

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 : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Présenté par :

FEKIR Samah

LARACHI Rania

Etude de l'influence des Vias sur la performance d'un guide d'onde SIW

Encadré par :

Dr. Rédha Bendoumia

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude à Allah le Tout-Puissant pour nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons adresser nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur **Rédha Bendoumia**, pour sa proposition et sa direction précieuse, ainsi que pour sa patience et ses conseils avisés qui ont grandement contribué à l'avancement de notre projet.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail de master.

Nous exprimons notre reconnaissance envers tous les enseignants de notre département d'électronique et des télécommunications pour leur contribution à notre formation.

Enfin, nous voulons exprimer notre profonde gratitude et notre sincérité envers nos parents, dont le soutien, l'éducation et les sacrifices tout au long des années ont été les fondements de notre succès.

Je dédie ce travail

À ma très chère mère qui a été chaleureusement présente avec beaucoup de tendresse dans les moments les plus difficiles et qui m'a entouré de chaleur pleine de sacrifice pour ma réussite.

À mon père pour son soutien .

À mes sœurs **Amina** ,**Nesrine** et **Radia** .

À mes amies **Manel** ,**Anissa**.

À tous mes meilleures amies vrais chacun son nom.

À tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui me sont chers

FEKIR SAMAH

Je dédie ce modeste travail, à mes parents, à ma source de
générosité
Et de patience tout au long de ma carrière scolaire. Que Dieu vous
protèges, vous prêtez bonne santé et longue vie.

A mes frères et sœurs et sa petite famille, qui m'ont toujours
indiqué
La bonne voie et qui ont su m'aider.

Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon cursus
universitaire,

À mes amies pour ses encouragements Permanents, et son soutien

Larachi Rania

نظراً للمميزات الجذابة لتقنية الدليل الموجي المدمج للركيزة في تصميم مكونات الموجات الميكروية والموجات المليمترية، فقد أصبحت مرشحة مثالية لتصميم الدليل الموجي الذي يمكن دمجه بسهولة مع الأنظمة المستوية الأخرى أو تلك القائمة على الدليل الموجي المدمج للركيزة. يركز هذا البحث على تحليل تأثير الموجهات الموجية المدمجة على الموجات الميكروية والموجات المليمترية، ويفحص بالتفصيل مختلف المعلمات المتعلقة بالموصلات الموجية مثل قطرها وتباعدها والمسافة بين الصفوف من تسهم هذه الدراسة إسهاماً كبيراً في فهمنا للتفاعلات بين SIW. أجل تقييم تأثيرها على الخصائص الرئيسية للموجه الموجي ، مما يمهد الطريق أمام التحسينات المحتملة في تصميم أنظمة الاتصالات باستخدام هذه الموجات SIW الشقوق والدليل الموجي المتكاملة.

كلمات المفاتيح: HFSS; الدليل الموجي; SIW

Résumé :

En raison des caractéristiques attrayantes de la technologie SIW (guide d'ondes intégré au substrat) dans la conception des composants micro-ondes et des ondes millimétriques, elle est devenue une candidate idéale pour la conception de guide d'onde facilement intégrables avec d'autres systèmes planaires ou ceux basés sur le guide d'ondes SIW. Cette recherche se concentre sur l'analyse de l'effet des guides d'ondes intégrés sur les ondes micro-ondes et millimétriques, et examine en détail divers paramètres liés aux Vias, tels que leur diamètre, leur espacement et la distance entre les rangées, afin d'évaluer leur impact sur les principales caractéristiques du guide d'ondes SIW. Cette étude contribue de manière significative à notre compréhension des interactions entre les Vias et le guide d'ondes SIW, ouvrant ainsi la voie à des améliorations potentielles dans la conception des systèmes de communication utilisant ces guides d'ondes intégrés

.Mots clés :SIW ; Guide d'onde ;HFSS.

Abstract:

Due to the attractive features of SIW (Substrate Integrated Waveguide) technology in the design of microwave and millimeter-wave components, it has become an ideal candidate for the design of microwave couplers that can be easily integrated with other planar systems or systems based on the SIW waveguide. This research focuses on analyzing the effect of integrated waveguides on microwave and millimeter waves, and examines in detail various parameters related to the Vias, such as their diameter, spacing, and the distance between rows, in order to assess their impact on the main characteristics of the SIW waveguide. This study significantly contributes to our understanding of the interactions between the Vias and the SIW waveguide, thus paving the way for potential improvements in the design of communication systems using these integrated waveguides.

Keywords : SIW ; waveguide ; HFSS .

