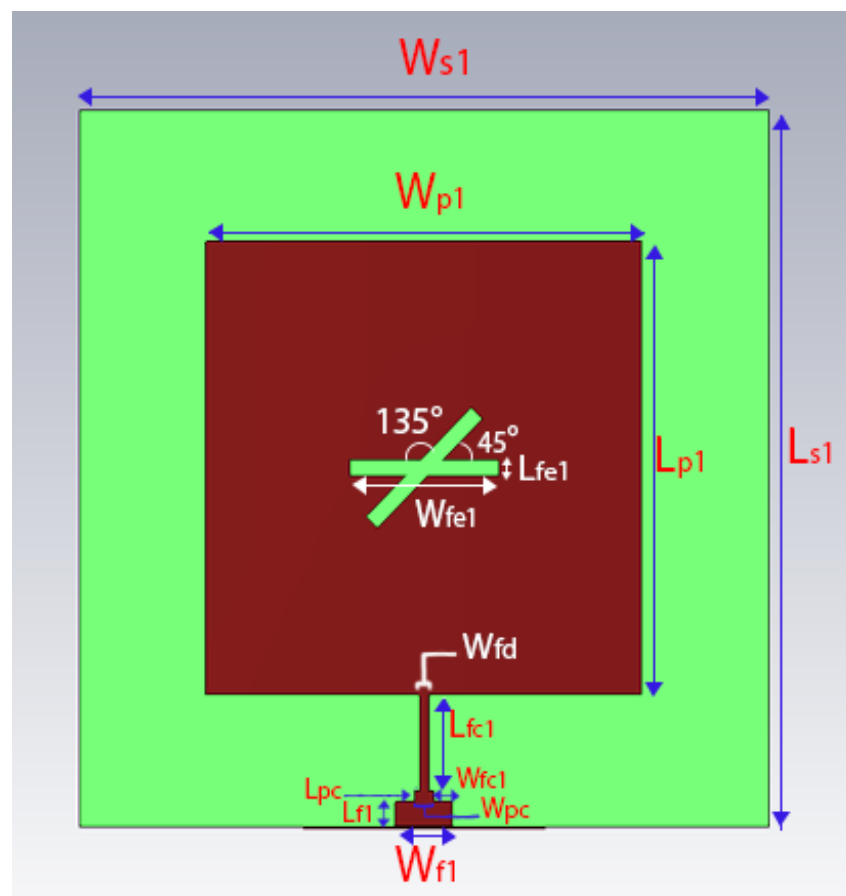


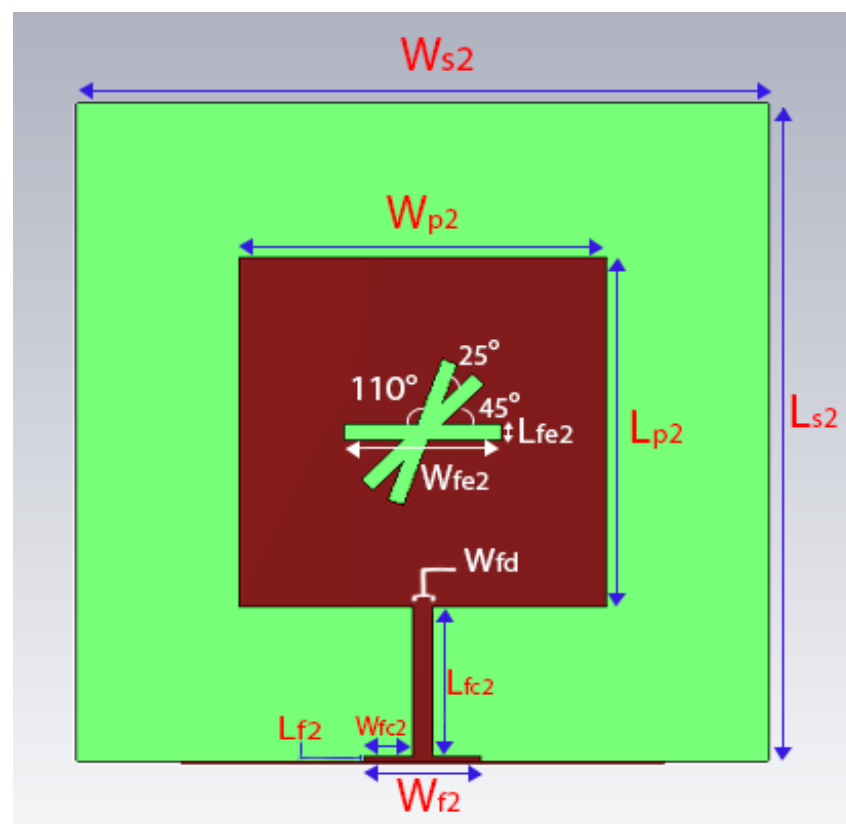
Figure III. 3 : Antenne patch à la fréquence 2.5 GHz à polarisation circulaire.

**Tableau III 1 : Valeurs des dimensions de l'antenne patch proposée à la fréquence 2.5 GHz.**

Dimensions	$W_{s1}$	$L_{s1}$	$W_{p1}$	$L_{p1}$	$W_{f1}$	$L_{f1}$	$W_{fc1}$	$L_{fc1}$	$W_{fe1}$	$L_{fe1}$	$W_{fd}$	$W_{pc}$	$L_{pc}$
Valeurs (mm)	60	60	38	38	5	2.1	1.67	8	12.88	1.29	0.83	0.42	0.9

### III.3.2 Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz

La deuxième antenne proposée fonctionne à la fréquence de 5.5 GHz. Elle a une forme carrée, de dimensions  $W_{p2} \times L_{p2}$  avec trois fentes ayant les mêmes dimensions  $W_{fe2} \times L_{fe2}$  au centre du patch, l'angle entre la première et la deuxième fente est de  $45^\circ$ , et l'angle entre la deuxième et la troisième fente est de  $25^\circ$ . Ce patch placé sur le même substrat RT5880 de taille  $W_{s2} \times L_{s2}$  avec plan de masse sur la face inférieure du substrat. Ce patch est alimenté par une ligne micro-ruban de 50 Ohm qui se divise en deux parties: la première avec les dimensions  $W_{fe2} \times L_{fe2}$ , et le deuxième avec les dimensions  $W_{fd} \times L_{fc2}$ , comme présentée dans la figure III.4. Les valeurs des dimensions de cette antenne sont présentées par le tableau III.2.



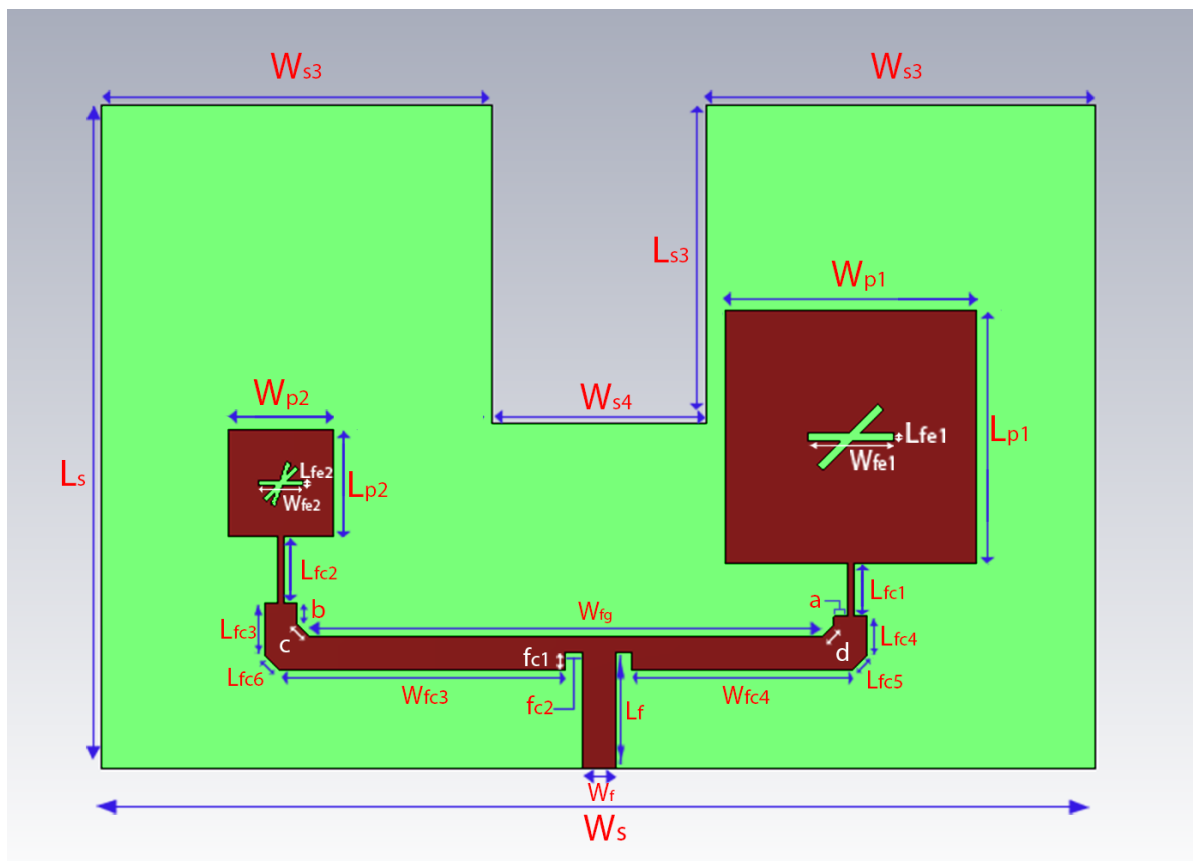
**Figure III. 4 : Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz à polarisation circulaire.**

**Tableau III.2 : Valeurs des dimensions de l'antenne patch proposée à la fréquence 5.5 GHz.**

Dimensions	$W_{s2}$	$L_{s2}$	$W_{p2}$	$L_{p2}$	$W_{f2}$	$L_{f2}$	$W_{fc2}$	$L_{fc2}$	$W_{fe2}$	$L_{fe2}$	$W_{fd}$
Valeurs (mm)	30	30	16	16	5	0.20	2.08	6.80	6.18	0.68	0.83

**III.3.3 Antenne patch double bandes à 2.5 et 5.5 GHz**

La troisième antenne regroupe les deux antennes proposées auparavant. Pour éliminer le couplage entre les deux patches, une ouverture de taille  $W_{s4} \times L_{s3}$  a été réalisée comme la montre la figure III.5. Cette antenne travaille aux fréquences de 2.5 et 5.5 GHz. Les dimensions de cette antenne sont présentées dans le tableau III.3.



**Figure III. 5 : Antenne patch globale, fonctionne aux fréquences 2.5 GHz et 5.5 GHz.**

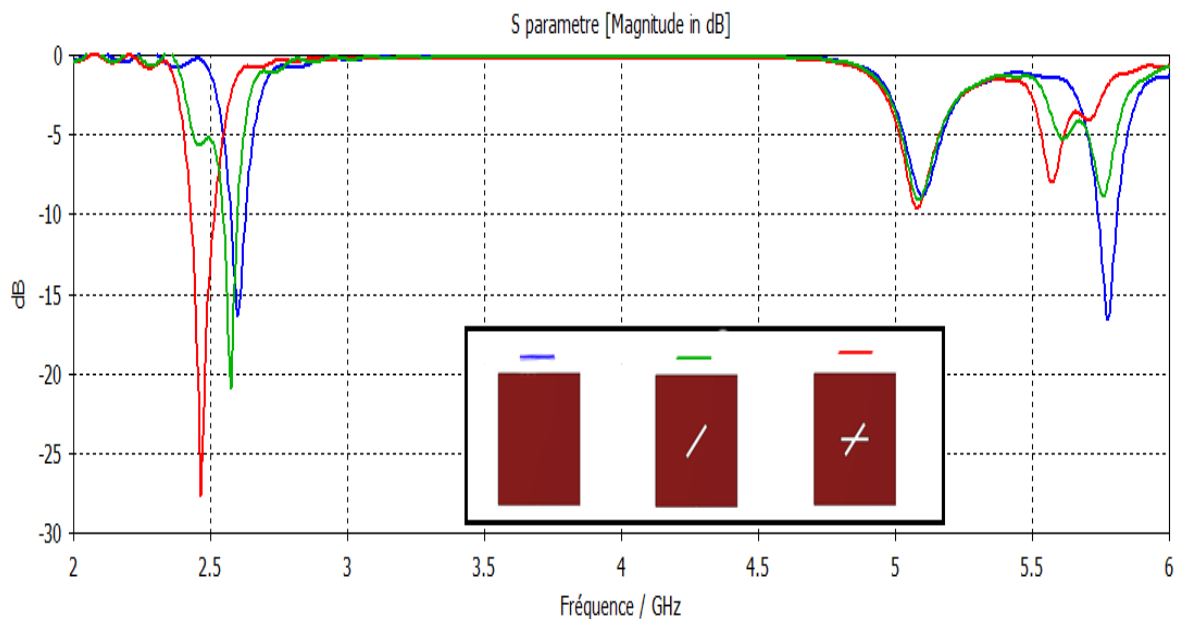
**Tableau III. 3 : Valeurs des dimensions de l'antenne globale double bandes.**

