

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : GUENINECHE RAHMA et KRIFIF FATNA

Sujet

Conception d'antennes à polarisation circulaire CP

Soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M^{me} MELIANI Maghnia

M^{me} SELADJI Nawel

M^r MERIAH Sidi Mohammed

M^{me} BELGACEM Wahiba

Professeur

MCB

Professeur

MRB

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

CDS Oran

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicace

Nous dédions se travail :

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

A nos chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A nos chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A notre encadreur, mansion « MERIAH SIDI MOHAMMED » pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir bénéficié de ses compétence scientifique et aussi pour sa disponibilité.

A ma défunte maman « KRIFIF KHALDIA » j'aimerais bien tu dire maman toi qui nous a donné la vie nous voulons à notre tour te dire merci de la haut malgré la route qui nous sépare, tu seras toujours notre rayon d'espoir.

A toute nos familles « GUENINECHE et KRIFIF » pour leur soutien tout au long de nos parcours universitaire,

À mon cher mari, pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes grâtitudes.

À ma fille « RADIA RODIN ». Merci infiniment.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour nous.

GUENINECHE RAHMA & KRIFIF FATNA

Remerciements

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.

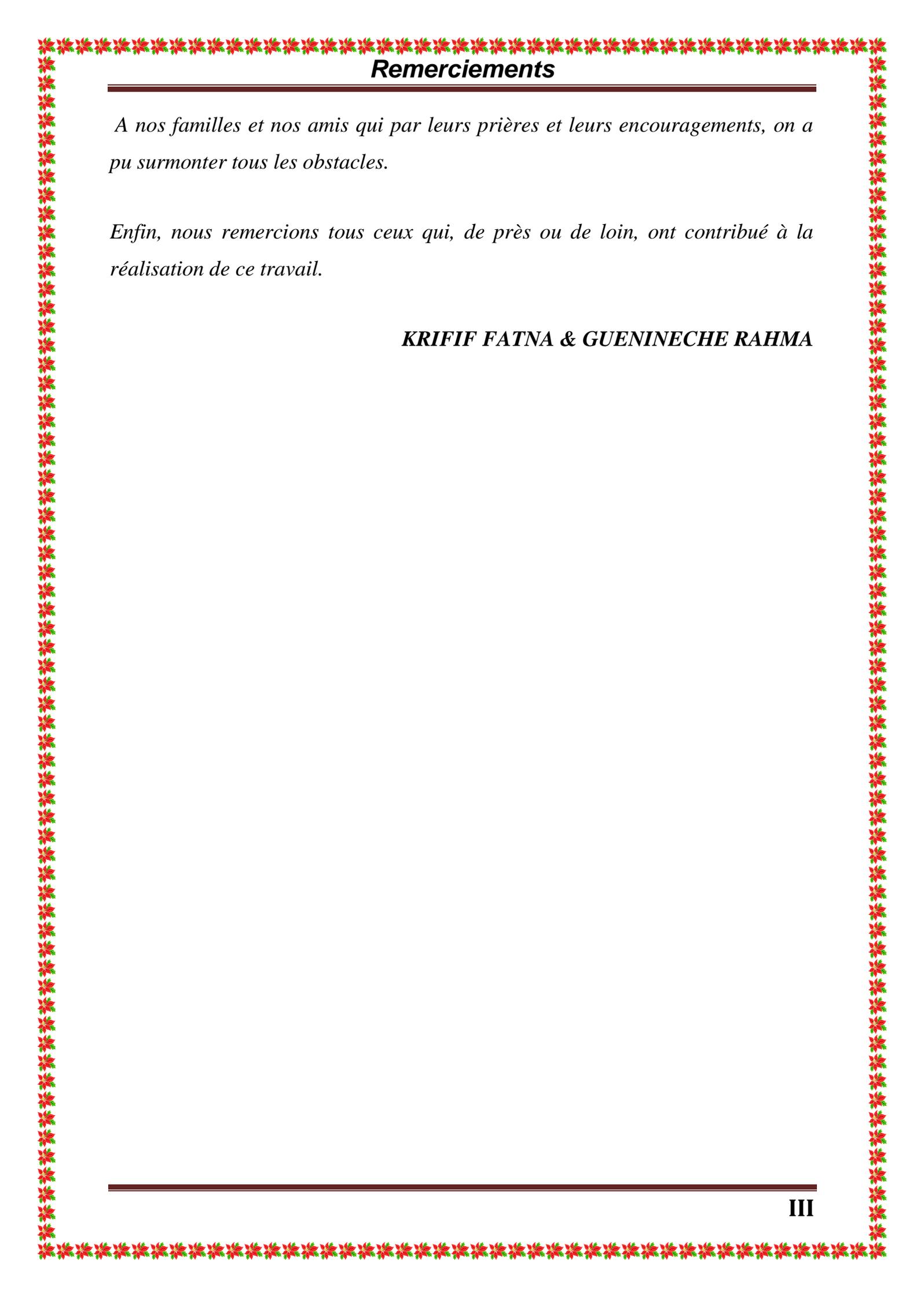
Ce travail de projet de fin d'étude a été réalisé au sein du laboratoire de Télécommunications de Tlemcen LTT.

Nos grands remerciements à notre encadreur, «Mr MERIAH SIDI MOHAMMED», pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Nous tenons à remercier aussi Mme BELGACEM Wahiba pour son soutien et son encadrement de ce PFE.

Nous adressons nos remerciements pour tous les membres de jury :

« Mme MELIANI Maghnia » Professeur à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) et « Mme SELADJI Nawel » maitre de conférences à la Faculté de Technologie (Université de Tlemcen) d'avoir accepté la participation à cette soutenance, et qui nous font le grand honneur d'évaluer notre travail son oublié les gens qui nous aidez pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.



Remerciements

A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

KRIFIF FATNA & GUENINECHE RAHMA

Résumé

Résumé

L'antenne est un élément important dans le domaine de la communication pour émettre et recevoir des informations sous la forme d'ondes électromagnétiques, elle est également utilisée dans plusieurs domaines tels que les systèmes de détection, de satellites et d'avions de surveillance, des réseaux de communications et de communications par satellite.

La conception des antennes, en utilisant le logiciel CST Studio Suite, se base essentiellement sur la variation de la forme de l'antenne et de son matériau conducteur, la nature et l'épaisseur du substrat afin d'avoir une structure qui résonne dans les fréquences désirées pour des applications précises.

L'objectif de notre travail est d'étudier d'un côté les différentes techniques et méthodes de polarisation circulaire CP, et d'un autre côté concevoir une antenne patch polarisée circulairement, destinée pour des applications Wifi.

Mot clés : Antennes micro ruban, adaptation, rapport axial AR, logiciel CST.

ABSTRACT

The antenna is an important element in the field of communication to transmit and receive information in the form of electromagnetic waves, it is also used in several fields such as detection systems, satellites and surveillance aircraft, communications networks and satellite communications.

The design of the antennas, using the CST Studio Suite software, is essentially based on the variation of the shape of the antenna and its conductive material, the nature and the thickness of the substrate in order to have a structure which resonates in the desired frequencies for specific applications.

The objective of our work is to study on the one hand the different techniques and methods of circular polarization CP, and on the other hand to design a circularly polarized patch antenna, intended for Wifi application.

Keywords: Microstrip antennas, adaptation, AR axial ratio, CST software.

الملخص

يعتبر الهوائي عنصرا مهما في مجال الإتصالات لنقل و استقبال المعلومات على شكل موجات كهرومغناطيسية ، كما أنه يستخدم في عدة مجالات ،مثلا مجالات الكشف و الأقمار الصناعية و طائرات المراقبة و شبكات الإتصالات ، و الإتصالات عبر الأقمار الصناعية . يعتمد تصميم الهوائيات باستخدام برنامج CST STUDIO SUIT ، بشكل أساسي على اختلاف شكل الهوائي و المواد الموصلة له و طبيعة و سمك الركيزة من أجل الحصول على هيكل يتردد صداه في الترددات المطلوبة لتطبيقات محددة.

الهدف من عملنا هو دراسة التقنيات و الأساليب المختلفة للإستقطاب الدائري CP من ناحية ، و من ناحية أخرى تصميم هوائي تصحيح مستقطب دائريا مخصصا لتطبيق WIFI .

الكلمات المفتاحية :

هوائيات MICROSTRIP ، تكيف adaptation ،نسبة المحورية AR ،برنامج CST .

Table des matières

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Liste des symboles	XI
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les antennes patches

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'une antenne.....	3
I.2.1 Antenne émission.....	3
I.2.2 Antenne de réception	3
I.3 caractéristiques d'une antenne	4
I.3.1 Impédance d'entrée.....	4
I.3.2 coefficient de réflexion S_{11}	5
I.3.3 Adaptation et condition d'adaptation.....	5
I.3.4 Bande passante et fréquence de résonance	6
I.3.5 Directivité	7
I.3.6 Rendement de l'antenne.....	7
I.3.7 Gain.....	8
I.3.8 Diagramme de rayonnement	9
I.3.9 Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch	9
I.3.10 Facteur de qualité.....	10
I.4 Antennes microbandes	11
I.4.1 Description d'antenne microbande	11
I.4.2 Alimentation des antennes microbandes.....	13
I.4.3 Alimentation par câble coaxial	14
I.4.4 Alimentation par ligne microbande	14

Table des matières

I.4.5 Alimentation par couplage par fente.....	15
I.4.6 Alimentation de proximité.....	17
I.5 Méthodes d'analyse d'une antenne patch.....	18
I.5.1 Modèle de la ligne de transmission.....	18
I.5.2 Modélisation et rayonnement des antennes patch.....	20
I.5.2.1 Modélisation d'un patch rectangulaire.....	22
I.5.2.2 Impédance, bande passante et diagramme de rayonnement.....	23
I.6 Équations de conception.....	25
I.7 Les avantages et les inconvénients des antennes microbandes.....	27
I.8 Conclusion.....	28

Chapitre II : Polarisation des ondes électromagnétiques

II.1 Introduction.....	30
II.2 Onde électromagnétique.....	30
II.3 Propagation des ondes électromagnétiques.....	31
II.3.1 Vecteur de Poynting.....	33
II.3.2 Définition de la polarisation d'une antenne.....	33
II.3.3 Mesurer de la polarisation de l'antenne.....	34
II.4 Polarisation d'une onde électromagnétique.....	34
II.4.1 Définition de la polarisation.....	34
II.4.2 Types de polarisations.....	35
II.4.2.1 Polarisation elliptique.....	35
II.4.2.2 Polarisation Linéaire.....	37
II.4.2.3 Polarisations horizontale et verticale.....	38
II.4.2.4 Polarisations TE et TM.....	38
II.4.2.5 Polarisation circulaire.....	39
II.4.3 Rapport axial en fonction de la fréquence.....	42
II.5 Simulation et optimisation d'une antenne circulaire.....	43
II.5.1 Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant presque rectangulaire.....	43
II.5.2 Antenne patch carrée à coins tronqués.....	48
II.5.3 Antenne patch carrée avec fente.....	52

Table des matières

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction	57
III.2. Résultats de simulation.....	57
III.2.1 Antenne patch presque carrée simple.....	57
III.2.2. Antenne presque carrée a coins traquée	59
III.2.3 Antenne carrée avec fente	61
III.3 Comparaison entre les trois antennes	62

Listes des figures

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les antennes patch

Figure I.1 : Système de transmission	4
Figure I.2 : Antenne en mode d'émission	5
Figure I.3 : Antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_C	6
Figure I.4 : Bande passante à partir du coefficient de réflexion S_{11}	7
Figure I.5 : Distribution de charge de champ dans l'antenne patch	10
Figure I.6 : Antenne patch alimentée par ligne microbande	12
Figure I.7 : Différentes formes du patch	13
Figure I.8. : Alimentation par câble coaxial.....	14
Figure I.9 : Alimentation par ligne microbande.....	15
Figure I.10 : Circuit équivalent d'une antenne patch alimenté par sonde coaxiale et ligne micro ruban	15
Figure I.11 : Alimentation à travers une fente.....	16
Figure I.12 : Circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture	17
Figure I.13 : Alimentation de proximité.....	17
Figure I.14 : Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité	18
Figure I.15 : une configuration de ligne de transmission micro ruban	19
Figure I.16 : Distribution du champ électrique TM_{10} sur toute le longueur du patch	19
Figure I.17 : Transformation de la figure 13 en un milieu homogène équivalent.....	19
Figure I.18 : Antenne patch sur une carte de circuit imprimé (PCB) . Les flèches rouges représentent le champ de frange.....	21
Figure I.19 : TM_{10} distribution du champ électrique sur la longueur du patch	22
Figure I.20 : Vue de dessus d'une antenne patch, notez que la longueur électrique est $L+26L$.	22
Figure I.21 : Modélisation de l'antenne patch comme un réseau à deux fentes	23
Figure I.22 : antenne patch simple	26
Figure I.23 : simulation de S_{11}	27

Chapitre II : Méthodes et techniques de polarisation circulaire CP

Figure II. 1 : onde électromagnétique	31
--	----

Listes des figures

Figure II. 2 : Onde électromagnétique à polarisation linéaire	31
Figure II. 3 : la représentation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre avec la composante de champ électrique et magnétique	34
Figure II.4 : Polarisation elliptique	36
Figure II.5 : Différents types de polarisation:(a) polarisation elliptique (b) polarisation linéaire (c) polarisation circulaire	37
Figure II.6 : Polarisation linéaire	37
Figure II.7 : Polarisation linéaire : (a) horizontale et (b) verticale	38
Figure II.8 : Polarisation circulaire à séquence spatiale et à séquence temporelle dans un plan fixe.....	39
Figure II.9 : Excitation en deux points	40
Figure II.10 : Excitation en un point.....	41
Figure II.11 : Différent type de dissymétries (a) polarisation circulaire droite et (b) polarisation circulaire gauche.....	41
Figure II.12: Convention de polarisation : (a) polarisation main droite et (b) polarisation main gauche.....	42
Figure II.13: Antenne patch classique alimentée sur la diagonale.....	44
Figure II.14 : Antenne patch carrée alimentée sur la diagonale	44
Figure II.15 : La variation du Rapport axial et du VSWR et le S11 de l'antenne	46
Figure II.16 : Rapport axial et VSWR sous MATLAB.....	46
Figure II.17 : La variation du rapport axial et du VSWR et le S11 de l'antenne50.....	47
Figure II.18 : Rapport axial et VSWR sous MATLAB.....	48
Figure II.19 : Antenne avec les coins tronqués	48
Figure II.20 : Variation du rapport axial AR (a), du VSWR (b) et du coefficient de réflexion S11 (c) de l'antenne 1 a la médiane.....	50
Figure II.21 : Rapport axial et VSWR sous MATLAB.....	50
Figure II.22 : Variation du rapport axial AR (a et b), du VSWR (c) et du coefficient de réflexion S11 (d) de l'antenne 2 a la médiane.....	51
Figure II.23 : Rapport axial et VSWR sous MATLAB.....	51
Figure II.24 : Méthode de dé segmentation appliquée à une antenne carrée avec une fente diagonale	52
Figure II.25 : La variation du rapport axial et du VSWR et le S11 de l'antenne avec fente	53

Listes des figures

Figure II.26 : Rapport axial et VSWR sous MATLAB..... 53

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure III.1 : Antenne patch simple 57

Figure III.2 : S11 et le Rapport Axial et VSWR en fonction de la fréquence 58

Figure III.3 : Antenne patch a des coins tronquée 59

Figure III.4 : S11 et le Rapport Axial et VSWR en fonction de la fréquence 60

Figure III.5 : Antenne carrée avec fente 61

Figure III.6 : S11 et le Rapport Axial et VSWR en fonction de la fréquence62

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les antennes patchs

Tableau I.1 : Valeurs des dimensions de l'antenne patch simple

Chapitre II : Méthodes et techniques de polarisation circulaire CP

Tableau II.1 : Paramètres des antennes 1 et 2 alimentée sur la diagonale

Tableau II.2 : Paramètres des antennes 1 et 2 alimentée sur la Médiane

Tableau II.3 : Paramètres des antennes 3 avec fente

Tableau II.4 : comparaison entre le logiciel CST et la référence de l'article 1983

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1: Les résultats de l'antenne patch simple

Tableau III.2: Les résultats de l'antenne patch à coins tronquée

Tableau III.3: Les résultats de l'antenne patch avec fente

Tableau III.4: comparaison entre les résultats des trois antennes

Liste des abréviations

Liste des abréviations

- **DDR** : Diagramme De Rayonnement.
- **IEEE**: Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- **ROS** : Rapport D'onde Stationnaire.
- **RLC** : Résistance 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-parametres** : Scattering Parameters.
- **CST** : Computer Simulation Technology.
- **EM** : Electromagnétique.
- **CW**: Clock Wise.
- **CCW**: Counter cloCk Wise.

Liste des symboles

Liste des symboles :

- η : Le rendement.
- D : la directivité.
- G : Le gain.
- λ_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_{moy} : L'intensité de rayonnement moyenne.
- P_{ray} : Puissance de rayonnement.
- P_e : Puissance d'entrée.
- θ : Angle l'azimutal.
- Φ : Angle d'élévation.
- Z_e : L'impédance d'entrée.
- R_e : Partie réelle.
- X_e : Partie imaginaire.
- R_r : La résistance de rayonnement.
- R_p : La résistance de perte.
- Δf : Largeur de bande.
- f_1 : Fréquence minimale.
- f_2 : Fréquence maximale.
- f_0 : Fréquence centrale.
- Q : Facteur de qualité.
- ω_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.

Liste des symboles

- **Qrad** : Facteurs de qualité des pertes par rayonnement.
- **Qc** : Facteurs de qualité conduction.
- **Qd** : Facteurs de qualité diélectriques.
- **Qsw** : Facteurs de qualité des ondes de surface.
- **Prad** : Puissance rayonnée par l'antenne.
- **Prec**: Puissance fournie par l'antenne.
- **η_0** : Efficacité totale.
- **η_r** : Efficacité de réflexion.
- **η_c** : Efficacité de conduction.
- **η_d** : Efficacité diélectrique.
- **Rray** : La résistance de rayonnement.
- **Rpertes** : La résistance de pertes.
- **Γ** : Le coefficient de réflexion.
- **ZA** : L'impédance d'antenne.
- **Zc** : L'impédance caractéristique.
- **dB** : Décibel.
- **RLC** : Résistance, L'inductance, Capacité.
- **JD** : Courant de déplacement.
- **Jt** : Courant de surface.
- **λ** : La longueur d'onde.
- **S11** : Le coefficient de réflexion.
- **u w** : Le vecteur unitaire de l'onde.
- **Ei** : Le champ électrique d'onde entrant.
- **u a** : Le vecteur unitaire (vecteur de polarisation).
- **E a** : Champ électrique d'antenne.
- **OA** : L'axe majeur.
- **OB** : L'axe mineur.
- **Ψ_p** : L'angle entre les deux vecteurs unitaires.
- **Ep** : L'efficacité de polarisation.
- **ϵ_r** : La constante diélectrique du substrat.
- **ϵ_{eff}** : Le constant 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 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 des adaptations d'impédance. 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

Introduction générale

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, trois types d'antennes patch microstrip polarisées circulairement à alimentation unique (presque carrée à alimentation diagonale, carrée à coins tronqués et carrée avec une Fente diagonale) ont été étudiées. L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne à polarisation circulaire dans la bande 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 patchs. 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'applications.

