

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : **Électronique**

Spécialité : **Systèmes des télécommunications**

Présenté par :

DJELITA Cyrine Haïfa

&

GHEZLI Rania

THEME :

Etude et conception d'une antenne patch à fente à l'aide de la technologie SIW

Proposé par : **DR .BENDOUMIA Rédha**

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENTS

Nous remercions **Dieu** de nous avoir accordé de connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Au terme de ce modeste travail nous tenons à remercier chaleureusement et respectivement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nous voulons également exprimer notre profonde gratitude pour notre Encadrant MR **Redha BENDOUMIA** qui nous a confié tout au long de ce projet et qui a veillé à son bon déroulement avec beaucoup d'intérêt et écoutes et nous a apporté beaucoup de connaissances dans ce vaste domaine des« Antennes ».

Tout notre respect et nos remerciements vont vers les membres de jury qui vont pleinement consacrer leurs temps et leurs attention afin d'évaluer notre travail, qui espérons le sera à la hauteur de leur attente.

Enfin, nos remerciements les plus sincères sont adressés à tous les professeurs, l'administration et le personnel qui ont contribué à forger nos connaissances et à assister nos formations

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail à mes très chers parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, pour leur soutiens et leur encouragements durant tout mon parcours.

À ma chère sœur oumaïma. Et mes frères et à tous mes amis

Cyrine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Aux défunts ma grand- mère paternelle (Yaya) mon grand-père
maternel et mon oncle paternel (Dada)

À mes chers parents qui m'ont soutenu durant toutes ces
années d'études et qui ont été toujours présent pour me
pousser vers l'avant et à être toujours forte

À la chouchou de la famille « LILI »

À toute ma famille paternelle et maternelle en particulier
« mamí touma »

À mes amis

RANIA

ملخص:

أدى التقدم التكنولوجي في أنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية إلى إنشاء وابتكار العديد من التقنيات. هذه التطورات هي من بين التقنيات التي غيرت بعمق طريقة حياتنا خلال القرن

في الوقت الحاضر، يتمثل الهدف الأساسي لباحثي الاتصالات في زيادة أداء العناصر التي يتكون منها نام الاتصالات

إلى أقصى حد مع تقليل تكاليف الإنتاج وتقليل الحجم لذلك يعد هذا تحديا حيث تستجيب تقنية SIW

لذلك قمنا بدراسة وتحسين نتائج تصميم هوائي التصحيح المشقوق باستخدام تقنية SIW بدأنا بهوائي تصحيح

كلاسيكي ثم أجرينا تحسينات بإضافة فتحات وفتحة

كلمات المفاتيح:

SIW, فتحة، فتحات، بهوائي تصحيح

Résumé :

Le progrès technologique dans les systèmes de télécommunications ont entraîné la création et l'innovation de nombreuses technologies. Ces avancés font partie des technologies qui ont profondément transformé notre mode de vie au cours de XXe siècle.

De nos jours, l'objectif primordial des chercheurs en télécommunication est de maximiser les performances des éléments qui composent un système de communication tout en réduisant les couts de production et minimisant la taille alors c'est un défi ou la technologie SIW répond.

Alors nous avons étudié et optimise les résultats de conception d'une antenne patch a fente à l'aide de la technologie SIW. nous avons commencé par une antenne patch classique puis nous avons effectué des améliorations avec l'ajout des vias et une fente.

Mots clés : SIW, antenne patch, vias, fente

Abstract :

Technological Progress in telecommunications systems has led to the creation and innovation of many technologies. These advances are among the technologies that have profoundly transformed our way of life during the twentieth century.

Nowadays, the primary objective of telecommunications researchers is to maximize the performance of the elements that make up a communication system while reducing production costs and minimizing size, so this is a challenge where SIW technology responds.

So we studied and optimized the design results of a slotted patch antenna using SIW technology. We started with a classic patch antenna and then made improvements with the addition of vias and a slot

Keywords : SIW , slot, patch antenna, vias

Listes des acronymes et abréviations

- OEM : Onde électromagnétique.
- E : Champs électrique.
- H : Champs magnétique.
- DB : Décibel.
- G : Gain.
- D : Directivité.
- I : Intensité.
- FA : Facteur d'antenne.
- HF : Haute fréquence.
- Ve : Tension.
- Ie : Courant.
- Zin : Impédance d'entrée.
- R : Résistance de l'antenne.
- X : Réactance de l'antenne.
- j : Etant le nombre imaginaire $\sqrt{-1}$.
- Γ : Coefficient de réflexion.
- Zc : Impédance caractéristique.
- SMA : SubMiniature version A.
- Bw : Largeur de bande.
- Fmax : Fréquence maximale.
- Fmin : Fréquence minimale.
- Fc : Fréquence centrale.
- Ω : Ohms.
- λ : Longueur d'onde.
- $Tan\delta$: Tangente des pertes.
- ϵ : Permittivité diélectrique.

- μ : Perméabilité magnétique.
- ω : Pulsation de l'onde.
- ϵ_r : Permittivité relative de diélectrique.
- L : longueur du patch.
- W : largeur de patch.
- C : Vitesse de la lumière.
- f_r : Fréquence de rayonnement.
- ϵ_r : Constante diélectrique du substrat.
- ϵ_e : Constante diélectrique effective.
- H : Hauteur du patch.
- SIW : Substrate integrated waveguide.
- \overrightarrow{rot} : Operateur Rationnel.
- Div : Opérateur de divergence.
- ρ : Densité volumique de charge électrique.
- k : Constante de propagation.
- \vec{E} : Vecteur d'intensité du champ électrique.
- \vec{B} : Vecteur d'intensité du champ magnétique.
- \vec{H} : Vecteur d'intensité du champ magnétique
- μ : Perméabilité magnétique.
- μ_r : Perméabilité relative.
- λ_c : Longueur d'onde correspond à la fréquence de coupure.
- λ_g : La longueur d'onde du guide.
- TE : Transverse électrique.
- TM : Transverse magnétique.
- TEM : Transverse électromagnétique.
- N_c : Indice de réfraction.

- d : Diamètre d'un via.
- P : Espacement entre deux vias du centre au centre (patch).
- a_s, a_{SIW} : la largeur entre deux rangées de vias du centre au centre.
- a_{RGW} : largeur du guide d'onde rectangulaire équivalente.
- HFSS. : High Frequency Structure Simulator.
- GHz : Giga Hertz.
- a_r : longueur de port.
- L_s : longueur slot.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les antennes	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de l'antenne.....	4
I.3 Rôle d'une antenne.....	5
I.4 Caractéristiques d'une antenne.....	6
I.4.1 Diagramme de rayonnement.....	6
I.4.2 Directivité.....	8
I.4.3 Gain d'une antenne	8
I.4.4 Facteur d'antenne.....	8
I.4.5 Polarisation d'une onde.....	9
I.4.6 Impédance d'entrée.....	10
I.4.7 Coefficient de réflexion	11
I.4.8 Bande passante.....	11
I.5 Types d'antennes.....	11
I.5.1 Antenne filaires.....	11
I.5.1.1 Antenne dipôle.....	11
I.5.1.2 Boucle magnétique.....	12
I.5.1.3 Antenne yagi.....	12
I.5.2 Antenne à ouverture.....	13
I.5.2.1 Antenne à fente.....	13
I.5.2.2 Antenne cornet.....	13
I.5.3 Antenne parabolique.....	13
I.5.4 Antenne imprimé.....	14
I.6 Description d'une antenne patch	14
I.6.1 Plan de masse	15
I.6.2 Substrat.....	15

I.6.3 Élément rayonnants.....	16
I.7 Paramètres Géométriques de l'antenne« Patch ».....	17
I.7.1 Largeur du patch.....	17
I.7.2 Longueur du patch.....	17
I.8 Applications des antennes imprimées	18
I.9 Technique d'alimentation	18
I.9.1 Alimentation avec contact	18
I.9.1.1 Sonde coaxiale.....	18
I.9.1.2 Ligne microbande.....	19
I.9.2 Alimentation sans contact (par proximité).....	20
I.9.2.1 Ligne microbande en sandwich.....	20
I.9.2.2 Guide d'ondes coplanaire.....	20
I.9.2.3 Couplage par fente.....	21
I.10 Avantages et inconvénients.....	23
I.11 conclusion.....	23
Chapitre II : Technologie SIW	
II.1 introduction.....	25
II.2 Définition d'une guide d'onde.....	25
II.2.1 Guide d'ondes diélectrique	25
II.2.2 Guide d'ondes métalliques.....	25
II.3 Types de guide d'ondes.....	25
II.3.1 Guide d'onde planaire.....	26
II.3.2 Guide d'ondes circulaire.....	26
II.3.3 Guide d'ondes rectangulaire.....	26
II.3.4 Fibre optique.....	27
II.3.5 Guide d'ondes diffuse.....	27
II.4 Équation de propagation	28
II.4.1 Équation de maxwell.....	28
II.5 Modes de propagation	29
II.6 Caractéristiques de guide d' onde.....	30
II.6.1 Fréquence de coupure.....	30
II.6.2 Longueur d'onde.....	30

II.6.3 Atténuation.....	31
II.6.4 Impédance d'onde	31
II.7 Technologie planaire	31
II.7.1 Guide d'ondes coplanaire	31
II.7.2 Ligne tri-plaqué.....	32
II.7.3 Ligne micro-ruban.....	32
II.7.3.1 Caractéristiques des lignes micro-rubans.....	33
II.7.3.2 Avantages et les inconvénients des lignes micro-rubans.....	33
II.8 Technologie des guides d'ondes intégrée au substrat.....	34
II.8.1 Définition de technologie SIW.....	34
II.8.2 Modes de propagation dans un guide d'onde SIW.....	35
II.8.3 Règles de conception d'une structure SIW.....	36
II.8.4 La géométrie d'une structure SIW.....	37
II.8.5 Dimensionnement d'une structure SIW.....	38
II.8.6 Conception d'une antenne patch SIW.....	39
II.8.7 Conception de la structure patch.....	40
II.8.8 Intégration dans le guide d'ondes SIW.....	40
II.8.9 Antenne patch SIW à fente	40
II.9 Intégration dans le guide d'ondes SIW.....	41
II.9.1 Alimentation.....	41
II.9.2 Adaptation.....	41
II.9.2.1 L'adaptation de guide SIW à la ligne micro-ruban.....	41
II.9.2.2 Adaptation de l'antenne à la fréquence de resonance.....	42
II.9.3 Avantages	42
II.10 Conclusion.....	43
 Chapitre III : Conception, résultats et interprétation	
III.1 introduction.....	44
III.2 Logiciel de simulation de champ électromagnétique HFSS.....	44
III.3 Interface principale du HFSS.....	45
III.4 Simulation d'un Guide d'ondes SIW.....	46
III.5 Dimensions de la ligne micro-ruban et de la transition micro-ruban.....	48

III.6 Antenne patch	49
III.6.1 Dimensionnement.....	50
III.6.2 Résultats.....	52
III.7 Antenne patch SIW.....	54
III.7.1 Dimensionnement	54
III.7.2 Resultats.....	55
III.8 Antenne PATCH SIW à fente.....	58
III.8.1 Dimensionnement.....	58
III.8.2 Resultats.....	59
III.9 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Référence	

Listes de figures :

Chapitre I : Généralités sur les antennes

Figure I.1 : une antenne.....	4
Figure I.2 : schéma bloc d'antenne.....	5
Figure I.3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en Db.....	6
Figure I.4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB.....	6
Figure I.5 : Exemple de diagramme de rayonnement 3D.....	7
Figure I.6 : Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires	7
Figure I.7 : schéma d'antenne émettrice.....	10
Figure I.8 schéma représentant un dipôle	12
Figure I.9 : Boucle magnétique.....	12
Figure I.10 : Structure de l'antenne Yagi.....	13
Figure I.11 :Antenne à fentes.....	13
Figure I.12 :Antenne cornet.....	13
Figure I.13 : Schéma illustrant l'antenne parabolique.....	14
Figure I.14 :Géométrie d'une antenne imprimée.....	15
Figure I.15 : différentes formes d' élément rayonnants.....	16
Figure I.16 : :Alimentation du patch par un câble coaxial.	19
Figure I.17:Alimentation du patch par une ligne microbande.....	19
Figure I.18:L'alimentation par une ligne microbande axiale(a), décalée (b) et avec encoche(c).....	19
Figure I.19:Ligne microbande en sandwich.....	20
Figure I.20:Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire	20
Figure I.21:Alimentation du patch par fente.....	21
Chapitre II : Technologie SIW	
Figure II.1 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire	26
Figure II.2 : représentation graphique guide d'onde circulaire.....	26
Figure II.3 : représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire.....	27
Figure II.4 : Représentation graphique d'une fibre optique.....	27
Figure II.5 : Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé.....	28
Figure II.6 : Structure d'une ligne coplanaire.....	32
Figure II.7 : Structure d'une ligne tri-plaque.....	32
Figure II.8 : structure d'une ligne micro-ruban	33
Figure II.9 : guide d'onde intègre au substrat	35

Figure II.10 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	36
Figure II.11 : géométrie d'une structure SIW.....	38
Chapitre III : Conception, résultats et interprétation	
Figure III.1 : Fenêtre principal de logiciel HFSS.....	46
Figure III.2 : Arbre de gestion d'une structure sous HFSS.....	46
Figure III.3 : Guide d'ondes en SIW sous HFSS.....	47
Figure III.4 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.....	48
Figure III.5 : Résultats de simulation du guide SIW.....	48
Figure III.6 : Dimensions de la ligne micro-ruban.....	49
Figure III.7 : Dimensions de la ligne et la transition micro-ruban.....	50
Figure III.8 : Présentation de l'antenne patch sur le substrat avec HFSS.....	50
Figure III.9 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW.....	51
Figure III.10 : Résultats du coefficient de réflexion d'antenne patch 2.4 GHz avec HFSS.....	52
Figure III.11 : Effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d'antenne patch.....	53
Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch.....	53
Figure III.13 : Présentation de l'antenne patch SIW sur le substrat avec HFSS.....	54
Figure III.14 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW.....	54
Figure III.15 : Coefficient de réflexion d'antenne patch SIW 2.4 GHz avec HFSS.....	56
Figure III.16 : Effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d'antenne patch.....	56
Figure III.17: Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW.....	57
Figure III.18 : Présentation de l'antenne patch SIW à fente sur le substrat avec HFSS.....	58
Figure III.19: Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW à fente.....	58
Figure III.20 : Résultats du coefficient de réflexion d'antenne patch SIW à fente 2.4 GHz avec HFSS.....	59
Figure III.21 : Effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d'antenne patch SIW à fente.....	60
Figure III.22 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW à fente.....	61
Figure III.23 : Résultats du coefficient de réflexion des 3 antennes 2.4 GHz avec HFSS.....	61

Liste de tableaux

Liste de tableaux :

Chapitre I : Généralités sur les antennes

Tableau I-1 : Comparaison entre les méthodes d'alimentation22

Tableau I-2 : avantages et inconvénients.....34

Chapitre III : Conception, résultats et interprétation

Tableau III.1: Paramètres de structure du guide d'onde SIW.....47

Tableau III.2: Paramètres de l'antenne patch.....51

Tableau III.3: Résultats du coefficient de réflexion de l'antenne patch52

Tableau III.4: Résultats du coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW.....56

Tableau III.5 : Résultats du coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW à fente.....60

Introduction générale

L'étude des outils et techniques de télécommunication évolue sans cesse suite à la forte demande des utilisateurs dans différents secteurs et ceci afin de leur faciliter la vie, en transmettant l'information en temps réel c'est à dire avec une grande facilité et rapidité. C'est l'un des domaines les plus dynamiques, cherchant à transmettre l'information le plus rapidement et précisément possible.

Le développement des systèmes de télécommunication se réalise grâce à des améliorations des interventions sur des outils tel que l'antenne qui représente un élément indispensable dans un système radioélectrique, c'est un transformateur d'énergie électrique en une énergie rayonnante. Ce dernier nécessite une étude théorique détaillée et précise, avec la constitution de nouveaux systèmes performants en réduisant les couts de fabrications et en éliminant les pertes de rayonnement et de transmission donc on parle de l'innovation de la technologie SIW.

La technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) est une approche novatrice qui tire parti des avantages des guides d'ondes traditionnels et des circuits planaires. Son principe consiste à intégrer des guides d'ondes dans un substrat diélectrique, en remplaçant les parois latérales métalliques par deux rangées de vias métalliques .cela permet de combiner les faibles pertes et les hauts facteurs de qualité des guides d'ondes volumiques avec les facilités d'intégration , le faible cout et le faible poids des technologies planaires (miniaturisation).

Le présent travail porte sur l'étude d'une antenne patch avec amélioration (technologie siw et fente) et comporte 3 parties, chacune représente un chapitre dédié à un élément clé de l'étude selon le plan suivant :

- Le premier chapitre abordera les concepts généraux sur les antennes fournit une introduction de base sur les antennes en général, ses caractéristiques et ses types. on mettant un accent particulier sur les antennes planaires (géométrie, applications et techniques d'alimentation)

- Le deuxième chapitre traitera des fondamentaux des guides d'ondes, en décrivant le fonctionnement de guide d'onde classique avant d'explorer des guides d'onde SIW, en expliquant la théorie de conception d'une structure SIW de manière générale et se penchant spécifiquement sur l'antenne patch SIW à fente .
- Le troisième chapitre présente la partie expérimentale ou nous nous sommes basées sur l'utilisation du logiciel de simulation HFSS (high frequency structure simulator) pour la conception d'une antenne patch siw à fente, puis examiner et interpréter les résultats obtenus

Chapitre I

Généralités sur les antennes

I.1 Introduction

Dans un système de radiocommunication, l'antenne est un composant à part entière qui nécessite une étude particulière. Tout en cherchant à optimiser les performances radioélectriques des antennes, ces dernières sont devenues les éléments de base pour une liaison radioélectrique. Les technologies modernes s'orientent vers la miniaturisation de ces antennes tout en essayant de garder les meilleures performances.

Dans ce chapitre nous avons défini l'antenne en citant leurs caractéristiques. Ensuite, nous citons quelques sortes d'antennes. Enfin, nous avons concentré notre étude l'antenne patch et leur techniques d'alimentations

I.2 Définition de l'antenne

Une antenne est en fait un morceau de métal, ou un diélectrique ; avec un langage plus approprié à l'électronique nous dirons que c'est un dispositif métallique qui est utilisé pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques. En d'autres termes, il s'agit d'une structure de transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage. Le dispositif de guidage peut être une ligne de transmission ou un guide d'ondes. Il est utilisé pour transmettre l'énergie d'une source à l'antenne ou de l'antenne à un récepteur. En simplifiant nous disons qu'un conducteur électrique à travers lequel un courant circule, fournit de l'énergie sous forme de chaleur, de lumière (lampe). De même, il fournit un champ magnétique (principe transformateur) et électrique (principe condensateur) [1].



Figure I.1 : Antenne [2].

Le principe de l'antenne émettrice est de s'assurer que lorsqu'elle est traversée par un courant variable, sans chauffage ni éclairage, créera un champ magnétique variable autour et ce dernier à son tour créera un champ électrique et ainsi de suite (c'est la description des équations de Maxwell). Ce champ se propage, c'est alors une onde électromagnétique. Une onde électromagnétique est transformée en énergie électrique guidée grâce à un conducteur électrique, c'est le principe de l'antenne réceptrice qui est de s'assurer que le champ électromagnétique de l'air est transformé en énergie utilisable (signal électrique) [1].

I.3 Rôle de l'antenne

Un système de communication radio transmet des informations par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique (OEM) :

L'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et produit l'onde électromagnétique

- Cette OEM se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission en fonction du type et de la forme d'antenne utilisée, certaines directions de propagation peuvent être privilégiées.
- La puissance produite par l'émetteur et appliquée à l'antenne se disperse dans l'espace.
- L'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique.
- Ce signal électrique est appliqué à l'entrée du récepteur qui en extrait l'information transmis [3].