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les guides ondes	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition du guide d'onde.....	4
I.3 Equations générales des guides d'onde.....	5
I.3.1 Equations de maxwell.....	5
I.3.2 Equations de propagation.....	6
I.4 Evolution des guides d'ondes.....	6
I.5 Principe de fonctionnement du guide d'onde.....	7
I.6 Types du guide d'onde.....	7
I.6.1 Guide d'one planaire.....	7
I.6.2 Guide d'onde rectangulaire.....	8
I.6.3 Guide d'onde circulaire.....	8
I.6.4 Guide d'onde Fibre optique.....	9
I.6.5 Guide d'onde diffuse.....	10
I.7 Utilisation du guide d'onde	10
I.8 Antennes.....	11
I .8.1 Types des antennes.....	12
I .8.1.1 Antennes filaires.....	12
I .8.1.2 Antennes fentes.....	13
I .8.1.3 Antennes microrubans.....	13
I .9 Diviseur de puissance.....	13
I .9.1 Quelques types de diviseurs de puissance.....	14
I .9.1.1 Diviseur résistif adapté.....	14

I.9.1.2 Diviseur de Wilkinson.....	14
I.9.1.3 Diviseur de Gysel	15
I.10 Coupleur.....	15
I.10.1 Quelques types de coupleur.....	15
I.10.1.1 Coupleurs passifs planaires.....	15
I.10.1.2 Coupleurs à lignes couplées.....	15
I.10.1.3 Coupleur de Lange.....	16
I.11 Conclusion.....	16

Chapitre II : Technologie SIW

II.1 Introduction.....	18
II.2 Définition du SIW.....	18
II.3 Historique.....	19
II.4 Principe de SIW.....	19
II.5 Paramètres d'un guide d'onde SIW.....	19
II.6 Méthodes numérique utilisées pour la conception de circuits SIW.....	21
II.6.1 Méthode des Moments.....	21
II.6.2 Méthode des différences finies.....	21
II.6.3 Méthode des éléments finis.....	22
II.7 Quelque exemple des circuits à base de SIW.....	22
II.7.1 Circuits passifs à base de SIW.....	22
II.7.2 Circuits actifs à base de SIW.....	23
II.7.3 Antennes à base de SIW.....	23
II.8 Règles de conception à base de SIW.....	24
II.9 Avantages et inconvénients de la technologie SIW.....	25
II.10 Conclusion.....	25

Chapitre III : Conception et simulation des guides d'onde SIW

III.1 Introduction.....	27
III.2 Logiciel de simulation HFSS.....	27
III.2.1 Présentation du logiciel.....	27
III.2.2 Méthode des éléments finis (FEM).....	28
III.2.3 Installation.....	28
III.2.4 Interface HFSS.....	28
III.2.5 Processus de fonctionnement de HFSS.....	29
III.3 Simulation d'un Guide d'ondes en SIW.....	32
III.4 Conception d'un guide d'onde SIW.....	32
III.4.1 Guide d'onde SIW avec $D = 1$ mm.....	32
III.4.1.1 Structure 1.....	32
III.4.1.2 Structure 2.....	34
III.4.1.3 Structure 3.....	36
III.4.1.4 Comparaison entre les trois structures avec $D=1$ mm.....	37
III.4.2 Guide d'onde SIW avec $D = 0.66$ mm.....	38
III.4.2.1 Structure 4.....	38
III.4.2.2 Structure 5.....	39
III.4.2.3 Structure 6.....	41
III.4.2.4 Comparaison entre les trois structures avec $D=0.66$	42
III.4.3 Comparaison entre $D=1$ et $D=0.66$	43
III.5 Conclusion.....	43
Conclusion Générale	45
Bibliographie.....	46

Chapitre I : Généralités sur les guides ondes

Figure I.1 : Guide d'onde.....	7
Figure I.2 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire.....	8
Figure I.3 : Représentation Graphique d'un guide d'onde rectangulaire de dimensions a et b.....	8
Figure I.4 : Représentation Graphique d'un guide d'onde circulaire.....	9
Figure I.5 : Représentation Graphique d'un guide d'onde fibre optique.....	9
Figure I.6 : Représentation Graphique d'un guide d'onde diffuse.....	10
Figure I.7 : Rayonnement d'une antenne.....	12
Figure I.8 : Antenne dipôle, circulaire, hélice.....	12
Figure I.9 : Antennes à fentes.....	13
Figure I.10: Diviseur de puissance résistif adapté	14
Figure I.11 : Diviseur de Wilkinson à deux voies de puissances égales.....	14
Figure I.12 : Diviseur de puissance de Gysel bidirectionnel	15
Figure I.13 : Géométrie d'un coupleur à ligne couplées.....	16
Figure I.14 : Géométrie d'un coupleur de Lange.....	16