Dimensions	$W_s$	$W_{s3}$	$W_{s4}$	$L_s$	$L_{s3}$	$W_f$	$W_{fg}$	$L_f$	$W_{fc3}$	$W_{fc4}$
Valeurs (mm)	150	58.8	38	100	48	5	77.34	17.6	43.26	33.26
Dimensions	$L_{fc3}$	$L_{fc4}$	$L_{fc5}$	$L_{fc6}$	$f_{c1}$	$f_{c2}$	$a$	$b$	$c$	$d$
Valeurs (mm)	7.76	5.76	3.17	3.17	2.6	2.5	1.17	3.17	2.59	2.59

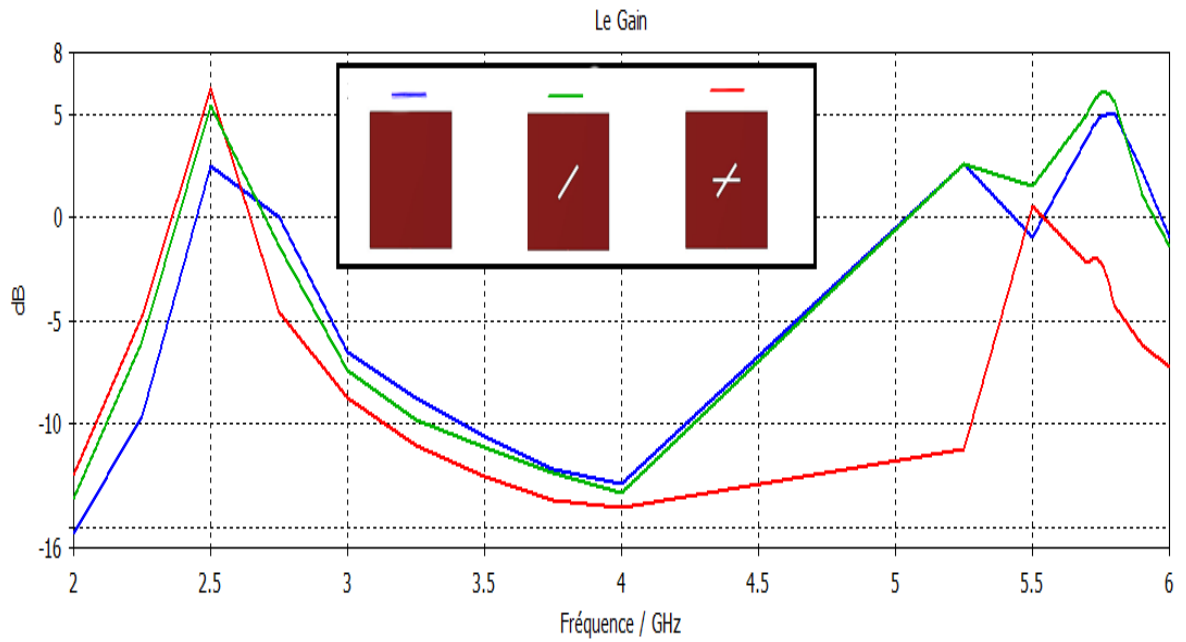
### III.4 Résultats et discussions

#### III.4.1 Antenne patch à la fréquence de 2.5 GHz

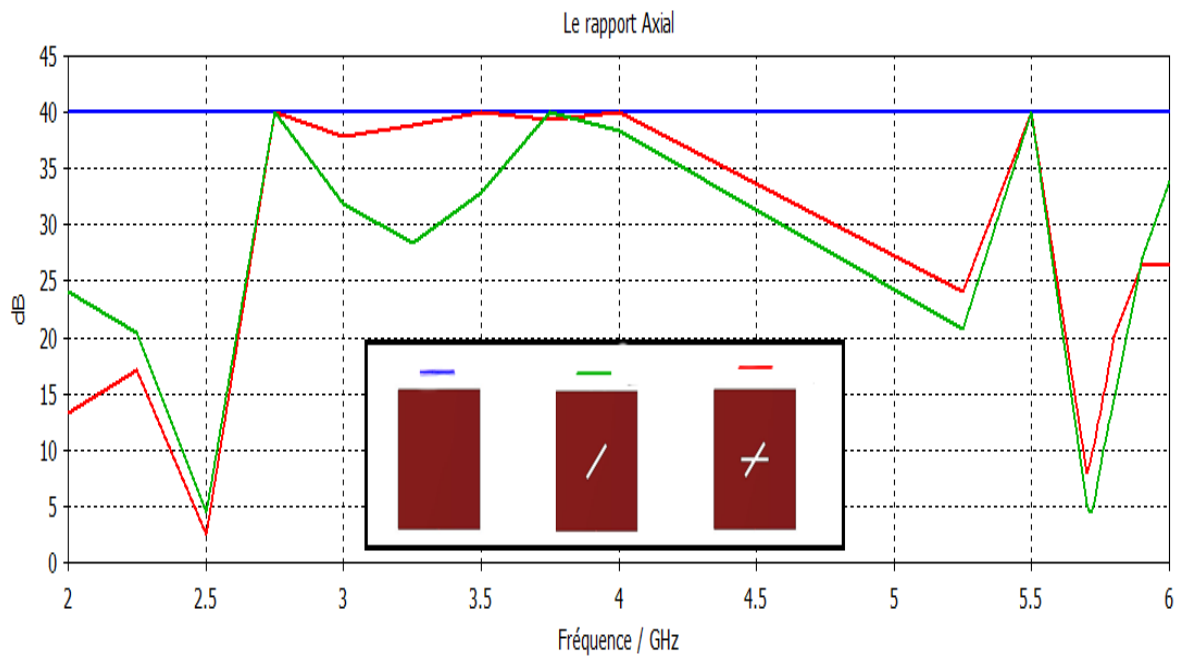
La conception de cette antenne est passée par trois étapes. Premièrement, on utilise un patch carré pour pouvoir fonctionner l'entour la fréquence de 2.5 GHz. Cette antenne ayant les caractéristiques suivantes : un coefficient de réflexion S11 inférieur à -10 dB, un gain de 2.54 dBi et un rapport axial constante égal à 40 dB (polarisation linéaire). Deuxièmement, pour obtenir une polarisation circulaire, en coupant une ouverture (fente) au milieu du patch avec un angle de 45° par rapport à l'horizontal, ce qui permet d'améliorer le gain qui devient égal à 5.41 dBi, et un rapport axial très proche de 3 dB. Troisièmement, pour améliorer le rapport axial encore une fois, on doit ajouter une deuxième fente au milieu du patch, avec un angle de 45° entre les deux fentes. Dans ce cas, on obtient un S11 inférieur à -10 dB jusqu'à -12 dB, avec un très bon gain jusqu'à 6.19 dBi à 2.5 GHz et un rapport axial inférieur à 3 dB (2.59 dB) et par conséquent une polarisation circulaire de l'antenne. Les figures III.6, III.7 et III.8 présentent respectivement le paramètre S11, le gain et le rapport axial des trois étapes cités précédemment.



**Figure III. 6 : Coefficient de réflexion S11 de la première antenne proposée en fonction de la fréquence pour les trois formes du patch.**



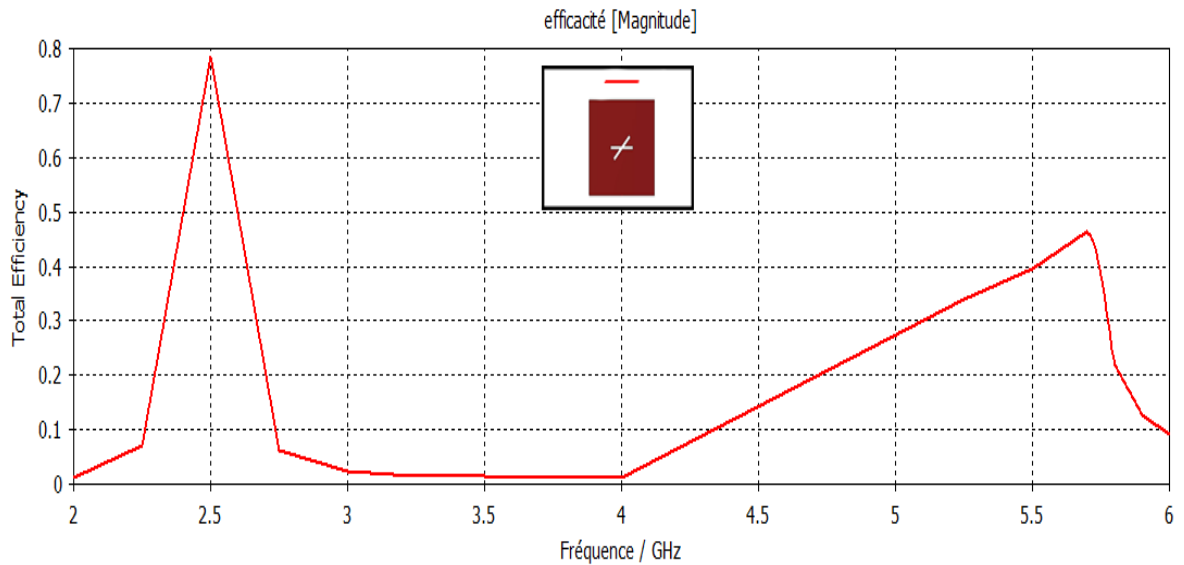
**Figure III. 7 :** Gain de la première antenne proposée en fonction de la fréquence pour les trois formes du patch.



**Figure III. 8 :** Rapport axial de la première antenne proposée pour les trois formes du patch.

Donc, l'antenne optimisée est la troisième forme ayant une polarisation circulaire à la fréquence de 2.5 GHz avec une efficacité supérieure à 78% (figure III.9).

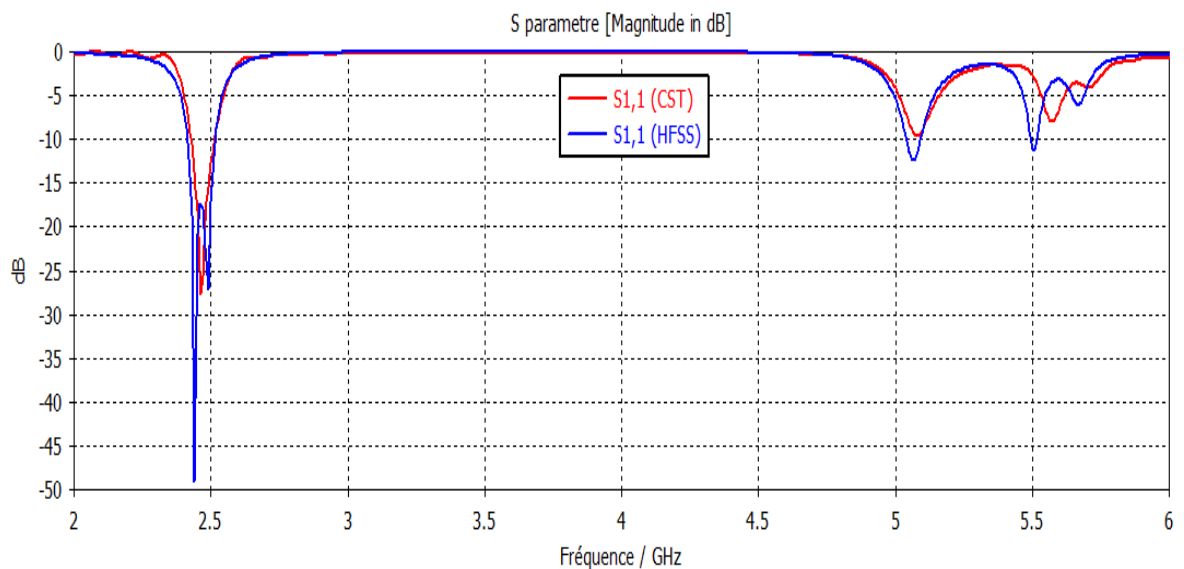




**Figure III. 9 : Efficacité de la première antenne proposée.**

#### III.4.1.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS

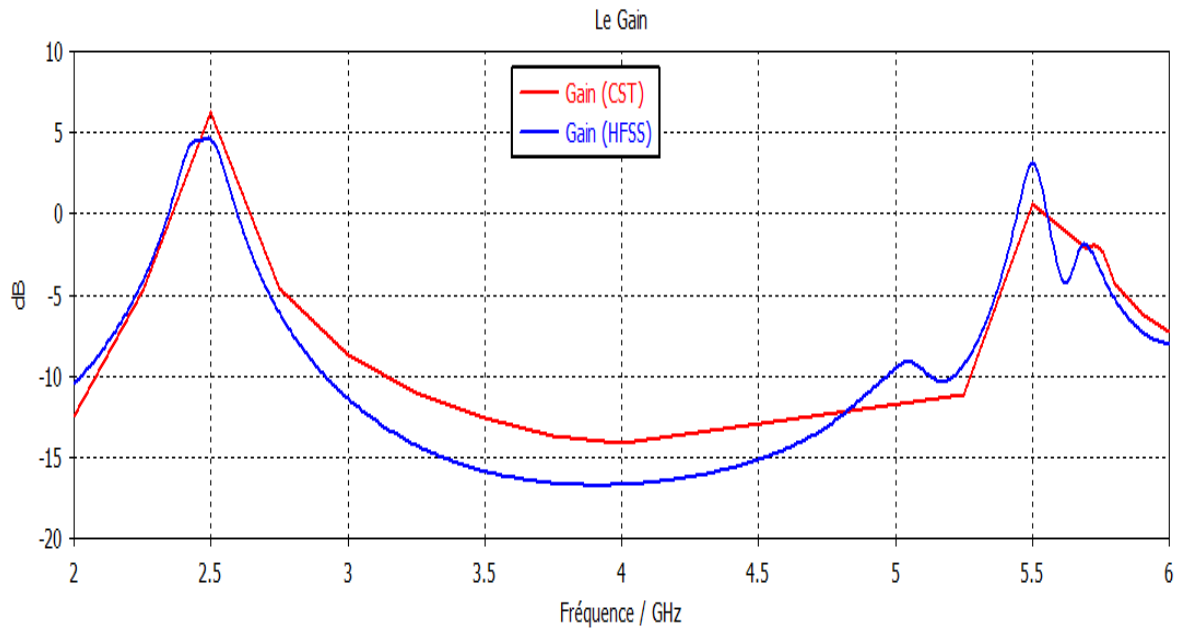
Une comparaison entre les résultats du CST et du HFSS a été effectuée dans cette partie. On obtient un très bon accord entre les résultats des deux simulateurs, ce qui montre la validité de nos résultats. (Voir les figures III.10 jusqu'à III.14).