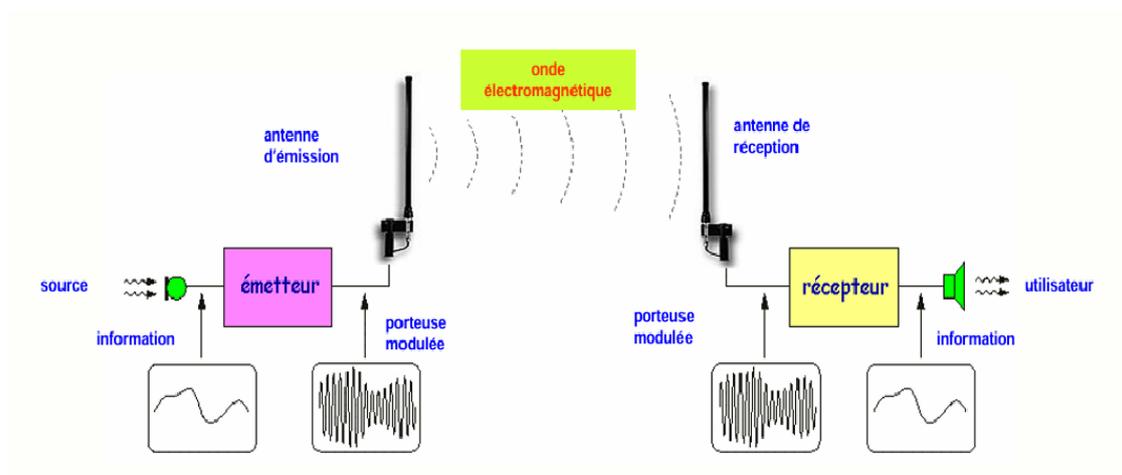


Figure I.2 : Schéma bloc de principe de transmission sans fil avec deux antennes [3].

I.4 Caractéristiques d'une antenne

I.4.1 Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de diagramme de rayonnement. La direction du maximum de rayonnement est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne. La représentation de cette fonction donne les caractéristiques du rayonnement dans l'espace. Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H [4].

- Le plan E est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et les champs électriques

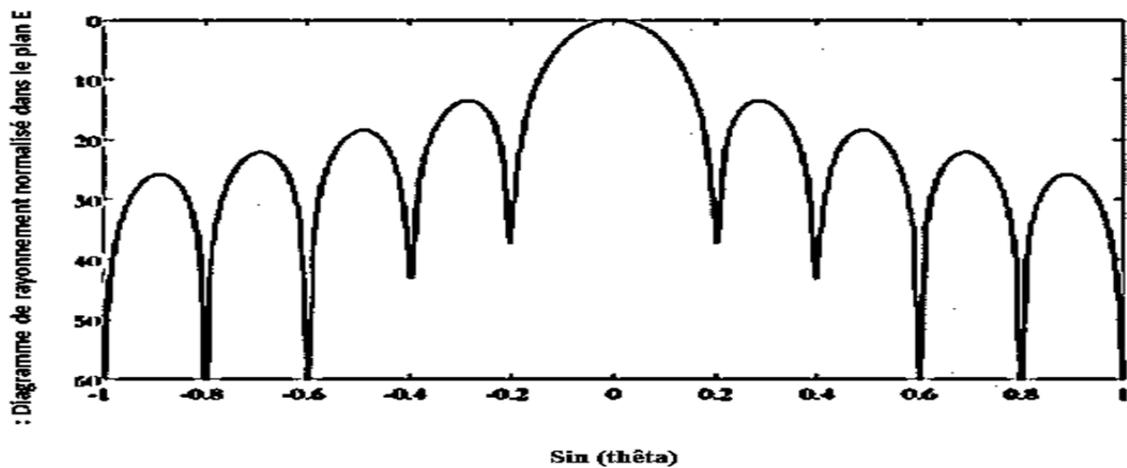


Figure I.3 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan E, en Db [4].

- Le plan H est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique.

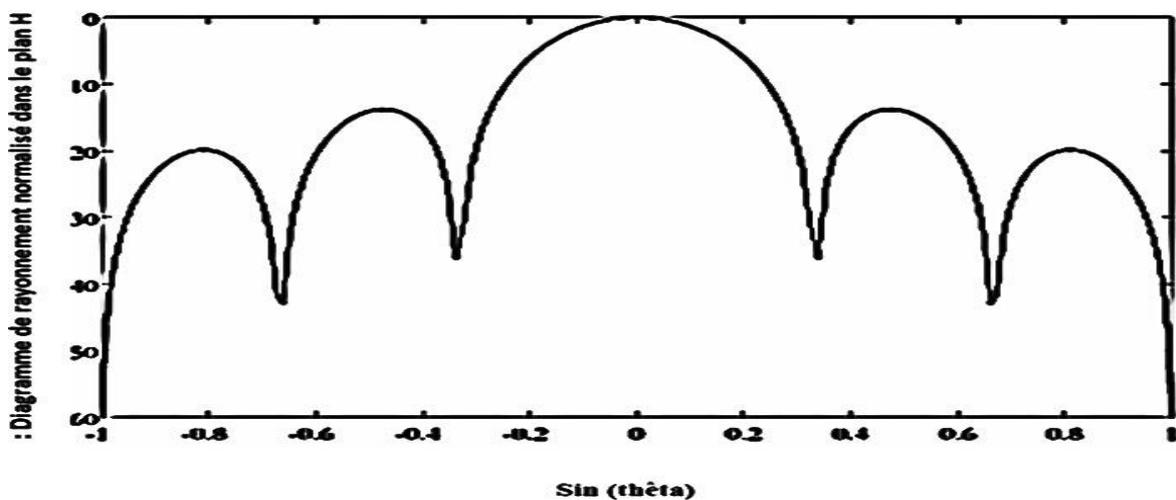


Figure I.4 : Diagramme de rayonnement normalisé dans le plan H, en dB [4].

- Certaines représentations en trois dimensions ont l'avantage de montrer toutes les directions de rayonnement dans l'espace.

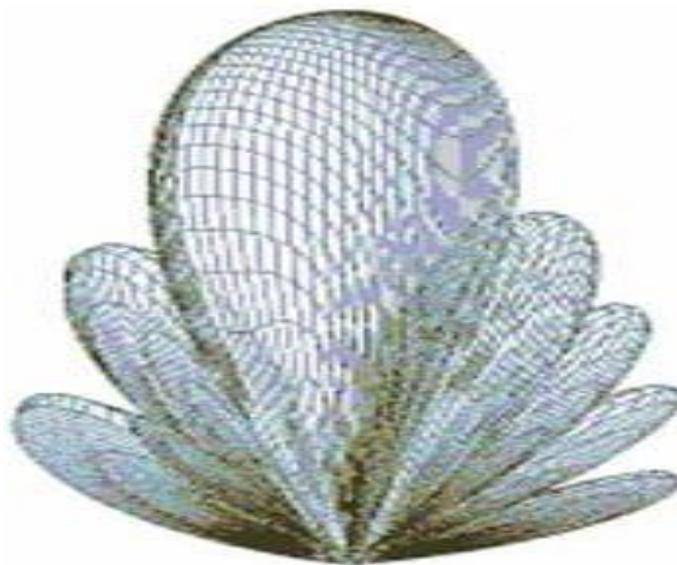


Figure I.5 : Exemple de diagramme de rayonnement 3D [4].

- Le diagramme de rayonnement, généralement en coordonnées logarithmiques, est présenté soit en coordonnées rectangulaires, soit en coordonnées polaires, dans les deux plans perpendiculaires (E et H).

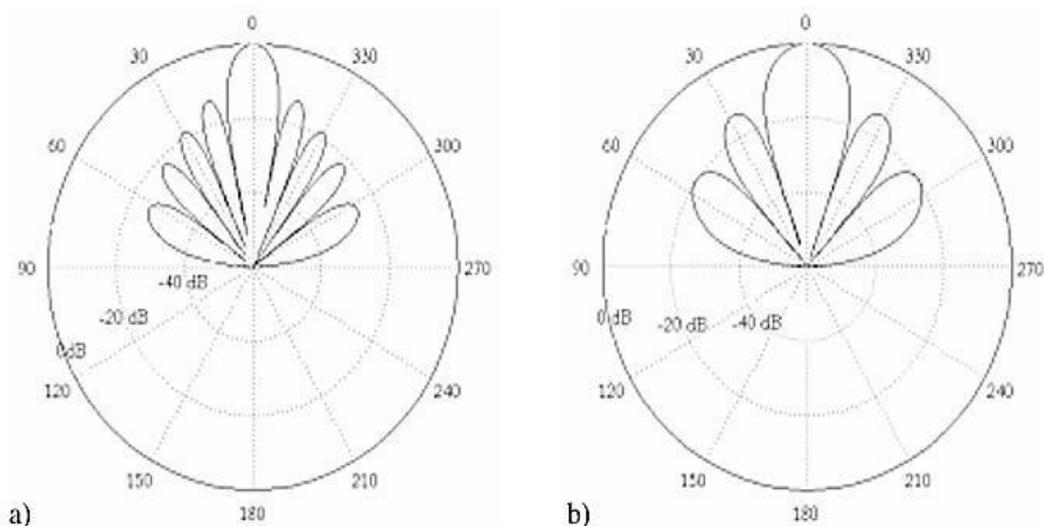


Figure I.6 : Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires [4].

- **Ouverture de l'antenne**

L'ouverture angulaire à mi-hauteur ou ouverture à 3 dB est définie par l'écart angulaire existant entre les deux directions situées de chaque côté de l'axe, pour lesquelles la puissance est divisée par deux. L'ouverture angulaire n'a de sens que dans un plan. Pour évaluer l'ouverture d'une antenne, il faut donner l'ouverture dans deux plans perpendiculaires. Donc on parle d'ouverture dans le plan E, ou dans le plan H. C'est alors le produit de ces angles qui donnerait une idée de l'ouverture en trois dimensions [4].

- **Angle solide de l'antenne**

Angle solide de l'antenne donne une valeur qui correspond à l'angle moyen dans lequel l'antenne émet [4].

- **Intensité**

L'intensité I dans une direction donnée est définie par la puissance rayonnée par unité d'angle solide [4].

I.4.2 Directivité

La directivité dans une direction est le rapport entre la valeur de la fonction caractéristique de rayonnement dans cette direction à sa valeur moyenne dans tout l'espace (permet de comparer la densité de puissance rayonnée dans cette direction à la puissance moyenne rayonnée dans l'espace). On remarque que la directivité peut être inférieure ou supérieure à 1 sur une échelle linéaire, ou bien positive ou négative sur une échelle logarithmique [4].

I.4.3 Gain d'une antenne

Le gain est proportionnel à la directivité. Il porte la même information sur les directions de rayonnement. Le gain tient compte du rendement de transformation entre la puissance d'alimentation et la puissance rayonnée. Au maximum de directivité [4].

On a simplement :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{\text{Intensité de source isotropique sans pertes}} \quad (\text{I.1})$$

Autrement dit :

$$G = \eta D \quad (\text{I.2})$$

I.4.4 Facteur d'antenne

Le facteur d'antenne FA est utilisé en mesure. Il donne le rapport entre le champ électrique efficace rayonné et la tension mesurée juste derrière l'antenne. Ce facteur, qui indique le taux de transformation entre le champ reçu et la tension transformée, fait intervenir le rapport de l'impédance de l'air à l'impédance de la ligne, le gain de l'antenne et la longueur d'onde. Il sert à comparer des antennes à une antenne étalon, en mesurant le facteur d'antenne en champ constant [4].

I.4.5 Polarisation d'une onde

La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation. Donc si la polarisation de l'antenne de réception n'est pas accordée sur la polarisation de l'antenne d'émission, la puissance reçue ne sera pas maximale [4].

Il existe plusieurs types de polarisations tels que : linéaire (horizontale, verticale), elliptique (droite, gauche) et circulaire et voici quelques caractéristiques pour quelques types de polarisations rencontrées [5] :

Horizontale :

- Peu de bruit électrique.
- Meilleure sensibilité aux signaux faibles.
- Angle de rayonnement généralement plus élevé par rapport au sol favorisant ainsi de bons contacts locaux.
- Grands espaces requis pour le déploiement.

Verticale :

- Bruit électrique plus présent dans les bandes HF.
- Optimisation de l'espace occupé par l'antenne.
- Nécessite généralement un bon plan de sol (Grounds).
- Plus enclin à causer de l'interférence dans les bandes HF.
- Angle de rayonnement plus bas ce qui aide pour les DX.

Circulaire :

- Génère en fait deux polarisations en phase pour éviter les pertes en traversant l'ionosphère et pour compenser la rotation des satellites.
- Rarement utilisé pour des contacts au sol.

I.4.6 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est définie comme l'impédance présentée par une antenne à ses bornes, elle est égale au rapport de la tension V_e au courant I_e présenté à son entrée. Il est donné par [6] :

$$Z_{in} = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (I.3)$$

- Z_{in} : impédance d'entrée aux bornes a et b.
- R : résistance de l'antenne aux bornes a et b.
- X : réactance de l'antenne aux bornes a et b.

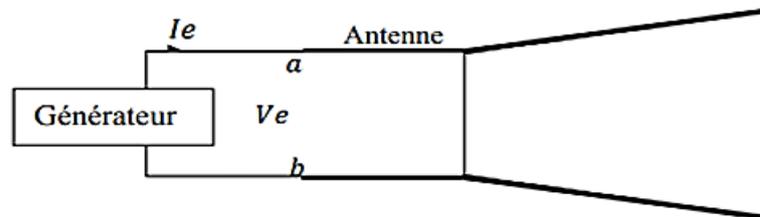


Figure I.7 : Principe d'antenne émettrice [6].

I.4.7 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet d'évaluer la relation entre la quantité réfléchi d'un signal et la quantité incidente. Le coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et à l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (I.4)$$

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation, généralement égale à 50. Nous pouvons représenter Γ sous la forme d'un paramètre S en dB comme suit :

$$S_{11} = 20 \log(\Gamma) \quad (I.5)$$

Il est important de noter que l'impédance d'une antenne peut être mesurée à l'aide d'un analyseur réseau. Dans ce cas, l'entrée de l'antenne est connectée au port de l'analyseur par un câble SMA, celui-ci transmet un signal harmonique et est capable de séparer l'onde incidente de l'onde réfléchi. Par conséquent, il permet de mesurer les paramètres S notamment le coefficient

de réflexion et donc de déduire l'impédance à la bande de fréquence considérée. Cependant, l'utilisation de cet analyseur nécessite une étape d'étalonnage précise pour mesurer l'impédance dans le plan de référence de l'antenne [6].

I.4.8 Bande passante

La bande passante d'une antenne est la bande de fréquences pour laquelle des caractéristiques particulières. Il dépend de l'impédance de rayonnement, de la directivité, de la polarisation de l'onde et enfin des dimensions de l'antenne, on définit la largeur de bande comme suit :

$$B_{\omega} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \quad (I.6)$$

La fréquence minimale et la fréquence maximale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur 0 -10 dB et f_c la fréquence centrale [7].

I.5 Types d'antennes

Afin de bien choisir l'antenne adéquate à l'application que nous désirions avoir, il est important de connaître les différents types d'antennes et leurs modes de fonctionnement. Il existe de nombreux types d'antennes, classés selon leurs technologies de fabrication et leurs modèles de conception et ainsi, chaque type d'antenne peut correspondre à un type d'utilisation bien précis. Bien qu'il soit impossible pour nous de citer tous les types d'antenne existants, nous allons dans ce qui suit présenter les types d'antennes les plus utilisés :

I.5.1 Antenne filaire

C'est les plus familiers des antennes puisque vue partout : sur les toits, les avions, les voitures...etc. Il existe une grande variété de forme : rectiligne (dipôle), boucle, circulaire, rectangulaire, ellipse et hélice [8].

I.5.1.1 Antenne dipôle

Elle est constituée de deux brins métalliques symétriques de longueur $\lambda/2$ pour le dipôle demi-onde, qui sont alimentés au milieu par des courants électriques de sens inverse dans la ligne bifilaire, et de même sens dans le dipôle. Très utilisé car il est facile à étudier et à concevoir avec son impédance de 73Ω , nous pouvons l'alimenter avec un câble coaxial d'impédance 75Ω sans aucun problème [8].

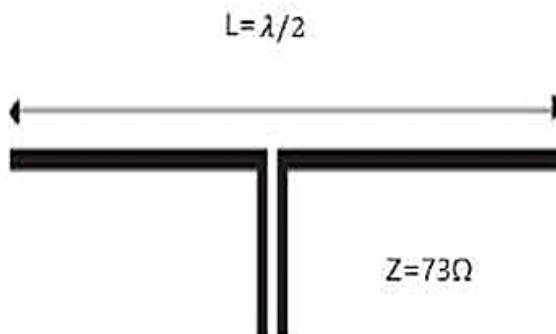


Figure I.8 Schéma représentant un dipôle [8].

I.5.1.2 Boucle magnétique

L'antenne boucle à une forme anneau qui permet le retour du fil sur lui-même, branchée sur une ligne bifilaire dont les courants sont de sens inverse pour ensuite circuler sur la boucle créant un champ magnétique variant qui engendre un champ électrique d'où le rayonnement électromagnétique [8].

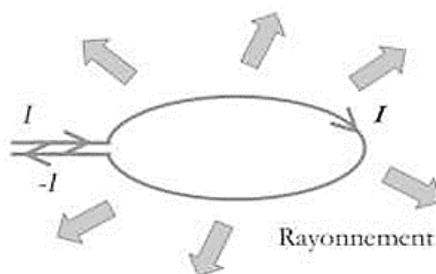


Figure I.9 : Boucle magnétique [8].

I.5.1.3 Antenne Yagi

Elle est constituée d'un dipôle demi-onde replié parfois appelé radiateur, un réflecteur placé juste avant à une distance de $\lambda/4$, et d'un ou plusieurs brins métalliques qu'on appellera directeurs, comme le montre la figure suivante, elle est très utilisée en télévision terrestre [8].

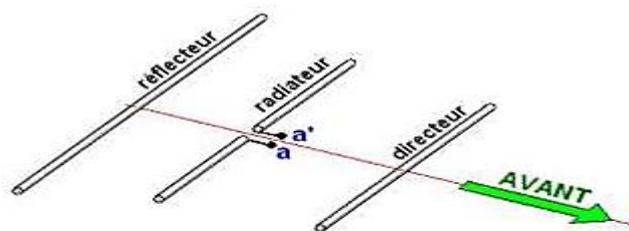


Figure I.10 : Structure de l'antenne Yagi [8].

I.5.2 Antenne à ouverture

I.5.2.1 Antenne à fente

L'antenne à fentes est le modèle de prédilection pour la conception d'antennes de systèmes de sécurité comme celles des radars micro-ondes utilisés pour la surveillance maritime et aéroportuaire [9].

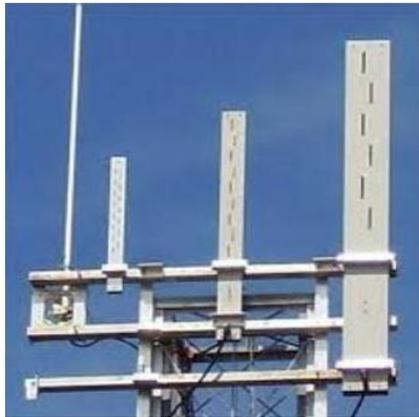


Figure I.11 : Antenne à fentes [9].

I.5.2.2 Antenne cornet

L'antenne à cornet est une antenne un peu spéciale à cause de son apparence en cône plus ou moins cylindrique. Elle a généralement la forme d'un gros entonnoir ou d'une pyramide inclinée à base ouverte [9].



Figure I.12 : Antenne cornet [9].

I.5.3 Antenne parabolique

Le besoin de communiquer à des grandes distances a permis d'élaborer des formes d'antennes capables de transmettre et de recevoir des signaux, qui devraient traverser des millions de kilomètres. Une forme courante pour de telles applications est le réflecteur parabolique avec des diamètres de plus de 305 m [10].