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 (elliptiques, linéaires et circulaires), puis nous étalerons sur le calcul du rapport axial. Nous donnerons ensuite quelques méthodes et techniques de polarisation circulaire CP dans le cas de patch de forme rectangulaire ou carrée.

Le troisième chapitre sera consacré aux résultats de simulation. Le logiciel CST Microwave Studio sera exploité pour la conception de trois antennes. Les trois antennes seront simulées et les résultats seront comparés. L'antenne qui sera retenue devra couvrir toute la bande WiFi 2.4 GHz avec, une adaptation, un VSWR et un rapport axial acceptables.

CHAPITRE I

Généralités sur les antennes patch

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 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].

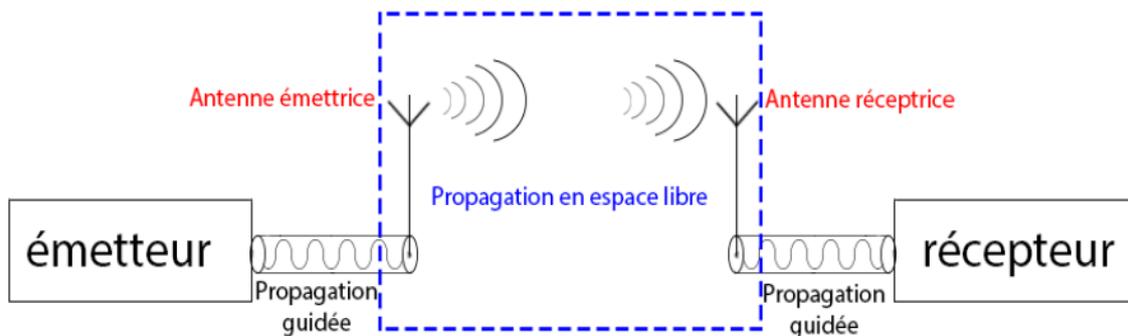


Figure I. 1 : Système de transmission.

I.3 Caractéristiques des antennes patch:

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 Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule [15] :

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

Z_c : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

S_{11} : Coefficient de réflexion.

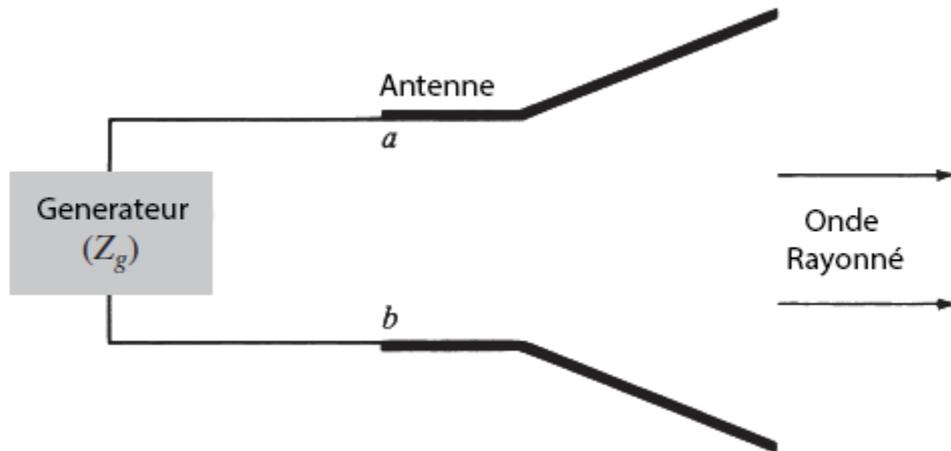


Figure I. 2 : Antenne en mode d'émission

I.3.2 coefficient de réflexion S11 :

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchie en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne Z_{in} et de l'impédance caractéristique Z_c [17]:

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

I.3.3 Adaptation et condition d'adaptation :

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général, $Z_c = 50 \Omega$) (figure I-3). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion τ_{in} ou S_{11} en entrée de l'antenne.

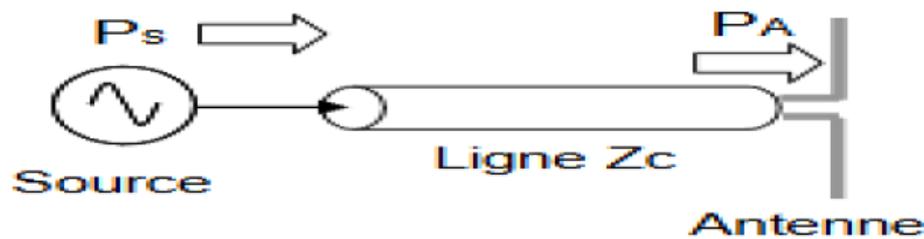


Figure I-3 Antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique ZC .

I.3.4 Bande passante et fréquence de résonance :

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 Δf il donnée par :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad \text{(I.3)}$$

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

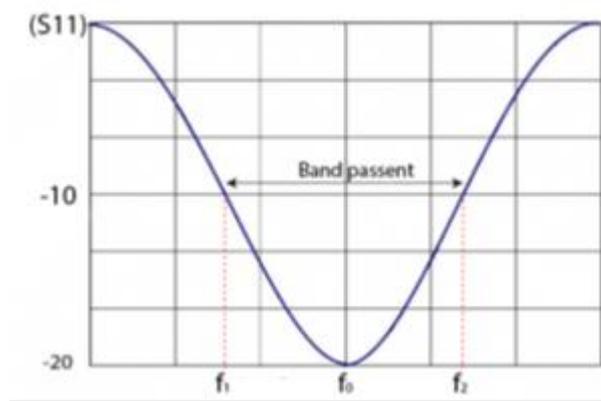


Figure I.4: Bande passante à partir du coefficient de Réflexion (S11).

La fréquence de résonance f_r , correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible.

I.3.5 Directivité : (θ, ϕ)

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, ϕ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. [14]

$$D(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{pr/4\pi} = 4\pi \frac{p(\theta, \phi)}{pr} \quad (1.4)$$

I.3.6 Rendement de l'antenne :

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

$$\eta = \frac{pr}{pf} \quad (1.5)$$

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

I.3.7 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_{iso} (sans perte).

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_{iso}} \quad (1.6)$$

Où :

P_r : La densité de puissance rayonnée.

P_{iso} : Puissance isotrope.

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 4π stéroïdiens [14], il est donné par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_e} \quad (1.7)$$

Où :

G : Le gain de l'antenne.

P_e : Puissance d'entrée.

θ : Angle d'azimut.

Φ : 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) :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (1.8)$$

Où, η 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.3.8 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace.

Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La fonction caractéristique de rayonnement $F(\theta, \phi)$ de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ à la puissance P_{\max} de la direction où le rayonnement est maximal.

$$F(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{\max}} \quad \text{(I.9)}$$

I.3.9 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. 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-6 suivante :

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] :

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1} \quad (1.11)$$

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 [16] :

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_s} \quad (1.12)$$

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.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 masse 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.

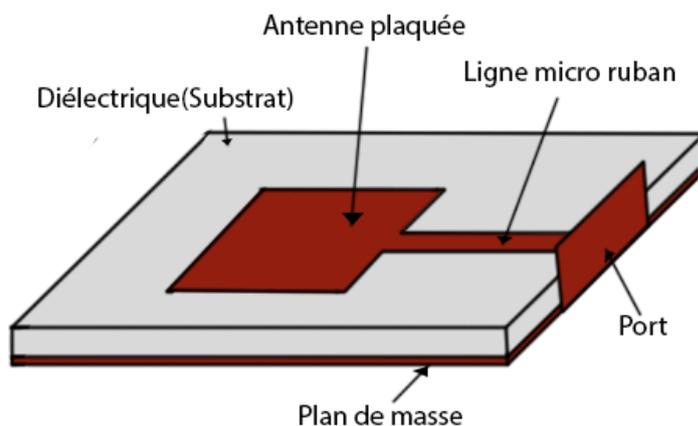


Figure I.6 : Antenne patch alimentée par ligne microbande.

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].

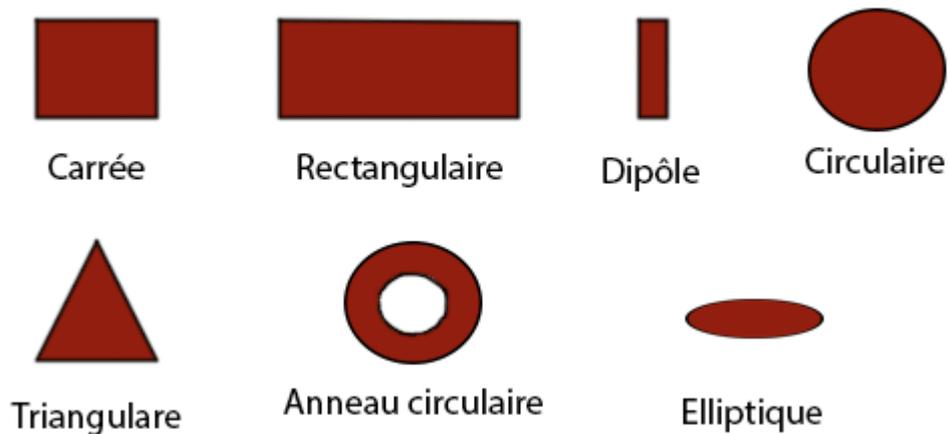


Figure 1.7 : Différentes formes du patch.

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.

1.4.2 Alimentation des antennes patch :

La technique d'alimentation représente un élément important sur la conception d'antenne patch, 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.4.3 Alimentation par câble coaxial :

Le conducteur du câble coaxial connecté à l'extérieur du plan de masse jusqu'au patch. 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 $0.02 \lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre. Cette alimentation occupe moins d'espace par rapport à l'alimentation par ligne microruban [20].

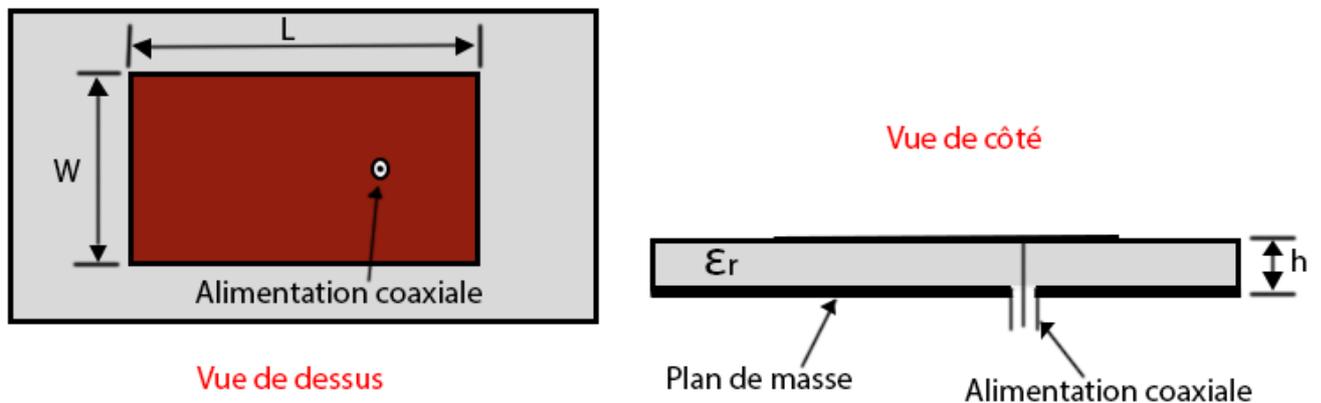


Figure I.8: Alimentation par câble coaxial.

I.4.4 Alimentation par ligne microbande :

Un patch micro ruban excité par une ligne microbande est représenté sur la 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. Cette technique d'alimentation présente l'avantage d'être gravée sur le même substrat que le patch, et d'être aussi facile à fabriquer et facile à modéliser [20].

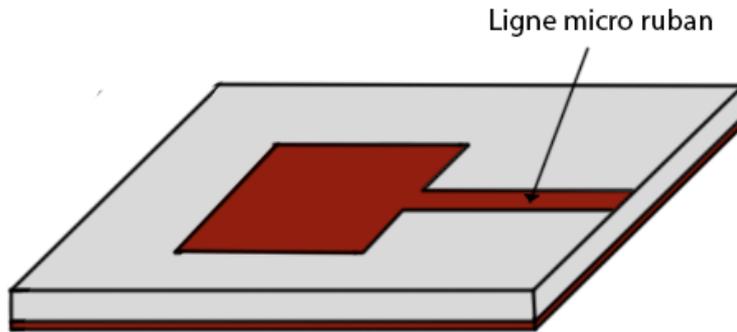


Figure I.9: Alimentation par ligne microbande.

Cette technique d'alimentation présente l'avantage d'être graver la ligne sur le même substrat avec le patch [21], 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].

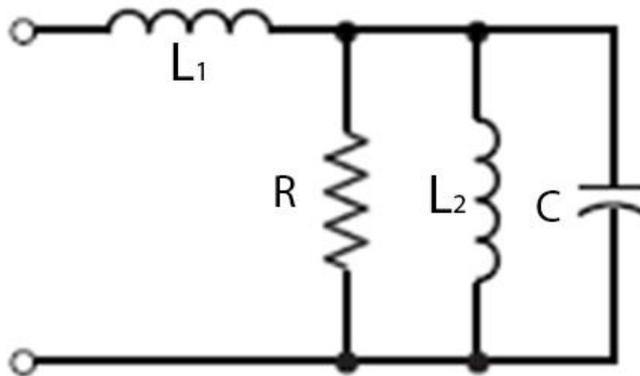


Figure I.10 : Circuit équivalent d'une antenne patch alimenté par sonde coaxiale et ligne micro ruban [12].

I.4.5 Alimentation par couplage par fente

L'alimentation par ligne micro ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation

croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite. Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban. Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite [19].

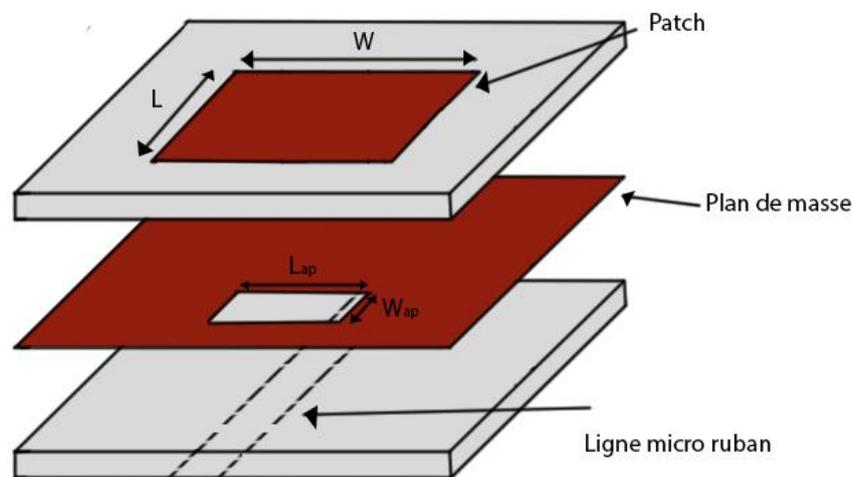


Figure I.11: Alimentation à travers une fente.

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.

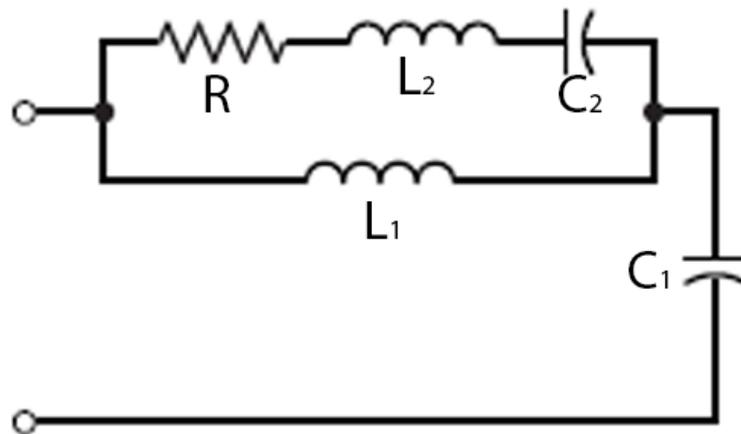


Figure I.12 : Circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture [12].

I.4.6 Alimentation de proximité

On appelle en anglais (Proximité couple Fed). 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 [18].

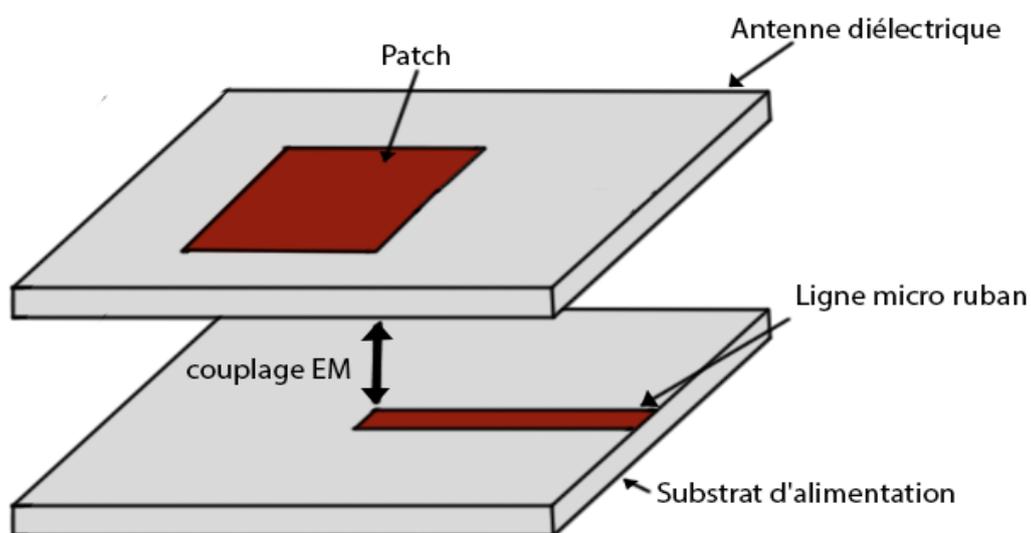


Figure I.13: Alimentation de proximité.

Les deux majors avantages de cette alimentation sont :

- ✓ Une bande passante élevée à cause de l'augmentation de l'épaisseur d'antenne,
- ✓ et l'élimination de rayonnement Parasite [20].

Mais il y a une difficulté de mise en œuvre. Cette méthode d'alimentation est représentée par un circuit équivalent RLC (figure I.14).

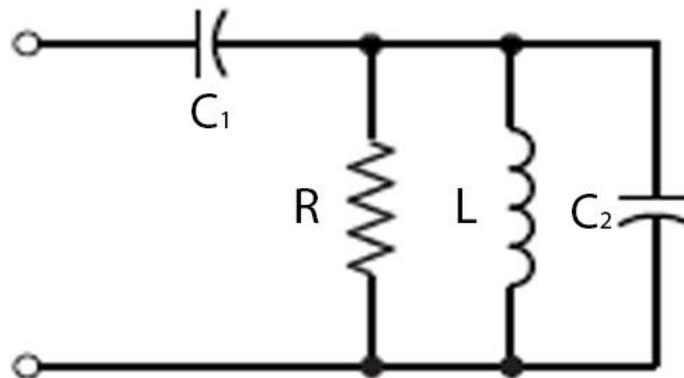


Figure I.14: Circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité [12].