Chapitre II : technologie SIW

Figure II.1 : Structure d'un guide SIW avec ses paramètres	18
Figure II.2 : Exemple d'une structure en technologie SIW.....	19
Figure II.3: Maillage cartésien pour la méthode FDTD.....	22
Figure II.4 : Exemples des circuits passifs SIW.....	23
Figure II.5: Oscillateur SIW	23
Figure II.6: Antennes SIW.....	24

Chapitre III : Conception et simulation des guides d'onde SIW

Figure III.1 : Logo HFSS.....	27
Figure III.2 : Fenêtre principale du HFSS.....	28

Figure III.3 : Processus HFSS.....	30
Figure III.4 : Guide d'ondes en SIW.....	30
Figure III.5 : Structure du guide SIW	30
Figure III.6 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.....	31
Figure III.7 : Résultats de simulation du guide SIW.....	31
Figure III.8 : Guide d'onde SIW avec les Paramètres.....	32
Figure III.9 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	33
Figure III.10 : Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW.....	33
Figure III.11 : Résultats de simulation du un guide d'onde SIW.....	34
Figure III.12 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	34
Figure III.13: Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW	35
Figure III.14: Résultats de simulation du un guide d'onde SIW.....	35
Figure III.15 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	36
Figure III.16 : Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW	36
Figure III.17 : Résultats de simulation du un guide d'onde SIW	37
Figure III.18 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	38

Figure III.19 : Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW	38
Figure III.20 : Résultats de simulation du un guide d'onde SIW	39
Figure III.21 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	39
Figure III.22 : Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW	40
Figure III.23: Résultats de simulation du un guide d'onde SIW	40
Figure III.24 : Structure d'un guide d'onde SIW.....	41
Figure III.25 : Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW	41
Figure III.26 : Résultats de simulation du un guide d'onde SIW	42

Tableau II.1 : les Avantages et inconvénients de la technologie SIW.....	25
Tableau III.1 : Paramètres du guide d'onde SIW	30
Tableau III.2 : Paramètres du guide d'onde SIW pour la 1 ^{ème} structure	33
Tableau III.3: Paramètres du guide d'onde SIW pour la 2 ^{ème} structure	35
Tableau III.4: Paramètres du guide d'onde SIW pour la 3 ^{ème} structure	37
Tableau III.5: résultats de simulation pour les trois structures	37
Tableau III.6 : Paramètres du guide d'onde SIW pour la 4 ^{ème} structure	39
Tableau III.7: Paramètres du guide d'onde pour la 5 ^{ème} structure	40
Tableau III.8: Paramètres du guide d'onde SIW pour la 6 ^{ème} structure	41
Tableau III.9: Résultats de simulation pour les trois structures 4, 5 et 6.....	42
Tableau III.10: Les résultats de simulation pour toutes structures... ..	43

Liste des acronymes et abréviations

- ϵ : Permittivité diélectrique.
- μ : Perméabilité magnétique.
- ω : Pulsation de l'onde.
- ρ : Densité volumique de charge électrique.
- δ : Conductivité électrique
- j : Courant de conduction.
- $E \rightarrow$: Vecteur d'intensité du champ électrique.
- $B \rightarrow$: Vecteur d'intensité du champ magnétique.
- $H \rightarrow$: Vecteur d'intensité du champ magnétique.
- Div : Opérateur de divergence
- $rot \rightarrow$: Opérateur rotationnel.
- Δ : Opérateur Laplacien vectoriel
- c : Vitesse de la lumière
- f_c : Fréquence de coupure.
- λ : Longueur d'onde.
- λ_c : Longueur d'onde correspond à la fréquence de coupure.
- λ_g : La longueur d'onde du guide.
- **SIW** : Substrat Integrated Waveguide.
- **GHz** : Giga Hertz.
- **HFSS** : High Frequency Structure Simulator
- **dB** : décibel
- **IRM** : l'imagerie par résonance magnétique
- **TEP** : la tomographie par émission de positrons

Liste des acronymes et abréviations

- **RF** : radiofréquences
- **WPD** : Wilkinson Power Divider
- **GPD** : Gysel Power Divider
- **D** : Le diamètre des Vias.
- **P** : La distance entre deux Vias adjacents centre à centre.
- **h** : La hauteur du substrat .
- **Leff** : L'écartement réel entre deux rangés de Vias
- **L** : Longueur du côté de plan de masse.
- **MoM** : La méthode des moments
- **FDTD** : La méthode des Différences Finies
- **FEM** : Méthode des éléments finis
- **EM** : électromagnétique
- **ADAS** : le systèmes avancés d'aide à la conduite
- **IoT** : Internet des objets
- **HPC** : haute performance
- f_c : Fréquence de coupure du mode le plus bas
- L_{siw} : Longueur SIW.
- W_{siw} : Largeur SIW.