**Figure III. 10 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée à 2.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

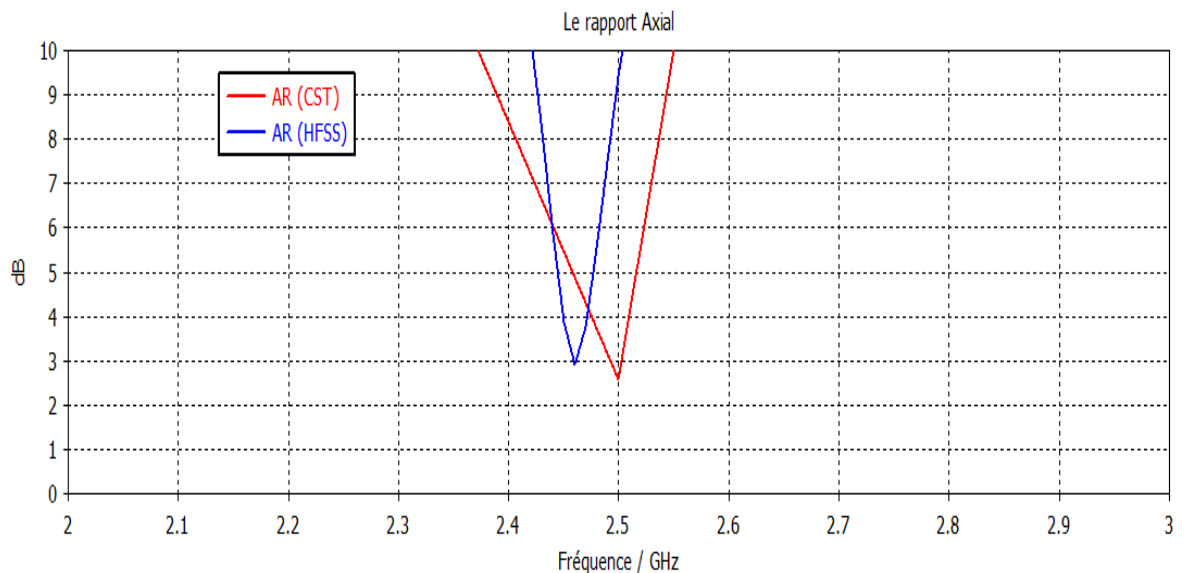
Le gain de l'antenne avec le simulateur HFSS est inférieur au gain trouvé avec le CST avec un petit décalage fréquentiel (figure III. 20). Ceci peut être expliqué par l'utilisation de deux méthodes différentes pour faire la simulation à savoir :

- Éléments éléments finis pour HFSS
- intégrations finies pour CST



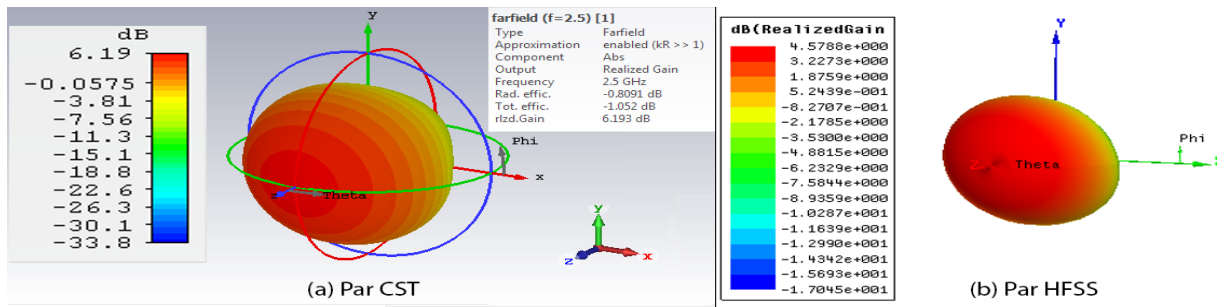
**Figure III. 11 : Gain de l'antenne proposée à 2.5 GHz**

Les valeurs de rapport axial par les deux simulateurs sont proches avec un petit décalage fréquentiel comme le montre dans la figure III. 12.

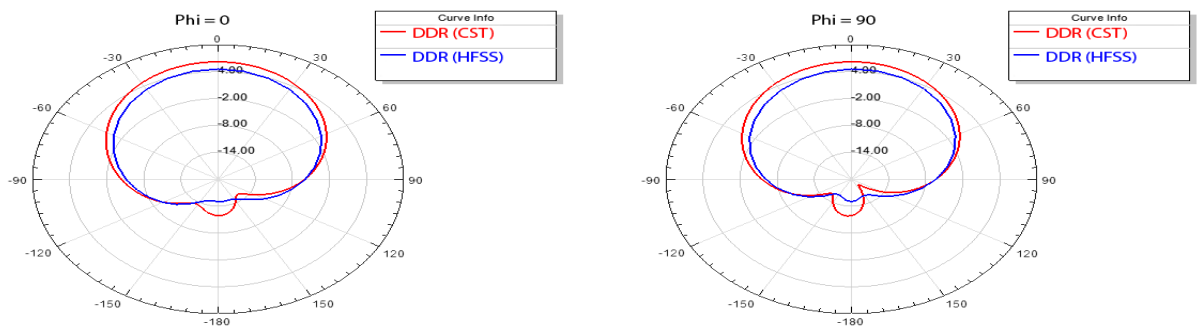


**Figure III. 12 : Rapport axial de l'antenne proposée à 2.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

Les figures III.13 et III.14 présentent respectivement le DDR de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz par les simulateurs CST et HFSS. D'après ces DDR l'antenne rayonne dans la direction ( $\theta = 0, \varphi = 0$ ), cette direction est appelée *broadside*.



**Figure III. 13 : DDR 3D de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

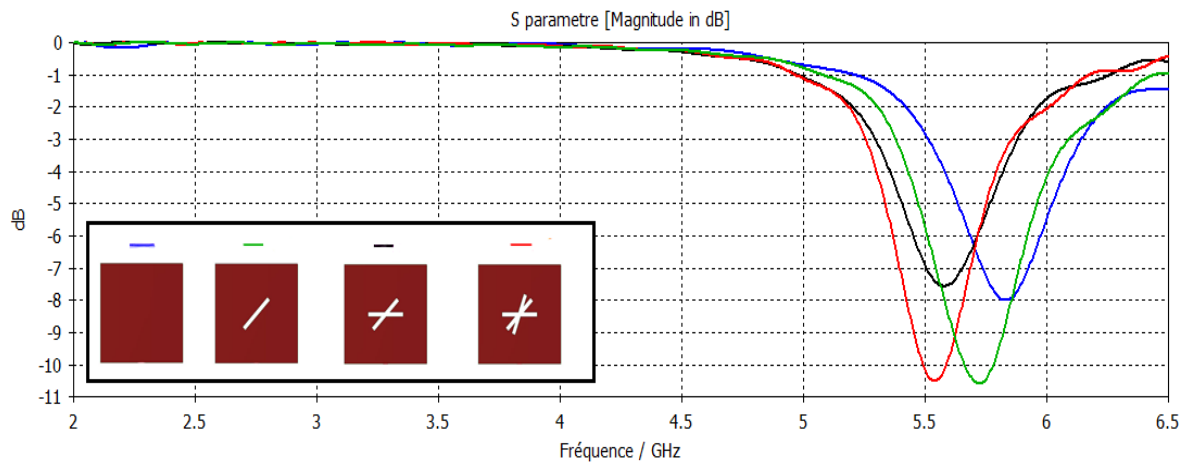


**Figure III. 14 : DDR polaire de l'antenne proposée à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

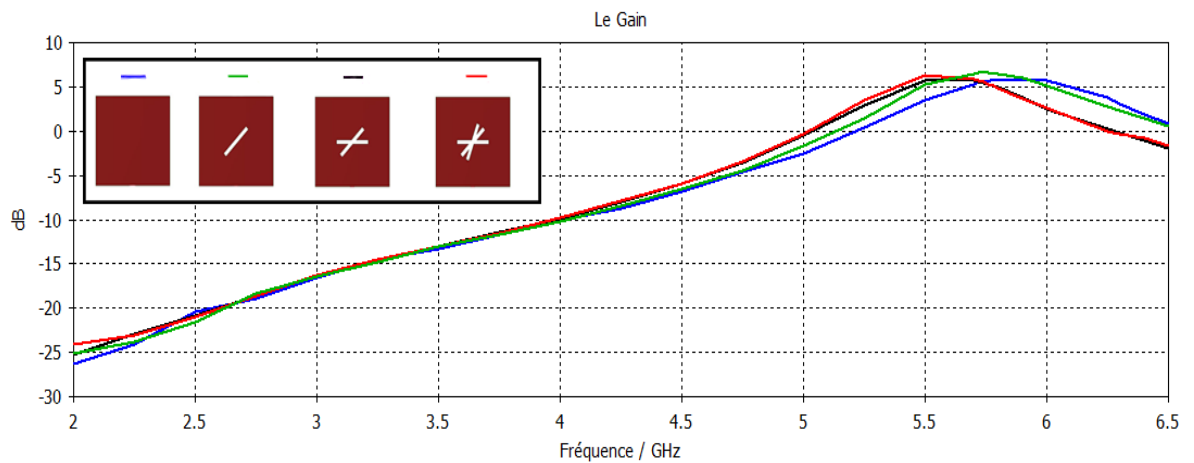
### III.4.2 Antenne patch à la fréquence 5.5 GHz

La deuxième antenne proposée fonctionne à la fréquence 5.5 GHz (bande WI-FI). La conception de cette antenne passe par quatre étapes. En premier lieu, un patch carré a été créé avec une surface inférieure à la première antenne, ayant un coefficient de réflexion  $S_{11}$  inférieur à -10 dB, un gain de 3.6 dBi et un rapport axial stable égal à 40 dB (polarisation linéaire). Deuxièmement, pour générer une polarisation circulaire, en ajoutant une fente au milieu du patch avec un angle d'inclinaison de  $45^\circ$  par rapport l'horizontal. Cette modification donne un coefficient de réflexion de -5.7 dB, une amélioration du gain jusqu'à 5.2 dBi et un rapport axial de 7.7 dB. Après, en ajoutant une deuxième fente au milieu du patch avec un angle  $45^\circ$  entre les deux fentes. Cette dernière donne un coefficient de réflexion  $S_{11}$  meilleure par rapport au cas précédent de -6.9 dB, avec petit augmentation de gain (5.6 dBi) et un rapport axial de 8.6 dB. Enfin, en ajoutant une troisième fente toujours au milieu du patch avec un angle de  $25^\circ$  par rapport à la deuxième fente. Cette forme d'antenne nous donne les meilleurs résultats, avec un coefficient de réflexion jusqu'à -10.12 dB, un gain de 6.2 dBi, et un bon rapport axial égal à 0.8 dB, donc une très bonne polarisation circulaire.

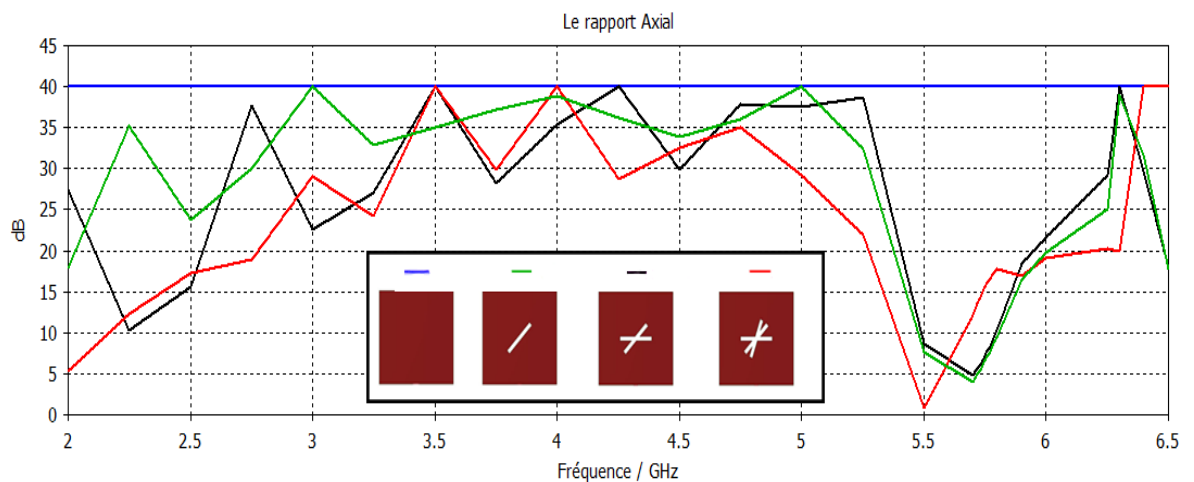
Les figures III. 15, 16 et 17 présentent respectivement le paramètre S11, le gain et le rapport axial des quatre formes du patch, simulées par CST.