I.5 Méthodes d'analyse d'une antenne patch :

Elles sont basées sur des équations physiques d'électromagnétisme d'où on a fait des hypothèses simplificatrices permettant d'obtenir des modèles simples. Néanmoins, les résultats sont approchés. Les modèles fréquemment utilisés pour analyser les antennes imprimées sont :

- >Le modèle de la ligne de transmission
- >Le modèle de la cavité électromagnétique

I.5.1 Modèle de la ligne de transmission :

Avant d'étudier les antennes patch, ouvrons une parenthèse et parlons des lignes micro ruban. La ligne micro ruban est un type de lignes de transmission, qui sont utilisées pour transporter de sondes électromagnétiques d'un port partie à un autre. Comme le montre (figure15) une ligne micro ruban comprend trois parties principales : un conducteur mince, un matériau diélectrique appelé substrat et un plan conducteur appelé plan de masse. En général,

l'air remplit le volume au-dessus du conducteur mince, ce qui implique que le champ électrique entre les deux conducteurs se déplace dans deux milieux dissemblables. Par conséquent, le champ électrique présente des franges sur les bords [20].

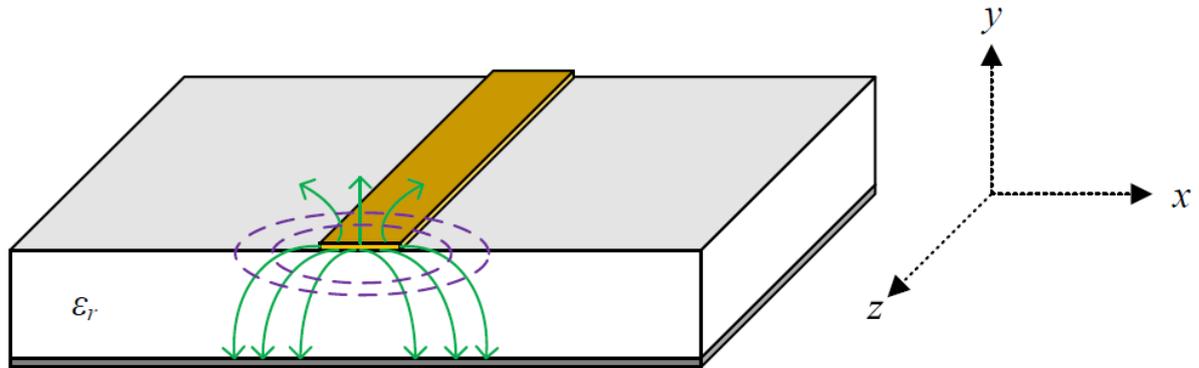


Figure I.15 : Une configuration de ligne de transmission micro ruban

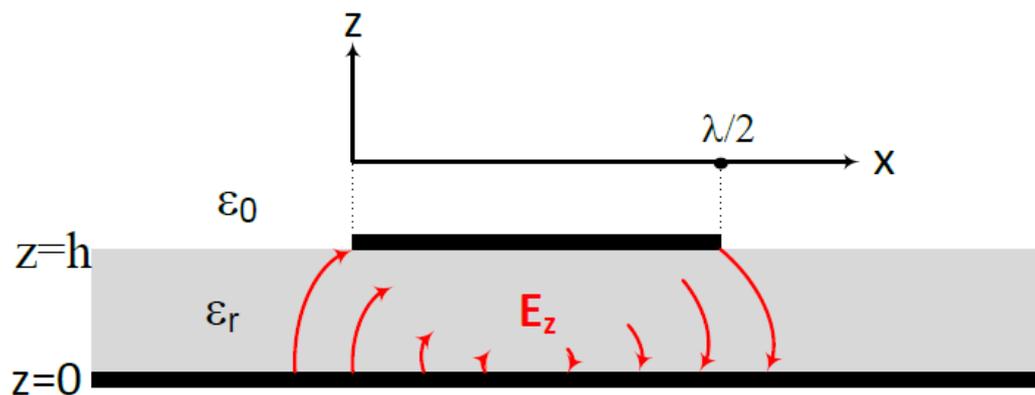


Figure I.16: Distribution du champ électrique TM_{10} sur toute la longueur du patch

Pour simplifier l'analyse de ces structures, nous devons trouver un moyen par lequel nous peut transformer le problème d'un champ qui se propage dans deux médias différents en un champ qui se propage dans un milieu homogène. Cette transformation peut se faire si l'on suppose que les deux milieux de la figure 16 sont équivalents à un seul milieu avec un diélectrique spécifique constant que nous appelons constante diélectrique effective (ϵ_{eff}) comme le montre la Figure I.17. Mathématiquement, (ϵ_{eff}) peut être écrit comme :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}}; \quad W/h > 1 \quad (I.13)$$

Où W est la largeur du conducteur et h est l'épaisseur du substrat. La permittivité effective est comprise entre $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$ [33].

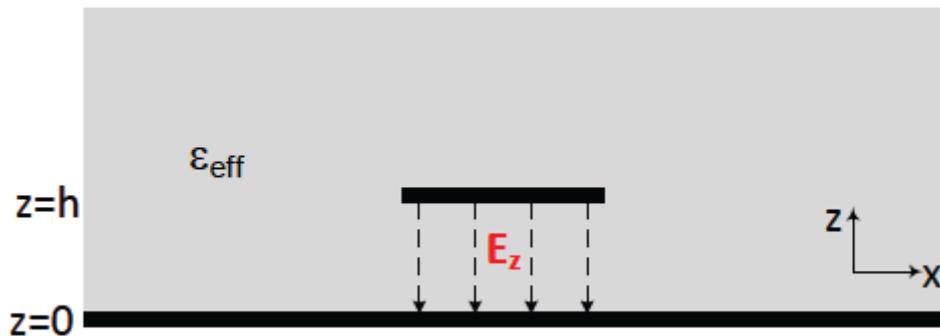


Figure I.17: Transformation de la figure I.16 en un milieu homogène équivalent.

I.5.2 Modélisation et rayonnement des antennes patch

L'antenne patch est similaire aux lignes de transmission micro ruban avec de légères modifications car, contrairement à la ligne de transmission microstrip, nous voulons que le patch rayonne. D'après la figure I.18, une antenne patch rectangulaire est simplement un "patch" de métal sur un substrat qui a une constante diélectrique ϵ_r . En se référant également à la figure I.18, nous voulons deux propriétés :

1. Le plan de masse bloque le rayonnement dans les $-z$ et l'orienté vers $+z$.
2. En champ lointain, le champ frangeant autour de $x = 0$ s'additionne en phase avec le champ frangeant autour de $x = L$. Par conséquent, le rayonnement maximum est sur la direction $+z$.

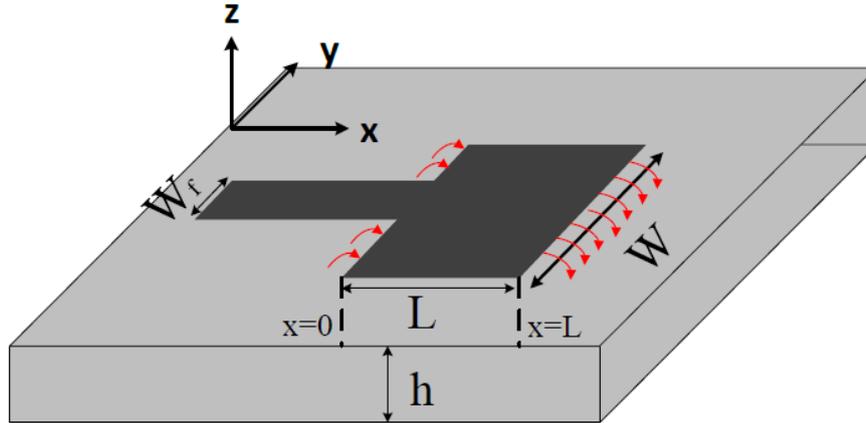


Figure I.18: Antenne patch sur une carte de circuit imprimé(PCB). (Les flèches rouges représentent le champ de frange).

Il s'avère que le mode TM₁₀ (qui est représenté sur la figure I.19) garantit ces propriétés. Le champ de franges de la figure I.19 rend la longueur électrique un peu plus longue que la longueur physique comme illustré à la Figure 1.20. Mathématiquement, la longueur des franges - référons-est comme suit :

$$\Delta L = (0.412h) \frac{(\epsilon_r + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_r - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{(I.14)}$$

Comme nous pouvons le déduire de l'équation (I.15), l'augmentation de ϵ_r augmentera la longueur des franges si d'autre paramètres (à savoir, W et h) sont conservés tels quels. Si la longueur nous aurons une résonance; ainsi, le patch commence à rayonner. Cependant, à cause de la frange champ, nous avons besoin que la longueur électrique effective soit une demi-longueur d'onde. A cet effet, pour obtenir la résonance la longueur physique doit être modifiée comme suit :

$$L = L_e - 2\Delta l = \frac{\lambda_m}{2} - 2\Delta l \quad \text{(I.15)}$$

Où L_e est la longueur électrique, () et le facteur "2" provient du fait que nous avons des franges aussi bien autour de $x=0$ que de $x=L$.

I.5.2.1 Modélisation d'un patch rectangulaire

Pour analyser les antennes patch, nous devons les modéliser. Dans la littérature, il existe plusieurs Techniques telles que la ligne de transmission et le modèle de cavité. Nous allons présenter le modèle de ligne de transmission parce qu'il suppose que le patch équivaut à deux fentes rayonnantes qui sont séparés par une ligne de transmission à faible impédance d'une longueur d'environ $\lambda/2$. La figure I.19 montre les deux fentes rayonnantes qui forment un réseau à deux éléments polarisé linéairement selon la direction de la ligne d'alimentation (dans notre cas, la polarisation du champ électrique est sur la direction x).

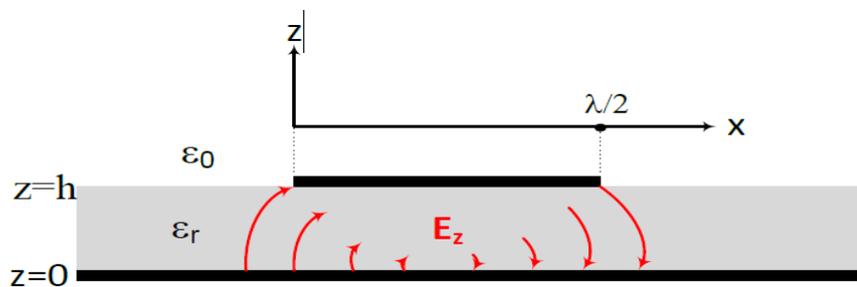


Figure I.19: TM_{10} distribution du champ électrique sur la longueur du patch

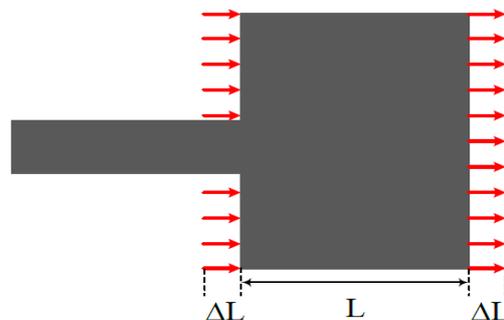


Figure I.20: Vue de dessus d'une antenne patch (la longueur électrique est $L+2\Delta L$).

Par conséquent, nous concluons que les antennes patch, par rapport à la configuration de la figure I.21, sont polarisées linéairement. Le plan XZ est appelé plan E tandis que le plan YZ est appelé plan H plan.

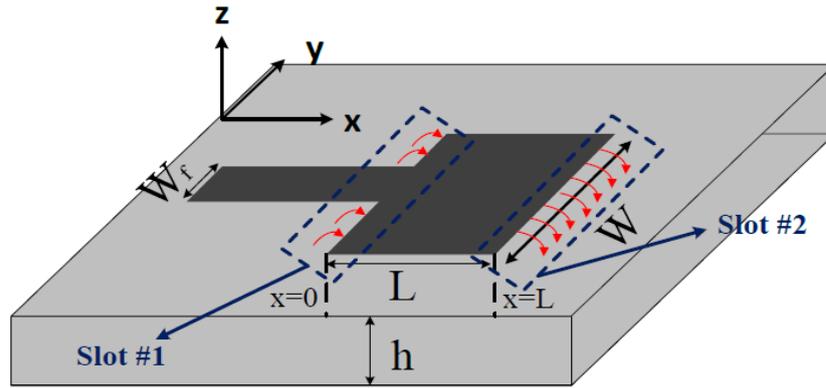


Figure I.21: Modélisation de l'antenne patch comme un réseau à deux fentes.

I.5.2.2 Impédance, bande passante et diagramme de rayonnement

Commençons d'abord par le diagramme de rayonnement, les antennes patch sont modélisées comme un réseau de deux fentes ou à deux éléments, le diagramme de rayonnement devrait adhérer à la théorie des réseaux d'antennes, à savoir que le motif total est la multiplication du diagramme de rayonnement de l'élément et du facteur de réseaux. Par conséquent, pour une fente de dimensions $W \times h$. les champs électriques de la fente sont [34]

$$E_{\theta} = E_0 \cos \varphi \frac{\sin\left(\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi\right)}{\sin \theta \sin \varphi} \quad (I.16)$$

$$E_{\varphi} = -E_0 \cos \theta \sin \varphi \frac{\sin\left(\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi\right)}{\sin \theta \sin \varphi} \quad (I.17)$$

Le diagramme de rayonnement d'un réseau à deux éléments distribué le long de l'axe x est

$$AF(\theta, \varphi) 2 \cos\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi\right) = 2 \cos\left(\pi \frac{L_e}{2} \sin \theta \cos \varphi\right) \quad (I.18)$$

Par conséquent, le champ total serait

$$E_{\theta_{total}} = E_{\theta} = \cos \varphi \frac{\sin\left(\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi\right)}{\sin \theta \sin \varphi} [2 \cos\left(\pi \frac{L_e}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)] \quad (I.19)$$

$$E_{\varphi_{total}} = E_{\varphi} = -E_0 \cos \theta \sin \varphi \frac{\sin(\frac{\pi w}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi)}{\sin \theta \sin \varphi} [2 \cos(\pi \frac{L_e}{2} \sin \theta \cos \varphi)] \quad (I.20)$$

Les largeurs de faisceau à demi-puissance sont :

$$\Theta_{E-plane} = 2 \cos^{-1} \sqrt{\frac{7.03\lambda^2}{4\pi^2(3Le^2+h^2)}} \quad (I.21)$$

$$\Theta_{H-plane} = 2 \cos^{-1} \sqrt{\frac{1}{2+(\frac{2\pi}{\lambda})w}} \quad (I.22)$$

L'impédance d'entrée d'une antenne patch à la résonance est approximativement réelle et est approximée par :

$$Z_A = 90 \frac{\epsilon r^2}{\epsilon r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \approx \frac{Rr}{2} \Omega \quad (I.23)$$

Où Rr est la résistance de rayonnement.

L'équation I.21 est une formule empirique pour un patch rectangulaire demi-onde, donc nous ne pouvons pas l'utiliser pour toutes les situations. La formule générale peut être trouvée à l'aide du modèle de cavité [34].

Enfin, du point de vue communication, la bande passante est une quantité importante à déterminer. Les antennes patch, il en va de même pour toutes les antennes à résonance telles que les dipôles, sont des antennes intrinsèquement à bande étroite. La bande passante du patch est donnée par [34] :

$$BW = fr \left(3.77 \frac{\epsilon r - 1}{\epsilon r^2} \frac{W}{L} \frac{h}{\lambda} \right) \quad (I.24)$$

Où f_r est la fréquence de résonance.

I.6 Équations de conception :

Nous avons répertorié de nombreuses équations, arrêtons-nous une seconde et résumons les étapes de conception dans l'ordre suivant :

- Calculer la valeur de W en utilisant :

$$W = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{I.25})$$

- Calculez E_{eff} en utilisant :

$$(\text{I.26})$$

- Calculez le champ de franges à l'aide de l'extension de la longueur :

$$\Delta l = (0.412h) \frac{(\epsilon_r + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_r - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{I.27})$$

- Calculez la longueur L en utilisant :

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta l \quad (\text{I.28})$$

- Calculez l'impédance d'entrée en utilisant :

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{l}{w}\right)^2 \quad (\text{I.29})$$

Un exemple d'antenne patch est simulé sous le logiciel CST Microwave studio à la fréquence 3 GHz (figure I.22). Le substrat diélectrique a les caractéristiques suivantes : $\epsilon_r = 3.4$, $h = 6.9$ mm. La ligne de transmission correspond à une ligne d'impédance caractéristique à 50ohms. Travaillez en groupe de deux ou trois pour trouver W ?

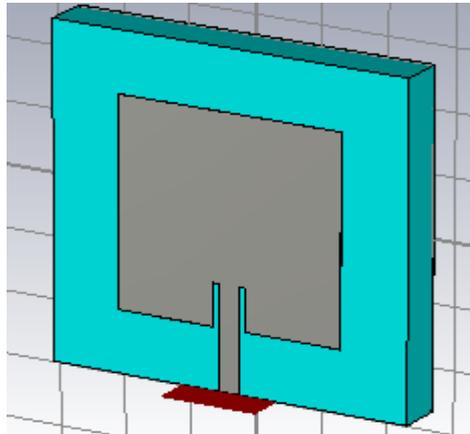


Figure I.22 antenne patch simple

À 3 GHz, la longueur d'onde en espace libre est de $5,2$ cm = 52 mm. Par conséquent, nous appliquons les étapes de conception soulignées ci-dessus, nous trouvons alors les résultats du Tableau I.1.

W	ϵ_{eff}	Δl	L	Z_a
8.96mm	2.575	2.49mm	3.309mm	591.1 hom

Tableau I.1

Par conséquent, nous avons tout ce dont nous avons besoin pour simuler (ou construire) notre conception. J'ai utilisé CST pour simuler le patch que nous avons conçu dans cet exercice et tracé le coefficient de réflexion S_{11} .

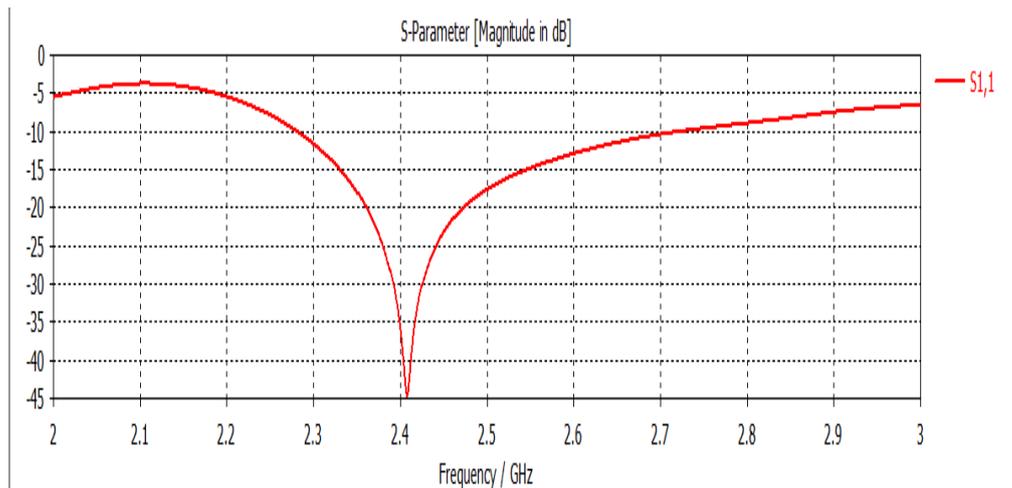


Figure 1.23 simulation de S11

- Les résultats de la simulation ont fourni un coefficient de réflexion S11 parfait dans notre cas qui est inférieur à -10 dB.