Les télécommunications jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne, et leur développement rapide ces dernières années exige des équipements de plus en plus performants et abordables. Cette évolution se manifeste dans de nombreux systèmes de télécommunications, en particulier dans le domaine des hyperfréquences. Autrefois, les circuits hyperfréquences étaient volumineux et complexes à concevoir. Cependant, des progrès récents ont permis de créer des circuits aux performances électriques toujours plus ambitieuses. Le guide d'onde rectangulaire est un exemple de composant performant, mais il présente des inconvénients en termes d'encombrement et d'intégration. Pour surmonter ces défis, une nouvelle technologie, le guide d'onde intégré au substrat SIW (Substrate Integrated Waveguide), a été développée. Le SIW est une technique prometteuse qui combine les avantages des guides d'onde traditionnels, comme de faibles pertes, un facteur de qualité élevé, une grande capacité de puissance et un faible rayonnement, avec ceux des lignes de transmission planaires, telles que la compacité et le faible coût de fabrication.

L'objectif de ce mémoire est de concevoir une structure de guide d'onde SIW basée sur des cavités intégrées au substrat, destinée à des applications de télécommunications à haute fréquence. Le manuscrit est structuré en trois chapitres pour atteindre cet objectif.

Le premier chapitre présente un aperçu général sur les guides d'onde, incluant leur définition, leur évolution, leur principe de fonctionnement, leurs différentes utilisations et les types, ainsi que les équations de Maxwell appliquées aux télécommunications. On y traite également de l'utilisation des guides d'onde dans divers dispositifs tels que les antennes, les diviseurs de puissance et les coupleurs, avec quelques exemples.

Le deuxième chapitre est consacré à la technologie SIW, avec une définition de cette technologie, ses principes de fonctionnement, les paramètres des guides d'onde SIW et les méthodes numériques utilisées pour la conception des circuits SIW. Ce chapitre présente aussi des exemples de circuits basés sur la technologie SIW et discute des règles de conception, des avantages et des inconvénients de cette technologie.

Le troisième et dernier chapitre se concentre sur la conception de six structures de guides d'onde SIW. Il commence par une présentation du logiciel de simulation HFSS, décrivant ses principales fonctionnalités et les tâches essentielles pour les simulations. Ensuite, il détaille la conception d'un guide d'onde SIW et procède à la simulation de six structures différentes, en variant le diamètre des Vias (noté D) et l'espacement entre les Vias (noté P). Le mémoire se termine par une conclusion générale et une bibliographie.

Chapitre I

Généralités sur les guides ondes

I.1 Introduction

Les guides d'onde constituent des structures déployées pour acheminer et réguler la propagation des ondes électromagnétiques, principalement dans les secteurs des télécommunications et de l'électronique. Leur conception vise à canaliser efficacement les ondes à travers un milieu donné, souvent en recourant à des matériaux diélectriques ou conducteurs. Ces dispositifs sont largement employés dans divers domaines, incluant les antennes, les systèmes de transmission de données, les radars et les appareils optiques. Leurs avantages incluent la capacité à restreindre la dispersion des ondes, à minimiser les pertes de signal et à assurer un contrôle précis sur la direction et la polarisation des ondes électromagnétiques.

Un guide d'ondes peut adopter diverses formes de section transversale telles que rectangulaire, circulaire ou elliptique, bien que la section rectangulaire soit la plus couramment utilisée pour les connexions de courte distance. Comparé à la transmission par fils et lignes coaxiales, les guides d'onde offrent plusieurs avantages. Le principal avantage réside dans la minimisation des pertes pendant la transmission. Les champs électriques et magnétiques, responsables du transport de l'énergie, sont annulés à l'intérieur des surfaces métalliques, ce qui limite les pertes en les confinant à l'espace interne du guide. De plus, leur blindage complet assure une excellente protection contre les interférences externes. Ce chapitre se concentrera uniquement sur les concepts généraux sur les guides d'ondes.