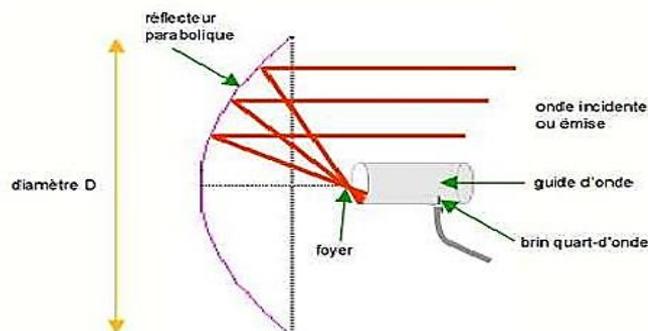


Figure I.13 : Schéma illustrant l'antenne parabolique [10]

I.5.4 Antenne imprimé

Les antennes imprimées de formes simples présentent des limitations telles qu'une faible bande passante, une directivité et un gain moyens, une taille de l'ordre de la demi-longueur d'onde, peu de flexibilité en termes de reconfiguration de polarisation, fréquence ou dépointage du faisceau rayonné, etc. Certaines techniques permettent d'améliorer une ou plusieurs de ces caractéristiques radioélectriques. Les principales applications de ces éléments rayonnants sont : communications par satellites, antennes pour l'aéronautique, téléphonie mobile, identification sans contact, antennes pour le biomédical, objets communicants.

I.6 Description d'une antenne Patch

L'antenne imprimée ou patch dans sa structure de base se forme d'une partie métallique rayonnante (patch) d'un côté du substrat isolant et d'un plan de masse de l'autre côté. Le patch est généralement constitué d'un matériau électriquement conducteur tel que le cuivre ou l'or et peut prendre toute forme concevable (carré, rond) afin de simplifier l'analyse de la structure [11].

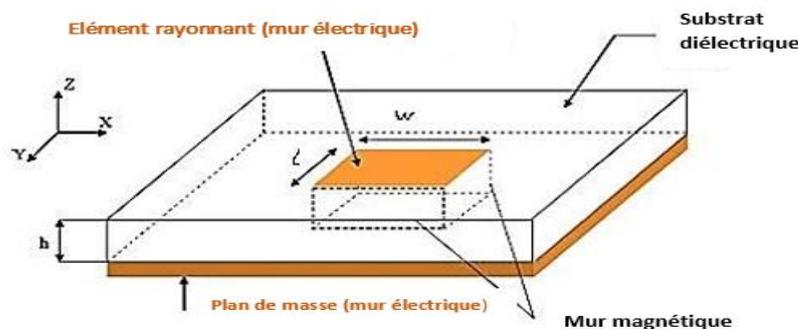


Figure I.14 : Géométrie d'une antenne imprimée [11]

Ces éléments rayonnants sont de différentes formes et leur alimentation peut être effectuée par divers procédés permettant d'obtenir un diagramme en polarisation linéaire ou circulaire. Les paramètres physiques et géométriques liés à cette structure sont :

- a) La permittivité relative de diélectrique (r).
- b) La tangente des pertes ($\tan\delta$) dans ce même substrat, avec dominance des pertes par effet joule.
- c) L'épaisseur du diélectrique (elle doit rester faible par rapport à la longueur d'onde à transmettre).
- d) Les dimensions de l'élément rayonnant (L, W).

I.6.1 Plan de masse

Doit être théoriquement de dimension infinie mais en pratique celui-ci est plutôt, pour des raisons d'encombrement, de l'ordre de 3 ou 4 de longueur d'onde. Il arrive cependant que celui-ci soit très réduit, ce qui bien évidemment modifie les caractéristiques de l'antenne initiale, parfois de manière très prononcée [11].

I.6.2 Substrat

Les caractéristiques du substrat conditionnent également le comportement de l'antenne. On choisit en général un diélectrique de faible hauteur vis-à-vis de la longueur d'onde λ d'utilisation, idéalement la permittivité relative du substrat doit être faible ($\epsilon_r \leq 3$) de façon à permettre le rayonnement, en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse [11].

Les matériaux les plus couramment utilisés sont des composites à base de téflon, du polypropylène ainsi que des mousses synthétiques contenant beaucoup de minuscules poches d'air. Une conservation de la forme originale [11].

- La stabilité en température (pour soudure) et aux conditions atmosphériques,
- L'uniformité de la permittivité relative et de hauteur (sur de grande plaque),
- Faible perte diélectrique pour une meilleure efficacité,
- Une résistance aux produits chimiques,
- Une faible rugosité Substrat mince avec des constantes diélectrique élevées sont souhaitables pour les circuits micro-ondes, car ils nécessitent étroitement liée champ pour minimiser le rayonnement indésirable et le couplage.

I.6.3-Éléments rayonnants

Les métallisations sont en très bons conducteurs tels que le cuivre, l'argent ou l'or. Afin de simplifier l'analyse et l'estimation des performances, le patch a généralement une forme rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique ou autre forme. Les divers types d'éléments rayonnants les plus simples sont [11] :

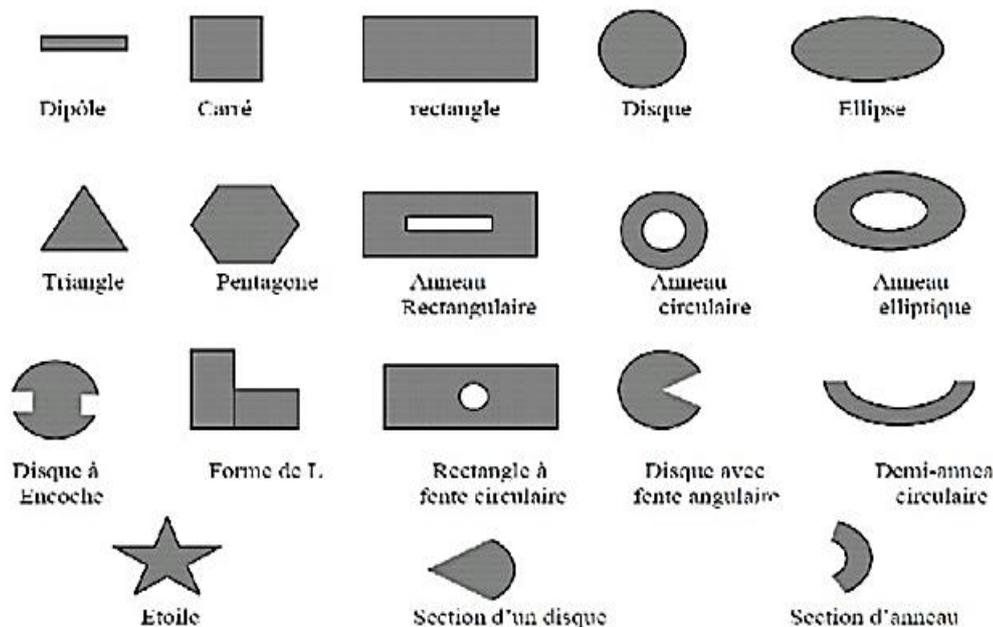


Figure I.15 : différentes formes d'élément rayonnant

I.7 Paramètres Géométriques de l'antenne « Patch » rectangulaire

I.7.1 Largeur du Patch

Joue un rôle important pour l'impédance d'entrée d'antenne et la bande passante a ses résonances, par contre à un effet mineur sur la fréquence de résonance et sur le diagramme de rayonnement [12].

$$W = \frac{C}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (I.7)$$

fr : Fréquence de rayonnement.

ϵ_r : Constante diélectrique du substrat.

C : Vitesse de la lumière.

I.7.2 Longueur du Patch :

Pour calculer la longueur 'L' il faut d'abord calculer ' ΔL ' qui correspond au débordement des champs ; puis Le la longueur de la ligne est une demi-onde, qui contient une permittivité effective d'une ligne Microstrip, qui repose sur la largeur de la ligne est sur la hauteur du substrat [12].

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (\text{I.8})$$

ϵ_e : constant diélectrique effective.

ϵ_r : constant diélectrique du substrat.

h : hauteur du substrat.

w : largeur du patch.

$$Le = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{C}{2fr\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$$\Delta L = 0.421 h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{I.10})$$

Et la dimension effective du Patch sera. :

$$Le = L - 2\Delta L \quad (\text{I.11})$$

Donc la longueur du patch est :

$$Lp = Le - 2\Delta L \quad (\text{I.12})$$

I.8. Applications des antennes imprimées

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

- Les télécommunications par satellites.

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

I.9 Technique d'alimentation :

L'alimentation des antennes imprimées, repose essentiellement sur deux classes d'excitation ; excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patches rayonnants en utilisant un élément de contact tels que le câble coaxial et la ligne microbande. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne microbande au patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microbande, sonde coaxiale, couplage par fente et couplage de proximité ..

I.9.1. Alimentation avec contact :

I.9.1.1. Sonde coaxiale

Le câble de la sonde coaxiale traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse, Cette alimentation est très utilisée avec les patches de formes circulaire et annulaire ..

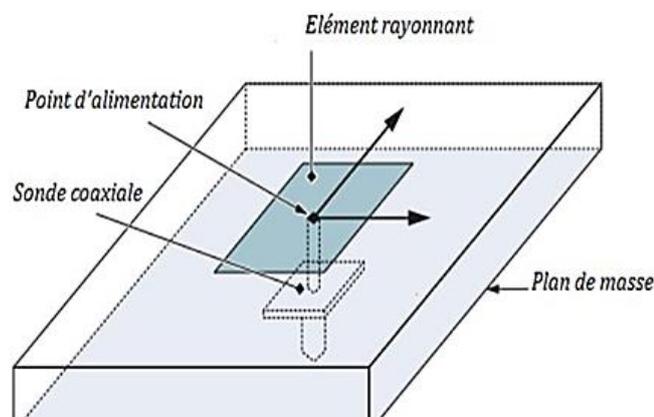


Figure I.16 : Alimentation du patch par un câble coaxial [13].

I.9.1.2. Ligne microbande

Faite par une ligne microbande de largeur plus petite par rapport au patch, cette ligne est gravée avec le Patch. Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes .

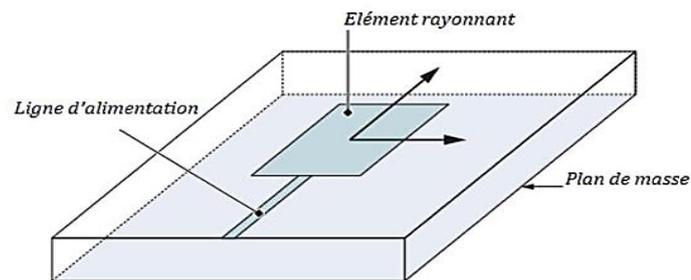


Figure I.17: Alimentation du patch par une ligne microbande [13].

L'alimentation peut se faire par la connexion directe à une ligne microbande (Figure I.17), dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats. Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes.

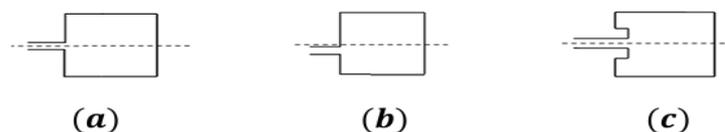


Figure I.18 : Alimentation par une ligne microbande axiale(a), décalée (b) et avec encoche(c) [13].

I.9.2. Alimentation sans contact (par proximité)

I.9.2.1. Ligne microbande en sandwich

Une antenne plaquée peut être aussi alimentée par couplage électromagnétique de la ligne micro-ruban à l'élément rayonnant. Dans ce cas, le résonateur et la ligne d'alimentation sont situés du même côté du plan de masse. L'antenne est formée de deux substrats, avec une ligne micro-ruban sur le substrat inférieur qui se termine en circuit ouvert sous le patch imprimé sur le substrat supérieur.

Le couplage électromagnétique a l'avantage de permettre la réalisation du patch rayonnant sur un substrat relativement épais, afin d'améliorer la bande passante, pendant que la ligne d'alimentation est imprimée sur un substrat plus mince, afin de réduire les rayonnements et les couplages parasites.

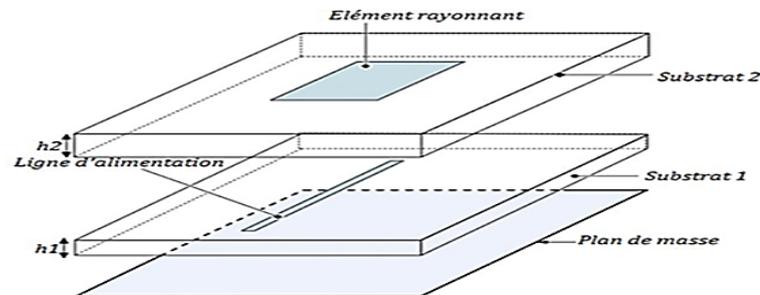


Figure I.19 : Ligne microbande en sandwich [13].

I.9.2.2. Guide d'onde coplanaire

L'élément rayonnant se trouve sur la face supérieure du substrat de fente rayonnante. La ligne d'alimentation et le plan de masse se trouvent à la même façade inférieure du substrat [13].

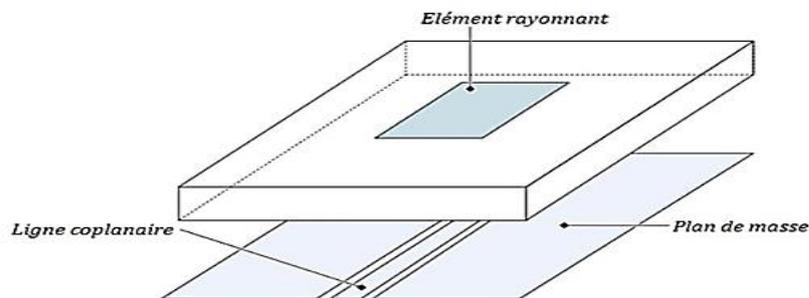


Figure I.20 : Alimentation du patch par un guide d'onde coplanaire [13].

I.9.2.3 Couplage par fente

Une ligne est disposée au-dessus du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne [13].

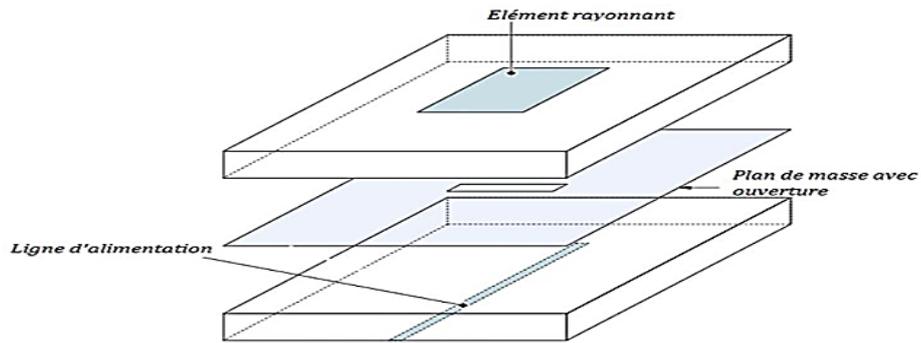


Figure I.21 : Alimentation du patch par fente [13].

- Une comparaison entre l'alimentation avec contact (sonde coaxiale et ligne microbande) et l'alimentation sans contact (par couplage, guide d'onde coplanaire, et le couplage par fente)

Méthodes		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Sonde coaxiale	-Pas de pertes par rayonnement de ligne -Sélection possible d'un mode privilégié -Obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde -Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur -Technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz	-Rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire. -Partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte. -Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. -Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.

	Ligne microbande	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation -Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant 	<ul style="list-style-type: none"> -Rayonnement parasite de la discontinuité ligne aérien -Rayonnement parasite possible du circuit de distribué en millimétrique -Structure figée après gravure
Alimentation sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> -Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens -Bande passante plus large par augmentation de la hauteur ($h_1+h_2>h_1$) 	<ul style="list-style-type: none"> -Deux couches de substrat requises -Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur
	Guide d'onde coplanaire	<ul style="list-style-type: none"> -Procédé technologique simple -Facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante -Faible rayonnement arrière -Transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et circuits MMIC 	<ul style="list-style-type: none"> -Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires
	Couplage par fente	<ul style="list-style-type: none"> -Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes -Séparation électromagnétique des deux couches -Possibilité d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente 	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie plus couteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation) -Support mécanique nécessitant des précautions -Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément

Tableau I-1 : Comparaison entre les méthodes d'alimentation [13].

I.10. Avantages et inconvénients d'antenne PATCH**Avantages**

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles.
 - Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithique Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne [13]

Inconvénients :

- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances (géométrique et physique).
- Génération faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances (quelques dizaines de watts).
- Circuit d'alimentation parfois très complexe.
- Parasite de l'alimentation [

I.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelque notion de base des antennes et spécialement les antennes imprimées où on s'est intéressé au fonctionnement, les propriétés et les caractéristiques, de ces antennes ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons montré également quelques techniques d'alimentation

Chapitre II

Technologie SIW

II.1 introduction

Dans le domaine de télécommunication et plus précisément la radiocommunication qui vise l'amélioration des performances des composantes radioélectriques pour donner naissance à de nouvelles technologies dont la fabrication est moins coûteuse d'où notre intérêt à la technologie Siw qui est le résultat de la fusion entre deux technologies à savoir volumique et planaire . Dans ce chapitre, nous allons d'abord aborder la conception, ses modes de propagation par la suite l'application de la technologie siw sur une antenne planaire à fentes et préciser sa théorie de conception et enfin terminer par les avantages de cette technologie.

II.2 Définition d'une guide d'onde

Un guide d'onde est une forme particulière de la ligne de transmission .Il s'agit des tubes métalliques fait des matériaux de haute qualité (cuivre et laiton – partiellement argenté ou même plaqué or). Récemment dans la nouvelle technologie, ces guides sont composés de cuivre plaqué électriquement d'une mince couche de fibres de carbone. Cette structure permet le confinement et le guidage de la lumière dans une direction bien déterminée. Selon sa dimension et la longueur d'onde du faisceau guidé, un guide d'onde peut être d'une longueur d'onde ou pas. [14]

Selon le matériau avec lequel ils sont fabriqués, les guides d'onde sont divisés en

Deux groupes :

II.1 Guides d'onde diélectriques

Comme leur nom l'indique, ils sont constitués de matériaux diélectriques uniquement. Dans cette catégorie, le guide d'onde en Silicone est le plus souvent utilisé grâce à son indice de réfraction élevé et sa propriété de transparence pour des longueurs d'onde télécom [15].

II.2 Guides d'onde métalliques

Ils sont constitués d'un métal et d'un diélectrique. Malgré les pertes radiocommunication qui sont dues à la présence du métal, cette catégorie de guides d'onde présente de nombreux avantages comparée la précédente. Le métal peut être utilisé comme contact électrique ce qui permet d'éviter l'encombrement lors de l'insertion du guide dans un réseau optique donné [16] [17].

II.3 Types de guide d'ondes selon la géométrie

II.3.1 Guide d'onde planaire

Le guide d'onde planaire est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents. La lumière se propage préférentiellement dans la couche d'indice de réfraction n_g si celle-ci est entourée de deux couches : une couche inférieure de substrat d'indice de réfraction n_s et une couche supérieure de couverture d'indice de réfraction n_c . La lumière est confinée selon l'axe vertical (x) et se propage dans la direction (z). De fait de l'invariance de cette structure dans la direction (y), la lumière ne peut être confinée dans cette direction [18].