I.7 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 fabriqués simultanément avec l'antenne.
- **Mais il y a quelques 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.

I.8 Conclusion :

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

Méthodes et techniques de polarisation circulaire CP

II.1 Introduction

La polarisation est découverte en 1808 par l'ingénieur physicien et mathématicien français **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 des amplitudes du champ électrique ou du 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 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 la polarisation et ses différents types (elliptique, linéaire et circulaire), puis nous étalerons sur le calcul du rapport axial. Par la suite, nous donnerons quelques exemples de conception d'antennes patches à polarisation circulaire CP. Les résultats obtenus par le logiciel Microwave studio CST sont comparés à la littérature.

II.2 Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est la propagation des champs électriques et magnétiques qui varie dans le temps et dans l'espace à la vitesse de la lumière. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde.

Une onde électromagnétique est constituée :

- ❖ D'un champ électrique $E \square \square$
- ❖ D'un champ magnétique $H \square \square$
- ❖ Orthogonaux et transverses (perpendiculaires à la direction de propagation) [12].

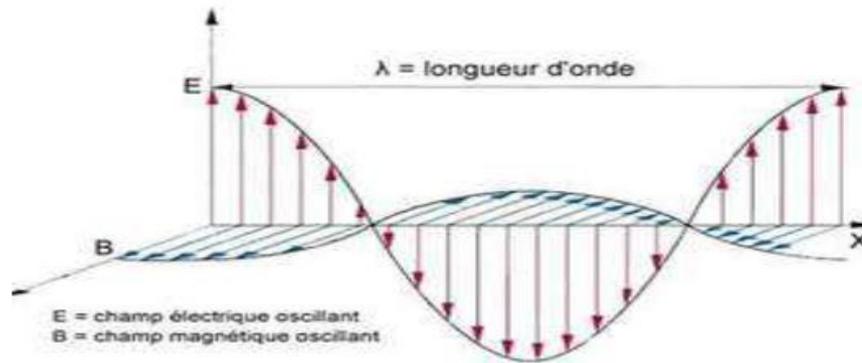


Figure II.1 onde électromagnétique

II.3 Propagation des ondes électromagnétiques

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

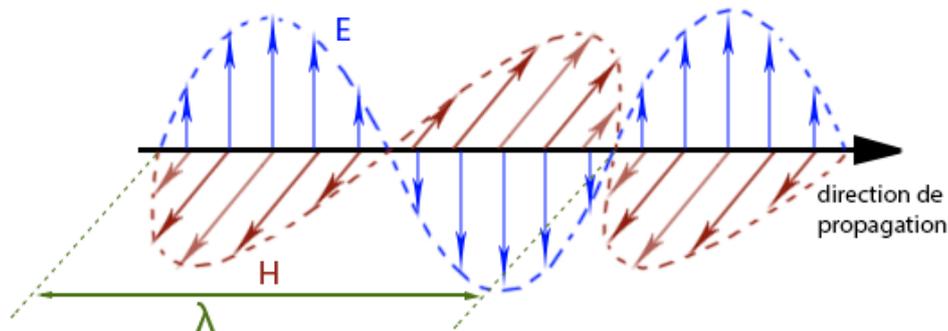


Figure II.2: Onde électromagnétique à polarisation linéaire.

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

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(Maxwell-Gauss) (II.1)

$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Maxwell-Faraday) (II.2)

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0$$

(Maxwell-Flux) (II.3)

$$\operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Ampère) (II.4)

Avec :

- ❖ E : Champ électrique.
- ❖ H : Champ magnétique.
- ❖ $D = \epsilon.E$: Induction électrique.
- ❖ $B = \mu.H$: Induction magnétique.
- ❖ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$: permittivité diélectrique, ϵ_0 permittivité diélectrique du vide et ϵ_r permittivité relative au milieu de propagation.
- ❖ $\mu = \mu_0 \mu_r$: perméabilité magnétique, μ_0 perméabilité magnétique du vide et μ_r perméabilité magnétique relative au milieu de propagation.
- ❖ J : Densité volumique de charge.
- ❖ ρ : Densité volumique de courant.

Dans le vide : $\epsilon = \epsilon_0$ et $\mu = \mu_0$, $J = 0$ et $\rho = 0$, on peut déterminer l'équation de propagation du champ électrique et du champ magnétique. Les équations de propagations (ou équations de d'Alembert) sont comme suit :

$$\Delta \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\Delta \mathbf{B} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II.6})$$

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

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = \text{Re}[\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) e(-j\omega t)] \quad (\text{II.7})$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = \text{Re}[\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) e(-j\omega t)] \quad (\text{II.8})$$

II.3.1 Vecteur de Poynting

Le vecteur de Poynting est la quantité d'énergie du flux électromagnétique par unité de surface (watts/m^2) [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 \mathbf{E} et le champ magnétique \mathbf{H} , et il est donné par :

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2 Définition de la polarisation d'une antenne

La polarisation d'une antenne est la caractéristique d'une antenne traduisant son adaptation à l'orientation du champ électrique qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit de façon privilégiée. Si le vecteur champ électrique de l'onde rayonnée par l'antenne se trouve toujours dans le même plan alors la polarisation est dite *linéaire*. Sinon la polarisation de l'onde est *elliptique* avec le cas particulier de la polarisation *circulaire*. Une polarisation linéaire peut être *horizontale* ou *verticale* [23].

II.3.3 Mesure de la polarisation de l'antenne :

La polarisation de l'antenne est liée à l'onde que cette antenne rayonne ou reçoit dans une certaine direction, cependant dans le cas d'une direction quelconque, la polarisation de l'antenne est également considérée selon la direction, où le gain est plus élevé. La polarisation de l'antenne change avec le changement de distance du centre L'antenne, de sorte que différentes parties de l'antenne peuvent avoir une polarisation différente. L'onde électromagnétique a deux composantes, les champs électrique et magnétique, et sont mutuellement perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Le niveau de polarisation des ondes radio est déterminé par la direction du vecteur électrique [29].

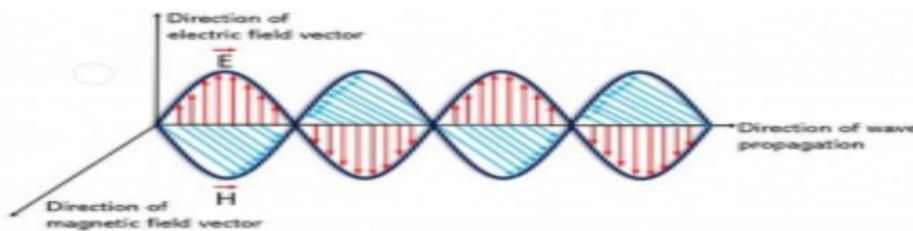


Figure II.3 : la représentation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre avec la composante de champ électrique et magnétique.

II.4 Polarisation d'une onde électromagnétique

II.4.1 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 :

$$\vec{E}(z, t) = E_x(z, t)\vec{u}_x + E_y(z, t)\vec{u}_y \quad (\text{II.10})$$

A partir des équations les composants E_x et E_y présentés sous forme réelles par :

$$E_x(z, t) = \Re[E_x e(j \omega t) - kz] = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (\text{II.11})$$

$$E_y(z, t) = \Re[E_y(j \omega t) - kz] = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (\text{II.12})$$

Où :

- ❖ 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.
- ❖ φ_x Et φ_y sont les phases initiales des composantes E_x et E_y respectivement.
- ❖ k est la constante de propagation.

II.4.2 Types de polarisations

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

II.4.2.1 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.4).

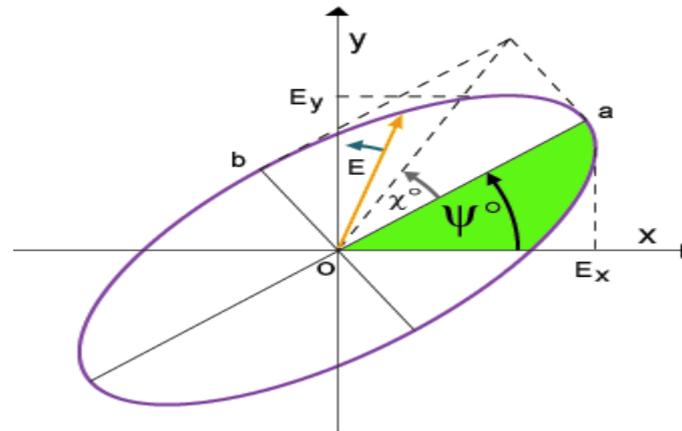


Figure II. 4 : Polarisation elliptique (a :axe majeure, b :axe mineure)

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 composants est un multiple impair de $\frac{\pi}{2}$.

- **Propriétés d'ellipticité**

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

$$X = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{II.13})$$

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 τ égal à 1, les composantes E_{x0} et E_{y0} sont égales [29] :

- Si le déphasage relatif $\Delta\phi = 5\pi/2$, l'angle d'orientation devient $\varphi = 135^\circ$ et l'ellipticité varier de 45° à -45° (Figure II.5.a).
- Si les deux composants sont en phase $\Delta\phi = 0$, la polarisation est linéaire (l'angle d'ellipticité $X=0$ et d'orientation $\varphi=45^\circ$) (Figure II.5.b).

- Si le déphasage relatif $\Delta\phi = \pi/2$, l'angle d'orientation $\varphi = 45^\circ$ et l'ellipticité $X = 45^\circ$, la polarisation est circulaire (Figure II.5.c).

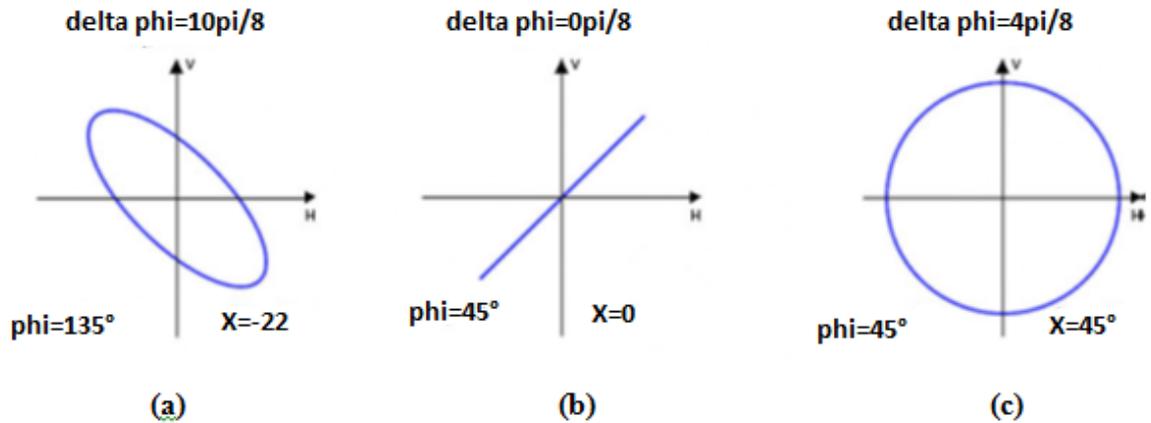


Figure II.5 : Différents types de polarisation:(a) Polarisation elliptique (b) Polarisation linéaire (c) Polarisation circulaire.

II.4.2.2 Polarisation linéaire

La polarisation linéaire est obtenue uniquement lorsque le champ électrique garde sa direction dans le temps. Autrement dit, le champ électrique garde son oriente de la même manière au cours de la propagation. (Figure II.4). Le champ électrique est parallèle au vecteur unitaire u_x et le champ magnétique est parallèle au vecteur unitaire u_y . Le vecteur de propagation k est alors parallèle au vecteur unitaire u_z [1].

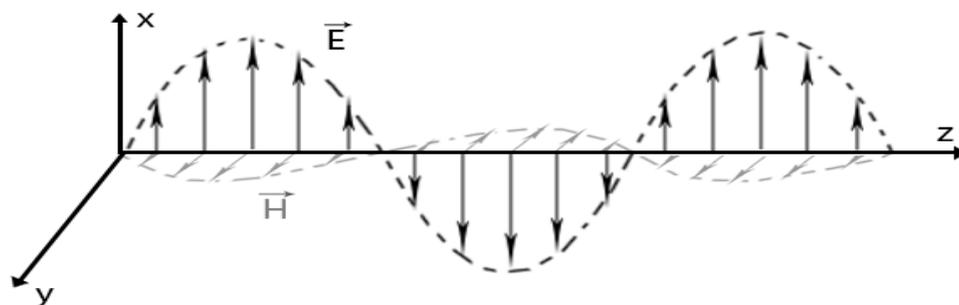


Figure II.6: Polarisation linéaire.

II.4.2.3 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.5.a).
- ✓ Quand le champ électrique est perpendiculaire au sol, la polarisation est verticale (figure II.5.b).

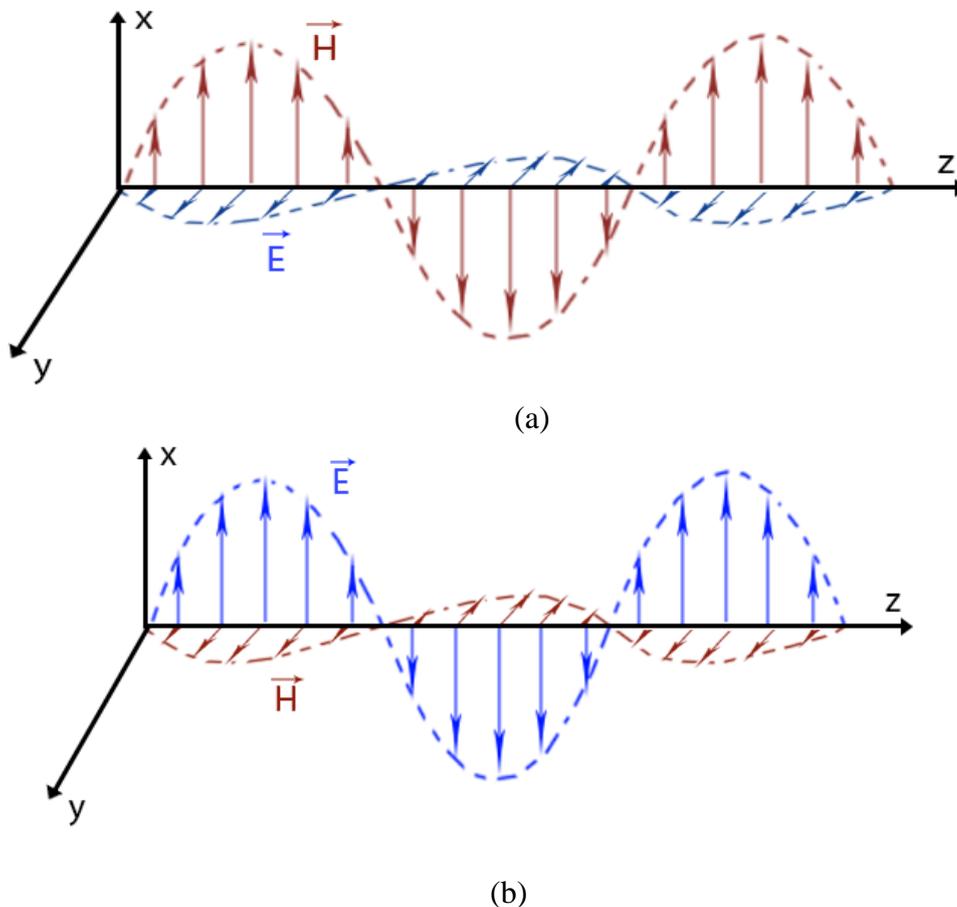


Figure II.7: Polarisation linéaire : (a) Horizontale et (b) Verticale

II.4.2.4 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.4.2.5 Polarisation circulaire

La polarisation est dite circulaire si l'extrémité du vecteur champ électrique en un point de l'espace décrit un cercle lorsque les ondes se propagent. L'onde électromagnétique peut alors être considérée comme la somme de deux ondes planes à polarisation rectiligne donc les champs électriques sont d'égales amplitudes, perpendiculaires l'un à l'autre et déphasés de $\pm\pi/2$ (quadrature de phase). Par convention, la polarisation circulaire est dite "droite" si, pour l'observateur qui regarde l'onde qui s'éloigne, la vectrice polarisation tourne dans le sens trigonométrique. Elle est dite "gauche" dans le cas contraire [13].

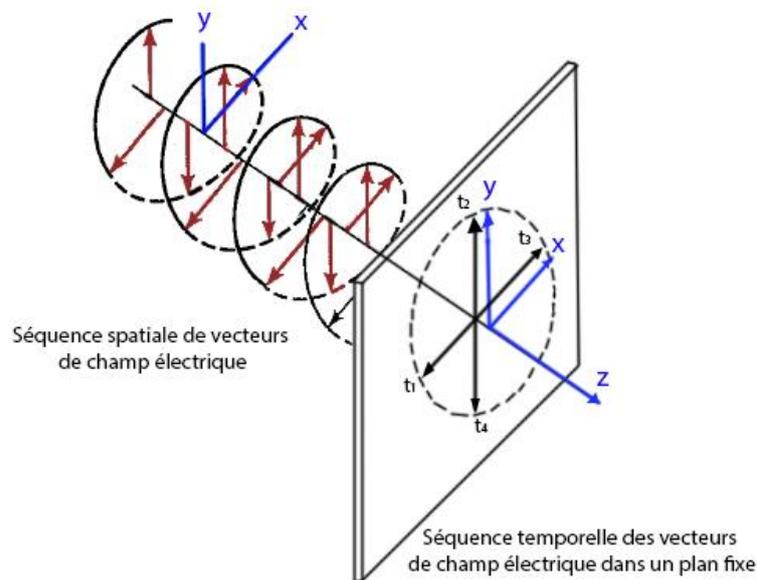


Figure II.8 : Polarisation circulaire à séquence spatiale et à séquence temporelle dans un plan fixe.

- ❖ Il existe deux principes fondamentaux pour obtenir une polarisation circulaire : excitation de l'élément rayonnant en 2 points ou en 1 point. La bande passante en polarisation circulaire obtenue avec l'excitation en 2 points est plus importante que celle obtenue avec l'excitation en 1 point [30].
- **Excitation en 2 points** : les deux points d'attaque excitent deux modes orthogonaux avec la même pondération en amplitude compte tenu de la symétrie de l'élément

rayonnant. Deux exemples de mise en quadrature et de division par 2 de l'énergie sont présentés sur la figure II.9 :

- diviseur en T et ligne à retard $\lambda_g/4$. On ne peut obtenir une polarisation circulaire que d'un seul type (gauche ou droite). La bande passante du diviseur est étroite à cause du tronçon de ligne $\lambda_g/4$, ce qui limite la bande passante de l'antenne [31].

- coupleur hybride qui est de nature large bande pour un déphasage de $\pi/2$ entre ses sorties. On peut obtenir soit un accès en polarisation circulaire gauche, soit un accès en polarisation circulaire droite.