I.2 Définition du guide d'onde

Un guide d'onde est un dispositif physique conçu pour diriger et réguler la propagation d'ondes électromagnétiques ou acoustiques à travers un milieu spécifique sur une distance déterminée. Il adopte généralement une configuration géométrique comme une cavité ou un conduit, et peut être fabriqué à partir de divers matériaux diélectriques ou conducteurs.

Les guides d'ondes sont employés dans divers domaines tels que la transmission par faisceaux hertziens, les fréquences hyper, la détection d'obstacles, ainsi que dans les techniques de diffusion à haute puissance et sur ondes courtes. Ils véhiculent une variété d'informations, à la fois par l'onde elle-même et par le guide utilisé [1].

- Signaux téléphoniques simples ou multiplex
- Signaux de télévision
- Impulsions numériques
- Données.

Dernièrement, les guides d'ondes ont adopté des configurations planes de taille nanométrique, fabriquées à partir de matériaux qui autorisent diverses fonctions telles que le couplage, la modulation, le multiplexage, l'amplification [2].

I.3 Equation générales des guides d'onde

Dans ce contexte, les équations générales des ondes guidées dans le milieu caractérisé par la permittivité diélectrique ϵ , la perméabilité magnétique μ , la densité volumique de charge électrique ρ , la conductivité électrique δ et la densité de courant $J = \sigma E$ peuvent être décrites par les équations de Maxwell.

En utilisant les relations constitutives entre les champs D et E , ainsi qu'entre les champs B et H , qui sont données par :

$$D = \epsilon \times E \quad (I. 1)$$

$$B = \mu \times H \quad (I. 2)$$

Et en introduisant la relation entre la densité de courant J et le champ électrique E , telle que $J = \sigma E$, on peut exprimer les équations de Maxwell dans ce milieu conducteur.

I.3.1 Les Equations de Maxwell

Maxwell a développé quatre équations mathématiques différentielles qui lient les champs magnétique et électrique. Ces équations qui portent son nom sont définies comme suit :

➤ **Equation de Maxwell-Gauss**

$$\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (I. 3)$$

➤ **Equation de Maxwell Thompson**

$$\text{rot}\vec{E} = \frac{-\partial B}{\partial t} \quad (I. 4)$$

➤ **Equation de Maxwell Faraday**

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (I. 5)$$

➤ **Equation de Maxwell Ampère**

$$\text{rot}\vec{B} = \mu \times \left(j + \frac{\epsilon \partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (I. 6)$$

Avec :

- ϵ : la permittivité diélectrique du matériau.
- μ : La perméabilité magnétique du matériau.
- ρ : est la densité volumique de charge électrique.
- \vec{J} : est le vecteur densité de courant.
- δ : Conductivité électrique [S.m-1].

I.3.2 Equations de propagation

Les équations de propagation des ondes dans ce milieu peuvent être obtenues en utilisant les équations de Maxwell et les relations constitutives. En supposant que le milieu est homogène et isotrope, les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel deviennent :

➤ **Équation de propagation pour le champ électrique E**

$$\nabla^2 \times \mathbf{E} = \mu \times \epsilon \times \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t^2} \right) \quad (\text{I. 7})$$

➤ **Équation de propagation pour le champ magnétique H**

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\mu \epsilon \partial \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (\text{I. 8})$$

I.4 Evolution des guides d'ondes

Les guides d'ondes ont évolué de manière significative au fil du temps grâce aux progrès technologiques et scientifiques, ce qui a conduit à une diversification des types de guides d'ondes disponibles et à une expansion de leurs applications dans de nombreux domaines.

En 1998, une des premières structures compactes conçues comme guides d'ondes laminaires a vu le jour [3]. Avant l'an 2000, ceux qui utilisaient le VIA dans la technologie SIW étaient confrontés à des difficultés pratiques considérables. Cependant, il y a exactement 20 ans, une percée majeure s'est produite avec la première démonstration réussie du passage entre les lignes de transmission micro-ruban et SIW [4]. Par la suite, la technologie SIW a été largement appliquée à divers composants micro-ondes et ondes millimétriques, tels que les circuits actifs, les composants passifs et les antennes, faisant l'objet de nombreux brevets [3].

I.5 Principe de fonctionnement du guide d'onde

Le fonctionnement d'un guide d'onde est basé sur sa capacité à limiter, diriger et gérer les ondes électromagnétiques ou acoustiques à l'intérieur d'une structure particulière, tout en réduisant au minimum les pertes d'énergie lors de leur propagation. Ce concept essentiel est employé dans divers domaines, tels que les télécommunications et la photonique, les capteurs et l'imagerie médicale.