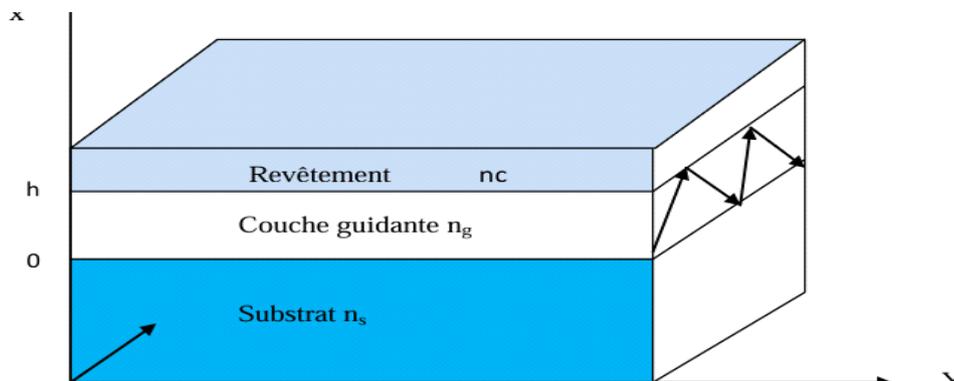


Figure II.1 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire [18]

II.3.2 Guide d'onde circulaire

Le guide d'onde à section circulaire est en principe ceux qui représentent le moins de pertes. Les guides d'ondes circulaires permettent également de faire véhiculer deux signaux polarisation orthogonale dans le même guide. Toutefois la maîtrise requise pour garder les champs électriques et magnétiques bien perpendiculaires est très délicate. C'est pourquoi on préfère les guides rectangulaires ou elliptiques [19]

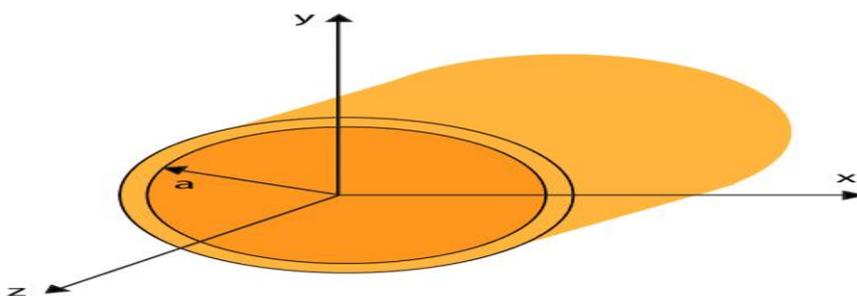


Figure II.2 : représentation graphique guide d'onde circulaire

II.3.3 Guide d'onde rectangulaire

Le guide d'onde rectangulaire est constitué de quatre parois conductrices (généralement parfaits). Donc, ce type de guide d'onde possède une section conductrice fermée, donnant la forme d'un conducteur simple et creux. Le guide d'onde rectangulaire est définie transversalement (selon x) par la largeur a et verticalement (selon y) par l'épaisseur b . Un diélectrique du conducteur creux. La lumière se déplace dans le diélectrique, mais il est confiné dans l'espace par les quatre parois conductrices [19]

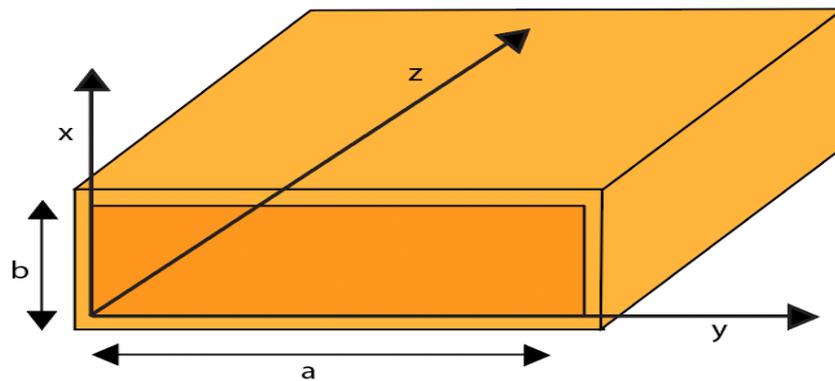


Figure II.3 : représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire

II.3.4 Fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde optique a symétrie circulaire. Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre de silice ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. Elle présente des meilleures qualités de transmissions et elle permet de faire passer un très grand nombre d'information (large bande passante). On peut avoir plusieurs canaux de transmission simultanément sur une fibre [19].

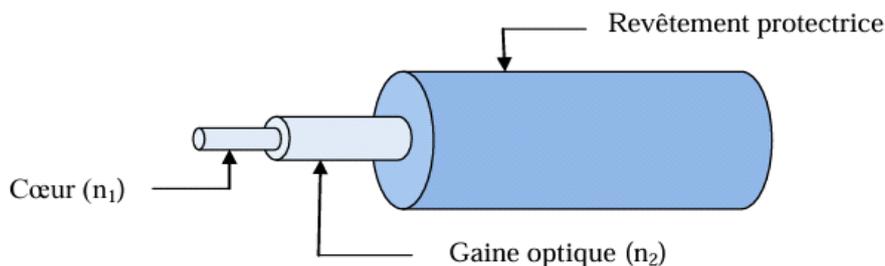


Figure II.4 : Représentation graphique d'une fibre optique [19].

II.3.5 Guide d'onde diffuse

Ce type de guide définit par une région de substrat semi-infinie $y < 0$ d'indice de réfraction n_0 . Une petite couche enfoncée dans le substrat d'indice de réfraction $n_0 + \Delta n$ et une région Supérieure de couverture semi-infinie $y > 0$ d'indice de réfraction n_c [20].

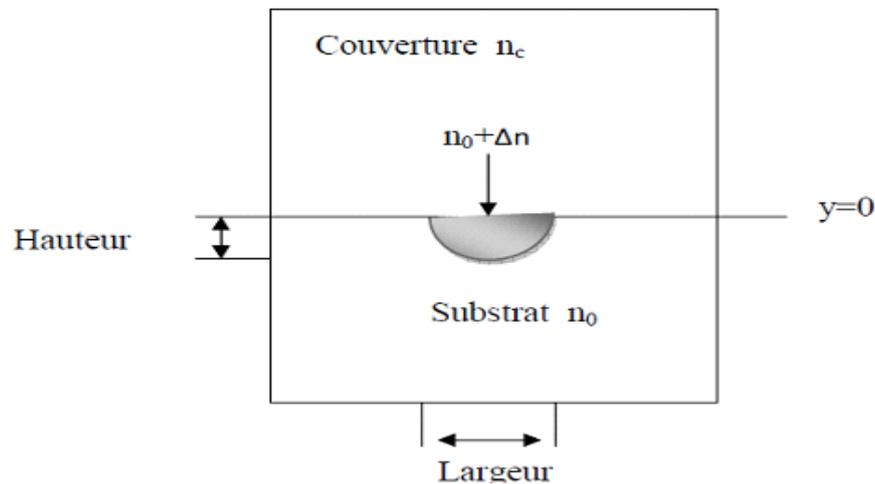


Figure II.5 : Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé [20]

II.4 Équation de propagation

L'équation de propagation est l'équation qui lie les constantes de propagation. Pour la déterminer, les lois fondamentales de l'électromagnétisme régies par les équations de Maxwell

II.4.1 Equations de Maxwell

La propagation des ondes électromagnétiques planes dans le guide est décrite mathématiquement par l'existence d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H qui oscillent sinusoïdalement. L'équation de propagation peut être déduite des équations de Maxwell. Ces équations de Maxwell fournissent des relations :

- Equation de maxwell faraday

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II. 1)$$

- Equation de maxwell ampère

$$\overrightarrow{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (II. 2)$$

- Equation de maxwell gauss

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II. 3})$$

- Equation de maxwell Thomson

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0 \quad (\text{II. 4})$$

E est l'intensité du champ électrique, H l'intensité du champ magnétique, B est l'induction magnétique, D est le déplacement électrique, J est la densité du courant électrique et ρ la densité de charge. D, B et J sont définis par :

$$D = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II. 5})$$

$$D = \mu \vec{H} \quad (\text{II. 6})$$

$$D = \partial E \quad (\text{II. 7})$$

La permittivité ε du milieu est représentée par l'équation : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ avec ε_0 la permittivité de l'espace libre et ε_r la permittivité relative du milieu.

La perméabilité magnétique μ du milieu est donnée par $\mu = \mu_0 \mu_r$ avec μ_0 la perméabilité de l'espace et μ_r est la perméabilité relative du milieu.

Dans le cas d'un guide d'onde diélectrique, μ_r est généralement considéré pour avoir une valeur d'unité, qui implique la continuité du champ magnétique à travers la limite. La conductivité σ du milieu est généralement considérée nulle d'ici J sera supposé également nulle.

II.5 Modes de propagation

Dans un guide d'onde, il existe plusieurs modes de propagation de l'onde électromagnétique, mathématiquement parlant, plusieurs solutions aux équations de maxwell, ou chaque solution représente un mode de propagation bien défini, c'est pour cela qu'il est important pour nous de connaître ces différents modes. Il existe quatre modes de propagation :

- Mode TE (Transverse Electric) :

Dans ce mode c'est le champ électrique E qui est une composante transverse, il est donc perpendiculaire à l'axe de propagation. Si on considère $Z \rightarrow$ le vecteur unitaire de l'axe de propagation, on aura : $E \rightarrow \perp Z \rightarrow$ Et $EZ = 0$.

- Mode TM (Transverse Magnétique) :

Dans ce mode c'est le champ magnétique H qui est une composante transverse, il est donc perpendiculaire à l'axe de propagation et on aura : $H \rightarrow \perp Z \rightarrow$ Et $HZ = 0$.

- Mode TEM (Transverse Electromagnétique) :

Dans ce mode les deux champs (électrique et magnétique) sont perpendiculaires à l'axe de propagation : $E \rightarrow \perp Z \rightarrow$, $H \rightarrow \perp Z \rightarrow$ Et $EZ = 0$, $HZ = 0$

- Mode hybride : dans ce cas, aucune composante n'est transverse, on aura le champ électrique et magnétique en toute direction avec : $EZ \neq 0$ Et $HZ \neq 0$ [21].

II.6 caractéristique de guide d'onde

II.6.1 Fréquence de coupure

Dans un guide d'onde rectangulaire, les modes TE et TM se propagent à partir d'une certaine fréquence, dite fréquence de coupure, dont l'expression est donnée par la relation suivante en fonction de la largeur a et la hauteur b de la section du guide d'onde

$$f_{cmn} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2} \quad (\text{II. 8})$$

Cette fréquence de coupure du mode dépend non seulement du diélectrique qui se trouve dans le guide rectangulaire mais également des dimensions de a et b du guide. Le classement des modes est obtenu à partir du calcul des fréquences de coupure f_c [22].

II.6.2 Longueur d'onde

La longueur d'onde est la distance parcourue par une onde électromagnétique pendant une période d'oscillation. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence de l'onde [23].

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (\text{II. 9})$$

T : la période

II.6.3 Atténuation

L'atténuation dans le guide d'ondes elliptique est approximativement 13% plus faible que celle dans le guide rectangulaire, alors que l'atténuation dans le guide d'ondes circulaire est de 40% à 50% plus faible que celle dans le guide d'ondes elliptique. En général, l'atténuation du mode dominant dans le guide elliptique est de 12% à 15% plus basse que celle du mode dominant du guide d'ondes rectangulaire pour le même type de paroi, la même fréquence de coupure et des rapports b/a égaux. Par contre, le guide d'ondes circulaires a toujours l'atténuation la plus faible [23]

II .6.4 Impédance d'onde

L'impédance de guide d'onde, souvent notée Z, est une caractéristique importante des guides d'ondes utilisés en électromagnétisme et en télécommunications. Elle représente la résistance à la propagation d'une onde électromagnétique à travers le guide d'onde [23]

II.7 Technologie planaire

Les technologies planaires consistent à utiliser un substrat qui se présente sous la forme d'une plaque de diélectrique et des fines couches métalliques déposées sur l'une ou les deux faces du substrat. Le circuit en entier peut être produit en grand nombre à faible coût par photolithographie. Les critères de choix du substrat sont principalement les caractéristiques électriques du diélectrique (tangente de perte et permittivité), les caractéristiques thermiques et mécaniques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique), le coût et la technologie de fabrication utilisée (procédé de dépôt des couches métalliques) [24].

II.7.1 Guide d'onde coplanaire

La technologie coplanaire se matérialise par une métallisation sur une seule face de substrat. La ligne est alors matérialisée par deux fentes gravées dans le métal, Cette technologie a pour avantage de réduire encore le coût de fabrication puisquetout est réalisé sur une seule face. On s'affranchit ainsi des perçages et de dépôt métalliques supplémentaires. Cependant, le fait d'avoir trois conducteurs en parallèle rend la propagation possible selon deux fondamentaux. Le premier qui est le mode quasi-TEM, et le second est le mode TE. Ce dernier apparait notamment avec la présence de discontinuités. La solution pour s'affranchir du mode

TE consiste à mettre au même potentiel les deux plans métalliques extérieur à la ligne. Mais en pratique, cela reste difficile et coûteux à réaliser. Pour cette raison le coplanaire reste peu utilisé. [25]

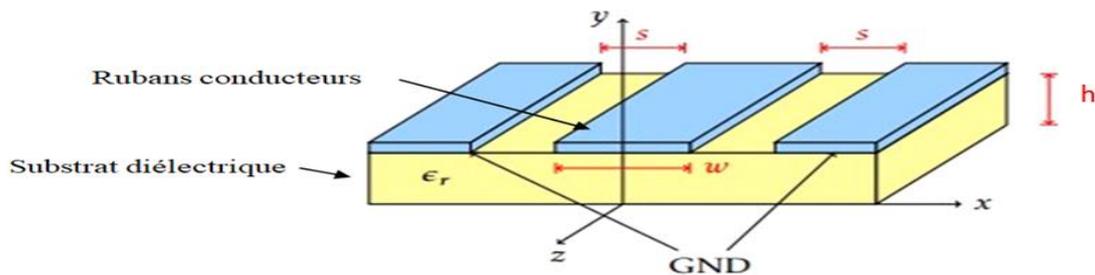


Figure II.6 : Structure d'une ligne coplanaire [25].

II.7.2 Ligne tri-plaque

La technologie tri-plaque revient à noyer un ruban métallique dans un substrat, dont les deux faces ont été métallisées. Nous retrouvons donc, comme pour le coplanaire, trois conducteurs en parallèles, avec deux modes de propagation possibles. Mais contrairement au coplanaire, le mode parasite peut être facilement éliminé en ajoutant des tiges métallisées tout au long de la ligne, pour relier les deux faces métallisées et les maintenir au même potentiel électrique. De plus, le fait de noyer la ligne dans un substrat permet de réduire considérablement les dimensions grâce à la permittivité relative plus élevée. Par ailleurs, la métallisation des deux faces protège des pertes par rayonnement. Les inconvénients de tri-plaque sont d'avoir des coûts de réalisation plus élevés [25]

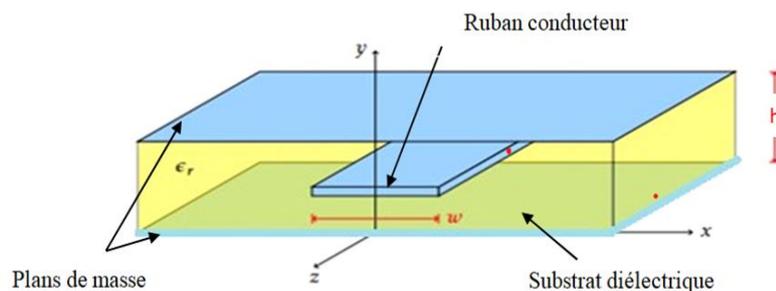


Figure II.7 : Structure d'une ligne tri-plaque [25].

II.7.3 Lignes Micro-ruban

La ligne micro-ruban est très utilisée pour la fabrication de circuits hyperfréquences, principalement parce qu'elle s'apprête bien à une fabrication par procédé photo-lithographique, et également parce qu'elle permet une intégration simple des composants passives et actives par montage en surface. Dans une ligne micro-ruban, les lignes de champ sont surtout concentrées dans le diélectrique entre la ligne métallisée et le plan de masse, bien qu'une faible

portion se retrouve également dans l'air au-dessus du substrat. Cela implique qu'une ligne micro-ruban ne puisse supporter un mode TEM pur, puisque la vitesse de phase "c" des champs TEM dans le diélectrique diffère de celle dans l'air [25]

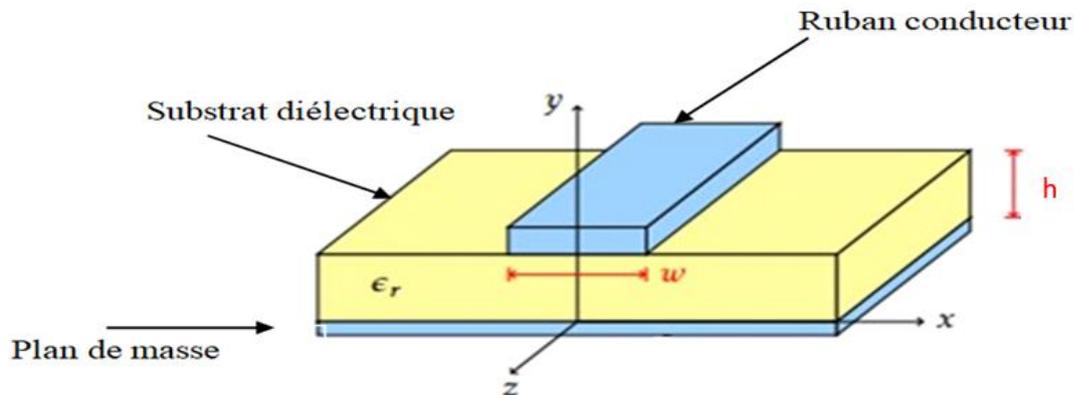


Figure II.8 : Structure d'une ligne micro-ruban [25]

II.7.3.1 : Caractéristiques des lignes micro-rubans

On peut citer les caractéristiques suivantes :

Les signaux en courant alternatif aussi bien qu'en courant continu peuvent être transmis

Les composants actifs, diodes et transistors peuvent être facilement Implémentés (des connexions en dérivation sont aussi facilement réalisables).

- La caractérisation des composants sur le circuit est simple à effectuer.
- La longueur d'onde de la ligne est considérablement réduite (généralement un tiers) des valeurs dans le vide
- La structure est assez irrégulière et peut résister modérément à des tensions et des niveaux de puissances élevés .

II.7.3.2 Avantages et les inconvénients de ligne micro ruban

Avantages	Inconvénients
1. Toute configuration du conducteur supérieur peut être déposée directement sur le diélectrique ce qui est une opération peu coûteuse 2. Des éléments semi-conducteurs peuvent être aisément fixés à cette structure puisqu'elle est de configuration plane 3. Tous les éléments incorporés à la structure sont aisément accessibles	1. Le champ électrique est perturbé par l'interface air diélectrique 2. Existence d'un effet de bord : les champs s'étendent de part et d'autre de ruban. 3. Les pertes sont plus élevées par suite du rayonnement ; elles dépendent fortement de l'épaisseur et de la constante diélectrique du substrat.

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de la ligne micro ruban .

II.8 Technologie des guides d'onde intégrée au substrat

Un guide d'ondes intégré au substrat (SIW), également connu sous le nom de guide d'ondes post-paroi ou guide d'ondes stratifié, est un guide d'ondes électromagnétique rectangulaire synthétique, facilement fabriqué par une production de masse à faible coût à l'aide de deux rangées de cylindres ou de fentes conducteurs intégrés dans un substrat isolant qui se connecte deux plaques métalliques parallèles [26]

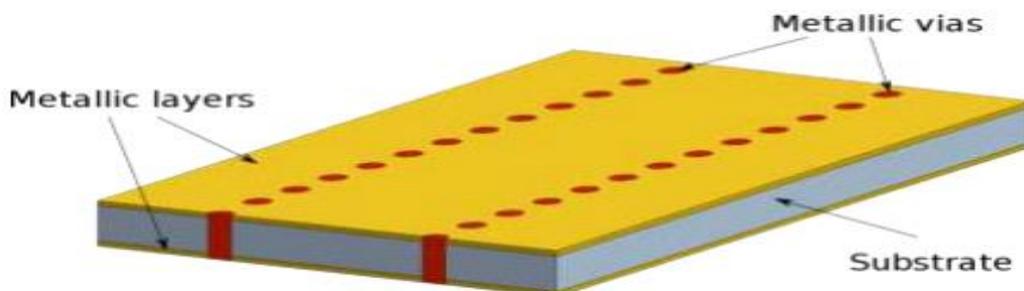


Figure II.9 : Guide d'onde intégré au substrat [26].

II.8.1 Définition de technologie SIW

La technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) est une technique innovante utilisée dans la conception de circuits intégrés, principalement dans les domaines des hautes fréquences et de la micro-onde. Elle consiste à intégrer des guides d'ondes directement dans le substrat diélectrique du circuit, ce qui permet de réaliser des composants compacts, à faible perte et à haute performance.