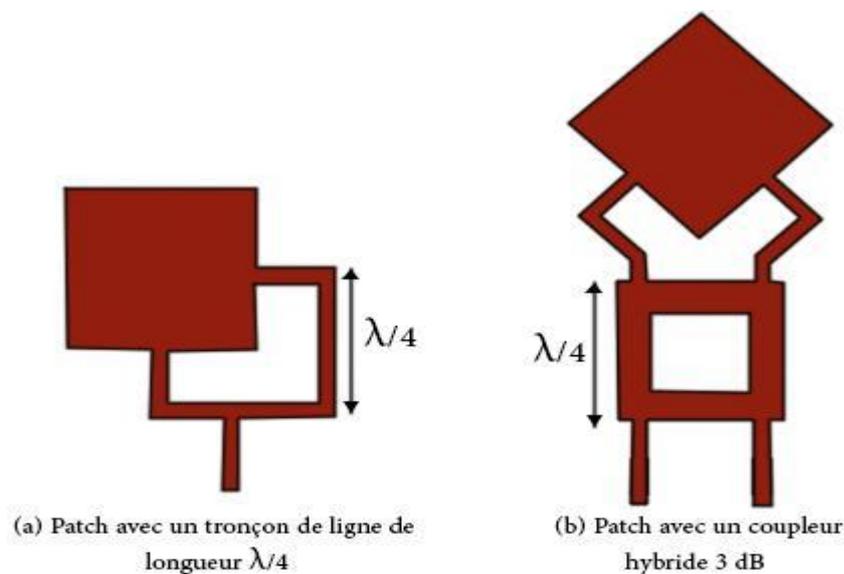


Figure II.9 Excitation en deux points.

- **Excitation en 1 point** : le principe consiste à positionner le point d'attaque de manière à exciter deux modes en quadrature et polarisés orthogonalement. Une géométrie légèrement dissymétrique de l'antenne produit deux fréquences de résonance voisines, de sorte qu'à la fréquence centrale de fonctionnement, les deux modes sont déphasés de $\pi/2$ (figure II.10) [32].



Figure II.10 Excitation en un point.

Différents types de dissymétries et d'excitations sont présentés sur les figures II.9 et II.10. Ils permettent l'obtention d'une polarisation circulaire droite ou gauche

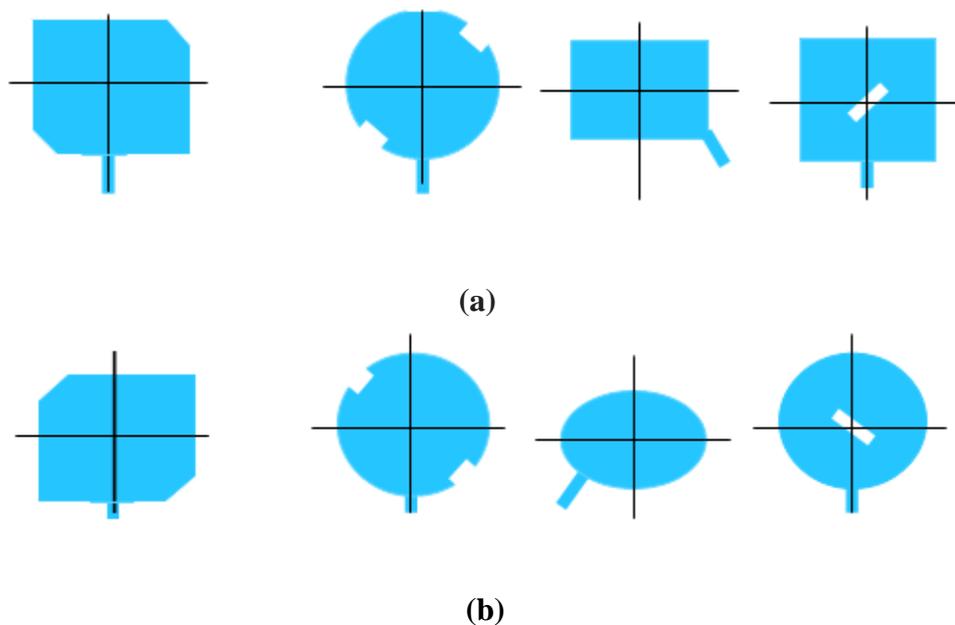


Figure II.11 Différents types de dissymétries.

(a) polarisation circulaire droite.

(b) polarisation circulaire gauche.

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.12)

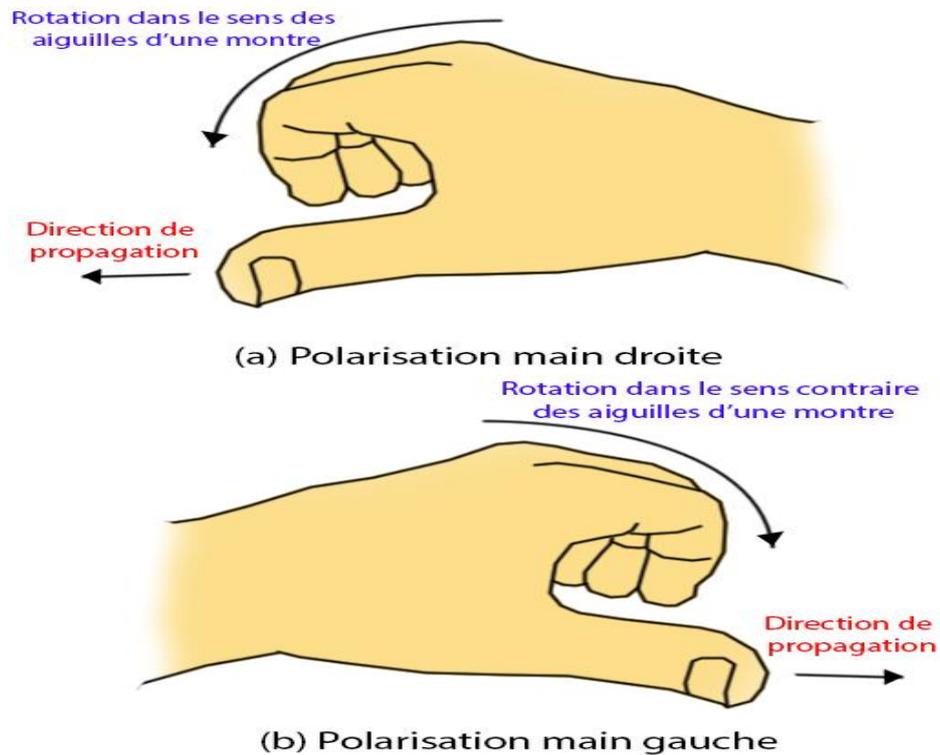


Figure II. 12: Convention de polarisation : (a) Polarisation main droite et (b) Polarisation main gauche.

II.4.3 Le rapport axial en fonction de la fréquence :

Le rapport axial est un paramètre très important qui aide à quantifier la polarisation d'une antenne. Le rapport axial d'une onde elliptiquement polarisée, est la relation entre le grand et le petit axe de l'ellipse (figure II.4) :

$$AR = \frac{\text{Axe Majeur}}{\text{Axe Mineur}} = \frac{OA}{OB} \quad \text{avec } 1 \leq AR \leq \infty \quad (\text{II.14})$$

$$AR(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{OA}{OB} \right) \quad \text{avec } 0 \leq AR \leq \infty \quad (\text{II.15})$$

Il peut prendre des valeurs comprises entre un et l'infini (1 et ∞) [16]. Pour une antenne qui a une polarisation purement linéaire, le rapport axial tend vers l'infini car l'une des composantes du champ électrique est nulle.

Pour les antennes qui ont une polarisation circulaire parfaite, le rapport axial est de 1 ou 0 dB, car les composantes du champ électrique ont la même valeur. Dans la pratique, on dit que la polarisation est circulaire, lorsque la valeur du rapport axial est entre 0 à 3 dB.

II.5 Simulation et optimisation d'antennes à polarisation circulaire CP

Comme une première approche les dimensions du patch, vont être calculées en fonction des caractéristiques du substrat (permittivité relative ϵ_r , l'épaisseur h) et le choix de la fréquence de résonance. L'alimentation sera faite à l'intermédiaire d'une ligne coaxiale. L'épaisseur du substrat doit être suffisante pour implanter la sonde [22]. Les extrémités du diélectrique doivent être éloignées d'au moins $\lambda/2\pi$ à partir de l'antenne, alors l'espacement du plan de masse situé au fond du diélectrique est inclus. Pour le choix de l'épaisseur du substrat, une bonne épaisseur favorise l'extension des champs alors la radiation vers l'extérieur. [23]

Nous proposons dans cette étude de réaliser trois conceptions d'antennes imprimées à polarisation circulaire CP à la fréquence 3.1GHz, selon trois techniques présentées dans les figures ci-dessous. Le travail de ce projet consiste à étudier l'effet des paramètres physiques et géométriques (type de substrat et d'alimentation) sur les caractéristiques des antennes telles que le coefficient de réflexion S11, la fréquence de résonance et le rapport axial AR. L'objectif essentiel serait de garantir la fréquence de résonance entre 3 et 3.2 GHz avec la meilleure adaptation possible et avec un bon rapport axial.

II.5.1 Alimentation sur la diagonale d'un élément rayonnant presque rectangulaire

La technique la plus classique est de considérer un patch légèrement rectangulaire avec un rapport b sur a proche de 1 pour avoir une polarisation circulaire. L'antenne doit être excitée à une fréquence qui se trouve entre les deux fréquences de résonance des deux

modes orthogonaux. Par conséquent, une alimentation en diagonale est nécessaire et la sonde est alors placée à une distance dx et dy du centre du patch (figure II.13). Dans cette étude, nous allons nous intéresser à deux antennes ayant deux différentes épaisseurs (Tableau 1).

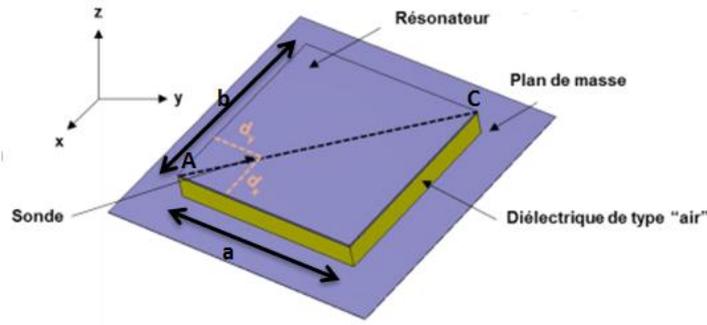


Figure II.13 : Antenne patch classique alimentée sur la diagonale [24]

- **Emplacement optimal du point d'alimentation :**

Nous constatons que la polarisation circulaire peut être obtenue lorsque l'alimentation est située en un point optimal sur la diagonale CA. La variation du VSWR d'entrée et du rapport axial avec l'emplacement de l'alimentation sur la diagonale AC est illustrée sur la Figure II.14. A mesure que l'alimentation est déplacée du coin A à un point situé à $0,3441 \cdot AC$ du coin avec $b/a = 1.112$, le rapport axial est alors égale a la valeur minimale 0.65 dB, et le VSWR égale à 1.53 dB pour la fréquence 3.1012GHz. Ces résultats sont résumés dans le tableau II.1.

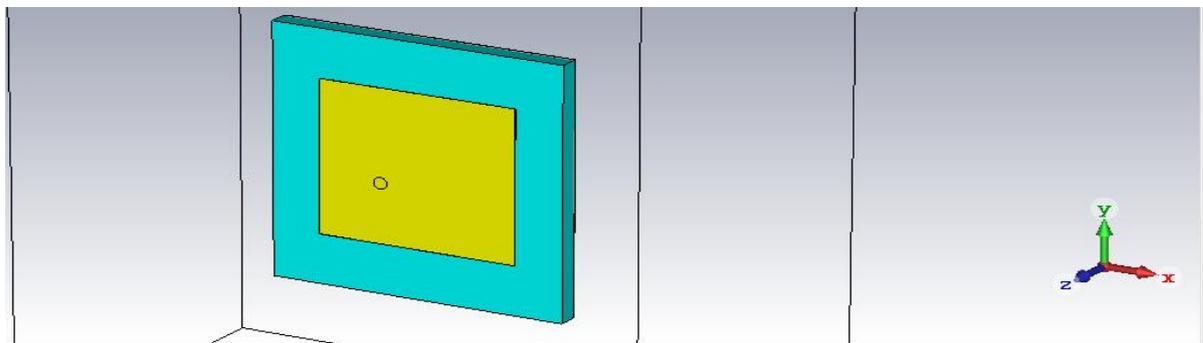
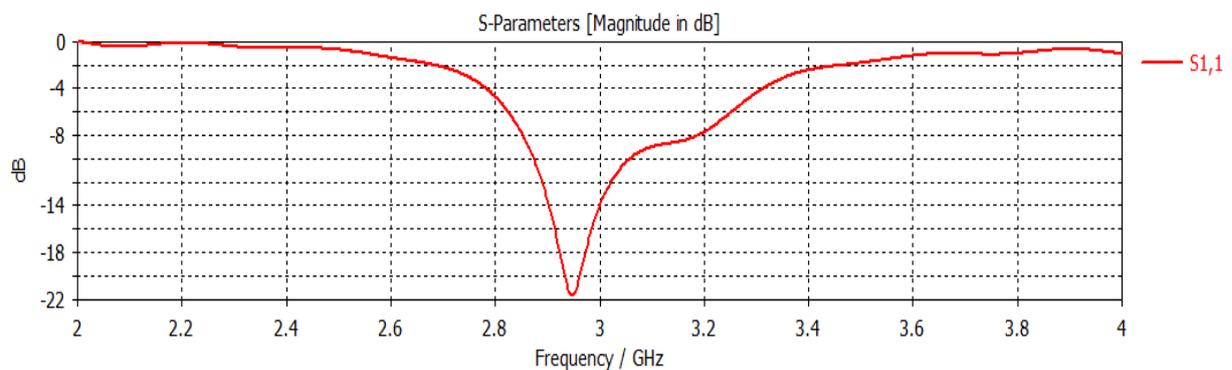
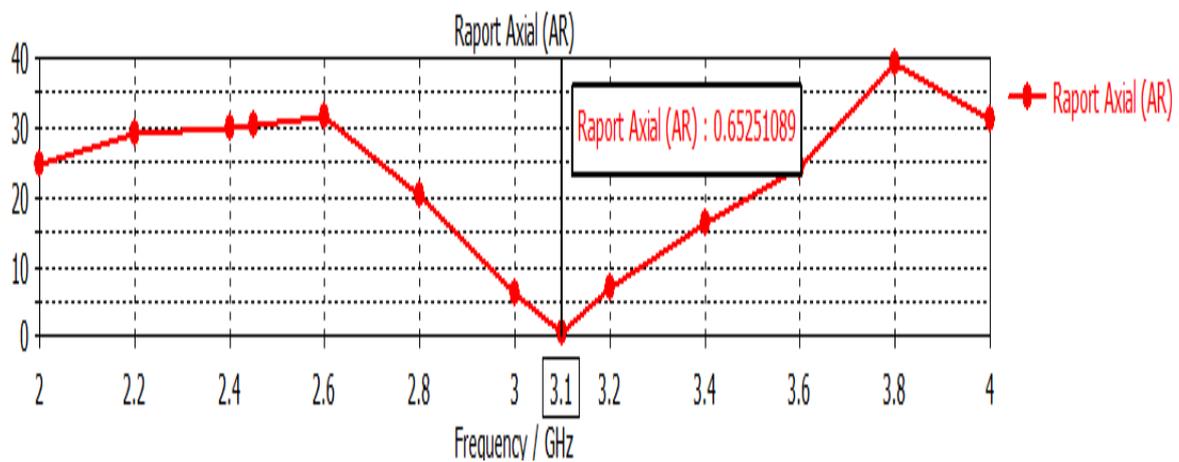
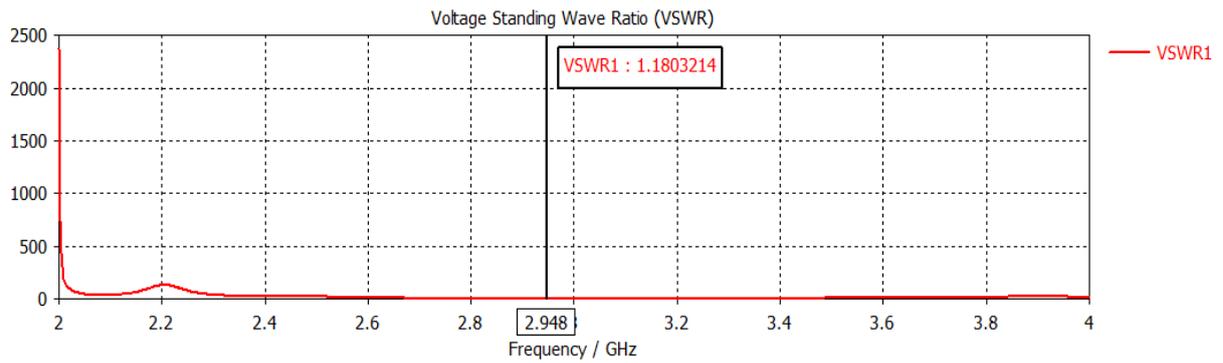


Figure II.14 : Antenne patch carrée alimentée sur la diagonale

Tableau II.1 : Paramètres des antennes 1 et 2 alimentée sur la diagonale

Paramètres	Antenne 1	Antenne 2
Épaisseur	1/8 pouce = 3.175mm	1/16 pouce = 1.587mm
Er	2.52	2.49
a x b (cm)	2.66 cm x 2.958 cm	2.781 cm x 2.9493 cm
Le rapport (b/a)	1.112	1.112
Axial ratio (f = 3.1GHz)	0.65	0.163
VSWR (f = 3.1GHz)	1.53	1.18





(c)

Figure II.15 Variation du rapport axial AR (a), du VSWR (b) et du coefficient de réflexion S11 (c) de l'antenne 1

La variation de rapport axial AR et de VSWR en fonction de déplacement de la position d'alimentation r/AC est illustrée sur la figure II.16.