**Figure III. 15 :** Coefficient de réflexion S11 de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch.

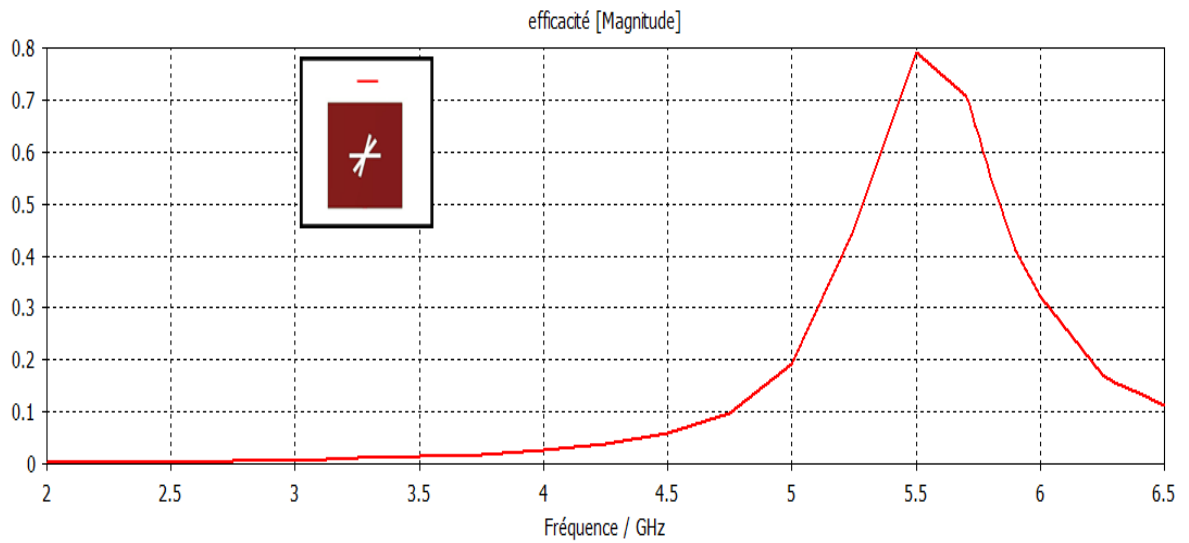


**Figure III. 16 :** Gain de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch.



**Figure III. 17 :** Rapport axial de la deuxième antenne proposée avec quatre formes du patch.

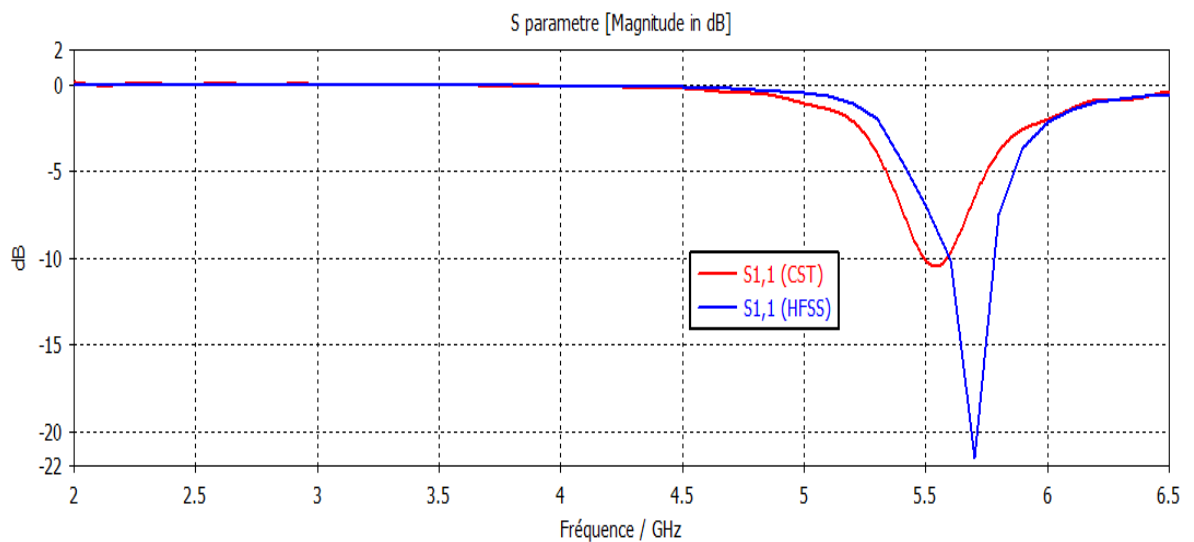
L'efficacité de cette antenne est supérieure à 79 % (figure III.18).



**Figure III. 18 : Efficacité de la deuxième antenne proposée pour la quatrième forme du patch.**

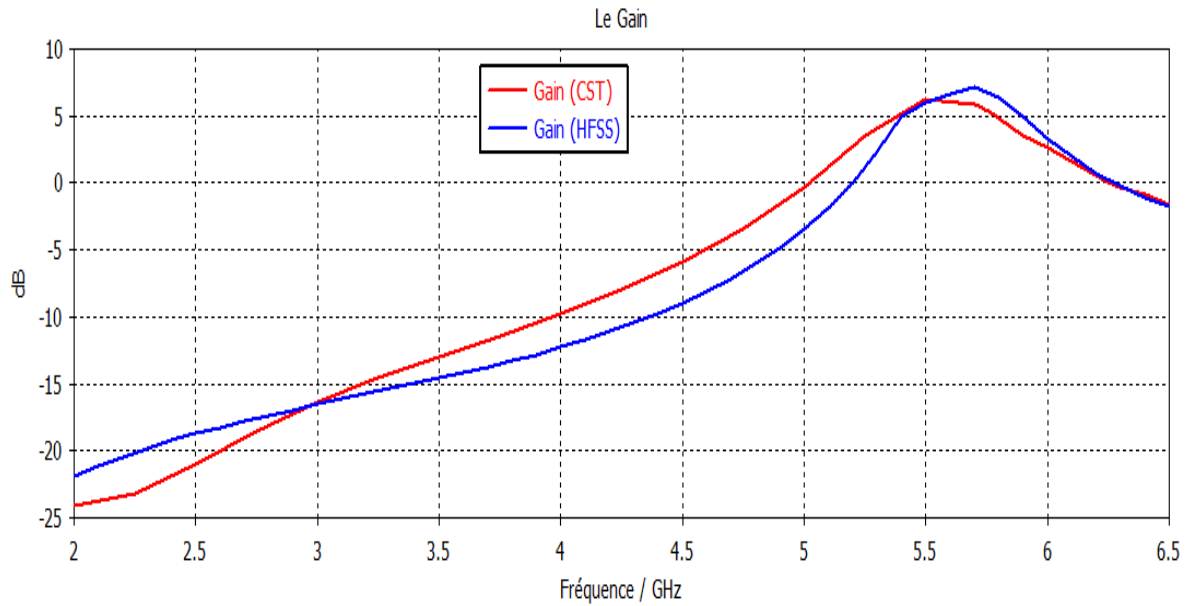
#### III.4.2.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS

Le coefficient de réflexion S11 par les deux simulateurs est inférieur à -10 dB, mais il y a un petit décalage fréquentiel sur le S11 de HFSS à cause de la différence de méthode entre les deux logiciel (figure III.19).



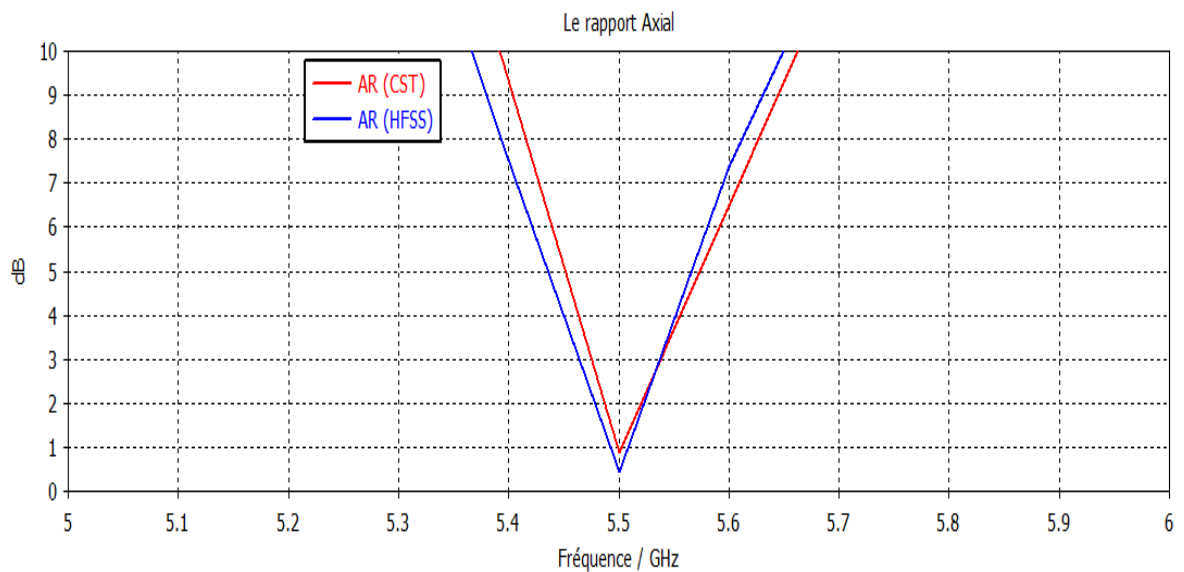
**Figure III. 19 : Coefficient de réflexion S11 de la deuxième antenne proposée, simulé par CST et HFSS.**

Le gain de cette antenne presque le même avec les deux simulateurs à la fréquence de 5.5 GHz, comme représenté par la figure III.20.



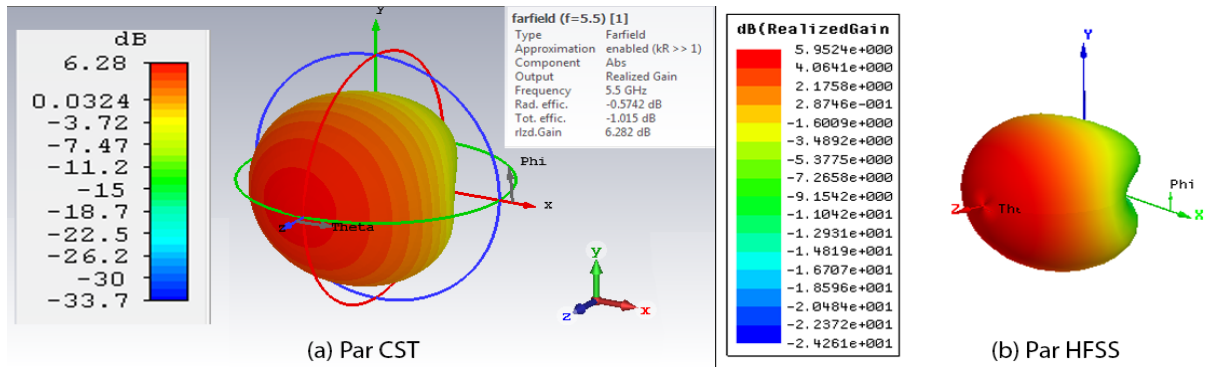
**Figure III. 20 : Gain de la deuxième antenne proposée, simulé par CST et HFSS.**

La figure III.21 présente les rapports axiaux des deux simulateurs, qui sont tous les deux inférieurs à 3 dB et plus proches entre eux à la fréquence 5.5 GHz.

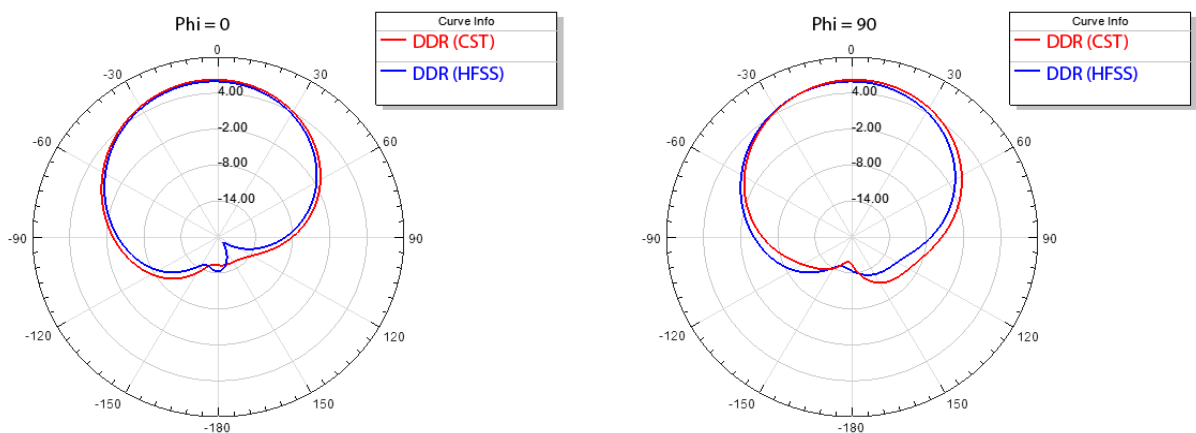


**Figure III. 21 : Rapport axial de la deuxième antenne proposée à 5.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

Les figures III.22 et III.23 présentent respectivement le DDR de l'antenne proposée à la fréquence de 5.5 GHz par les deux simulateurs CST et HFSS. Les deux DDR rayonnent dans la direction *broadside*.