En d'autres termes, au lieu d'utiliser des composants traditionnels tels que des lignes de transmission métalliques, la SIW utilise le substrat diélectrique du circuit lui-même pour former des guides d'ondes, ce qui permet de réduire l'encombrement et les pertes de signal.

Cette technologie offre des avantages tels qu'une meilleure intégration de composants, une réduction de la taille des circuits, une meilleure isolation entre les composants, une meilleure performance à haute fréquence et une plus grande facilité de fabrication. [27]

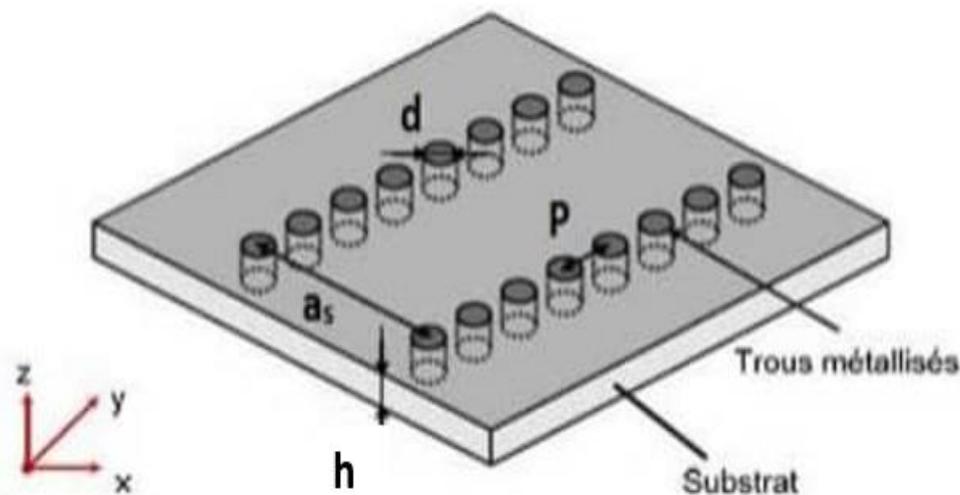


Figure II.10 : Structure d'un guide d'onde SIW

h : la hauteur du substrat,

d : le diamètre des vias et

P : l'espacement entre les centres de deux vias consécutifs.

II.18.2 Modes de propagation dans un guide SIW :

Dans un guide SIW (Substrate Integrated Waveguide), plusieurs modes de propagation peuvent se produire en fonction de la structure géométrique du guide et des conditions de fonctionnement. Voici quelques-uns des modes de propagation courants dans un guide SIW :

Mode Transverse Électromagnétique (TEM) : Ce mode est caractérisé par un champ électromagnétique transversal (perpendiculaire à la direction de propagation) et n'a pas de composante de champ magnétique le long de la direction de propagation. Il est souvent utilisé dans les guides SIW pour le transport de signaux.

Mode Transverse Magnétique (TM) : Dans ce mode, seul le champ magnétique a des composantes transversales, tandis que le champ électrique a des composantes dans la direction de propagation. Les modes TM sont souvent rencontrés dans les guides SIW avec des structures spécifiques.

Mode Transverse Électrique (TE) : Dans ce mode, seul le champ électrique a des composantes transversales, tandis que le champ magnétique a des composantes dans la direction de propagation. Les modes TE sont également courants dans les guides SIW.

Ces modes de propagation dépendent des dimensions et de la configuration spécifique du guide SIW, ainsi que de la fréquence de fonctionnement. [28][29]

II.18.3 Règles de conception d'une structure SIW

La conception d'une structure SIW (Substrate Integrated Waveguide) nécessite de suivre certaines règles pour garantir des performances optimales. Voici quelques-unes des règles de conception courantes pour les structures SIW :

- **Dimensions du guide d'ondes** : Les dimensions du guide d'ondes SIW doivent être soigneusement calculées pour assurer un bon couplage entre le guide d'ondes et les composants intégrés. Ces dimensions dépendent de la fréquence de fonctionnement et des propriétés du substrat.
- **Placement des composants** : Les composants actifs et passifs doivent être placés de manière à minimiser les pertes et les interférences électromagnétiques. Un placement

stratégique des composants peut également réduire les réflexions et améliorer l'efficacité du guide SIW.

- Connexions : Les connexions entre les composants et le guide d'ondes doivent être conçues avec soin pour minimiser les pertes et les réflexions. Des techniques telles que les transitions d'impédance et les structures de transition peuvent être utilisées pour assurer un couplage optimal.
- Réduction des pertes : Les pertes diélectriques et conductives dans le substrat et les composants doivent être minimisées autant que possible pour garantir des performances élevées du guide SIW. Cela peut être réalisé en utilisant des matériaux à faible perte et en optimisant la conception des structures.
- Isolation entre les composants : Pour éviter les interférences entre les composants, une isolation adéquate doit être maintenue. Cela peut être réalisé en utilisant des techniques telles que le placement stratégique des composants et l'utilisation de structures de blindage.
- Simulation et caractérisation : Avant la fabrication, la conception du guide SIW doit être simulée et caractérisée pour vérifier ses performances et son fonctionnement. Des logiciels de simulation électromagnétique peuvent être utilisés pour modéliser le comportement du guide SIW et optimiser sa conception [29][30].

II.8.4 Géométrie d'une structure SIW [31]

En plus des dimensions des tiges cylindriques en métal, on aura une nouvelle largeur pour le guide SIW qui s'ajoutera, qui est la largeur entre les deux rangées de vias du centre au centre des cylindres métalliques, et on aura donc les dimensions suivantes :

- d : diamètres d'un via.
- P : l'espacement entre deux vias du centre au centre (pitch).
- a_s , a_{SIW} : la largeur entre deux rangées de vias du centre au centre.
- En plus de l' a_{RGW} qui est la largeur du guide d'onde rectangulaire équivalente, et h l'épaisseur du substrat.

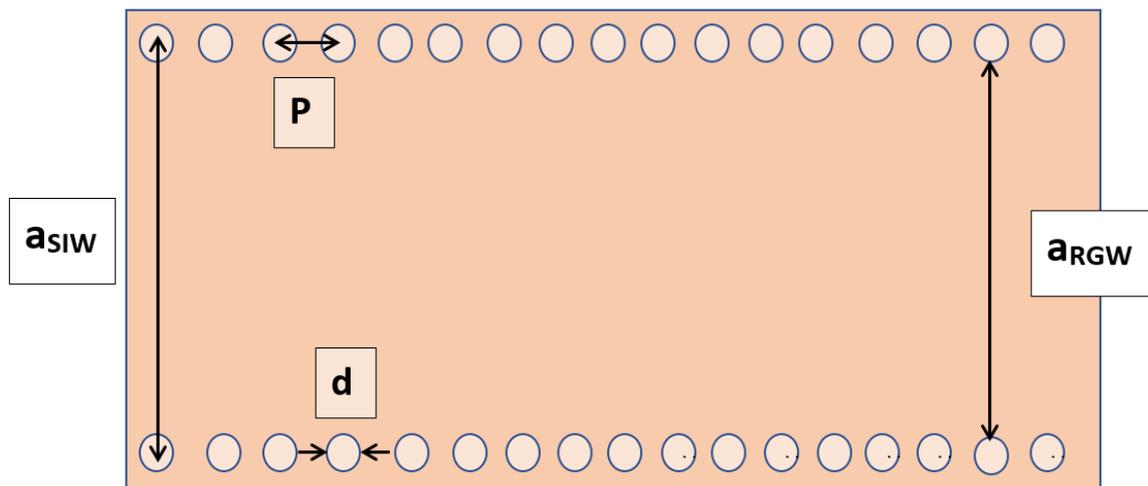


Figure II.11 : géométrie d'une structure SIW.

II.8.5 Dimensionnement d'une structure SIW [30].

Pour réaliser un guide d'onde intégré au substrat dont le principe, est de remplacer les parois latérales par deux rangées de vias, la première problématique qui puisse se poser est l'emplacement des vias, concernant l'espace entre ces cylindre métalliques p , il doit être minime pour éviter les pertes de rayonnement entre les trous métalliques, mais au même temps suffisamment grand pour éviter le chevauchement des vias, ces deux conditions sont traduites comme suit :

$$p > d \quad (\text{II. 10})$$

$$p < 2d \quad (\text{II. 11})$$

Le diamètre d représentant également un paramètre important, lié aux pertes par rayonnement, se doit de respecter la condition ci-dessous pour que ces dernières soient négligées :

$$d < \lambda_g/5 \quad (\text{II. 12})$$

Et la longueur d'onde à l'intérieur du guide est définie par :

$$\lambda_g = \frac{c}{f_c \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II. 13})$$

Avec

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique choisie pour le substrat.

Un autre paramètre également important est l'espace entre les deux rangées de vias noté par a_{SIW} qui est obtenu à partir d' a_{RWG} qui est la largeur d'un guide rectangulaire rempli par un diélectrique de permittivité ϵ_r (au lieu d'être vide).

Le guide d'onde rectangulaire rempli par un diélectrique de permittivité relative ϵ_r , partage les mêmes caractéristiques modales qu'un guide d'onde rectangulaire classique (creux), dont le mode fondamental TE₁₀ s'approprie une fréquence de coupure F_c .

La fréquence de coupure du mode fondamental du guide d'onde rectangulaire rempli d'un diélectrique sera :

$$f_c = \frac{c}{2a_{RWG} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II. 14})$$

On aura donc :

$$a_{RWG} = \frac{c}{2 \times F_c \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II. 15})$$

Et a_{SIW} la largeur du guide SIW sera déterminée par l'équation suivante :

$$a_{SIW} = a_{RWG} + \frac{d^2}{0.95 \times P} \quad (\text{II. 16})$$

II.8.6 Conception d'une antenne patch SIW

La conception d'une antenne patch SIW implique l'intégration d'une structure de patch dans un guide d'ondes SIW, ce qui offre des avantages en termes de compacité, de facilité de fabrication et de performances. Voici une approche générale pour la conception d'une telle antenne avec références

II.8.7 Conception de la structure patch

La conception de la structure de patch détermine les propriétés de rayonnement de l'antenne. Les dimensions de la plaque métallique, la forme du patch, et la présence d'éventuels éléments de charge ou de perturbation influencent directement les performances de l'antenne.

Des techniques de simulation électromagnétique, telles que la méthode des éléments finis (FEM) ou la méthode des moments (MoM), peuvent être utilisées pour concevoir et optimiser la structure de patch [29].

II.8.8 Intégration dans le guide d'onde SIW :

Une fois la structure de patch conçue, elle est intégrée dans le guide d'ondes SIW. Cela implique de découper une cavité dans le substrat diélectrique pour accueillir la structure de patch. Les dimensions de cette cavité doivent être soigneusement calculées pour assurer un bon couplage entre le guide d'ondes et l'antenne patch.

Des techniques de simulation électromagnétique peuvent être utilisées pour optimiser l'intégration de la structure de patch dans le guide d'ondes SIW, en tenant compte des effets de bord et des pertes [30].

II.8.9 Antenne patch SIW à fente

La conception d'une antenne SIW à fente implique la création d'une fente dans le substrat diélectrique du guide d'ondes SIW, ce qui permet de rayonner ou de capter des ondes électromagnétiques. Voici une approche générale pour la conception d'une telle antenne avec références :

La fente est généralement réalisée en découpant une ouverture dans le substrat diélectrique du guide d'ondes SIW. La forme et les dimensions de cette fente déterminent les caractéristiques de rayonnement de l'antenne.

Des techniques de simulation électromagnétique, telles que la méthode des éléments finis (FEM) ou la méthode des moments (MoM), peuvent être utilisées pour concevoir et optimiser la forme et les dimensions de la fente pour les performances souhaitées.

I.9 Intégration dans le guide d'ondes SIW

Une fois la fente conçue, elle est intégrée dans le guide d'ondes SIW. La fente est généralement placée à une position spécifique le long du guide d'ondes pour assurer un rayonnement ou une réception efficace des ondes électromagnétiques. Des techniques de simulation électromagnétique peuvent être utilisées pour optimiser l'emplacement de la fente dans le guide d'ondes SIW, en tenant compte des effets de bord et des pertes [29] [30].

II.9.1 Alimentation

Très utilisée et facile à mettre en œuvre sur une technologie planaire, la ligne micro-ruban est un choix judicieux pour alimenter une telle structure en raison de son faible rayonnement parasite et de sa bande passante plutôt satisfaisante. Le dimensionnement de cette ligne se fera selon des règles de conception de façon à ce qu'elle fonctionne avec une impédance caractéristique égale à 50Ω . On notera également que le mode de propagation le long de cette ligne est exclusivement le mode TEM [31].

II.9.2 Adaptation

Comme le guide d'onde SIW (substrate integrated wave guide) possède sa propre impédance, et fonctionne avec un mode fondamental TE_{10} , l'adaptation du mode fondamental du guide GIS et le mode TEM de la ligne micro-ruban, et ainsi l'adaptation de l'impédance du guide à celle de la ligne est un point important pour la conception de cette structure. L'adaptation d'une antenne SIW reposera sur deux points importants : l'adaptation de l'alimentation au guide SIW et l'adaptation de l'antenne de façon à ce qu'elle raisonne sur la fréquence désirée [31].

II.9.2.1 Adaptation du guide SIW à la ligne micro-ruban [31]

Pour lier le guide d'onde SIW à la ligne micro-ruban afin que le signal électrique puisse transiter de l'alimentation vers la structure SIW, un tronçon de ligne quart d'onde est inséré connu sous le nom d'une transition micro-ruban vers SIW (Microstrip-to-SIW), pour adapter en impédance le mode fondamental du guide SIW (TE_{10}) au mode TEM se propageant dans la ligne micro-ruban. Les dimensions de cette transition seront établies selon des règles de conception qui dépendent des propriétés physiques du diélectrique choisi pour la conception d'une telle structure, on aura donc pour cette structure SIW, les dimensions suivantes :

- $W1$: la largeur de la ligne micro-ruban alimentant la structure qui sera établie de façon à avoir une impédance caractéristique de 50Ω .
- $L1$: la longueur de la ligne micro-ruban.
- $W2$: la largeur de la transition.
- $L1$: la longueur de transition.

II.19.2.2 Adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance [31]

Pour concevoir une antenne à fentes, on insèrera un réseau de fentes sur l'élément rayonnant de l'antenne (la paroi supérieure du guide SIW), de telle sorte que notre antenne fonctionne sur la bande passante micro-onde désirée, dont les dimensions seront importantes afin que l'antenne puisse raisonner sur la fréquence de coupure choisie. Les fentes vont nous permettre d'adapter l'antenne à la fréquence de résonance. La longueur des fentes notée L_s peut être obtenue par l'équation suivante :

$$L_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (\text{II. 17})$$

La dimension de la largeur de ces fentes notée W_s , est moins importante car elle n'affectera en aucun cas le fonctionnement de l'antenne sur la fréquence désirée, mais elle se doit quand même de respecter la règle suivante

$$W_s < \frac{L_s}{2} \quad (\text{II. 19})$$

II.9.3. Avantages :

- faible coût de fabrication.
- Petite taille et faible poids
- Facilité d'intégration des circuits à ondes millimétriques
- Possibilité d'intégration avec les circuits passifs comme avec les circuits actifs.
- Aucune perte de rayonnement et faible pertes de transmissions.
- Facilité de mise en œuvre.
- Facteur de qualité élevé (le rapport entre la fréquence centrale et la bande passante)
- .Excellente application large bande.

- Très bonne dispersion.
- Isolement de la plus part des modes parasites, voir élimination complète.

II.10 Conclusion :

La technologie SIW ouvre la voie à des solutions plus compactes, efficaces et performantes pour les applications, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour le développement de systèmes de communication et de traitement du signal toujours plus avancés et performants.

Chapitre III

Conception, résultats et interprétation

III.1 Introduction

La conception d'antennes capables de fonctionner dans la bande S (de 2 GHz à 4 GHz) est devenue un sujet d'intérêt majeur pour les ingénieurs en télécommunications. Cette bande est utilisée par diverses applications telles que les radars de surveillance aéroportuaire, les radars météorologiques, les radars maritimes et certains satellites de communication, notamment ceux employés par la NASA pour les communications avec la navette spatiale et la station spatiale internationale. De plus, des dispositifs tels que les appareils de diathermie médicale et les fours à micro-ondes.

Les antennes patch micro-ruban rectangulaires, en raison de leur compacité, de leur légèreté et de leur efficacité, ont contribué à susciter l'intérêt. Ces antennes sont souvent développées en utilisant des technologies émergentes telles que la technologie SIW.

Les antennes SIW à fentes sont largement utilisées dans les systèmes de communication sans fil à ondes millimétriques et les systèmes radar en raison de leurs avantages, notamment leur faible poids et leur coût réduit. Dans cette étude, nous allons concevoir une antenne SIW à fente destinée à fonctionner dans la bande S à une fréquence centrale de 2,4 GHz. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel HFSS.

III.2 Logiciel de simulation de champ électromagnétique HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Le principe de la méthode utilisée consiste à diviser l'espace d'étude en un grand nombre de petites régions (tétraèdres), puis à calculer localement le champ électromagnétique dans chaque élément. Nous avons simulé les antennes en technologie SIW à l'aide du logiciel d'Ansoft-HFSS. Le choix de ce logiciel pour notre application est justifiée. En effet, c'est un logiciel dédié à la simulation haute fréquence des circuits micro-ondes. Il s'agit d'un logiciel de simulation puissant qui permet de représenter la distribution des champs et de calculer les paramètres des structures hyperfréquences passives. Un projet HFSS est un dossier qui contient un (ou plusieurs) modèle(s) appelé(s) design. Chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et le choix des matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post traitement.

III.3 Interface principale du HFSS

L'interface principale et l'arbre de gestion du logiciel HFSS sont présentés respectivement sur les figures suivantes :

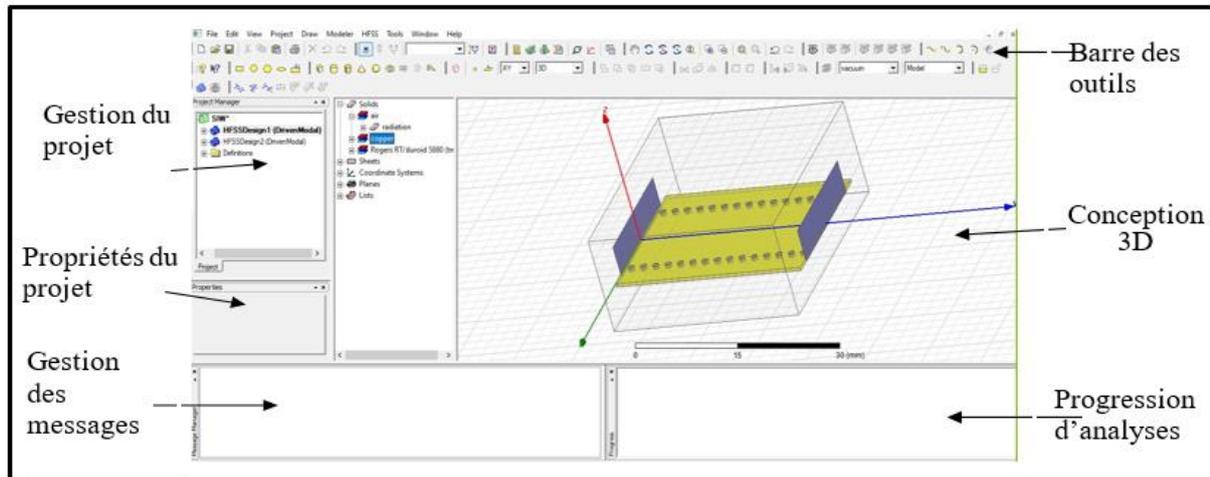


Figure III.1 : Fenêtre principal de logiciel HFSS.