Les guides d'ondes peuvent être fabriqués à partir de conducteurs ou de matériaux diélectriques en fonction de la fréquence. En général, plus la fréquence à transmettre est élevée, plus le guide d'ondes est petit, et inversement. Par exemple, la Terre possède un guide d'ondes naturel entre l'ionosphère conductrice et le sol, dont les dimensions et la circonférence à l'altitude moyenne de la Terre résonnent à 7,83 Hz, connu sous le nom de résonance Schumann [5]. En revanche, les guides d'ondes utilisés dans les communications à très haute fréquence peuvent avoir une largeur de moins d'un millimètre.



Figure I.1 Guide d'onde.

I.6 Types du guide d'onde

Les guides d'ondes peuvent être classés en plusieurs types en fonction de différents critères, tels que la nature des ondes qu'ils guident, leur géométrie et leur mode de fonctionnement. Voici quelques types courants de guides d'ondes :

I.6.1 Guide d'onde planaire

Le guide d'onde plan consiste en un empilement de trois couches de matériaux ayant des indices de réfraction différents, comme illustré dans la figure I.2. La lumière se propage de manière préférentielle dans la couche ayant un indice de réfraction n_g lorsqu'elle est entourée de deux autres

Couches : une couche inférieure de substrat ayant un indice de réfraction n_s et une couche supérieure de couverture avec un indice de réfraction n_c . Ce système confine la lumière le long de l'axe vertical (x) et dans la direction de propagation (z). Cependant, en raison de l'invariance de cette structure dans la direction horizontale (y), la lumière ne peut être confinée dans cette direction [6].

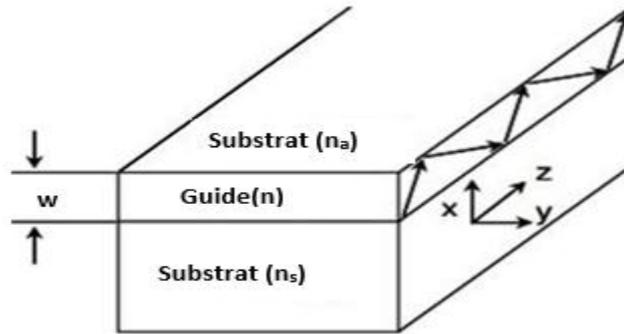


Figure I.2 Représentation graphique d'un guide d'onde planaire.

I.6.2 Guide d'onde rectangulaire

Le guide d'onde rectangulaire est composé de quatre parois conductrices (habituellement idéales), tel qu'illustré dans la figure 1.3. Ainsi, ce type de guide d'onde présente une section conductrice fermée, formant un conduit simple et creux. Ses dimensions transversales (le long de x) sont définies par la largeur a et verticales (le long de y) par l'épaisseur b . À l'intérieur du conduit creux se trouve un diélectrique, souvent de l'air. La lumière se propage à travers ce diélectrique, mais elle est confinée à l'intérieur par les quatre parois conductrices. L'axe de propagation (z) demeure toujours défini dans la direction de la propagation [7].

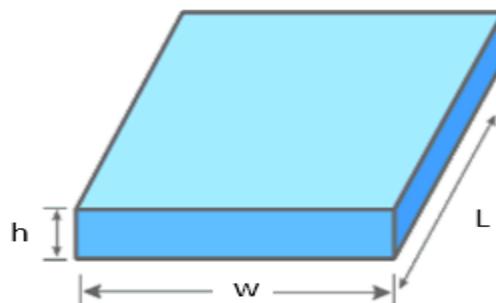


Figure I.3 Représentation Graphique d'un guide d'onde rectangulaire.

I.6.3 Guide d'onde circulaire

Un autre type de guide d'onde est une structure utilisée pour la transmission des ondes électromagnétiques. Contrairement aux guides d'onde rectangulaires, le guide d'onde circulaire présente une section transversale circulaire. Les guides d'ondes circulaires sont utilisés dans diverses applications telles que l'ingénierie des télécommunications, l'instrumentation, l'électronique et l'ingénierie radar.

En principe, les guides d'onde à section circulaire sont ceux qui présentent le moins de pertes. Ils permettent également de transporter deux signaux avec polarisations orthogonales dans un même guide. Cependant, maintenir les champs électriques et magnétiques parfaitement perpendiculaires est une tâche délicate, ce qui conduit souvent à privilégier les guides d'onde rectangulaires ou elliptiques [7].