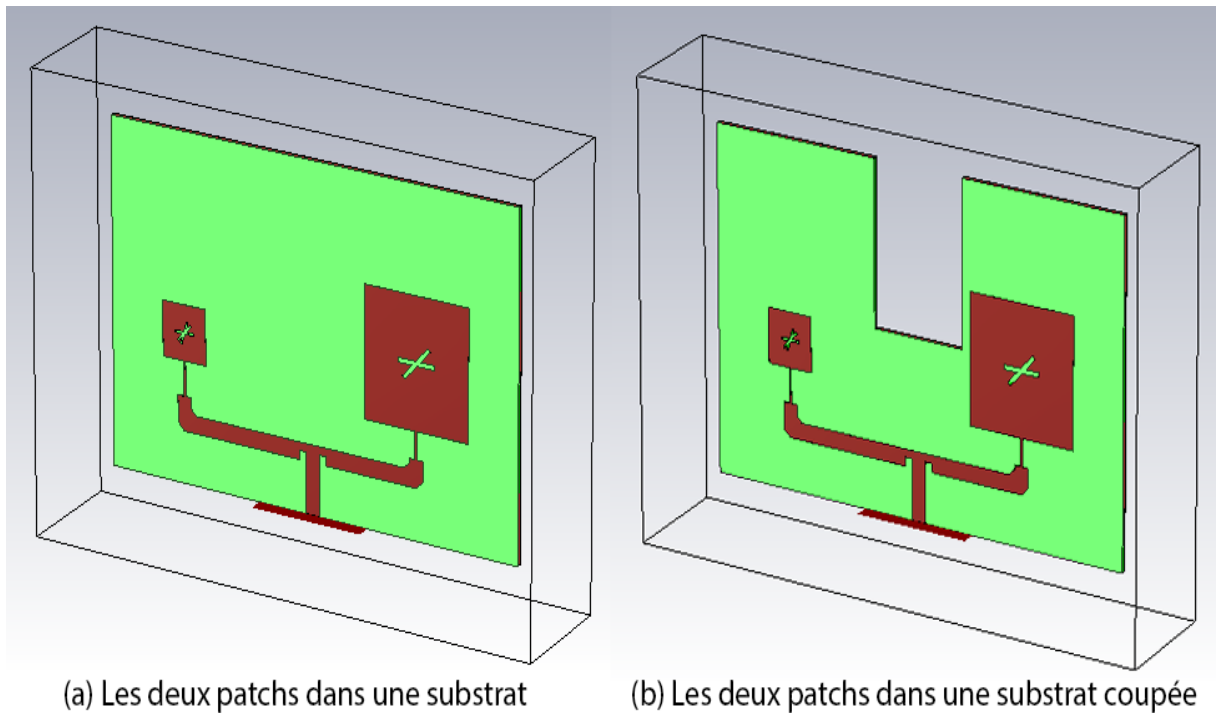
**Figure III. 22 : DDR 3D de la deuxième antenne proposée à la fréquence de 5.5 GHz, simulé par CST et HFSS.**



**Figure III. 23 : DDR 2D polaire de la deuxième antenne proposée à la fréquence de 5.5 GHz, simulé par CST et HFSS.**

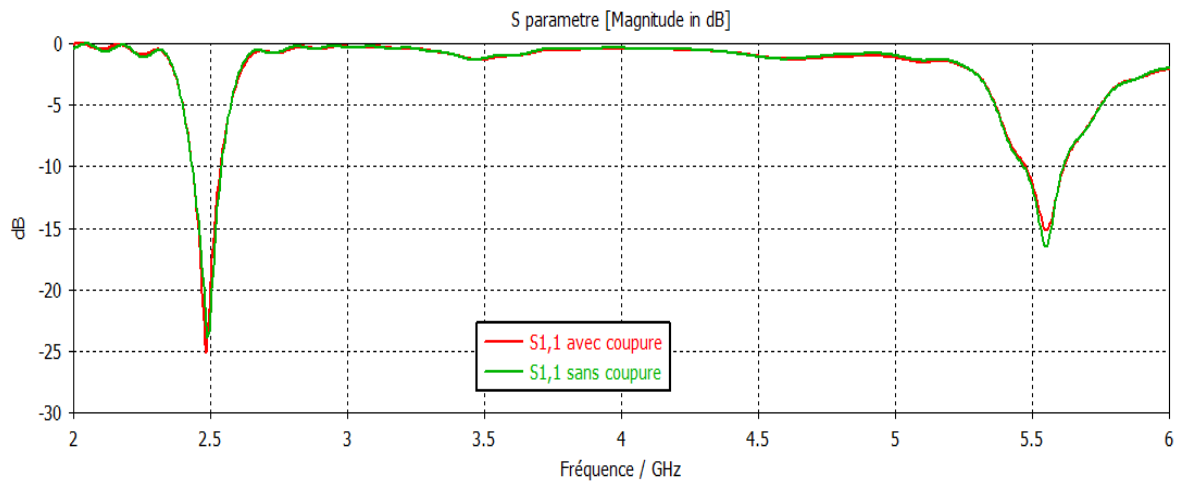
### III.4.3 Antenne patch double bandes de fréquences 2.5 et 5.5 GHz

La troisième antenne regroupe les deux premières, en conséquences elle fonctionne aux fréquences des deux bandes WI-FI 2.5 et 5.5 GHz avec une polarisation circulaire (figure III.14a). Un bon coefficient de réflexion à la fréquence de 2.5 GHz jusqu'à -21,86 dB et à la fréquence de 5.5 GHz jusqu'à -11,77 dB, un gain de 7.17 dBi à la fréquence 2.5 GHz et de 8.21 dBi à la fréquence de 5.5 GHz, mais les rapports axiaux deviennent supérieurs à 3 dB aux deux fréquences à cause du couplage entre les deux patches. Pour remédier à ce problème, on coupe la partie qui les sépare pour éliminer les ondes de surface et le couplage entre les deux patches (figure III.24b). Ceci nous donne les coefficients réflexion aux fréquences 2.5 et 5.5 GHz de -19,37 dB et -11,33 dB respectivement, les gains aux fréquences 2.5 et 5.5 GHz respectivement égal à 7,42 dB et 8,20 dB, et avec une amélioration en termes de rapport axial à la fréquence de 2.5 GHz jusqu'à 1,42 dB et 2,66 dB à la fréquence de 5.5 GHz. Ces rapports sont acceptables pour une polarisation circulaire.



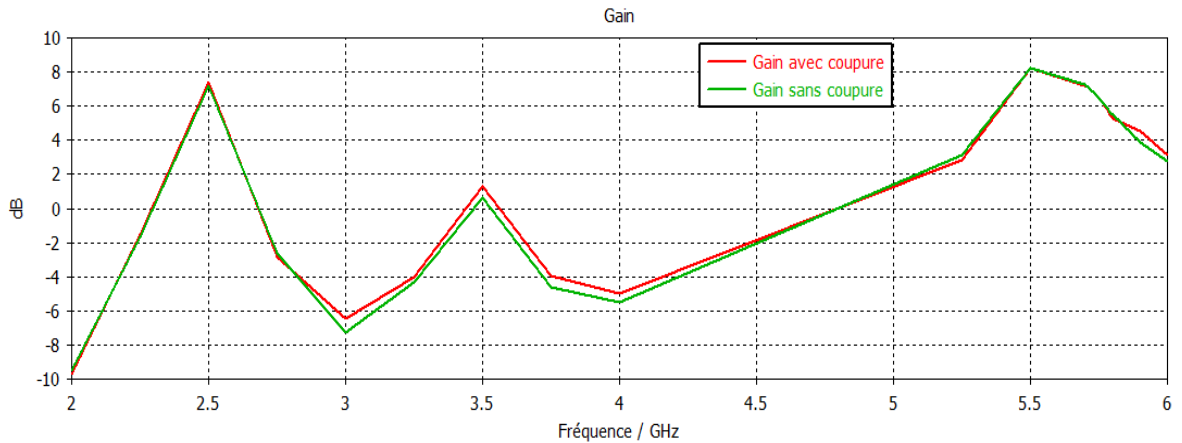
**Figure III. 24 : Antenne globale double bandes: (a) sans coupure (b) avec coupure.**

Les figures III.25, 26 et 27 présentent respectivement, le paramètre  $S_{11}$ , le gain et le rapport axial des deux formes d'antenne (figure III.24a et III.24b), simulées par le simulateur CST.

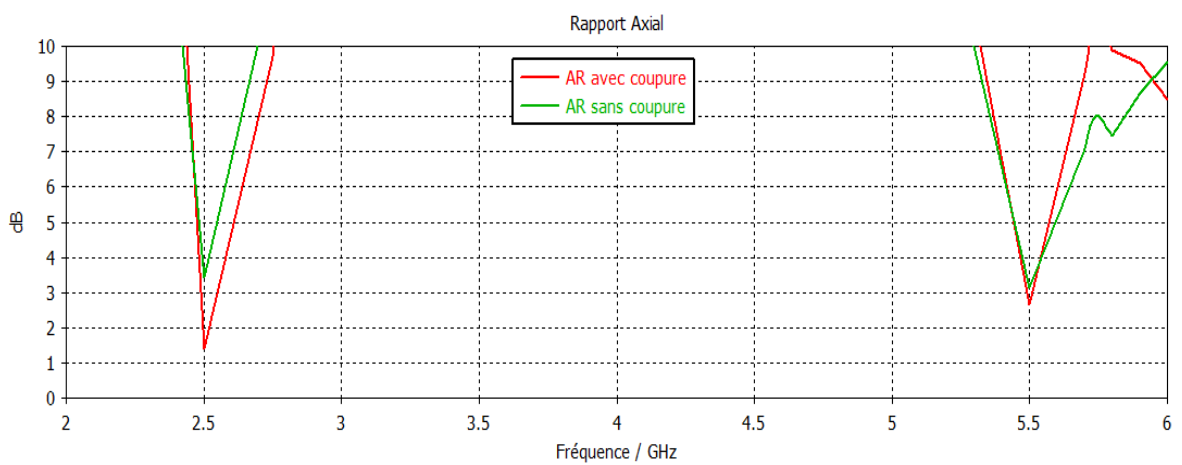


**Figure III. 25 : Coefficients de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée globale.**



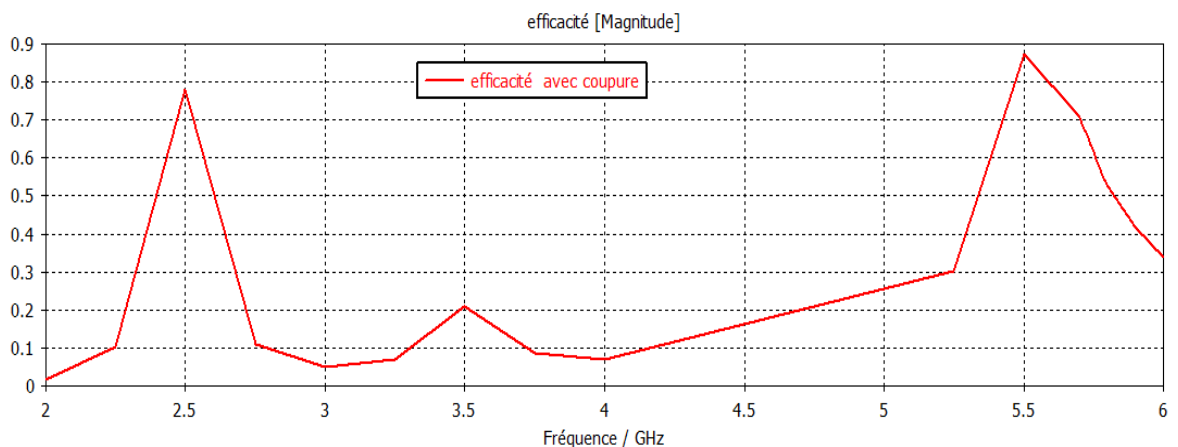


**Figure III. 26 : Gain de l'antenne proposée globale.**



**Figure III. 27 : Rapport axial de l'antenne proposée globale.**

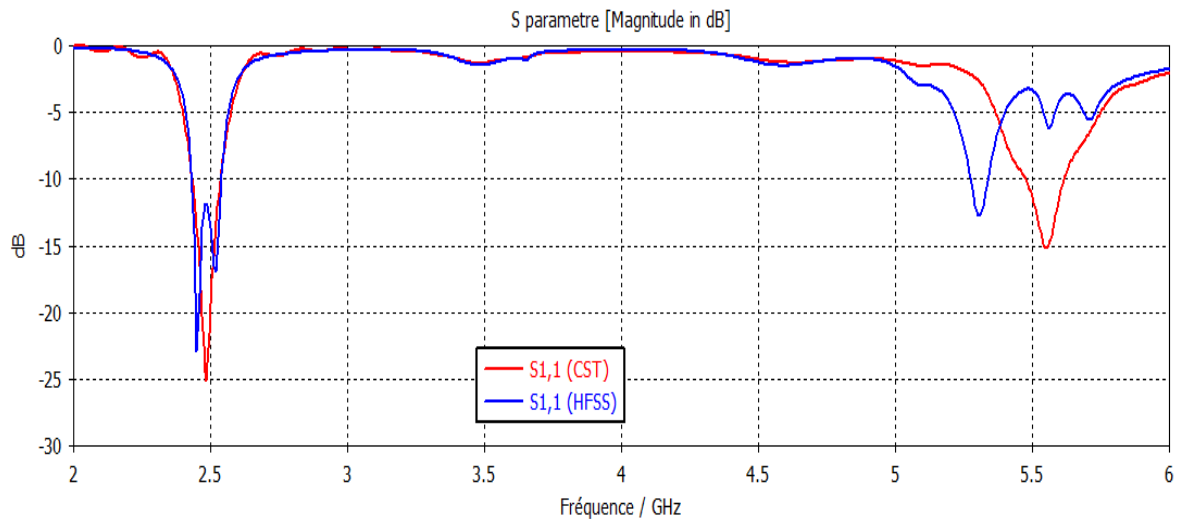
Les résultats de l'antenne avec une coupure (figure III.24b), présentent une antenne à polarisation circulaire aux fréquences de 2.5 et 5.5 GHz, avec une efficacité supérieure à 78% à la fréquence de 2.5 GHz et supérieure à 87 % à la fréquence de 5.5 GHz, comme montre la figure III.28.