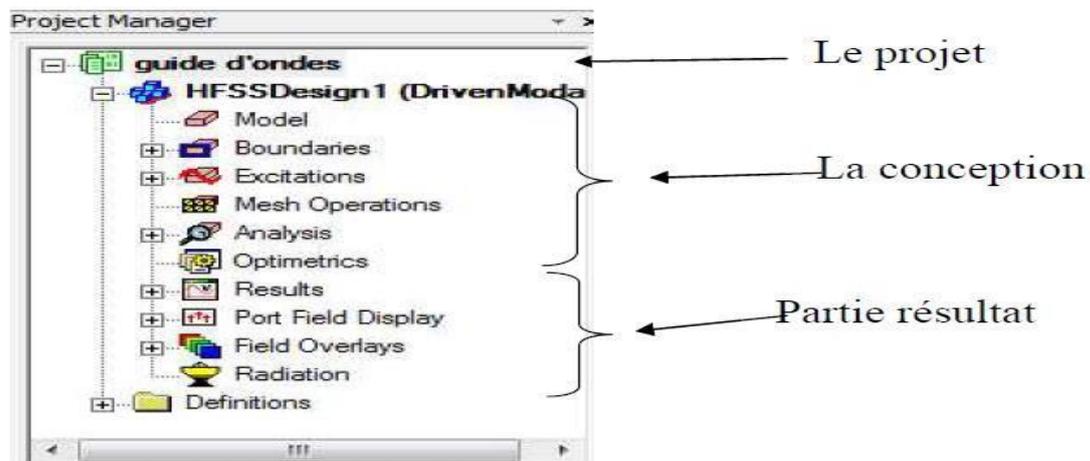


Figure III.2 : Arbre de gestion d'une structure sous HFSS.

- **Project Manager** : contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Message Manager** : permet d'afficher toutes les erreurs avant de commencer la simulation.
- **Fenêtre de Propriétés** : pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.
- **Fenêtre de Progress** : affiche les progressions de la solution.
- **Fenêtre de 3D Modeler** : contient le modèle et son arbre pour la conception active.

III.4 Simulation d'un Guide d'ondes en SIW

La figure suivante illustre la configuration du guide d'onde simulé dans le logiciel HFSS. le tableau 1 présente les divers paramètres associés au guide d'onde, calculés en référence à une fréquence de 10 GHz.

- Le substrat en « Rogers RT/duroid 5880 (tm) » avec $\epsilon_r = 2.2$.
- La hauteur du substrat sera notée $h = 0.508$ mm
- La direction de propagation selon l'axe z.

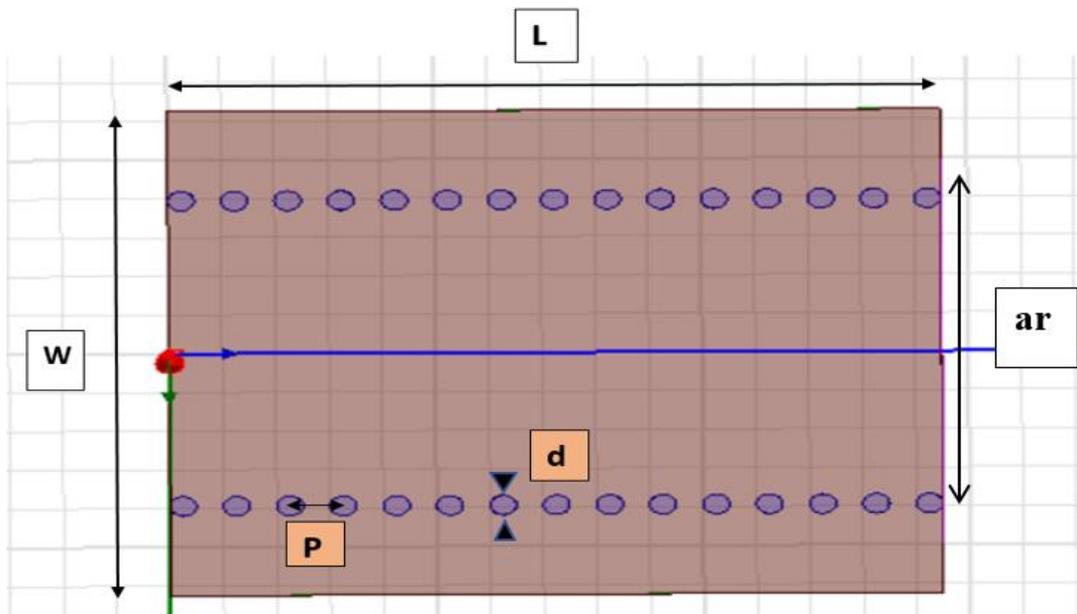


Figure III.3 : Guide d'ondes en SIW sous HFSS

Paramètres	Valeur
F_c : fréquence de coupure	10 GHz
W : largeur de substrat	25 mm
L : longueur de substrat	30 mm
h : hauteur de substrat	0.508 mm
d : diamètre de via	1 mm
P : le pas entre deux vias	2 mm
ar : longueur de port	15.77 mm

Tableau III.1 : Paramètres de structure du guide d'onde SIW

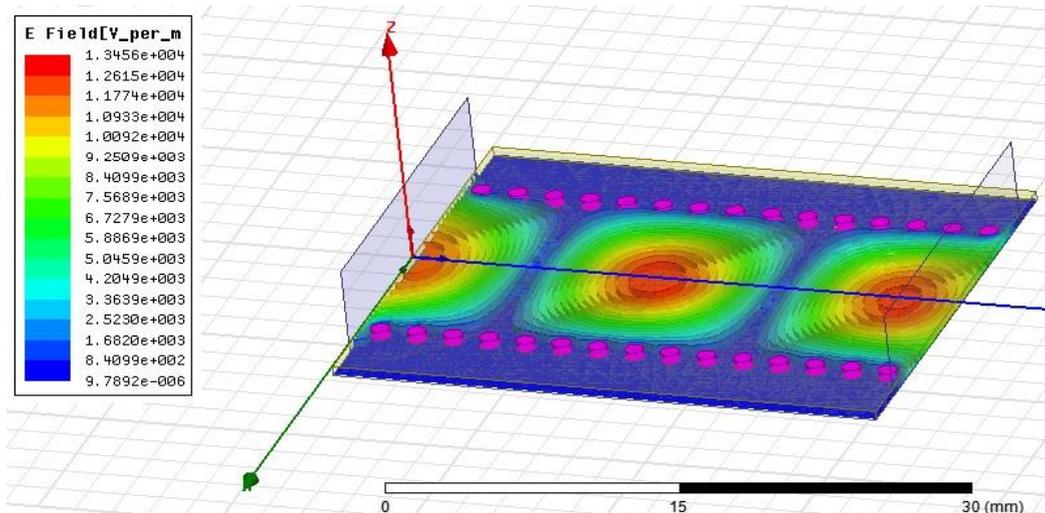


Figure III.4 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.

Suite à la conception du guide d'onde SIW avec le logiciel HFSS, la simulation numérique a révélé les puissances réfléchies à l'entrée et à la sortie, ainsi que le coefficient de transmission, comme indiqué dans la figure précédente. Cette analyse démontre un meilleur résultat de guidage avec une faible perte, comme observé dans la figure III.4. Il est remarquable que la puissance soit clairement délimitée par les deux rangées de vias, ce qui confirme l'efficacité du dispositif en matière de guidage.

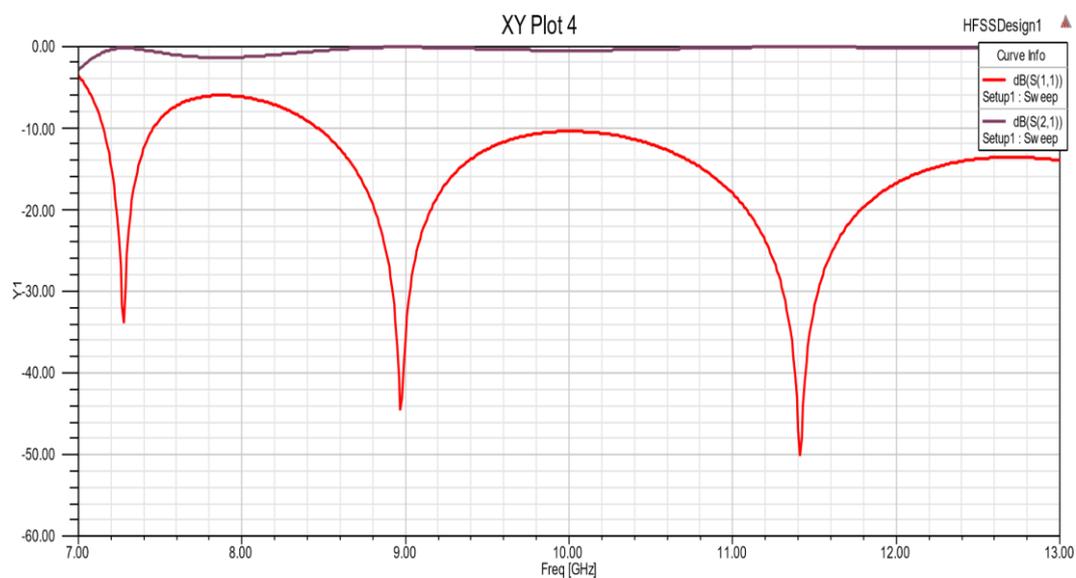


Figure III.5 : Résultats de simulation du guide SIW

Dans la figure III.5, on peut observer les valeurs du coefficient de transmission S21 et de réflexion S11 du guide SIW. Une transmission efficace jusqu'à -3 dB est remarquée, ainsi que plusieurs pics de résonance dont les niveaux descendent jusqu'à -50 dB.

III.5 Dimensions de la ligne micro-ruban et de la transition micro-ruban :

Il existe plusieurs méthodes pour alimenter une antenne patch, telles que l'utilisation d'une ligne directe, d'un câble coaxial ou d'un couplage à proximité. Dans ce projet, nous avons choisi l'alimentation directe via une ligne micro-ruban, la méthode la plus couramment utilisée. Avec les dimensions suivantes :

- $W_f = 3 \text{ mm}$ est la largeur de la ligne micro-ruban.
- $L_f = 9.51 \text{ mm}$ est la longueur de la ligne micro-ruban

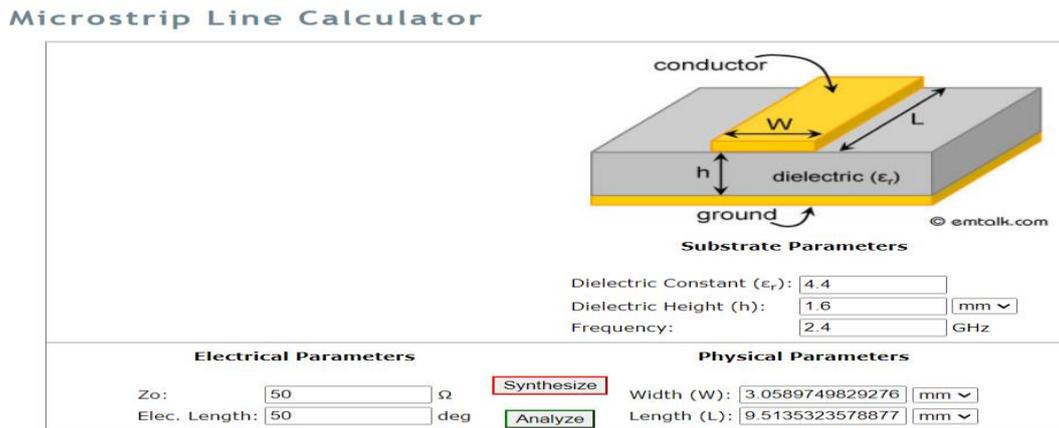


Figure III.6 : Dimensions de la ligne micro-ruban

Pour garantir une meilleure adaptation, les dimensions de la ligne de transmission utilisée pour alimenter le patch sont comme suivies :

- $W_t = 25.8 \text{ mm}$ est la largeur de la transition.
- $L_t = 14.89 \text{ mm}$ est la longueur de la transition

Ces dimensions sont calculées avec les équations suivantes :

$$L_t = \frac{\lambda_g}{4} = 14.9 \text{ mm} \tag{III.1}$$

Avec λ_g la longueur d'onde guidée :

$$\lambda_g = \frac{c}{F_c \times \sqrt{\epsilon_r}} \tag{III.2}$$

Application numérique :

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times \sqrt{4.4}} = 59.59 \text{ mm}$$

Et la largeur de la transition est 80% du largeur de patch.

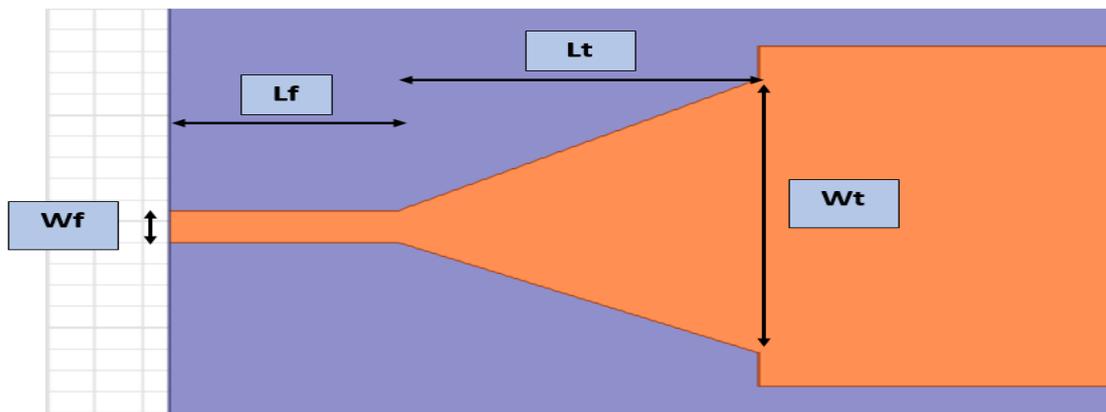


Figure III.7 : Dimensions de la ligne et la transition micro-ruban.

III.6 Antenne PATCH :

III.6.1 Dimensionnement

La structure est réalisée sur un substrat diélectrique dont les paramètres physiques sont importants pour la suite des calculs, pour la fréquence mentionnée au-dessus on prendra :

- Le substrat en FR4-epoxy avec $\epsilon_r = 4.4$.
- La hauteur du substrat sera notée $h = 1.6\text{mm}$.
- La direction de propagation selon l'axe z .

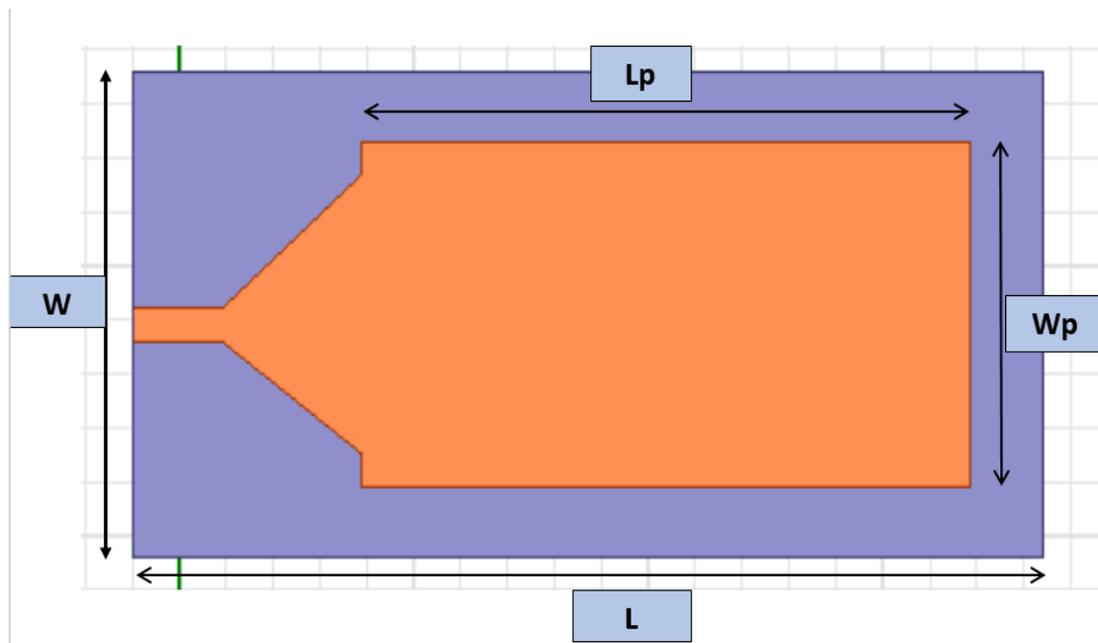


Figure III.8 : Présentation de l'antenne patch sur le substrat avec HFSS.

<u>Le paramètre</u>	<u>La valeur</u>
F_c : la fréquence de coupure	2.4 GHz
h : la hauteur de substrat	1.6 mm
L : longueur de plan de masse et substrat	97 mm
W : largeur de plan de masse et substrat	45 mm
L_p : longueur de patch	65 mm
W_p : largeur de patch	32 mm
Th : La hauteur de patch	0.017 mm

Tableau III.2 : Paramètres de l'antenne patch.

III.6.2 Résultat

Après la conception d'une antenne patch via le logiciel HFSS, la simulation numérique a produit le champ électrique de cette antenne

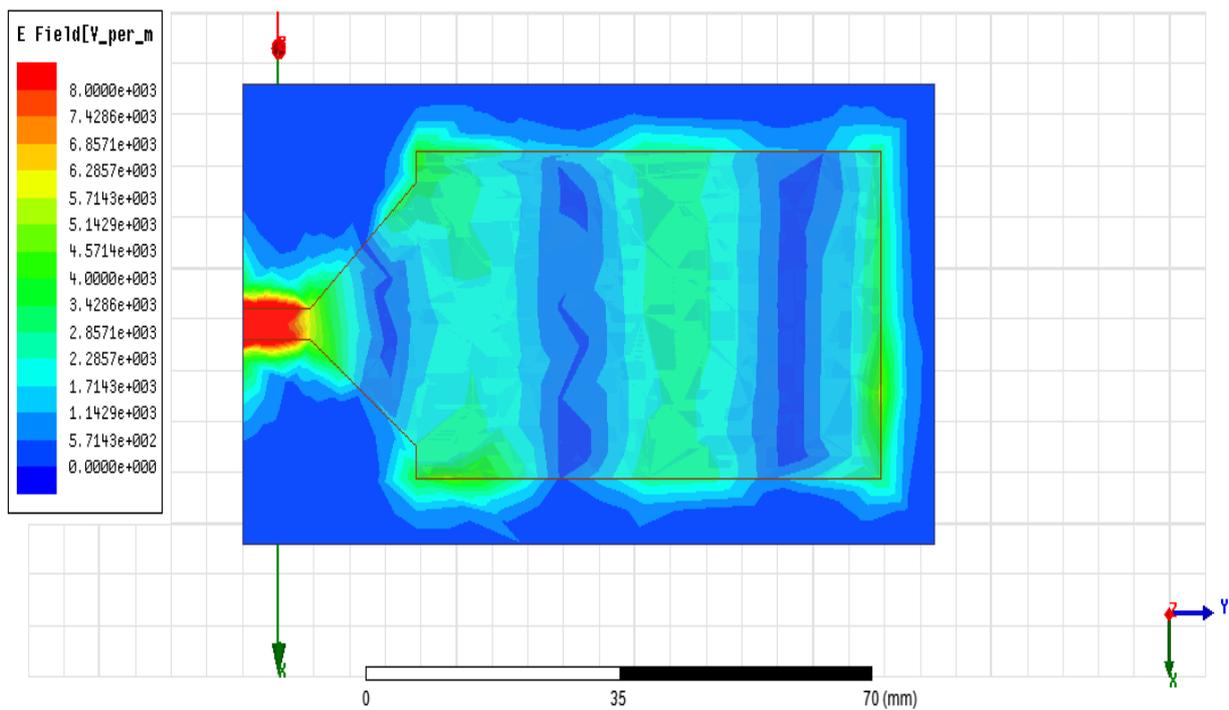


Figure III.9 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch

Le coefficient de réflexion de cette antenne est présenté dans la figure suivante.