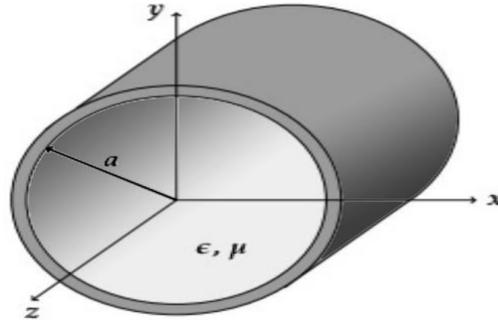


Figure I.4 Représentation Graphique d'un guide d'onde circulaire

I.6.4 Guide d'onde Fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire, comme illustré dans la figure I.5. Ce guide est composé de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents tels que le verre de silice ou le plastique, ayant des indices de réfraction différents. Cette structure assure le confinement de la lumière près du centre de la fibre. Les fibres optiques offrent une transmission de qualité supérieure et permettent de transporter un très grand volume d'informations grâce à leur large bande passante. Il est possible d'avoir plusieurs canaux de transmission simultanément sur une seule fibre [8].

Les fibres optiques sont largement utilisées pour transporter la lumière sur de longues distances sans perte de signal. Leur utilisation est répandue dans divers domaines tels que les télécommunications, la transmission de données, l'imagerie médicale, les capteurs optiques, et bien d'autres encore. En effet, les guides d'ondes en fibre optique offrent une solution efficace pour acheminer la lumière sur de longues distances tout en préservant la qualité du signal.

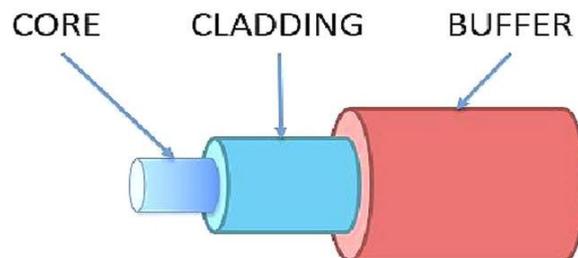


Figure I.5 Représentation Graphique d'un guide d'onde fibre optique.

I.6.5 Guide d'onde diffuse

Un guide d'onde diffusé est une structure utilisée pour guider et propager des ondes électromagnétiques, telles que la lumière, à travers un milieu spécifique. Contrairement aux guides d'ondes traditionnels qui présentent des parois parfaitement réfléchissantes, un guide d'onde diffusé comporte une couche ou une région où la réflectivité est réduite, ce qui permet une diffusion partielle de l'onde à travers la structure. La figure I.6 illustre le schéma de principe d'un guide d'onde de type diffusé. Ce type de guide est caractérisé par une région de substrat semi-infini où $y < 0$ et possède un indice de réfraction n_0 . Il comporte également une fine couche encastrée dans le substrat, avec un indice de réfraction $n_0 + \Delta n$, ainsi qu'une région de couverture semi-infinie où $y > 0$ et ayant un indice de réfraction n_c [8].

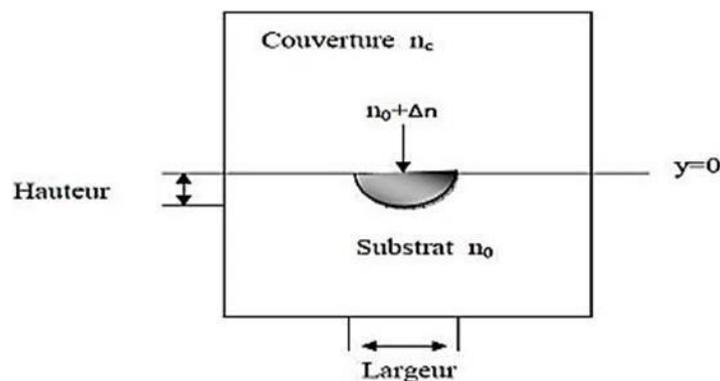


Figure I.6 Représentation Graphique d'un guide d'onde diffusé

I.7 Utilisation du guide d'onde

L'utilisation des guides d'ondes constitue un élément crucial dans de multiples domaines de l'ingénierie et des sciences, incluant les télécommunications, l'électronique, la physique des plasmas et le génie électrique. Ces structures sont spécifiquement conçues pour propager des ondes électromagnétiques à travers un espace délimité par des parois conductrices.

Les applications des guides d'ondes sont variées, couvrant la transmission et la manipulation des ondes électromagnétiques, acoustiques ou optiques. Dans le domaine des télécommunications, ils jouent un rôle central dans la transmission de signaux, que ce soit pour les communications par satellite, les liaisons micro-ondes terrestres ou les réseaux de fibre optique.

Dans le secteur militaire et civil, les guides d'ondes sont indispensables pour les systèmes de radar utilisés dans la détection d'objets, la surveillance du trafic aérien, la météorologie et la cartographie.