**Figure III. 28 : Efficacité de l'antenne globale double bandes avec coupure.**

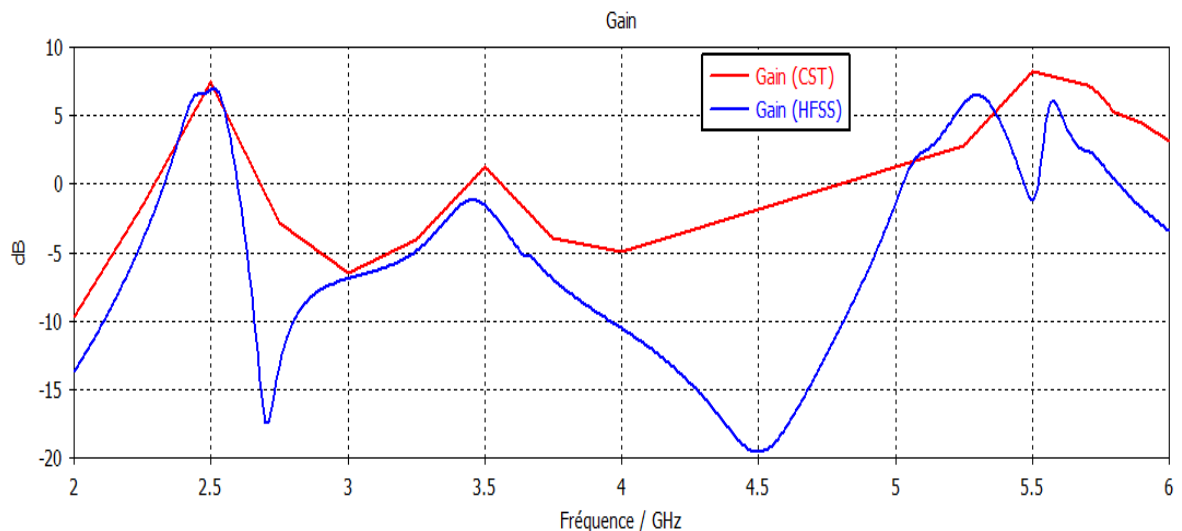
### III.4.3.1 Comparaison entre les résultats du CST et du HFSS

Dans ce cas, le coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée globale est inférieur à -10 dB avec les deux simulateurs, et avec un petit décalage dans la fréquence.



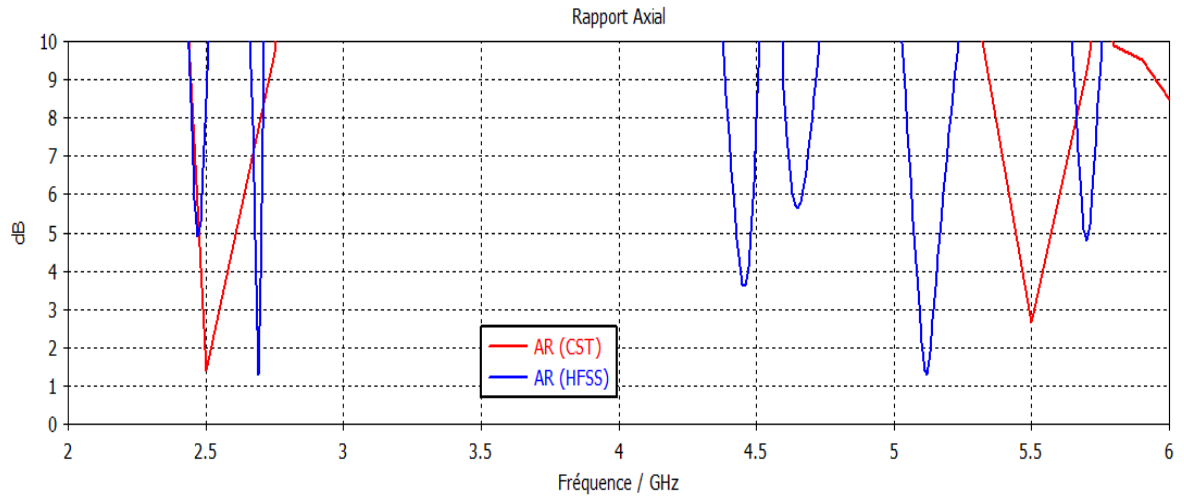
**Figure III. 29 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne double bandes globale simulé par CST et HFSS.**

Les gains des deux simulateurs à la fréquence de 2.5 GHz sont très proche, mais à la fréquence de 5.5 GHz, le gain simulé par HFSS est inférieur par rapport au gain simulé par CST avec un petit décalage entre eux.



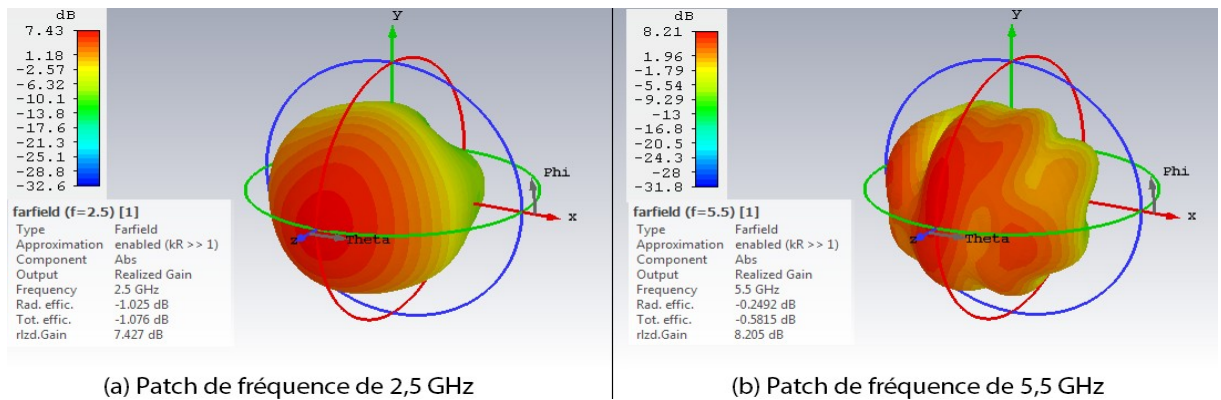
**Figure III. 30 : Gain de l'antenne double bandes globale, simulé par CST et HFSS.**

La figure III.31 représente les rapports axiaux de l'antenne double bandes simulés par CST et HFSS. Le rapport axial simulé par HFSS présente un décalage fréquentiel par rapport au rapport axial simulé par CST aux fréquences 2.5 et 5.5 GHz.

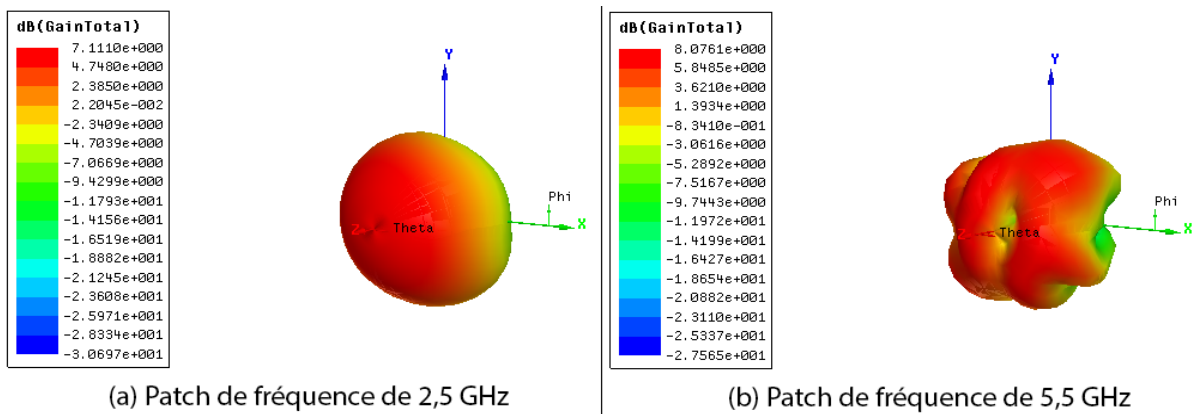


**Figure III. 31 : Rapport axial de l'antenne double bande globale, simulé par CST et HFSS.**

Les figures III.32 et III.33 présentent respectivement le DDR de l'antenne globale simulé par CST et HFSS. Les DDR rayonnent dans la même direction *broadside* ( $\theta = 0$ ,  $\varphi = 0$ ).

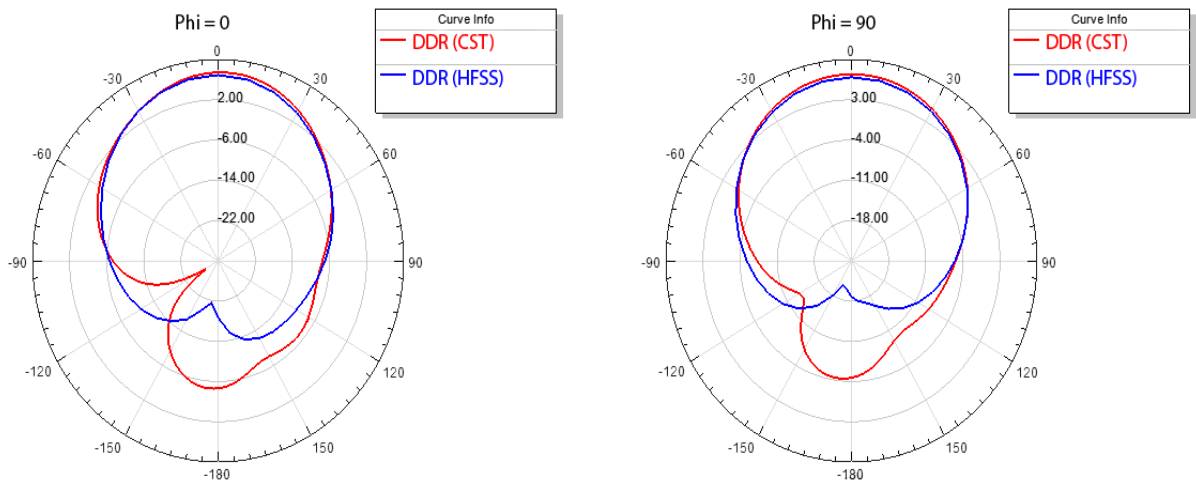


**Figure III. 32 : DDR 3D de l'antenne globale double bandes simulé par CST.**

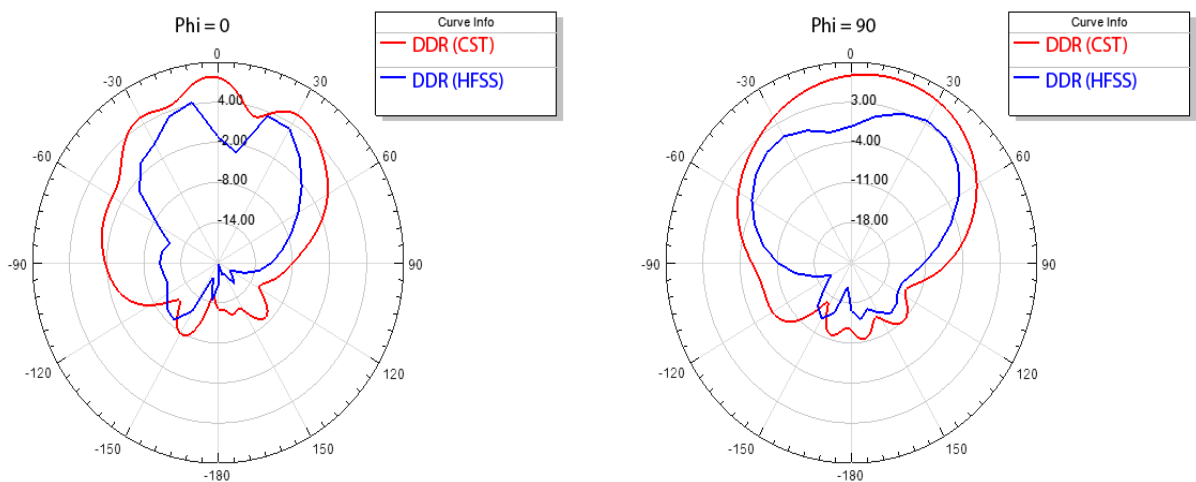


**Figure III. 33 : DDR 3D de l'antenne globale double bandes simulé par HFSS.**

Les figures III.34 et III.35 présentent respectivement le DDR polaire de l'antenne globale simulé par CST et HFSS.