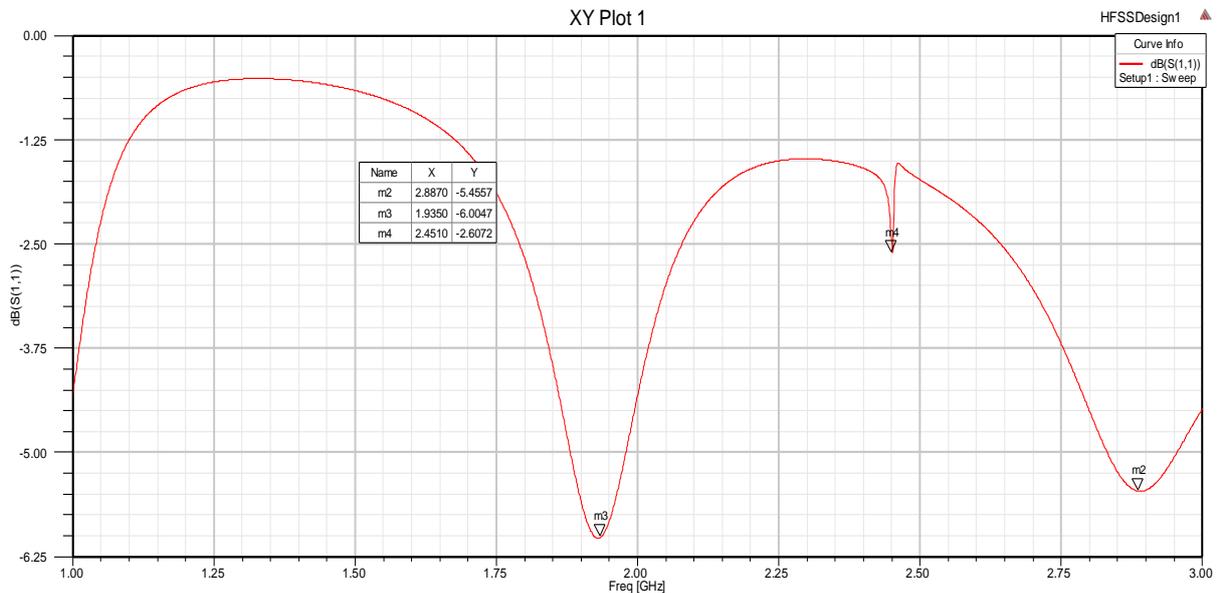


Figure III.10 : Résultats du coefficient de réflexion d’antenne patch 2.4 GHz avec HFS

Résultats	HFSS
Fréquence 1 (GHz)	1.9350 GHz
S11 (dB)	-6.0047dB
Fréquence 2 (GHz)	2.4510 GHz
S11 (dB)	-2.6072 dB
Fréquence 3 (GHz)	2.8870 GHz
S11 (dB)	-5.4557 dB

Tableau III.3 : Résultats du coefficient de réflexion de l’antenne patch

Les résultats du coefficient de réflexion révèlent l'émergence de trois fréquences de résonance distinctes, induisant ainsi trois bandes passantes séparées. Aucune des trois fréquences de résonance ne correspond à la valeur théorique prévue. De plus, la valeur de S11 (dB) est considérablement élevée.

En conséquence, des ajustements sont nécessaires sur le modèle afin de recentrer les fréquences de résonance et d'améliorer l'adaptation de l'antenne.

L'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant qui est clairement visible comme le montre la figure suivante :

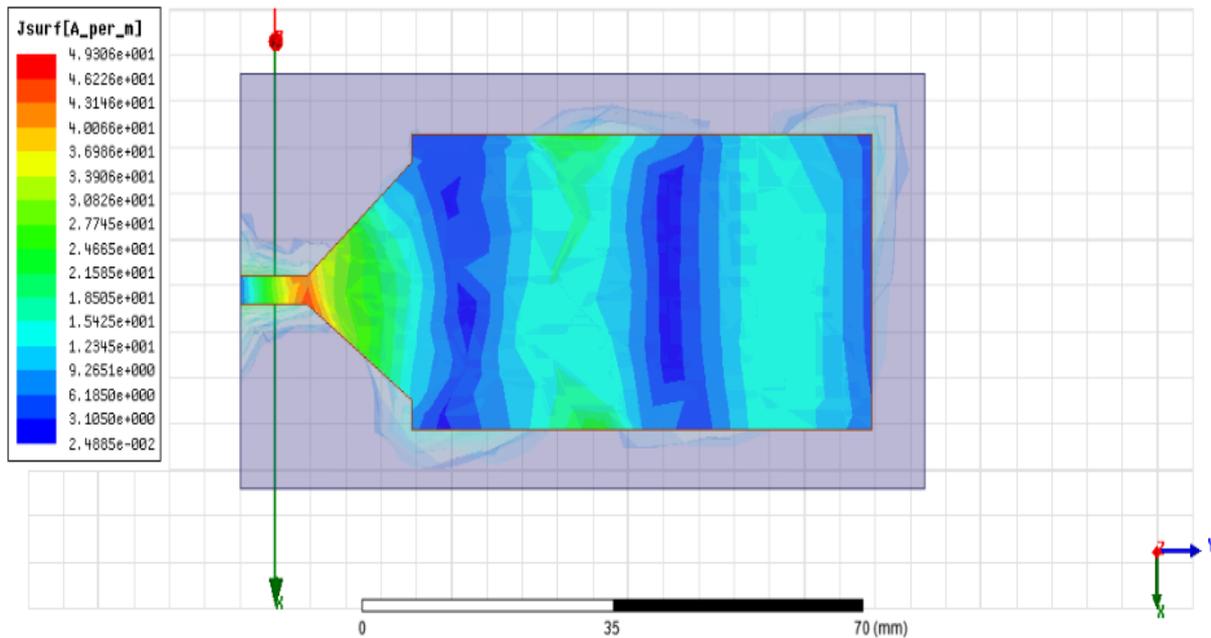


Figure III.11 : Effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d'antenne patch

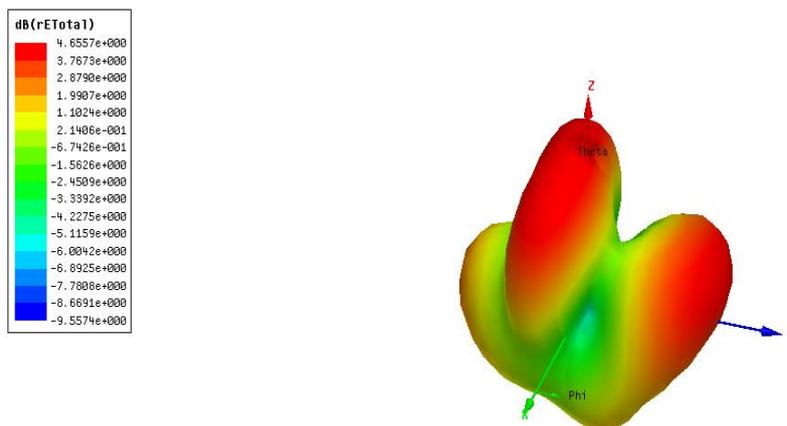


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch.

Avec le résultat obtenu du diagramme de rayonnement on remarque la présence un lobe principale. Et deux lobes secondaires qui sont indésirables et ils devraient être réduits au maximum.

III.6 Antenne PATCH SIW :**III.6.1 Dimensionnement**

Pour améliorer l'adaptation de l'antenne patch, nous envisageons d'intégrer des vias comme moyen d'ajustement.

On ajouton les vias Il est essentiel de s'assurer que ces conditions suivantes sont respectées.

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (\text{III. 3})$$

Et :

$$P > d \quad (\text{ II. 4})$$

Et :

$$P \leq 2d \quad (\text{III. 5})$$

- Diamètre des vias $d=1\text{mm}$
 - Le pas entre les vias du centre au centre $P=2\text{mm}$.
 - L'espace entre les deux rangées de vias $a_{\text{SIW}} = 30.32\text{mm}$.
 - La largeur d'un guide rectangulaire rempli par un diélectrique de permittivité $a_{\text{RWG}} = 29.796\text{mm}$.
- Les paramètres sont calculés grâce aux équations indiquées dans lapartie théorique comme suit :
- La largeur d'un guide d'onde rempli par un substrat est calculée par l'équation suivante :

$$a_{\text{RWG}} = \frac{c}{2 \times \sqrt{\epsilon_r} \times Fc} \quad (\text{III. 6})$$

Application numérique :

$$a_{\text{RWG}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times \sqrt{4.4} \times 2.4 \times 10^9} = 29.796 \text{ mm}$$

- La largeur du guide SIW sera :

$$a_{\text{SIW}} = a_{\text{RWG}} + \frac{d^2}{0.95 \times P} \quad (\text{III. 7})$$

Application numérique :

$$a_{SIW} = 29.796 + \frac{1^2}{0.95 \times 2} = 30.32 \text{ mm}$$

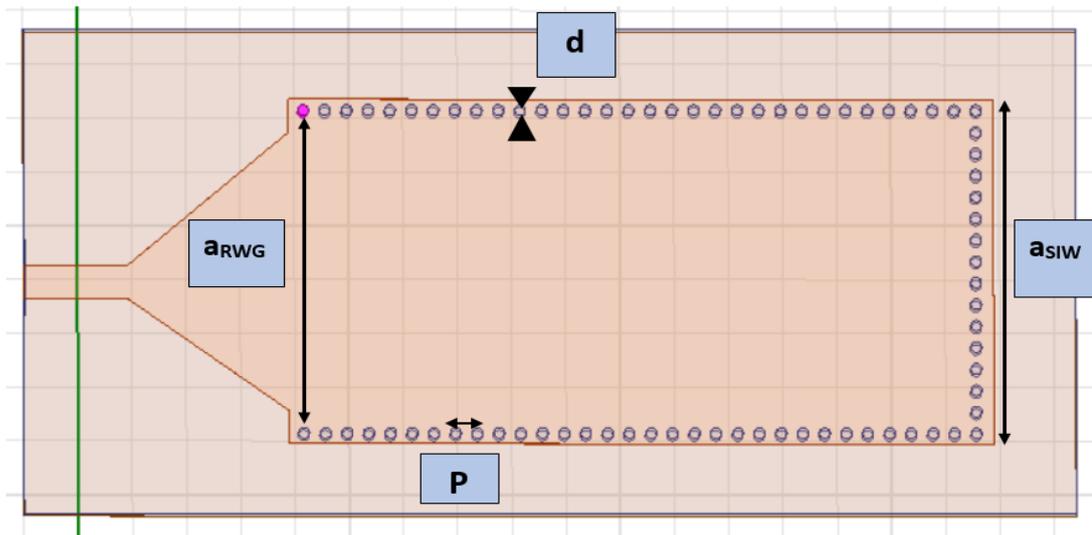


Figure III.13 : Présentation de l’antenne patch SIW sur le substrat avec HFSS.

III.6.2 Résultat

Après la conception d'une antenne patch SIW via le logiciel HFSS, la simulation numérique a produit l'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant est clairement visible comme le montre la figure suivante :

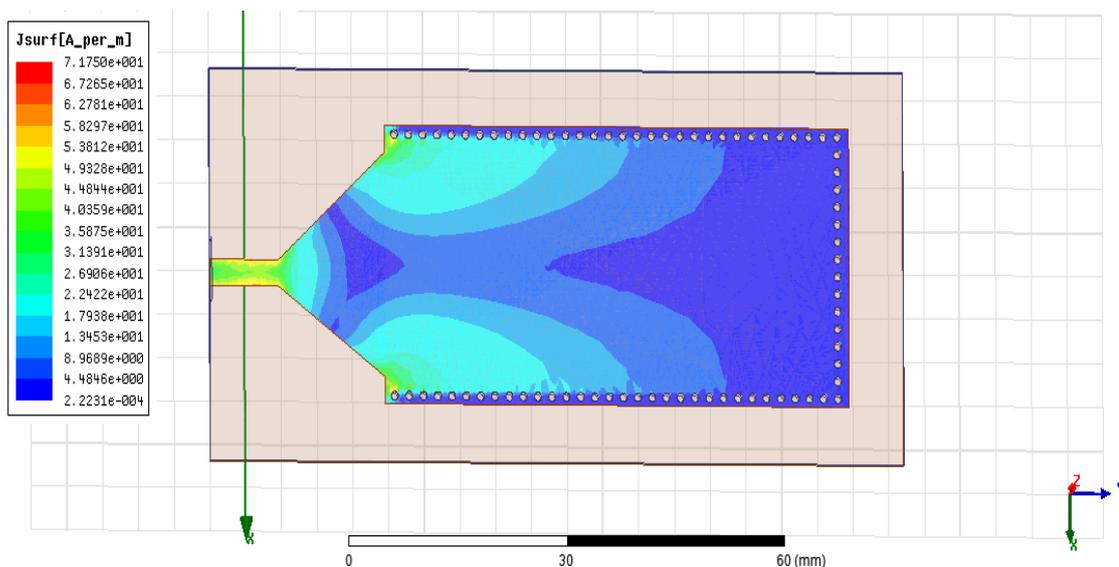


Figure III.14 : l'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d'antenne patch

Coefficient de réflexion de cette antenne est présenté dans la figure suivante.

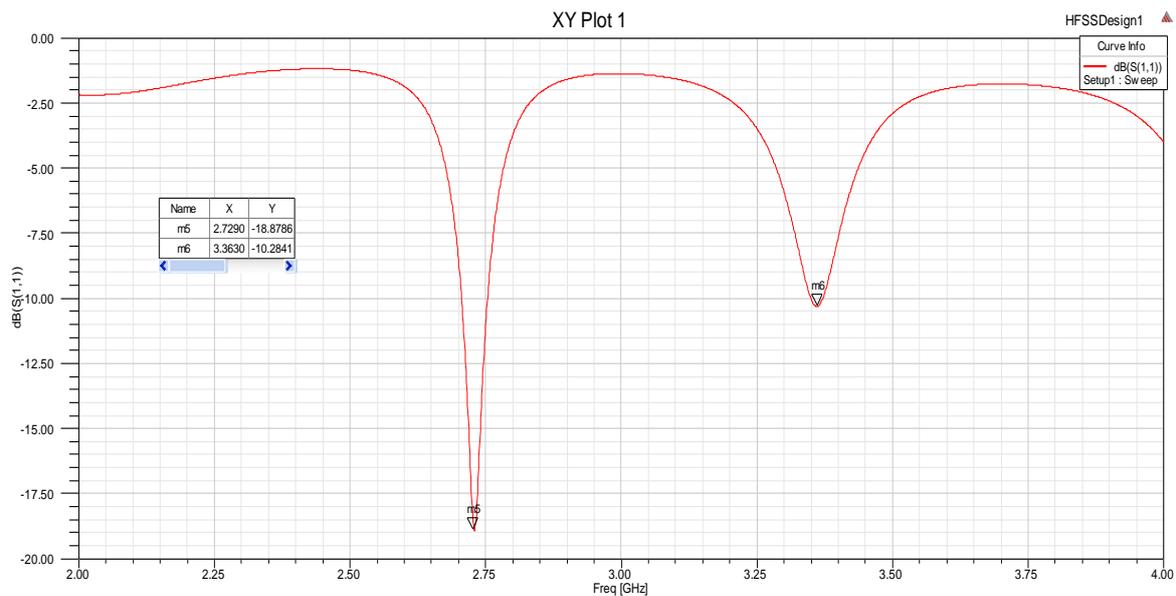


Figure III.15 : Coefficient de réflexion d’antenne patch SIW 2.4 GHz avec HFSS

Résultats	HFSS
Fréquence 1 (GHz)	2.7290
S11 (dB)	-18.8786
Fréquence 2 (GHz)	3.3630
S11 (dB)	-10.2841

Tableau III.4 : Résultats du coefficient de réflexion de l’antenne patch SIW.

Le résultat obtenu, représenté par la figure III.15, est assez intéressant et montre un effet remarquable de l’intégration des vias sur l’antenne. On observe ainsi une amélioration de l’adaptation de l’antenne et une augmentation des bandes passantes des deux fréquences de résonances.

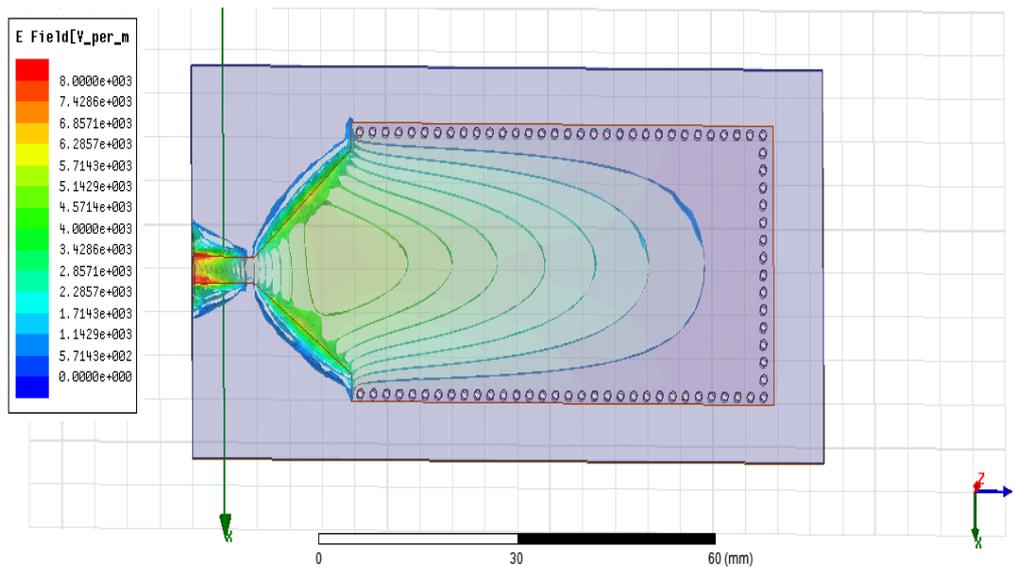


Figure III.16 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW.

La figure III.14 montre le phénomène de distribution du champ électrique du mode TE₁₀ guidé dans l'antenne patch SIW. Nous remarquons que le champ est bien localisé et délimité par les deux rangés des Vias métalliques. Comme nous observons que l'adaptation est acceptable

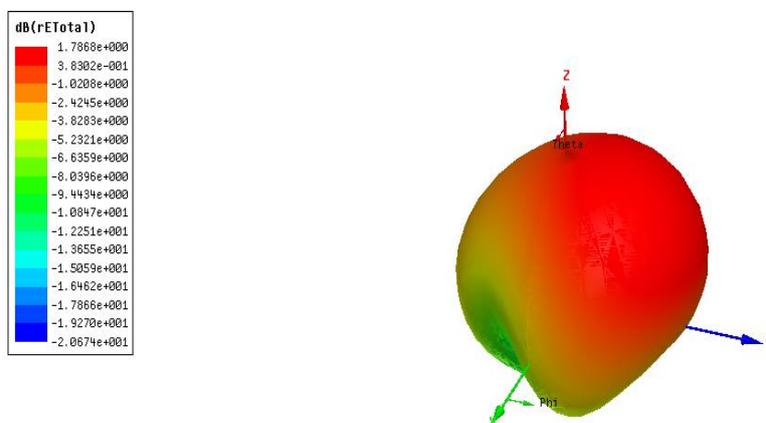


Figure III.17 : Le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW.

Avec le résultat de diagramme de rayonnement on remarque la réduction des lobes secondaires

III.7 Antenne PATCH SIW à fente :

III.7.1 Dimensionnement

L'antenne SIW à fente est conçue pour résonner à la fréquence 2.4 GHz en bande S comme tout projet, la conception de cette structure doit être codifiée dans un cahier de charge qu'on effectuera à partir de l'objectif qu'on s'est fixé au début, c'est-à-dire de telle sorte qu'elle puisse fonctionner à 2.4 GHz.

Les dimensions des fentes sont importantes pour que l'antenne se comporte comme une antenne à fente. Les dimensions des fentes peuvent être obtenues avec l'aide des relations suivantes :

$$L_s = \frac{\lambda_c}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (\text{III. 3})$$

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \quad (\text{III. 4})$$

Application numérique :

$$\lambda_c = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 125 \text{ mm}$$

$$L_s = \frac{125}{\sqrt{2(4.4 + 1)}} = 38 \text{ mm}$$

La dimension de W_s n'a pas beaucoup d'importance mais devrait être inférieure à la moitié de L_s .