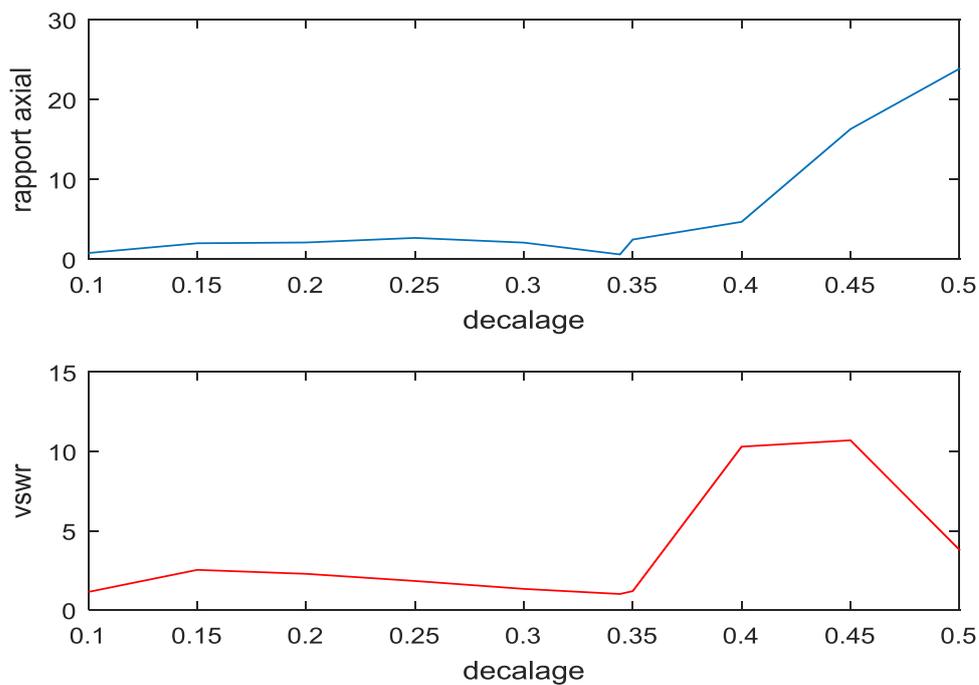


Figure II.16 Rapport axial et VSWR en fonction de r/AC sous MATLAB

- Une autre antenne sur un substrat d'épaisseur 1/16 pouce avec $\epsilon_r = 2,52$ a été conçue. La largeur du rectangle à (Figure II.13) a été choisie. Pour obtenir une polarisation circulaire avec un rapport axial égal à 0.163 dB Le rapport optimal b/a des côtés de rectangle est égal à 1.112. La valeur minimale de VSWR pour l'antenne sur substrat d'épaisseur 1/16 pouce est égal à 1.18 à une distance de 0,3522 fois AC. Pour cet

emplacement, l'alimentation est optimale et le rapport axial minimal égal à 0.163 dB est obtenu à la fréquence 3.1GHz. Ces résultats sont résumés dans les figures suivantes :

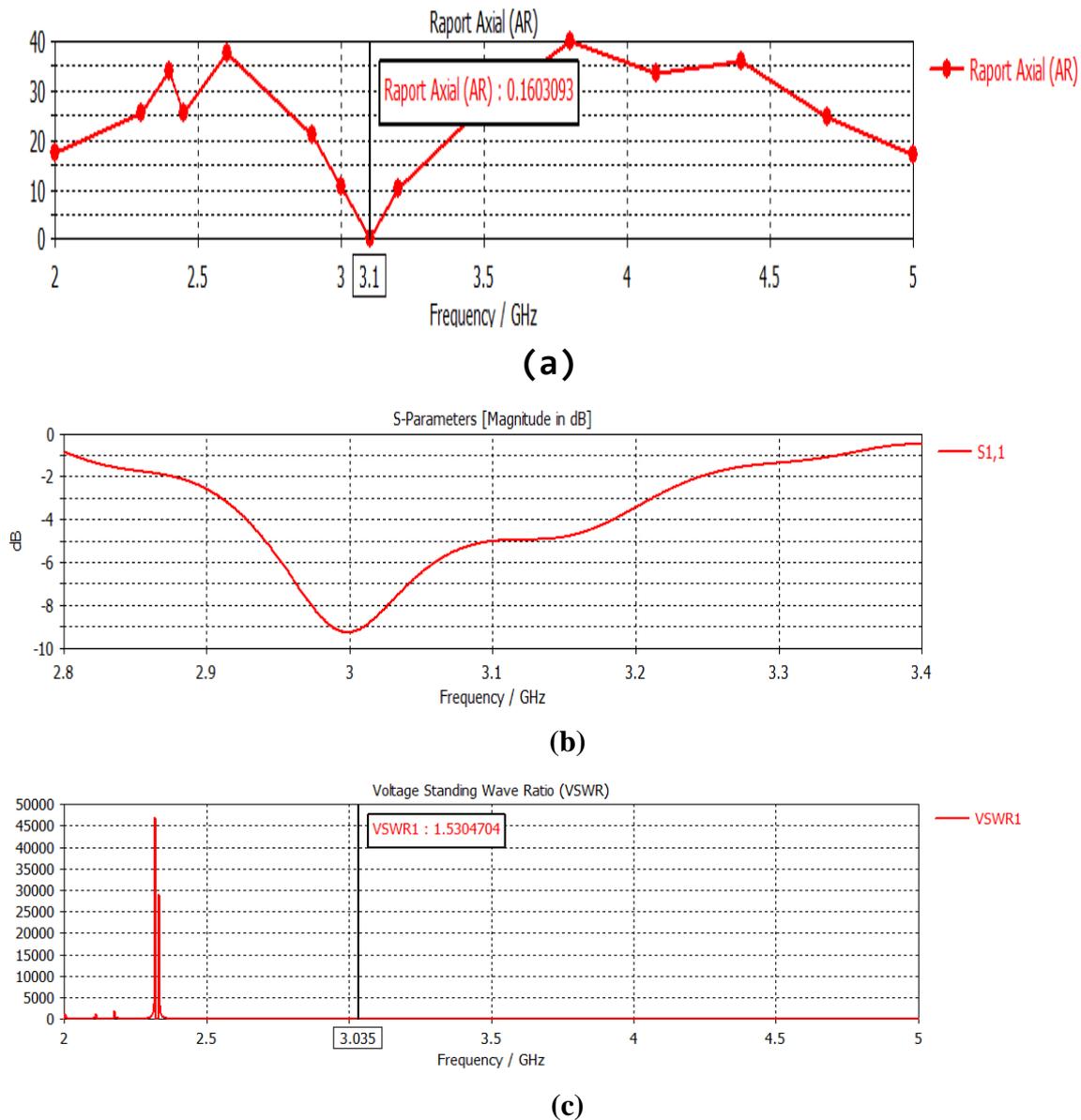


Figure II.17 Variation du rapport axial AR (a), du VSWR (b) et du coefficient de réflexion S11 (c) de l'antenne 2

La variation de rapport axial AR et de VSWR en fonction de déplacement de la position d'alimentation r/AC est illustrée sur la figure II.18.

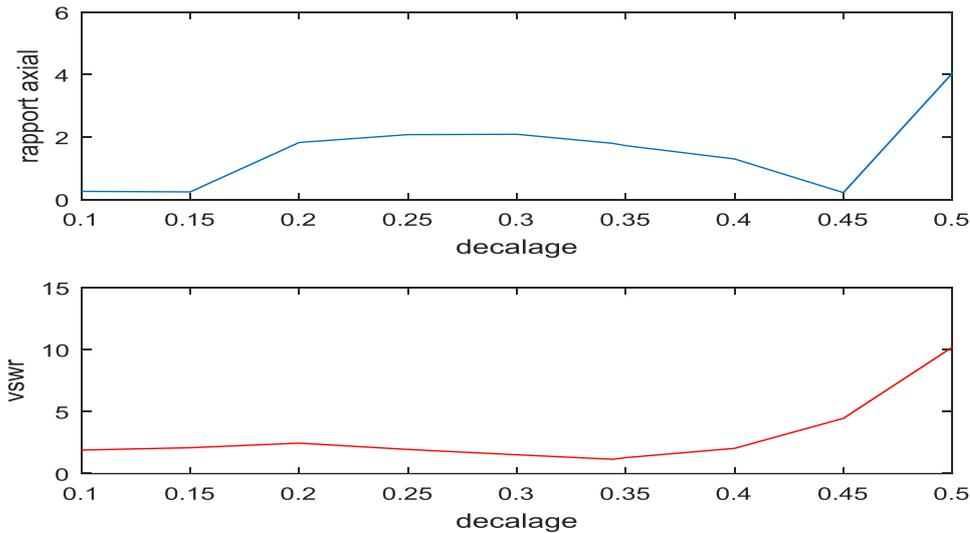


Figure II.18 Rapport axial et VSWR en fonction de r/AC sous MATLAB

II.5.2 Antenne patch carrée à coins tronqués

Considérons l'exemple étudié dans la figure (II.19) où la structure antennaire est composée d'un élément rayonnant tel que les caractéristiques antennes sont évaluées comme indiqué dans la section. Il a été constaté que pour les Dimensions choisies (2.739 cm X 2,739 cm) de la pièce carrée, et du polystyrène de 1/8 de pouce d'épaisseur (3,175 mm) et ($\epsilon_r = 2.52$) et $b/a = 0,04578$, avec b est la valeur de l'indice de réfraction de l'aire en cm et a est la longueur des côtés du patch carré. Par conséquent, une autre antenne pour les dimensions (2.86 cm X 2.86 cm) du polystyrène de 1/16 de pouce d'épaisseur (1,5875 mm) et ($\epsilon_r = 2.51$) et $b/a = 0.0573$. L'antenne génère une polarisation circulaire à 3.2 GHz avec une bande passante en TE < -10 dB). L'efficacité totale de rayonnement moyenne dans la bande d'adaptation de l'antenne est de 90%.

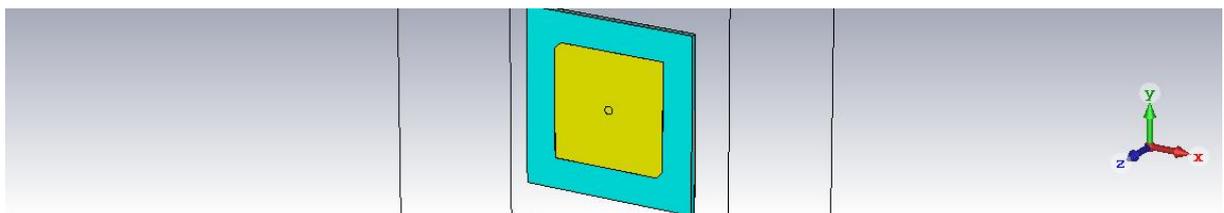
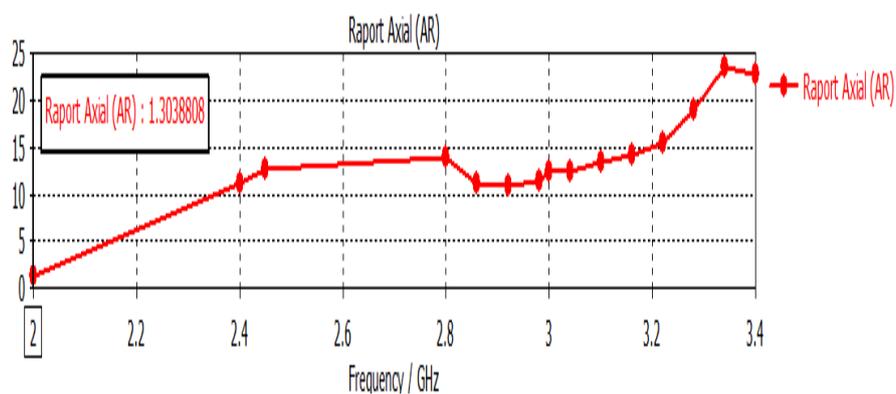


Figure II.19: Antenne avec les coins tronqués

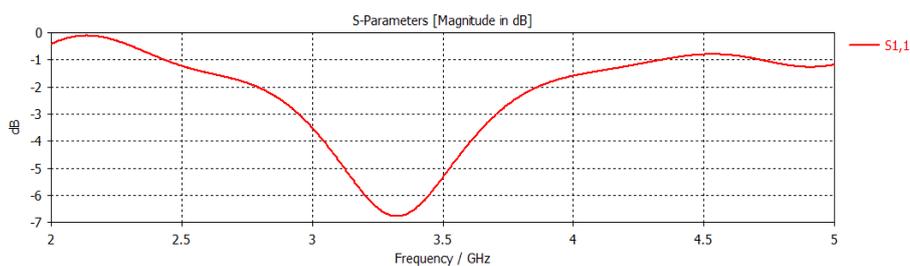
Pour l'emplacement du point d'alimentation les variations du rapport axial et du VSWR avec l'emplacement d'alimentation sur la ligne joignant les milieux de deux points côtés opposés, sont illustrés à la (Figure II.19). Le VSWR égale à 2,92 dB à 3,323 GHz. le rapport axial est de 1,30 dB.

Tableau II.2 : Paramètres des antennes 1 et 2 avec alimentation médianes

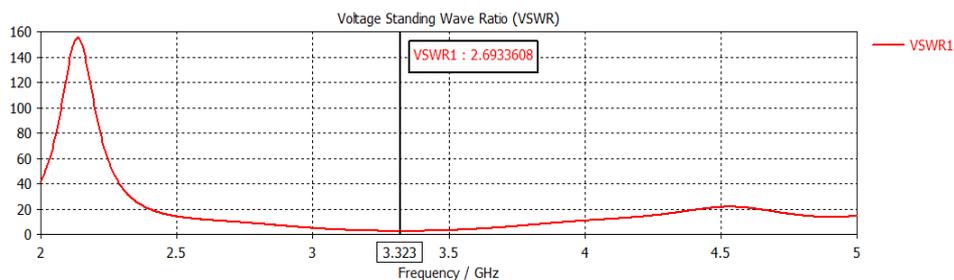
Paramètres	Antenne 1	Antenne 2
Épaisseur	1/8 pouce = 3.175mm	1/16 pouce = 1.587mm
Er	2.52	2.49
La largeur a	2.73 cm × 2.73 cm	2.86 cm × 2.86 cm
Le rapport (a/b)	1.112	1.061
Axial ratio (f = 3.1GHz)	1.30	1.91
VSWR (f = 3.1GHz)	2.92	2.65



(a)



(b)



(c)

Figure II.20 Variation du rapport axial AR (a), du VSWR (b) et du coefficient de réflexion S11 (c) de l'antenne 1 a la médiane

La variation de rapport axial AR et de VSWR en fonction de déplacement de la position d'alimentation r/AC est illustrée sur la figure II.21.

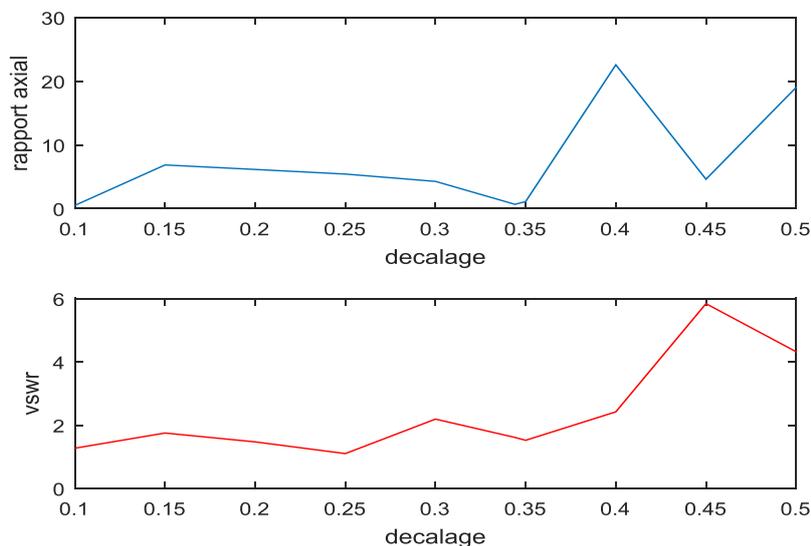
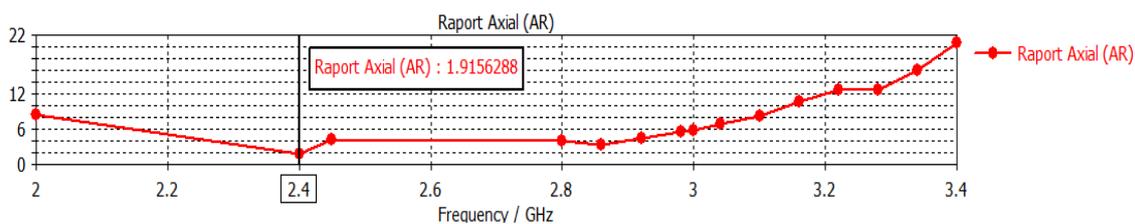
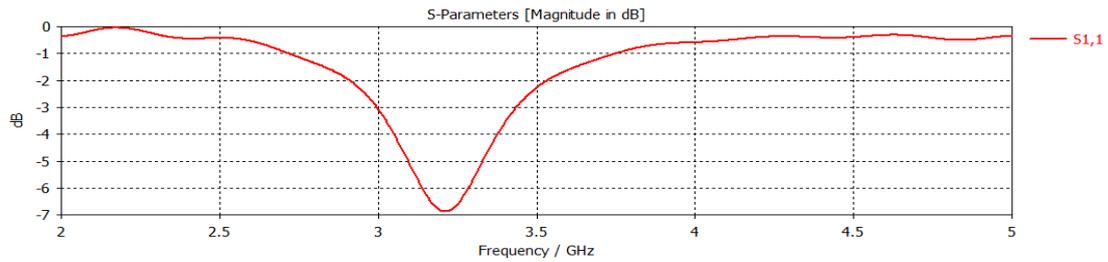


Figure II.21 Variation de rapport axial et VSWR en fonction de r/AC sous MATLAB.

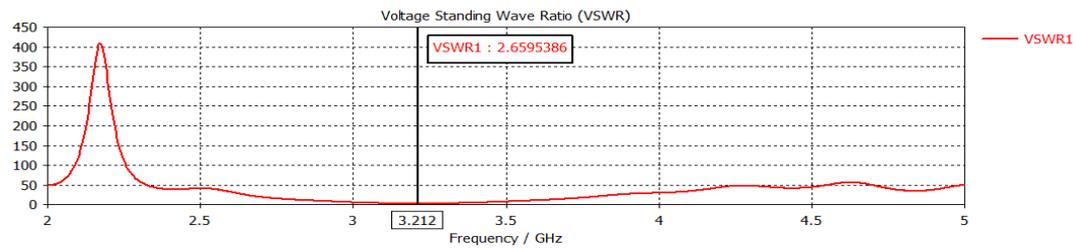
- Pour une autre antenne conçue sur un substrat d'épaisseur $1/16$ et ($Er= 2,51$), le VSWR minimum est de 2,65 à 3.212 GHz et le rapport axial égale à 1,91 dB. Les détails de ces deux antennes sont résumés dans le tableau II.2. Ces résultats sont résumés dans les figures suivantes :



(a)



(b)



(c)

Figure II.22 Variation du rapport axial AR (a et b), du VSWR (c) et du coefficient de réflexion S11 (d) de l'antenne 2 a la médiane

La variation de rapport axial AR et de VSWR en fonction de déplacement de la position d'alimentation r/AC est illustrée sur la figure II.23.

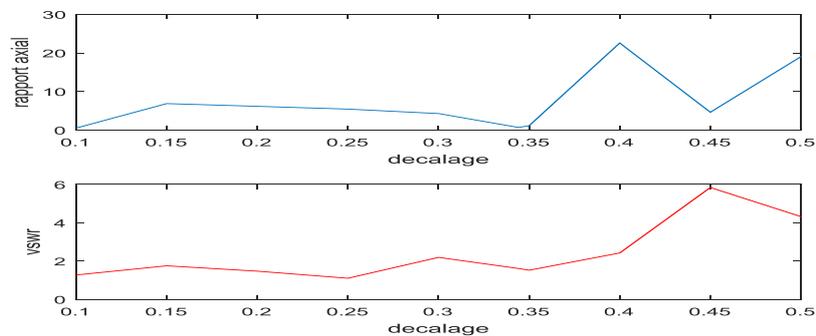


Figure II.23 Variation de rapport axial et VSWR en fonction de r/AC sous MATLAB

II.5.3 Antenne patch carrée avec fente

La troisième méthode de conception consiste à utiliser un patch carrée avec une fente sur la diagonale ce qui va permettre l'excitation des deux modes orthogonaux a fin d'obtenir une polarisation circulaire.