**Figure III.34 : DDR 2D polaire de l'antenne globale double bandes à la fréquence 2.5 GHz simulé par CST et HFSS.**



**Figure III.35 : DDR 2D polaire de l'antenne globale double bandes à la fréquence 5.5 GHz simulé par CST et HFSS.**

Les travaux dans la littérature concernant les applications Wi-Fi présentent des résultats différents, selon la conception de l'antenne. Le tableau III.4 présente une comparaison entre les différentes conceptions d'antennes dans la littérature et nos antennes proposées.

**Tableau III. 4 : Comparaison de l'antenne proposée avec les antennes disponibles dans littérature pour les applications Wi-Fi.**

Référence	Fréquence (GHz)	S11(dB)	Gain (dBi)	AR (dB)	Efficacité (%)	Type de Polarisation
[3]	2.37	-9.95	2.86	-	45.88	linéaire
	5.11	-23.60	4.58	-	41.71	linéaire
[4]	2.4	-45	1	-	78	linéaire
	5.5	-25	0.26	-	75	linéaire
[5]	2.5	-12	2.52	-	80	linéaire
	5.2	-19	5.08	-	90	linéaire
[6]	2.4	-21	4	-	-	linéaire
	5	-17	4	-	-	linéaire
[8]	2.48	-25	6.6	0.33	-	circulaire
	5.9	-12.5	6	1.01	-	circulaire
Antenne proposée 1	2.5	-12.71	6.19	2.5	78	circulaire
Antenne proposée 2	5.5	-10.15	6.28	0.89	79	circulaire
Antenne globale	2.5	-19.37	7.42	1.42	78	circulaire
	5.5	-11.33	8.20	2.66	87	circulaire

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception d'une antenne patch double bandes à polarisation circulaire, fonctionne sur les bandes Wi-Fi 2.5/5.5 GHz. Les résultats de simulations ont été trouvés par les simulateurs CST et HFSS. L'antenne proposée fonctionne dans les deux bandes Wi-Fi 2.5 GHz et 5.5 GHz avec les gains respectivement de 7.42 dBi et de 8.2 dBi dans la direction *broadside*. L'avantage de notre antenne c'est que les deux bandes ont la caractéristique de la polarisation circulaire avec les rapports axiaux aux fréquences 2.5 GHz et 5.5 GHz sont respectivement 1.42 dB et 2.66 dB. Ces caractéristiques donnent à l'antenne proposée l'avantage d'être utilisée à la place des antennes Wi-Fi à polarisation linéaire.



# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

La technologie de communication sans fil est très intéressée par le développement d'antenne micro ruban. Nombreux appareils utilisent cette antenne en raison de ses nombreux avantages par rapport aux autres types d'antennes. Les chercheurs tentent constamment de l'améliorer ses caractéristiques pour répondre aux exigences futures multiples.

Notre travail est principalement axé sur la conception d'une antenne patch double bandes polarisée circulairement sur chacune des deux bandes Wi-Fi : 2.5 GHz et 5.5 GHz. Premièrement, nous avons d'abord commencé par la conception des deux antennes fonctionnent séparément : l'une sur la bande 2.5 GHz et l'autre sur la bande 5.5 GHz. Chacune d'elles ayant une polarisation circulaire. Les deux antennes proposées ayant les bandes 2.5 GHz et 5.5 GHz ont respectivement les gains de 6.19 dBi et 6.2 dBi dans la direction *broadside*, ainsi elles sont polarisées circulairement sur les deux bandes 2.5 GHz et 5.5 GHz avec les rapports axiaux respectivement de 2.5 dB et de 0.8 dB.

Après, nous avons regroupé les deux antennes conçues auparavant dans une seule antenne. Pour réduire le couplage entre les deux patches, une coupure a été réalisée. L'antenne globale double bandes fonctionne donc dans les deux bandes Wi-Fi 2.5 GHz et 5.5 GHz, ayant de bons gains de 7.42 dBi et 8.2 dBi respectivement dans la direction *broadside*. Cette antenne est polarisée circulairement sur les deux bandes 2.5 GHz et 5.5 GHz avec les rapports axiaux sont respectivement de 1.42 dB et 2.66 dB. Les résultats de simulation dans ce travail ont été trouvés par les deux logiciels de simulation CST et HFSS, et un très bon accord entre les résultats des deux simulateurs est atteint.

Les caractéristiques de l'antenne proposée double bandes nous permettent de l'utiliser dans les applications Wi-Fi, avec une meilleure mobilité, des effets des trajets multiples réduits et une meilleure réception quelle que soit l'orientation de l'antenne à la réception. Ces caractéristiques donnent à l'antenne proposée l'avantage d'être utilisée à la place des antennes Wi-Fi à polarisation linéaire vu les avantages de la polarisation circulaire par rapport à la polarisation linéaire en termes de rendement de polarisation, en conséquence une qualité de transmission meilleure.

## Bibliographie

- [1] O. Picon et coll, “ *les Antennes Théorie, conception et application,*” Dunod. Paris, 2009.
- [2] A. Sarwar, A. Kumar Patel, G.Chandra and R. Singh, *A VERNAL DESIGN OF MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR 2.4 GHz/ 5 GHz WLAN APPLICATIONS,* International Journal of Advanced Research ,Volume 4, Issue 2, 689-693, 2016.
- [3] S. Atchay Jahanath, S.Srinidhi, P.Yamini and D.Venkatesh , *Dual Band Microstrip Antenna for Wi-Fi Applications,* IJERT, Vol. 7 Issue 04, April-2018.
- [4] R. Patel and T.Upadhyaya, *Compact Planar Dual Band Antenna for WLAN Application,* Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 70, 89–97, 2017.
- [5] P. Chaurasia, B.-K. Kanaujia, S. Dwari1, and M.-K. Khandelwa, *Antenna with Hexa-Band Capabilities for Multiple Wireless Applications,* Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 82, 109–122, 2018.
- [6] J. Yang, H. Wang , Z. Lv and H. Wang, *Design of Miniaturized Dual-Band Microstrip Antenna for WLAN Application,* MDPI, Basel, Switzerland, 2016.
- [7] Q. W. Lin, H.Wong, X.-Y. Zhang and H.-W. Lai, *Printed Meandering Probe-Fed Circularly Polarized Patch Antenna With Wide Bandwidth,* IEEE Antennas and Wireless Propagation Leterts, vol. 13, 2014.
- [8] S. Behera, *Circular polarized dual-band antenna for WLAN/Wi-MAX application,* wiley, 2016.
- [9] Z. S. A. Mebarek, “*Antennes Filaires et Antennes a surfaces Rayonnantes,*” Office des Publications Universitaires, 2008.
- [10] C. A. Balanis, “*Antenna theory: analysis and design,*” A John WILEY & SONS, INC., Publication, 2005.
- [11] D. G. Fang, “*Antenna-Theory-and-Micro-Strip-Antennas,*” Taylor & Francis Group, 2010.
- [12] A. Balanis, “*ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN,*” Fourth edition John Wiley & Sons, 2016.



- [13] IEEE-SA Standards Board, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*, Institute of Electrical and Electronics Engineers 2014.
- [14] L. MOUSTAFA, “*Conception d’antennes à Bande Interdite Electromagnétique large bande et multi bandes à base de méta surfaces*,” Université de Limoges, Thèse de doctorat 22 septembre. 2009.
- [15] P. S. Nakar, “*Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for Use in Wireless/Cellular Devices*,” Florida State University, 2004.
- [16] W. L. Stutzman and G.-A. Thiele, *Antenna theory and design*, John Wiley & Sons, 2012.
- [17] B. Abdellatif , “*Conception et réalisation d’antenne miniatures Isotropes dans les bande C et ISM*,” Université abou bakar belkaid, Tlemcen, Thèse de doctorat, Mai. 2014.
- [18] P. Bhartia, I. Bahl, R. Garg, A. Ittipiboon, “*Microstrip Antenna Design Handbook*,” Artech House Publishers, 2001.
- [19] Z. N. Chen and M.-Y.-W. Chia, “*Broadband Planer Antennes*,” Jhon wiley & sons, Ltd, 2006.
- [20] A. Boufrioua, “*Contribution a l’étude des antennes a patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d’une source d’excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant*,” Université Mentouri de Constantine, Thèse de doctorat Novembre. 2006.
- [21] G. A. S. Bazán, “*Desing of a Circularly Polarized Patch Antenna for Satellite Communications in L-Band*,” Polytechnic University of Cataluña, 2010.
- [22] Pradeep, “*Project report on microstrip patch antenna*,” University Kurukshetra, 2005.
- [23] D. M. Pozar and B. Kaufman, “*Increasing the Baud with of a microstrip antenna by proximity coupling*,” Electron, Lett, Vol.23, PP.368-369, 1987.
- [24] M. Diblng , “*Développement du concept de l’antenne à résonateur bie pour la génération de la polarisation circulaire*,” Université de Limoges, thèse de Doctorat, 20 mars. 2006.

- [25] N.Seladji, F. Z. Marouf, L. Merad, S.-M. Meriah, F.-T. Bendimerad, M.Bousahla, N.Benahmed, *Antenne Microruban Miniature Ultra Large Bande ULB pour Imagerie Micro-onde*, Mediterranean Télécommunication Journal, 2013.
- [26] R. T. Ogan, *Integration of Manned and Unmanned Aircraft Systems into U.S. Airspace*, IEEE, Dec 18. 2014.
- [27] «<http://www.trakgps.com/fr/index.php/information/articles-localisation-gps/67-antennes-gps>».
- [28] D. M. Pozar, “*Microwave Engineering*,” JohnWiley & Sons, Inc, 2011.
- [29] «<https://www.nrca.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9575>».
- [30] A. Angelini, “*Photon Management Assisted by Surface Waves on Photonic Crystals*,” PoliTO Springer Series, 2017.
- [31] S. S. Gao, Q. Luo and F. Zhu, “*CIRCULARLY POLARIZED ANTENNAS*,” University of Kent, UK, 2014.
- [32] A. Balanis, “*ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS*,” Arizona State University, 2012.
- [33] K. Allabouche, “*Etude, conception et caractérisation de nouvelles topologies d’Antennes à Résonateurs Diélectriques : Application aux nouveaux systèmes de communications sans fil*,” l’Université Sidi Mohamed Ben Abdellah et Docteur de l’Université Côte d’Azur, 2017.
- [34] «[http://www.ansys.com/fr\\_fr/Produits/Flagship+Technology/ANSYS+HFSS](http://www.ansys.com/fr_fr/Produits/Flagship+Technology/ANSYS+HFSS)», AnSoft HFSS Full Documentation.

# Annexe

## 1-Démarrer le CST

- exécuter la simulation CST.
- Sélectionnez " New Template".
- Ensuite, une fenêtre s'affiche, suivez les étapes de la Fig. 1.