La figure suivante représente les dimensions de fente, ainsi que son emplacement sur la structure

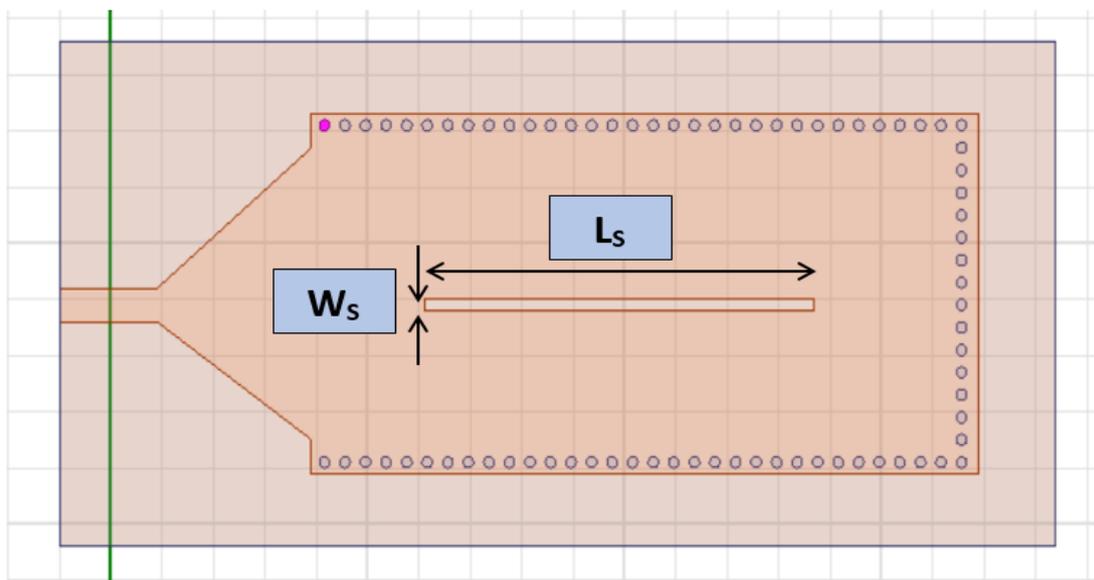


Figure III.18 : Présentation de l'antenne patch SIW à fente sur le substrat avec HFSS.

III.7.2 Résultat

Après la conception d'une antenne patch SIW à fente avec le logiciel HFSS, la simulation numérique a produit le champ électrique qui est présenté dans la figure suivante :

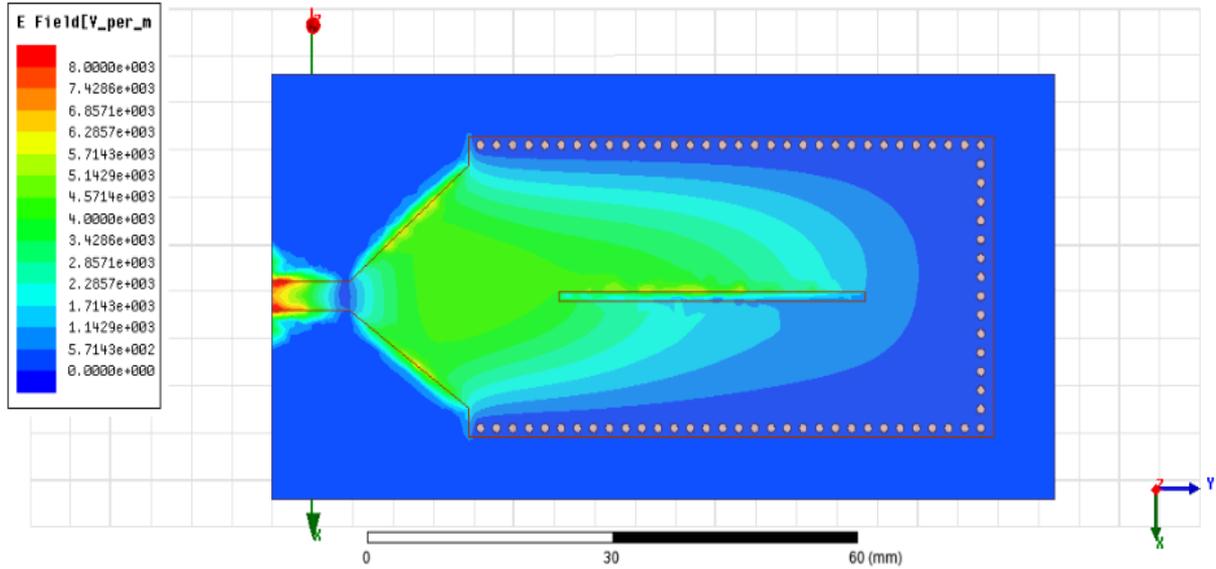


Figure III.19: Distribution du champ électrique de d'antenne patch SIW à fente

Le coefficient de réflexion. Qui est présenté dans la figure suivante.

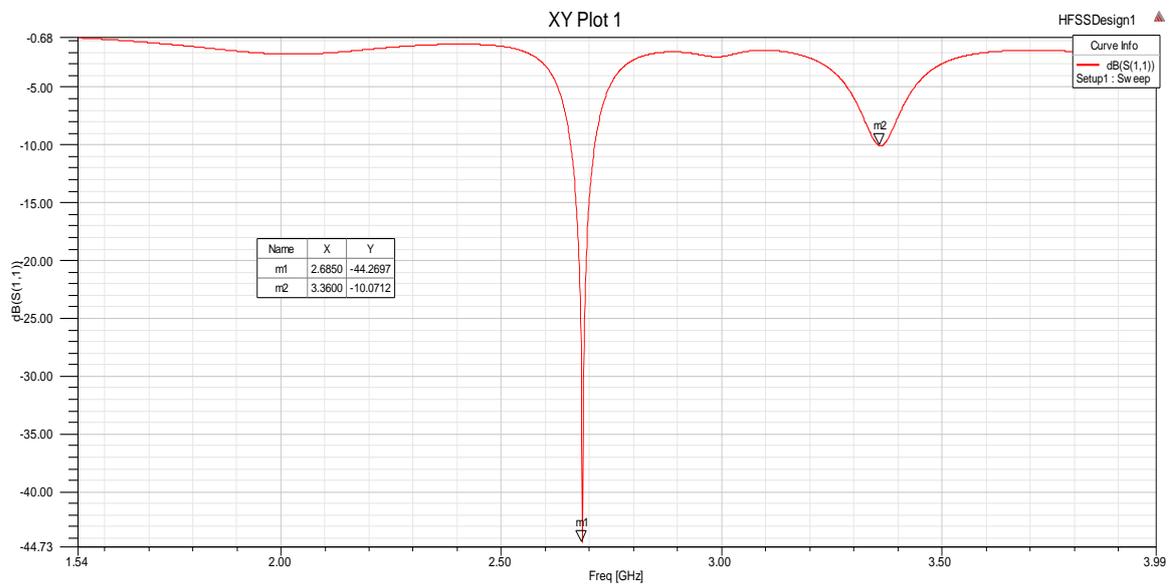


Figure III.20 : Résultats du coefficient de réflexion d'antenne patch SIW à fente 2.4 GHz avec HFSS

Résultats	HFSS
Fréquence 1 (GHz)	2.6850
S11 (dB)	-44.2697
Fréquence 2 (GHz)	3.3600
S11 (dB)	-10.0712

Tableau III.5: Résultats du coefficient de réflexion de l’antenne patch SIW à fente.

Il est notable l'apparition de deux fréquences de résonance et donc deux bandes passantes. La fréquence qui attire davantage notre attention est celle située aux alentours de 2,4 GHz. De plus, nous observons une amélioration de l'adaptation et les bandes passantes est plus large après l'ajout de fentes.

L’effet de proximité sur la distribution de la densité de courant qui est clairement visible comme le montre la figure suivante :

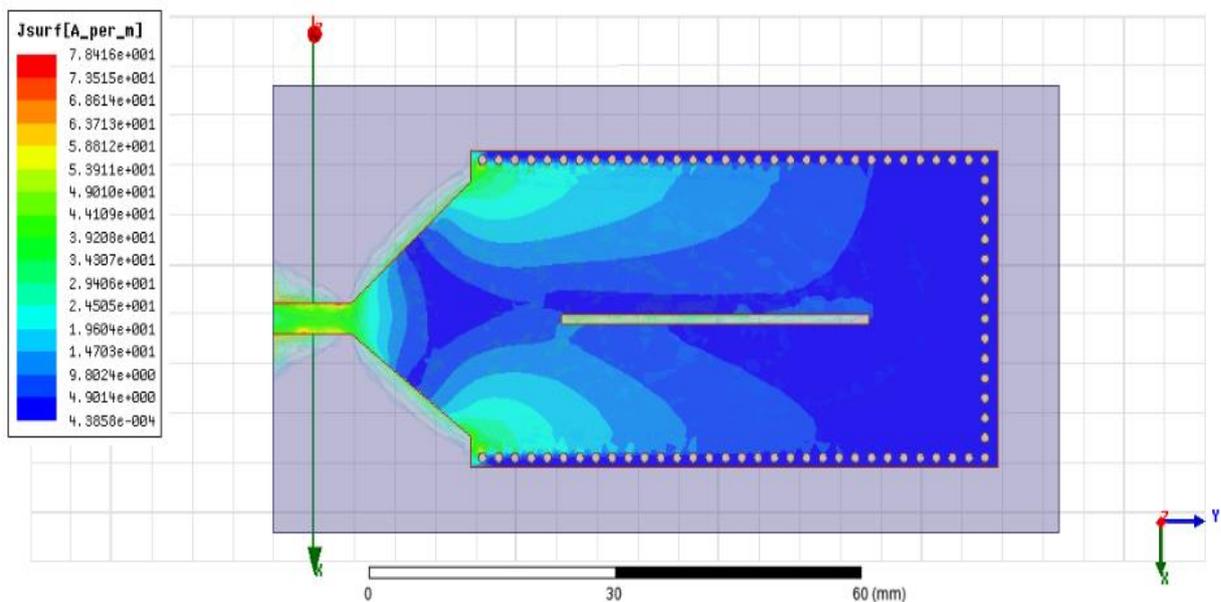


Figure III.21: Effet de proximité sur la distribution de la densité de courant d’antenne patch SIW à fente

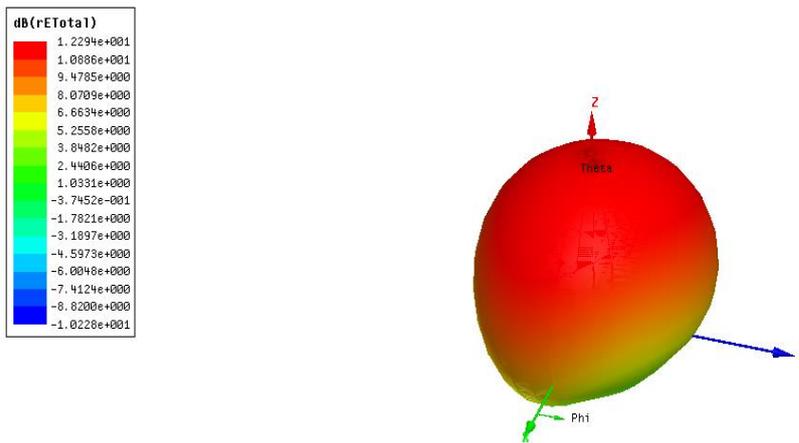


Figure III.22 : Le diagramme de rayonnement en 3D de l’antenne patch SIW à fente.

Avec le résultat de diagramme de rayonnement on remarque qu’il est le plus similaire à le diagramme omnidirectionnel.

Les résultats des simulations ont été mis sur un même graphe grâce au logiciel Matlab.

La figure suivante nous permet d’observer les résultats des trois antennes et de les comparer :

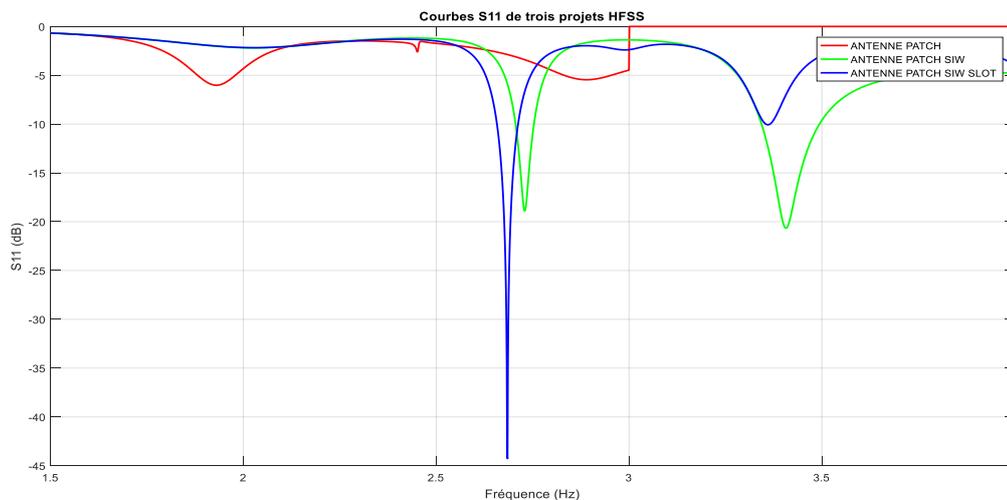


Figure III.23 : Résultats du coefficient de réflexion des 3 antennes 2.4 GHz avec HFSS.

Avec les résultats obtenus nous pouvons dire que cette antenne patch SIW à fente est mieux adopté à la fréquence 2.68 GHz qu’à la fréquence 2.4 GHz.

III.8 Conclusion :

En utilisant la technologie SIW et l’ajout de fente, nous pouvons améliorer l’efficacité de l’antenne par rapport à l’antenne patch micro ruban conventionnelle. Dans ce projet, nous avons vu l’effet

de la technologie SIW et de la fente sur l'antenne patch micro ruban. Grâce à l'utilisation du SIW et slot, nous pouvons améliorer l'adaptation et la bande passante.

Le diagramme de rayonnement est également amélioré. Grâce à l'ajout d'un SIW et d'une fente à l'antenne patch micro ruban, elle peut être utilisée dans de nombreuses applications

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce manuscrit se concentre sur l'étude et la conception des antennes dans le domaine des hyperfréquences, en explorant une nouvelle technologie émergente appelée guide d'onde intégré au substrat.

SIW est vantée pour ses nombreux avantages en termes de performances élevées et de rapport qualité-prix, est de plus en plus utilisée dans le domaine radioélectrique. Les ingénieurs en télécommunication cherchent actuellement à optimiser les performances des composants des systèmes de communication tout en réduisant les coûts de fabrication, un objectif que la technologie SIW promet d'offrir, même pour les composants destinés aux fréquences les plus élevées.

Cette technologie, compacte et légère, a été appliquée avec succès sur divers composants actifs (transistors, amplificateurs) et passifs (antennes, filtres) en raison de sa facilité d'intégration. Dans ce mémoire, l'attention est portée sur une antenne planaire, un choix stratégique en raison de sa facilité de mise en œuvre.

Le travail élaboré sur ce projet est la conception d'une antenne SIW à fentes pour fonctionner à une fréquence 2.4 GHz, un domaine fréquentiel qui ne cesse de susciter la curiosité des ingénieurs, cette problématique a été sélectionnée car elle révèle un souci majeur dans le domaine de la télécommunication moderne. Une étude est réalisée sur cette structure selon les paramètres des fentes d'une part et les paramètres de la technologie SIW d'une autre part.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Oualli, L « Simulations des antennes sous HFSS » mémoire de master présentée à l'université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.
- [2] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/technologie-antenne-398/>
Consulté 12/2023.
- [3] <https://sitelec.org/download.php?filename=cours/antennes2.pdf> consulté 1/2024
- [4] Odile Picon et coll. Livre « les Antennes Théorie, conception et applications » Préface de Maurice Bellanger
- [5] radioamateur.ca « Les types de polarisation d'antenne Par Martin VE2BQA ».
- [6] BELMESSAOUD Dj « étude de nouvelles antennes planaires en tenant compte des surfaces sélectives en fréquence » thèse de doctorat université Msila 2020.
- [7] Sophie, V : « Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO », Thèse de Doctorat présentée à l'université de Provence - Aix-Marseille I, 2007. Français.
- [8] Benabdelhak Meriem Chahinez « Conception et étude paramétrique d'une antenne patch SIW à fentes dans la bande Ku » mémoire de master présentée à l'université de Bejaia 2018/2019.
- [9] Farah Bassma, Mezhoud Maroua « Effet de l'insertion des fentes dans l'élément rayonnant sur les caractéristiques des antennes planaires » mémoire master présentée à l'université de Tébessa 2020/2021
- [10] Hemmas Mohamed Abdrraouf , Ben Alia Mohamed Amin ; Bey Aymen Baha Eddine « Conception et Simulation d'une Antenne » mémoire de master présentée à l'université de Bordj Bou Arreridj 2020/2021.
- [11] Gandoura Intisbem, Lamer Soumia « conception et réalisation des antennes fractales imprimées ultra large bande (ULB) à bande rejetée » mémoire de master présentée à l'université de Guelma 2012
- [12] Hadj Slimene Zahra, « Conception d'antenne planaire à haute fréquence pour les applications 5G. » mémoire de master présentée à l'université de Telemcen 2020/2021
- [13] Daouia BELGUELLAOUI « Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire » mémoire master présentée à l'université de Msila 2015/2016
- [14] Christian Wolff, les principes du radar « revue »
- [15] Enrique AJ Marcetili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. Bell Labs Technical Journal, 48(7):2071-2102, 1969.

- [16] Rupert F Oulton, Volker J Sorger, Guy Bartal, and Xiang Zhang. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long range propagation. In *Plasmonics and Metamaterials*, page MTuD3. Optical Society of America, 2008.
- [17] Mark I Stockman. Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides. *Physical review letters*, 93(13) :137404, 2004.
- [18] F. Meriche, « Structuration 1D et 2D de matériaux diélectriques par ablation laser nanoseconde » : Applications aux couches minces et monocristaux de LiNbO₃ et couches minces de TiO₂ Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [19] D. Grenier, « Electromagnétique et transmission des ondes » Département de génie électrique et de génie informatique université de laval Québec 2012
- [20] BOUBEKRI faycal, CHIKHA AMARA saliha «étude et dimensionnement d ‘un guide d’ onde en arête a base de materiau» mémoire de master présentée à l’université de ouergla, 2013/2014
- [21] <https://fr.fabmann-jp.com/waveguide/rigid-rectangular-waveguide-tube-copper.html>
Consulté on 02/2024
- [22] J. C. Slater Article : "Theory of Waveguides" , Revue : Journal of Applied Physics
- [23] J. C. Zhang, Y. Z. Yin and S. F. Zheng, “Double Screen FSSs with Multi-Resonant Elements for Multiband, Broadband Applications ”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.23, pp. 2209-2218, 2009
- [25] fellah benzerga « étude et conception des réseaux d’antenne a ouverture progressive pour imagerie passive et technologie siw modélisation par la methode » Thèse de Doctorat présentée à l’université de Tlemcen 2016
- [26] m. bozzi1 a. georgiadis2 k. wu3, "review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas", vol. 5, iss. 8, pp.909–920, 2011.
- [27] S. Beer, "Recent Advances in Substrate Integrated Waveguide (SIW) Technology and Its Applications," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2008.
- [28] J. Xu, K. Wu, and M. C. E. Yagoub, "Full-wave analysis of substrate integrated waveguide structures using the boundary integral-resonant mode expansion method," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 7, pp. 1689-1695, July 2008..
- [29] X. Wang, Y. Zhang, and K. Wu, "Substrate integrated waveguide circuits and antennas," John Wiley & Sons, 2019.
- [30] NOURI Keltouma, « Conception, réalisation et caractérisation de filtres et de duplexeurs en technologies guides d’ondes et SIW application aux systèmes de communications » Thèse de doctorat présenté à l’université de Tlemcen 2008

[31] : D.Deslandes, K.Wu, "Accurate modeling, wave mechanisms, and desing consideration of a substrate integrated wave guide ", IEEE Trams.on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54, pp : 2516-2526.