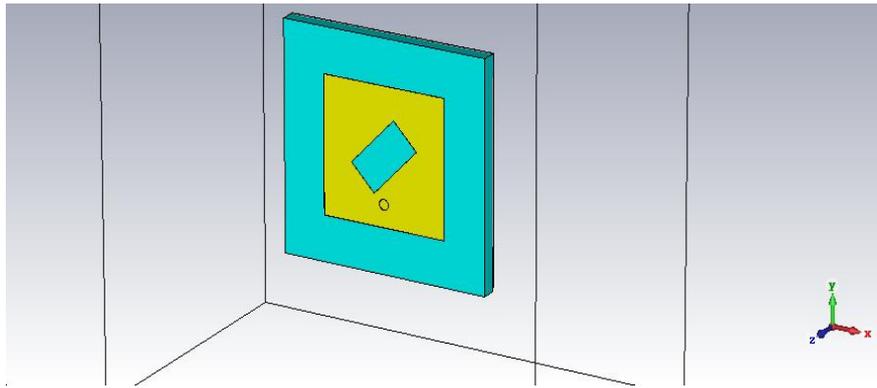
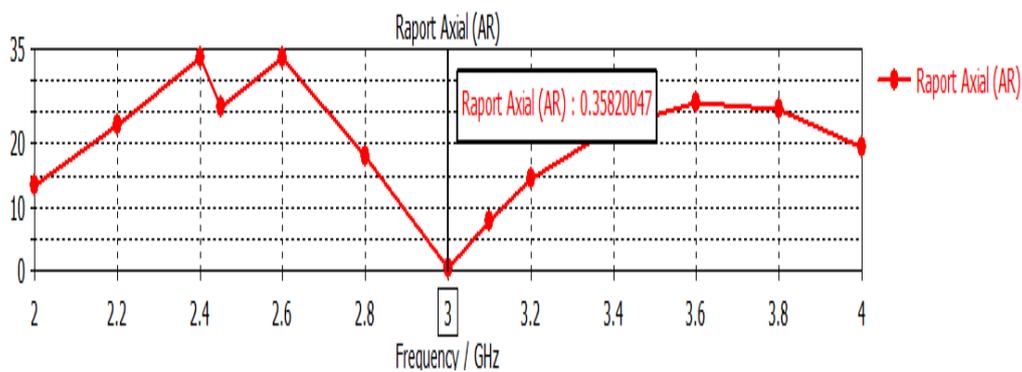
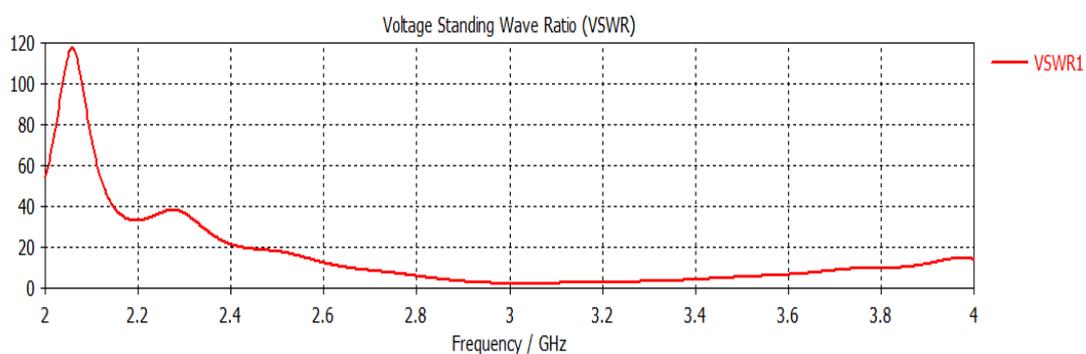


Figure II.24 : Antenne carrée avec une fente diagonale

L'antenne étudiée a un substrat d'électrique d'épaisseur 1/8 pouce et la permittivité $\epsilon_r = 4.4$. Les dimensions du patch Carré sont 2,602 cm X 2,602 cm, avec une fente de dimension 2,89 cm X 0,47 cm. Ceci donne un rapport axial de 1.3 dB à 3GHz. La variation du rapport axial et du VSWR avec l'emplacement d'alimentation est illustré sur la Figure II.25. Pour une position d'alimentations optimale, le VSWR est de 1.93 et le rapport axial AR est égal à 0.35 dB. Nous constatons que VSWR s'améliore avec une dégradation de rapport axial.



(a)



(b)

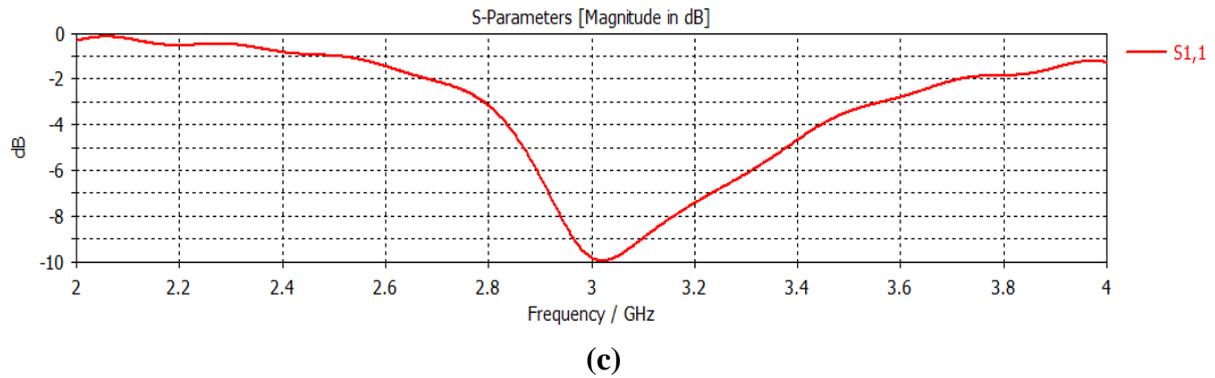


Figure II.25. Variation du rapport axial et du VSWR et le S11 de l'antenne avec fente

La variation de rapport axial AR et de VSWR en fonction de déplacement de la position d'alimentation r/AC est illustrée sur la figure II.26.

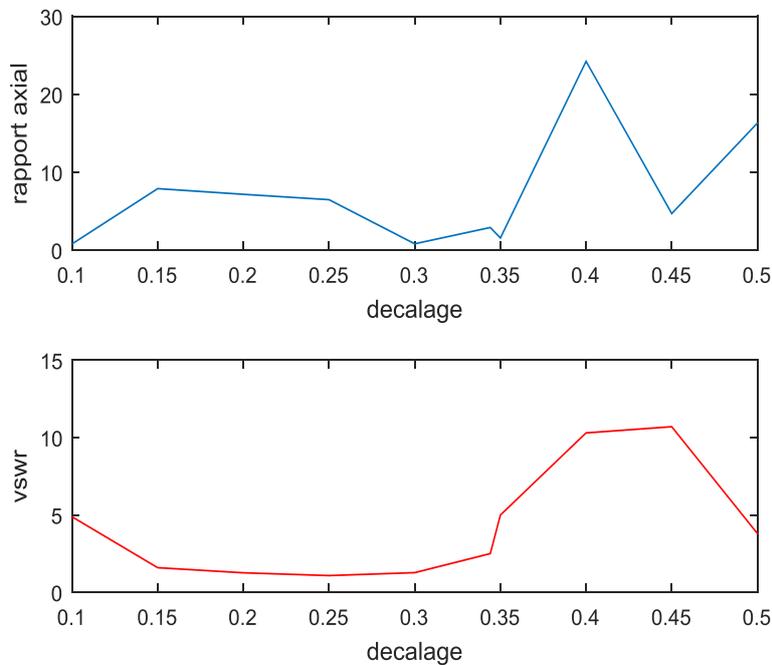


Figure II.26 Rapport axial et VSWR en fonction de r/AC sous MATLAB

Tableau II.3 : Paramètres de l'antenne 3 avec fente

Paramètres	Antenne 3 avec fente
Épaisseur	1/8 pouce = 3.175 mm
Er	2.52
La largeur a	2.602 cm × 2.602 cm
La largeur de la fente	2.89 cm × 0.47 cm
Axial ratio (dB)	0.35

VSWR (dB)	1.93
-----------	------

✚ Comparaison entre logiciel utilisé(CST) et l'article de 1983 :

Tableau II.4 : Comparaison entre le logiciel CST et la référence [35]

Antennes		Référence [35]			Logiciel CST		
		Rapport Axial (dB)	VSWR	Fréquence (GHz)	Rapport Axial (dB)	VSWR	Fréquence (GHz)
Méthode 1	Antenne 1(1/8 po)	0.45	1.73	3.101	0.65	1.53	3.1
	Antenne 2 (1/16 po)	0.17	1.33	3.175	0.163	1.18	3.1
Méthode 2	Antenne 1(1/8 po)	0.02	2.26	1.1753	1.30	2.92	3.323
	Antenne 2 (1/16 po)	0.12	1.80	1.1753	1.91	2.65	3.212
Méthode 3	Antenne 1 (1/8 po)	0.189	2.9	2.130	0.35	1.93	3

CHAPITRE III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre présente quelques résultats de simulation d'antennes polarisée circulairement fonctionnant dans la bande wifi. Il est bien connu que les appareils WiFi fonctionnent à des fréquences de fonctionnement de 2,4 GHz et 5 GHz. Il y a des appareils WiFi fonctionnant à 2,4 GHz, conformément à la norme IEEE 802.11b et les normes IEEE 802.11g, et il existe également des appareils WiFi qui fonctionnent à 5 GHz, conformément à la norme IEEE 802.11a. De plus, il y a aussi un développement d'appareils WiFi qui fonctionnent sur les deux fréquences, selon les normes établies, c'est-à-dire IEEE 802.11n. Les bandes de fréquences ouvertes pour les usages Wifi sont les bandes de fréquence mobiles 2.4GHz (2400-2483.5) MHz et 5GHz (5150-5875) MHz. Ces bandes de fréquences sont disponibles en émission et en diffusion point à point ou point à multi point. Nos antennes sont conçues pour une utilisation dans la bande Wifi. Elles sont simulées avec le simulateur CST (Computer Simulation Technology).

III.2. Résultats de simulation

III.2.1 Antenne patch presque carrée simple :

La figure III.1 explicite de près la structure de l'antenne patch simulée. La visualisation 3D permet de bien cerner les différents composants, à savoir, l'antenne patch, la ligne d'alimentation, le port d'excitation et le substrat diélectrique.

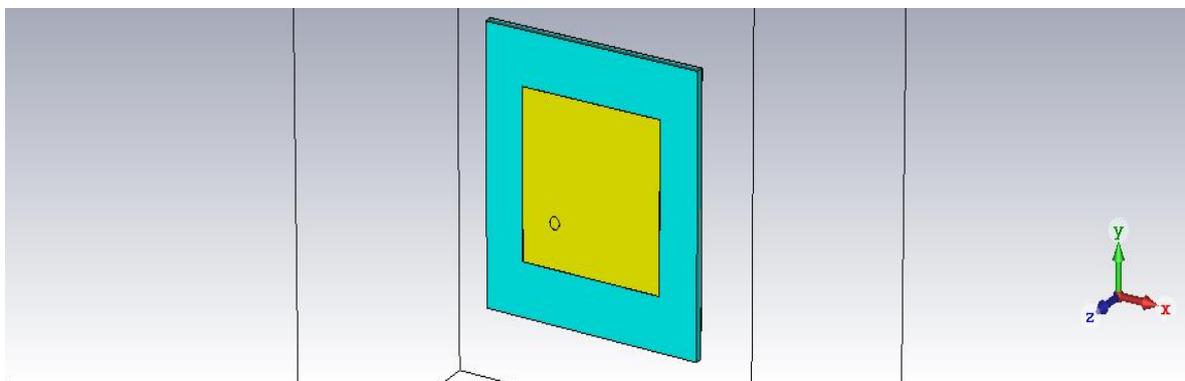
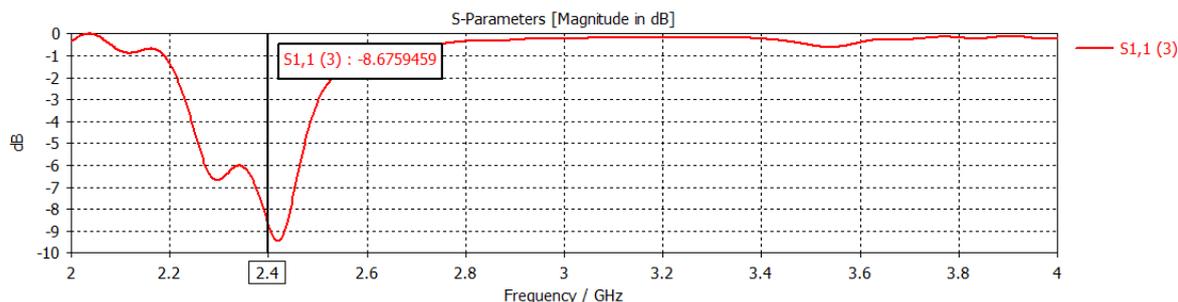
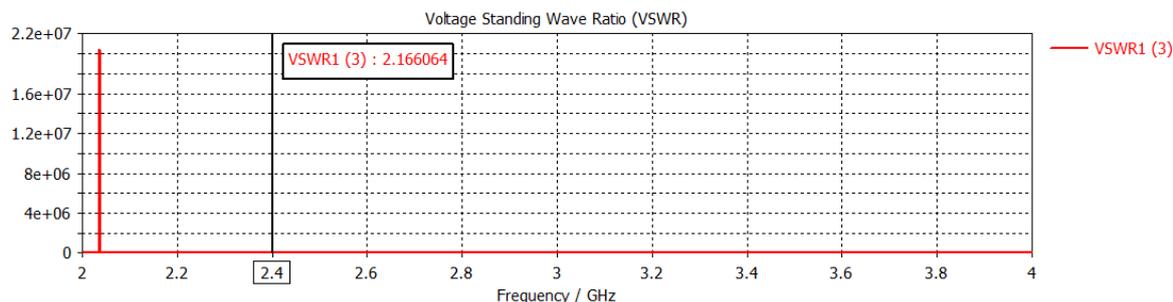


Figure III.1: Antenne patch simple, alimenté par câble coaxial

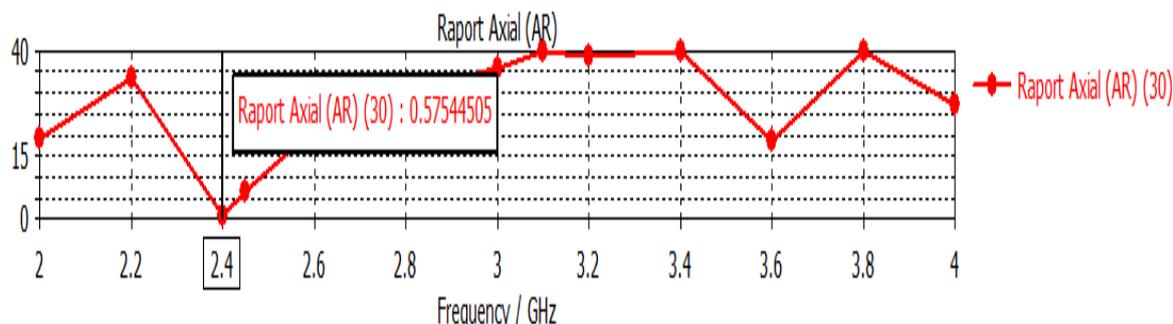
Les dimension de l'antenne sont : $a \times b = 28\text{mm} \times 26.6\text{mm}$, la dimension du plan de masse est $W_s \times L_s = 43.7\text{mm} \times 43.7\text{mm}$, l'épaisseur de substrat $h = 1.6\text{mm}$ son matériau est Rogers RO4003C, de constant diélectrique $\epsilon_r = 4.3$, les dimensions de substrat et le plan de masse est $W_s \times L_s = 43.7\text{mm} \times 43.7\text{mm}$. Les courbes de la figure III.2 montrent que la valeur de Rapport Axial est égale à 0.57dB, ce qui donne un coefficient de réflexion $S_{11} = -8.67\text{ dB}$ avec un décalage de la bande passante de 2.4GHz.



(a)



(b)



(c)

Figure III.2 Variation du Coefficient de réflexion S_{11} , VSWR et Rapport Axial AR En fonction de la fréquence

Les résultats de l'antenne patch sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Les paramètres caractéristiques de l'antenne

Caractéristiques	Antenne patch simple
Dimension du patch (mm)	26.6 X 28
S11 (dB)	-8.67
VSWR (dB)	2.16
AR(dB)	0.57

L'antenne patch simple a des résultats parfaits tels qu'un bon rapport axial avant-arrière. Cette antenne rayonne dans la direction de l'axe Z, et elle présente une bande passante étroite.

III.2.2. Antenne presque carrée a coins traquée :

La figure III. 3 présentes la structure d'une antenne patch carrée à coins tronquées.