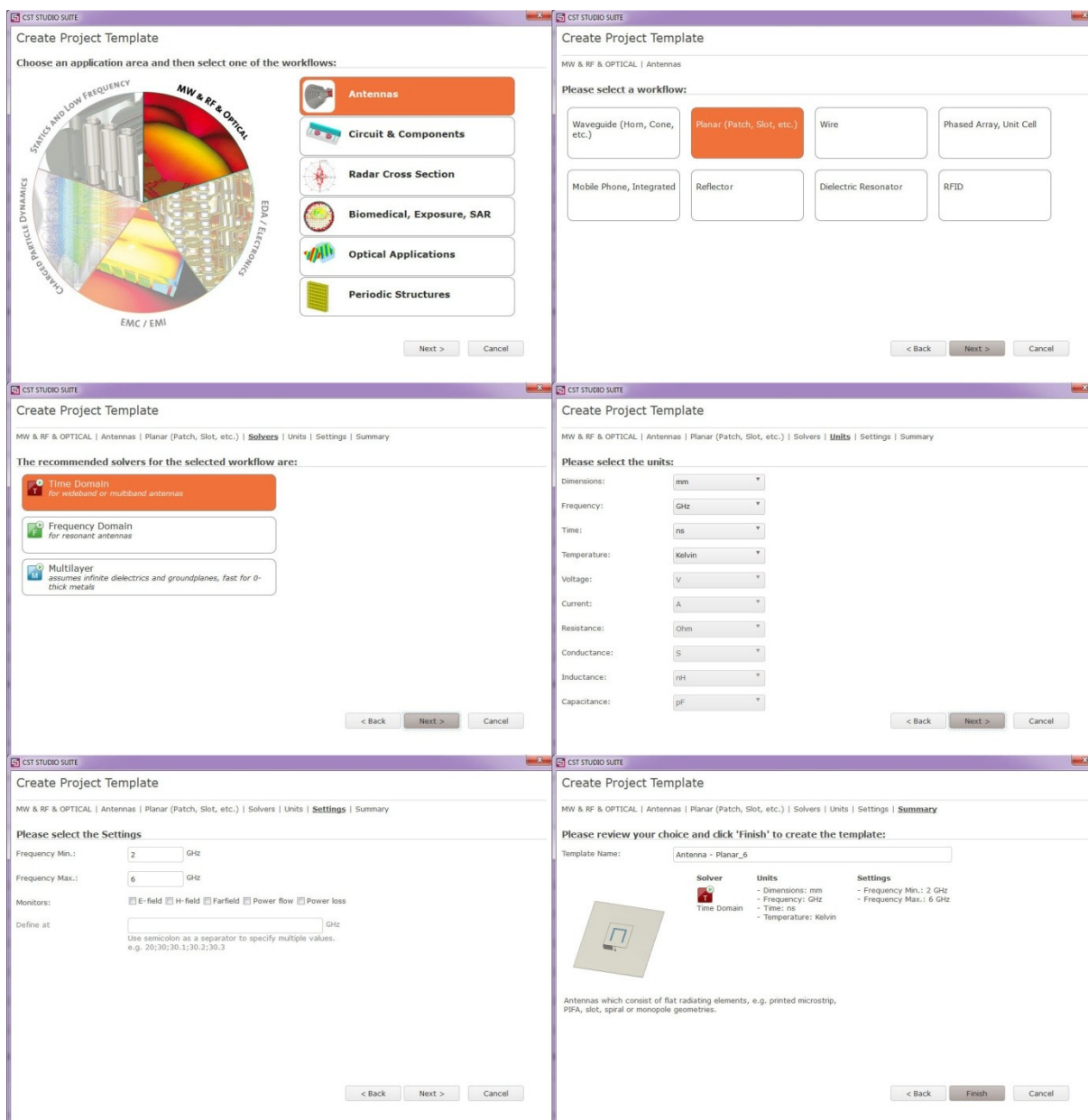
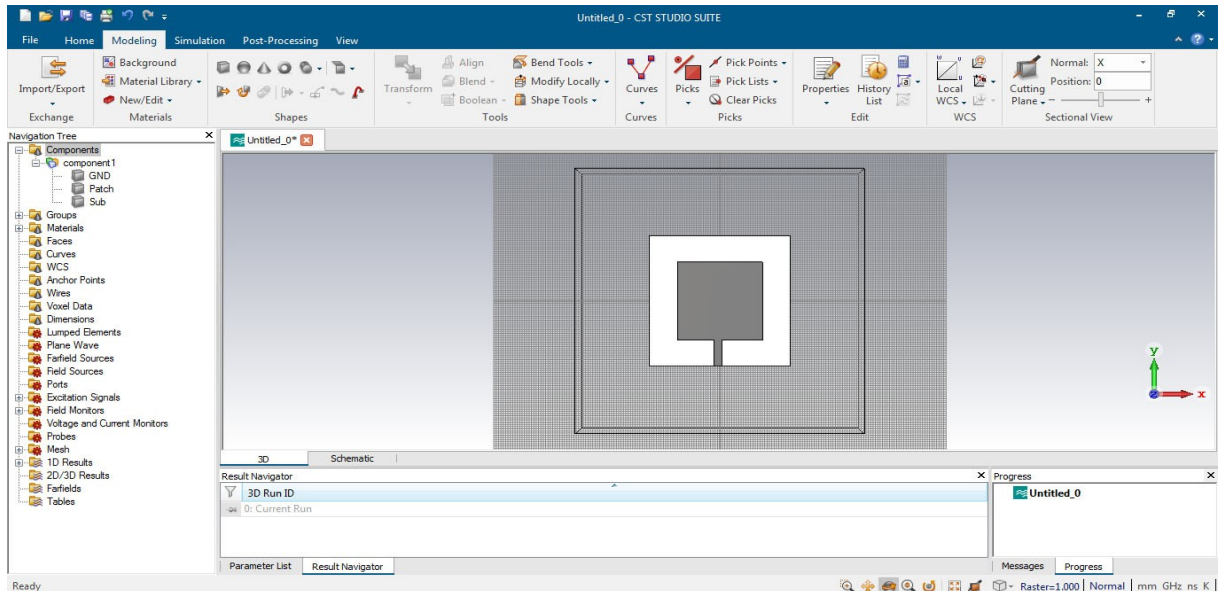


Fig. 1

## 2- Creation d'une antenne patch

- Pour créer une boîte, sélectionnez Modeling>Brick.
- Cliquez sur "Échap" sur le clavier, une fenêtre sera montrée.
- Dans cette fenêtre, vous pouvez créer le substrat, le plan de masse et le patch selon les dimensions données (Fig. 2).



*Fig. 2*

- Pour assurer une ligne d'alimentation adapté à 50 Ohm, sélectionnez Home > Marcos > Calculate > Calculate analytical Line Impedance.
- On donne l'épaisseurs  $h$ ,  $t$ ,  $w$  et la permittivité  $\epsilon_r$  pour calculer l'impédance d'entrée ou d'une autre manière pour calculer l'impédance, en utilisant le script MATLAB suivant:

clear all;

clc

% paramètres du substrat et de la ligne

h=1.588; % l'épaisseur du substrat en mm

w=5; % la largeur de la ligne microbande en mm

eps=2.2; % la permittivité du substrat

% La permittivité effective (epsreff)

epsreff=((eps+1)/2)+((eps-1)/2)\*(-1+12\*(h/w))^-0.5;

% l'impédance caractéristique z en ohms

if w/h>1

z=120\*pi/(sqrt(epsreff)\*((w/h)+1.393+0.667\*log((w/h)+1.444)))

else

$$z=(60/\sqrt{\text{epsreff}})*\log((8*h/w)+(w/(4*h)))$$

end

### 3- Conversion du CST à HFSS

- Sélectionnez Modeling > Import/export > 3D file > STEP, pour exporter le projet en tant que fichier STEP (**Fig. 3**).
- Exécuter la simulation HFSS.
- Créer un nouveau projet, puis choisissez Modeler > Import et sélectionnez le fichier exporté (**Fig. 4**).

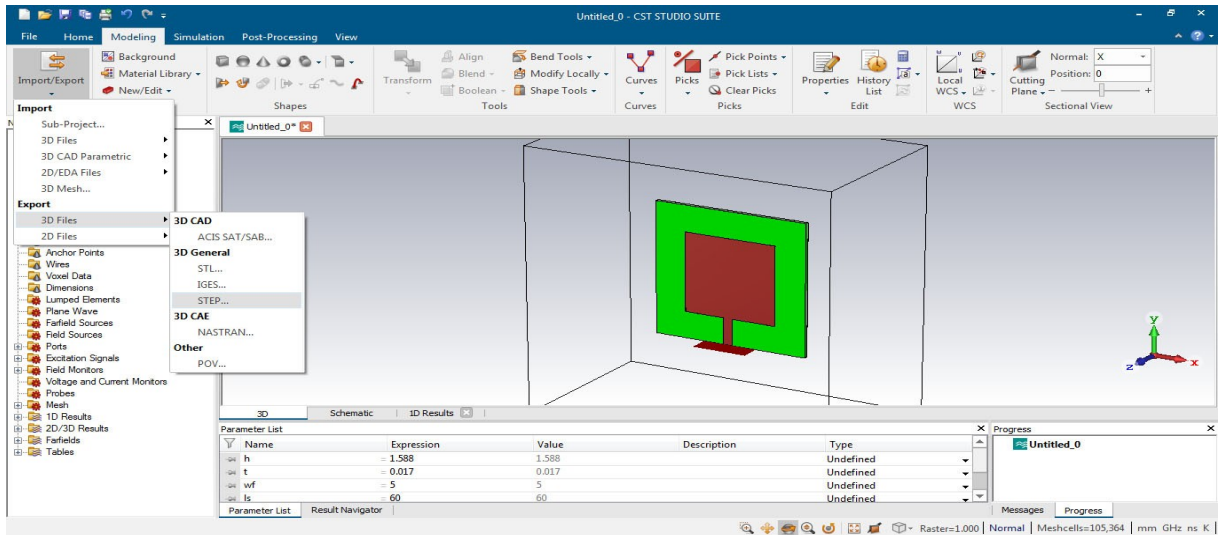


Fig. 3

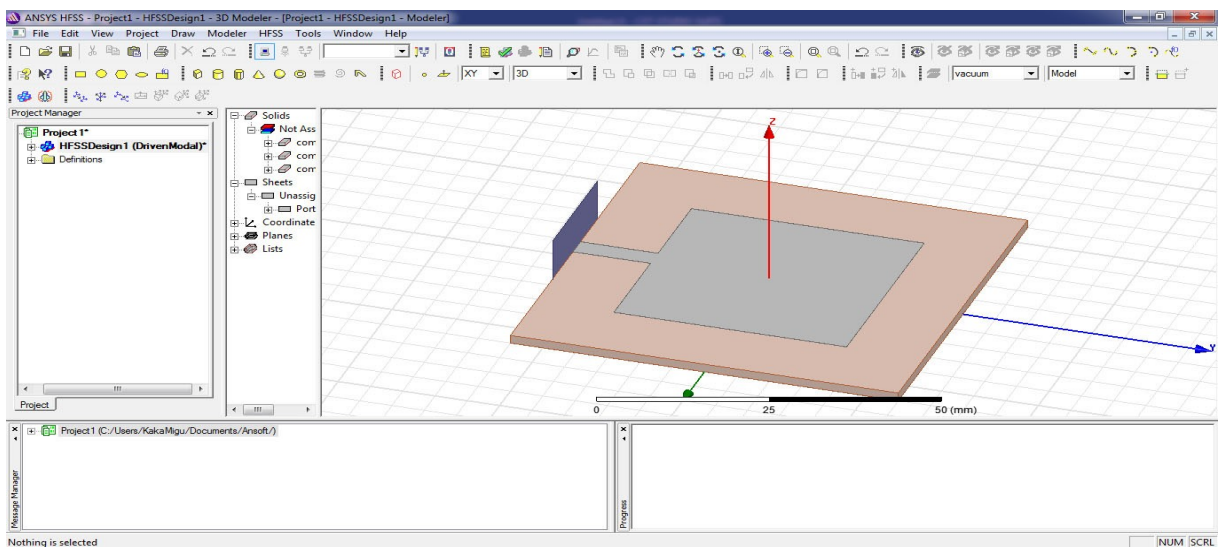


Fig. 4

## Résumé

Dans ce mémoire, nous avons proposé une antenne micro-ruban double bandes couvrant les deux bandes WI-FI 2.5 GHz et 5.5 GHz à polarisation circulaire. Cette antenne est constituée de deux patchs carrés avec fentes fonctionnent chacun d'eux séparément sur les bandes de 2.5 GHz et de 5.5 GHz ayant les gains de 6.19 dBi et de 6.28 dBi respectivement. En outre, ils sont polarisés circulairement sur chacune des bandes. L'antenne globale double bandes présentant une polarisation circulaire sur les deux bandes avec les rapports axiaux de 1.42 dB, et de 2.66 dB, les gains de 7.42 dBi et de 8.2 dBi aux fréquences 2.5 GHz et 5.5 GHz respectivement. Ces caractéristiques nous permettent de l'utiliser pour les applications Wi-Fi qui nécessitent une polarisation circulaire.

**Mots clés :** Antenne micro-ruban, Polarisation circulaire, Rapport axial.

## Abstract

In this work, we have proposed a dual-band circularly polarized microstrip patch antenna which covers WI-FI bands of 2.5 GHz and 5.5 GHz. This antenna consists of two square patches with slots, each of the patches operating separately on the 2.5 GHz and 5.5 GHz bands with gains of 6.19 dBi and 6.28 dBi respectively. In addition, they are circularly polarized on each of the bands. The dual-band antenna has circular polarization on both bands with axial ratios of 1.42 dB, and 2.66 dB, gains of 7.42 dBi and 8.2 dBi respectively at 2.5 GHz and 5.5 GHz. These features allow it to be used for Wi-Fi applications that require circular polarization.

**Key words:** Microstrip patch antenna, Circular polarization, axial ratio.

## ملخص

في هذه المذكرة، اقترحنا هوائيًا مزدوج النطاق ذات رقعة صغيرة (ميكروريبون) يغطي نطاقي WI-FI 2.5 جيجاهرتز و 5.5 جيجاهرتز وذات استقطاب دائري. يتكون هذا الهوائي من بقعتين مربعتين مع فتحات، يعمل كل منهما على حدة في النطاقين 2.5 جيجاهرتز و 5.5 جيجاهرتز، بمكاسب تبلغ 6.19 ديسيبل ايزوتروب و 6.28 ديسيبل ايزوتروب على التوالي. بالإضافة إلى ذلك، فهي مستقطبة بشكل دائري في كلا النطاقين. الهوائي العام مزدوج النطاق يظهر استقطابا دائريا في كلا النطاقين بنسب محورية تبلغ 1.42 ديسيبل و 2.66 ديسيبل، مكاسب قدرها 7.42 ديسيبل ايزوتروب و 8.2 ديسيبل ايزوتروب عند التردد 2.5 جيجاهرتز و 5.5 جيجاهرتز على التوالي. نتيج لنا هذه الميزات استخدامه من اجل تطبيقات WI-FI التي تتطلب استقطاب دائري.

**الكلمات المفتاحية :** الهوائي ذات رقعة صغيرة، استقطاب دائري، نسبة محورية