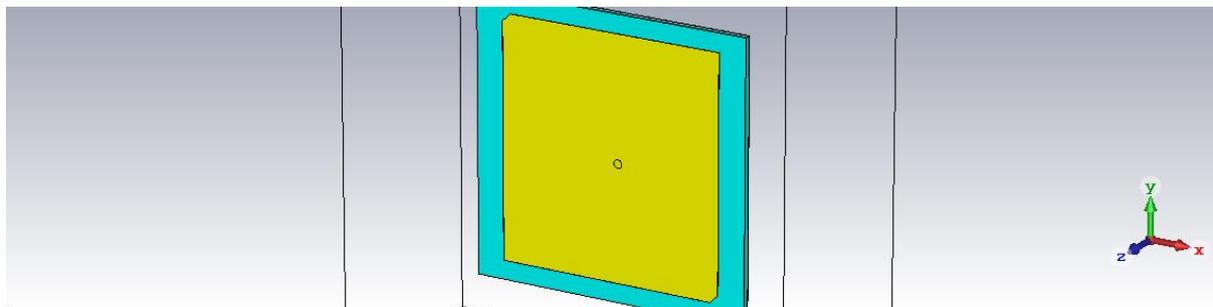
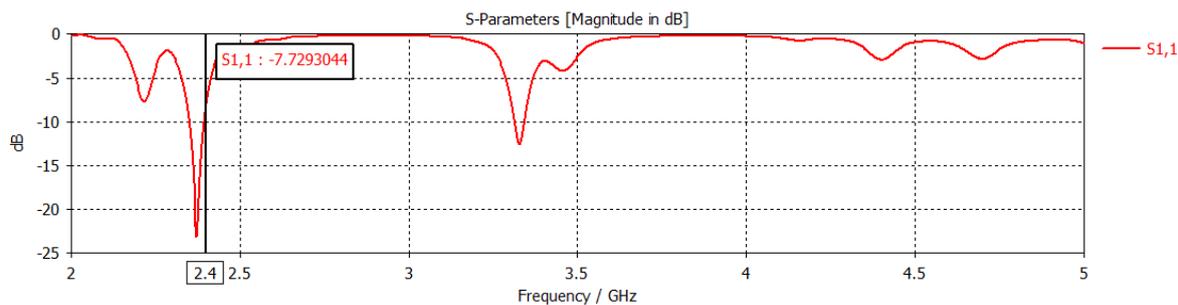
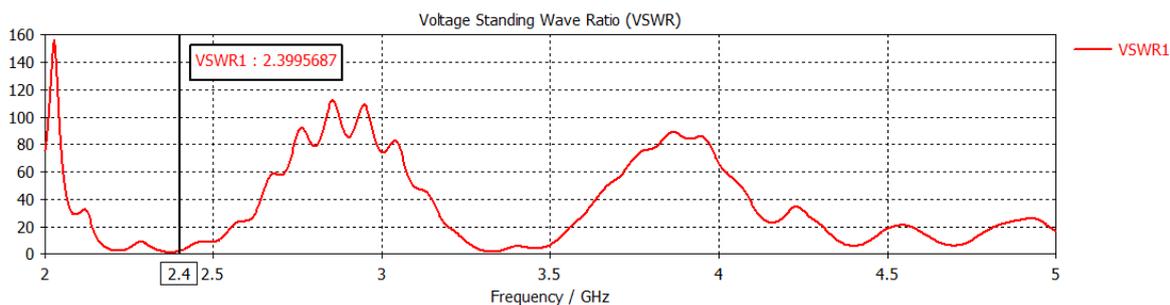


Figure III.3: Antenne patch à coins tronquée, alimentée par câble coaxial

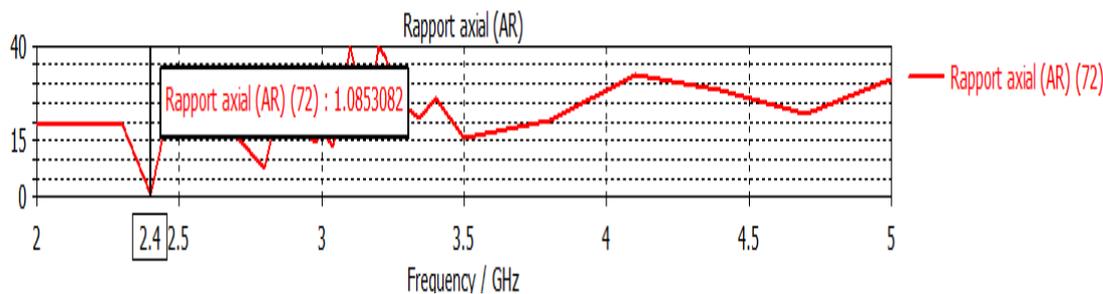
Les dimensions de l'antenne sont : $a \times b = 67\text{mm} \times 67\text{mm}$, le plan de masse est $W_s \times L_s = 54\text{mm} \times 56\text{mm}$, l'épaisseur de substrat $h = 1.6\text{mm}$, son matériau est Rogers RO4003C de constant diélectrique $\epsilon_r = 4.3$. Les courbes de la figure III.4 montrent les valeurs du coefficient de réflexion S11, du rapport d'ondes VSWR et du Rapport Axial AR.



(a)



(b)



(c)

Figure III.4 : Variation du Coefficient de réflexion S_{11} , VSWR et Rapport Axial AR En fonction de la fréquence

Les résultats de l'antenne à coins coupés sont résumés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Les paramètres caractéristiques de l'antenne

Caractéristiques	Antenne patch simple
Dimension du patch (mm)	54 X 56
S_{11} (dB)	-7.72
VSWR (dB)	2.39
AR(dB)	1.08

A partir du tableau III.2, nous constatons que les paramètres de cette antenne sont presque les mêmes considérablement par rapport à la première structure :

- On observe une augmentation importante au niveau de la bande passante,
- augmentation sur les dimensions de l'antenne.
- Un rendement relativement acceptable.
- L'inconvénient : augmentation du rapport axial AR.

III.2.3 Antenne carrée avec fente :

La figure III.5 ci-dessous explicite de près la structure de l'antenne patch simulée.

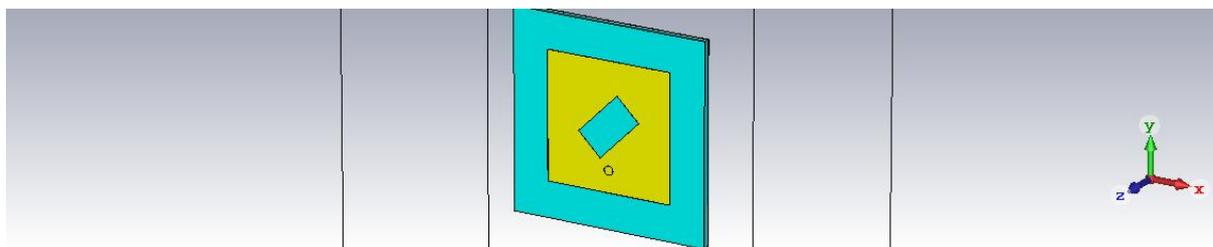
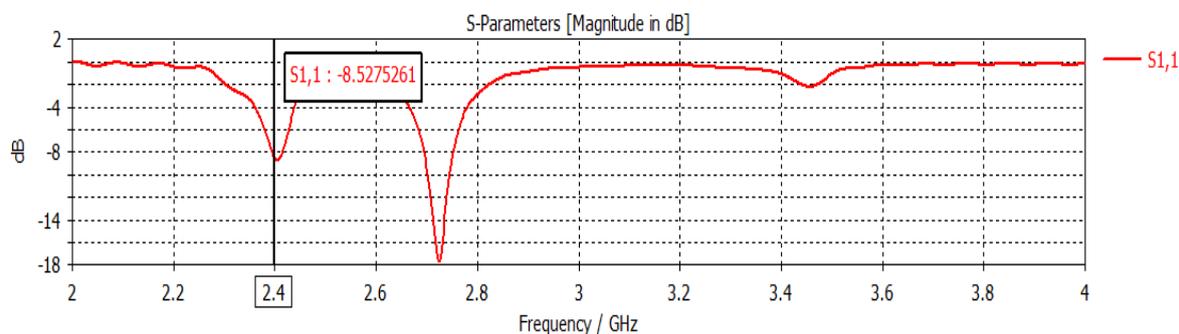


Figure III.5 Antenne carrée avec fente

Les courbes de la figure III.6 montrent un Rapport Axial est égale à 1.46 et un coefficient de réflexion $S_{11} = -8.52$ dB, avec un VSWR=2.19



(a)

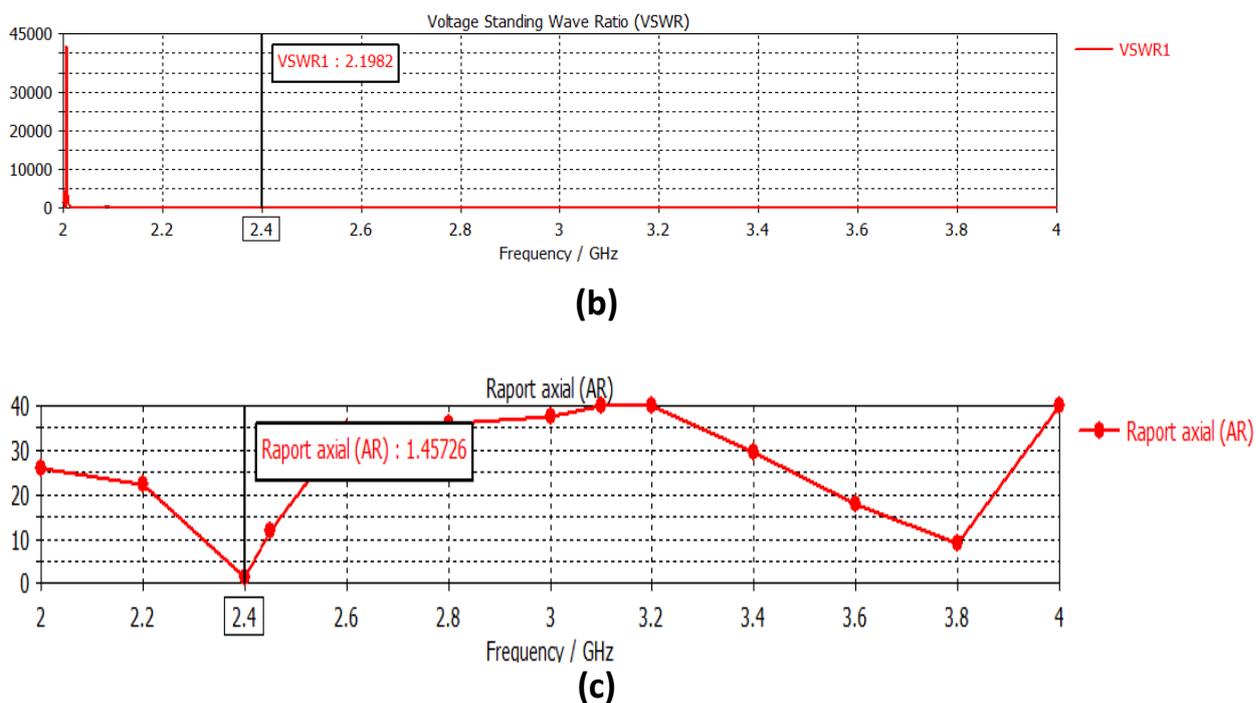


Figure III.6 : Variation du Coefficient de réflexion S11, VSWR et Rapport Axial AR En fonction de la fréquence

Les résultats de l’antenne patch avec fente sont résumés dans le tableau III.3 :

Caractéristiques	Antenne patch simple
Dimension du patch (mm)	42 X 42
S11 (dB)	-8.52
VSWR (dB)	2.19
AR (dB)	1.46

A partir du tableau III.3, nous remarquons :

- Un bon coefficient de réflexion
- Une augmentation de dimensions de l’antenne.
- Un rendement relativement acceptable.
- le rapport axial est égal à 1.46.

III.3 Comparaison entre les trois antennes :

Le tableau III.4 présente les résultats de simulations des trois structures d’antennes.

Tableau III.4 : Comparaison entre les trois antennes

Caractéristiques en Db	Antennes		
	Antenne 1	Antenne 2	Antenne 3
S11	- 8.67	-7.72	- 8.52
VSWR	2.16	2.39	2.19
Rapport Axial AR	0.57	1.08	1.46

Une comparaison a été faite sur les trois types d'antenne. Nous avons constaté que les performances de l'antenne 1 sont nettement meilleurs point de vu rapport axial AR.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Nous avons présenté un contexte général sur les antennes patchs. 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'applications. Les performances d'une antenne patch peuvent être contrôlées par ses paramètres constitutifs, tels que le type d'alimentation, la forme et les dimensions de l'élément rayonné (patch) et du plan de masse, ainsi que l'épaisseur et le type de substrat.

Au cours de ce projet de fin d'étude, nous nous sommes particulièrement intéressés au problème de polarisation circulaire CP. Les antennes patchs à polarisation circulaire sont largement utilisées dans les communications spatiales et radars vu leurs meilleurs caractéristiques par rapport à la polarisation linéaire. Trois types d'antennes patch micro strip polarisées circulairement à alimentation par câble coaxial (presque carrée à alimentation diagonale, carrée à coins tronqués et carrée avec une fente diagonale) ont été étudiés. L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne à polarisation circulaire dans la bande Wi-Fi pour éliminer les pertes de polarisation qui sont très importantes dans le cas de la polarisation linéaire.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et ouvrent des perspectives de développement et de conception de nouvelles antennes qui peuvent répondre aux nouvelles exigences de développement des systèmes de télécommunications.

Référence bibliographique

Références Bibliographiques

- [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. AtchayJahanath, 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 MicrostripAntenna 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 à 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,*” Fourthedition John Wiley& Sons, 2016.
- [13] IEEE-SA Standards Board, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*, Institute of Electrical and ElectronicsEngineers 2014.

Référence bibliographique

- [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*,” John 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 Cataluđa, 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] S. Pflaum. “*Étude et conception d’antennes miniatures et directives à polarisation circulaire pour lecteurs RFID UHF*”, *Thèse de doctorat*, Université Sophia Antipolis, Nice, 2013.
- [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.tragps.com/fr/index.php/information/articles-localisation-gps/67-antennes-gps>>.
- [28] D. M. Pozar, “*Microwave Engineering*,” JohnWiley& Sons, Inc, 2011.
- [29]<https://www.nrcan.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.

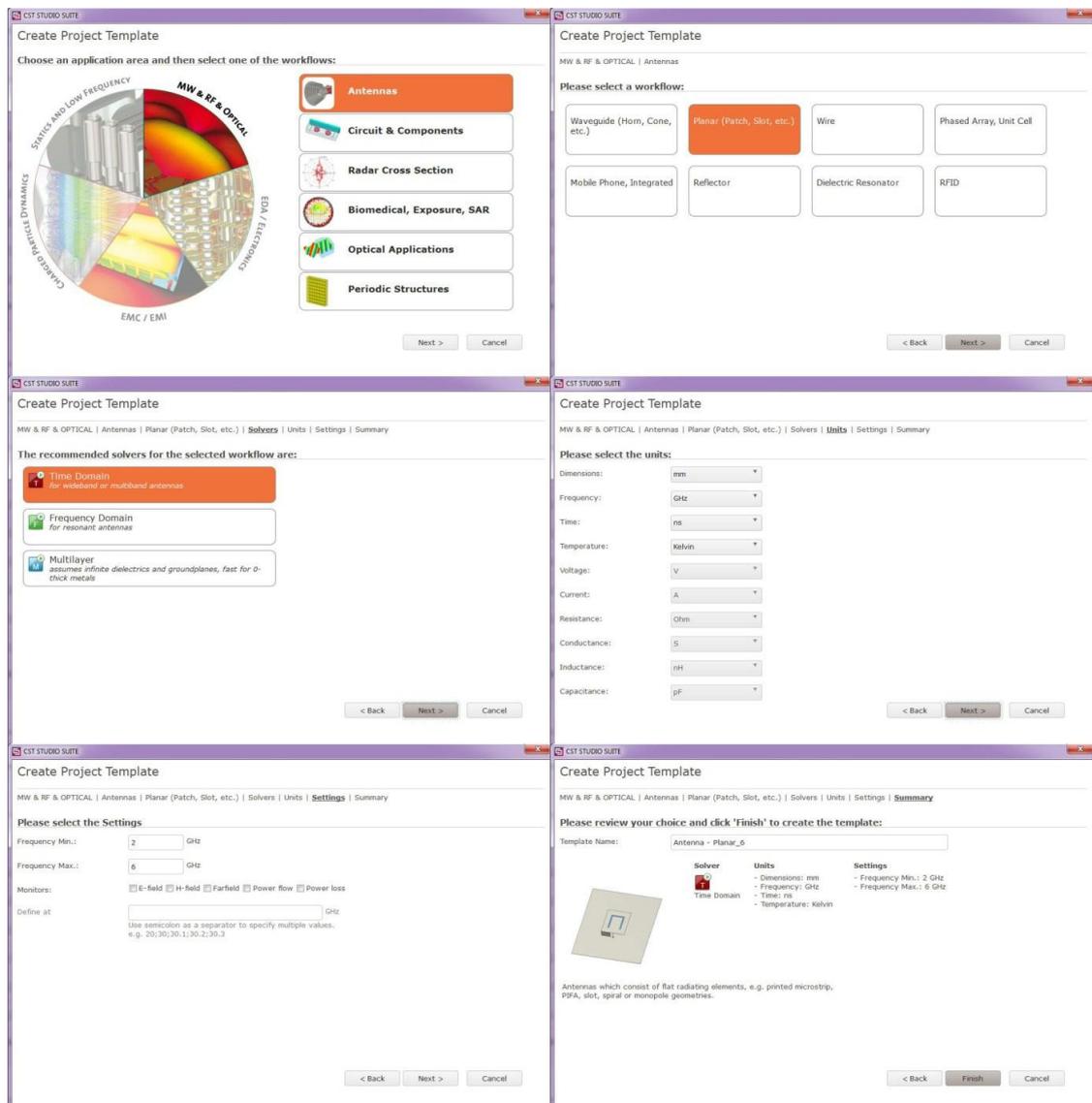
Référence bibliographique

- [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] Pozar, David M. Microwave Engineering: <https://goo.gl/dVQZWF>
- [34].Stutzman,WarrenL.and.Thiele,Gary.A.AntennaTheoryandDesign:<https://goo.gl/5Gi1xY>
- [35] IEEE.TRENSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. **AP-31**, NO. **6**, NOVEMBER **1983**.

Annexe

➤ 1-Démarrer le CST

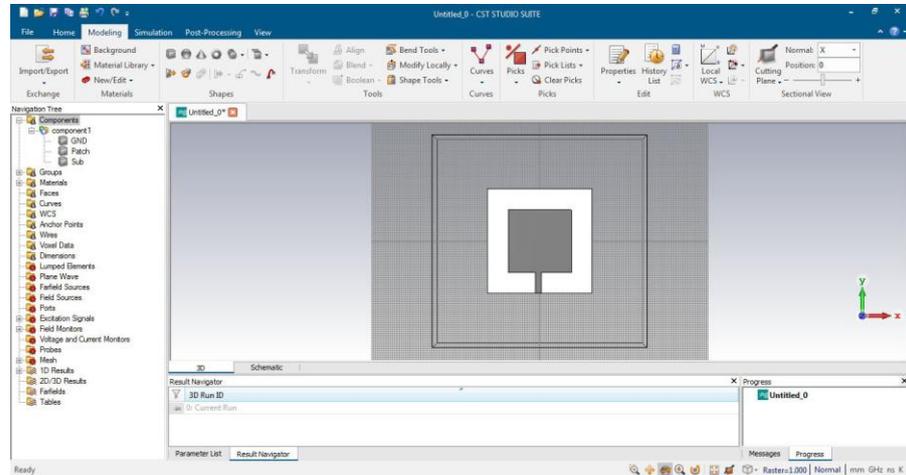
- exécuter la simulation CST.
- Sélectionnez " New projet".
- Ensuite, une fenêtre s'affiche, suivez les étapes de la **Figure suivante** :



➤ 2- Création 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 montrer dans la figure dessus :



Pour assurer une line d'alimentation adapté à 50 Ohm, sélectionnez Home > Marcos > Calculate > Calculate analytical Line Impedance. On donne l'épaisseur h, t, w et la permittivité ϵ_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(epsreff))*log((8*h/w)+(w/(4*h)))
end

```

➤ **3. Calcul des paramètres géométriques de l'antenne:**

Clear all

Close all

clc

h=1.6

er=4.3

c=(3)*((10)(8))**

fr=(1.575)*((10)(9))**

import math

w=(c/(2*fr*((er+1)/2)(0.5)))*(1000)**

ereff=((er+1)/2)+((er-1)/2)*(1+12*h/w)(-0.5)**

eff=c/(2*fr*((ereff)(0.5)))**

F1 = (ereff + 0.3)*(w/h + 0.264)

F2 = (ereff - 0.258)*(w/h + 0.8)

dl = h*0.412*(F1 / F2)

l=(eff*1000)-(2*dl)

print("valeur première de w =",w,'mm')

print("valeur première de l =",l,'mm')

for i in range (0,4) :

ereff=((er+1)/2)+((er-1)/2)*(1+(12*h)/l)(-0.5)**

eff=c/(2*fr*((ereff)(0.5)))**

F1 = (ereff + 0.3)*(w/h + 0.264)

F2 = (ereff - 0.258)*(w/h + 0.8)

dl = (h*0.412)*(F1 / F2)

l=((eff*1000)-(2*dl))-1.69

print("patch dimension =",l,'mm')

lg=6*h+l

print('ground dimension =',lg,'mm')