En médecine, les guides d'ondes sont essentiels dans des technologies d'imagerie telles que l'imagerie par résonance magnétique et la tomographie par émission de positrons pour guider et focaliser les ondes électromagnétiques. Ils sont également utilisés en chirurgie médicale pour diriger des faisceaux laser dans les tissus corporels, permettant des interventions à distance et une thérapie ciblée, comme dans la chirurgie au laser ophthalmique.

Dans le domaine des capteurs, les guides d'ondes sont employés pour détecter et mesurer divers phénomènes physiques tels que la température, la pression, l'humidité et la concentration de gaz.

Ils sont également utilisés dans les systèmes de détection d'intrusion, de surveillance des périmètres et de détection des incendies pour transmettre des signaux de détection sur de longues distances avec précision.

Dans le secteur industriel, les guides d'ondes sont intégrés dans les systèmes de contrôle et de mesure pour surveiller et réguler les processus de production, comme la fabrication de semi-conducteurs et la fabrication automatisée.

Enfin, dans la recherche scientifique, les guides d'ondes sont utilisés dans diverses applications, notamment en physique des plasmas, en spectroscopie et en métrologie.

I.8 Antennes

Les antennes sont des dispositifs électriques spécialement conçus pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Leur utilisation est très diversifiée, couvrant des domaines tels que les communications sans fil, la diffusion radio et télévisuelle, la transmission de données, le radar, la navigation par satellite, entre autres.

De manière générale, une antenne est composée d'éléments métalliques ou conducteurs soigneusement dimensionnés pour émettre ou capter des ondes électromagnétiques dans une direction précise ou sur une gamme spécifique de fréquences. Lorsqu'elle est employée pour émettre, elle transforme les signaux électriques en ondes électromagnétiques, les diffusant dans l'air ou à travers un milieu particulier. Quant à son rôle de réception, elle intercepte les ondes électromagnétiques de l'environnement et les convertit en signaux électriques, prêts à être traités par un équipement électronique.

De manière plus pratique, une antenne agit comme un récepteur lorsque des signaux sont reçus depuis une ligne de transmission. Elle les transforme alors en ondes électromagnétiques et les propage dans l'espace lorsqu'elle est en mode d'émission. En mode de réception, elle se contente de capturer les ondes électromagnétiques entrantes et de les reconvertir en signaux. La figure I.7 offre une illustration simple de ce processus [9].

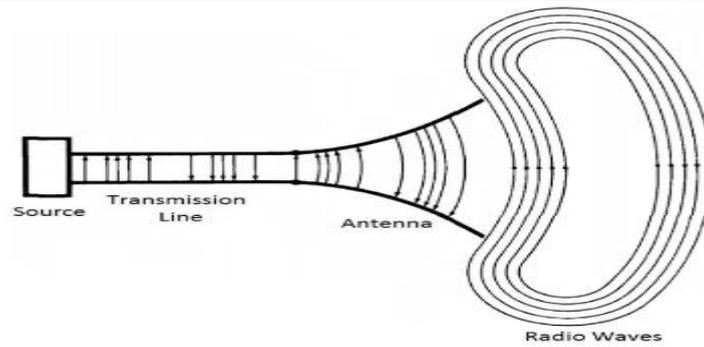


Figure I.7 Rayonnement d'une antenne

I.8.1 Types des antennes

Une antenne est considérée comme idéale lorsqu'elle émet toute la puissance qu'elle reçoit de la ligne de transmission dans une ou plusieurs directions spécifiques. En pratique, il est difficile d'atteindre ces performances idéales, mais des approximations précises sont possibles. Il existe une grande variété d'antennes, chacune étant conçue pour adopter une forme spécifique afin de répondre à une caractéristique de rayonnement souhaitée pour une application donnée [10].

Parmi les grandes familles d'antennes qui sont à l'origine de la plupart des structures rayonnantes, on trouve :

- Les antennes filaires (telles que les dipôles, les monopôles, et les Yagi)
- Les antennes à fentes (comme les demi-ondes ou quart d'ondes)
- Les antennes patch (de type planaire)
- Les antennes à ouverture (comme les cornets)
- Les antennes à réflecteurs (telles que les paraboles).

I.8.1.1 Antennes filaires

Ce sont les antennes les plus couramment rencontrées car elles sont présentes partout : sur les toits, les avions, les voitures, etc. Elles se déclinent en une grande variété de formes telles que rectiligne (dipôle), boucle, circulaire, rectangulaire, ellipse et hélice [10].

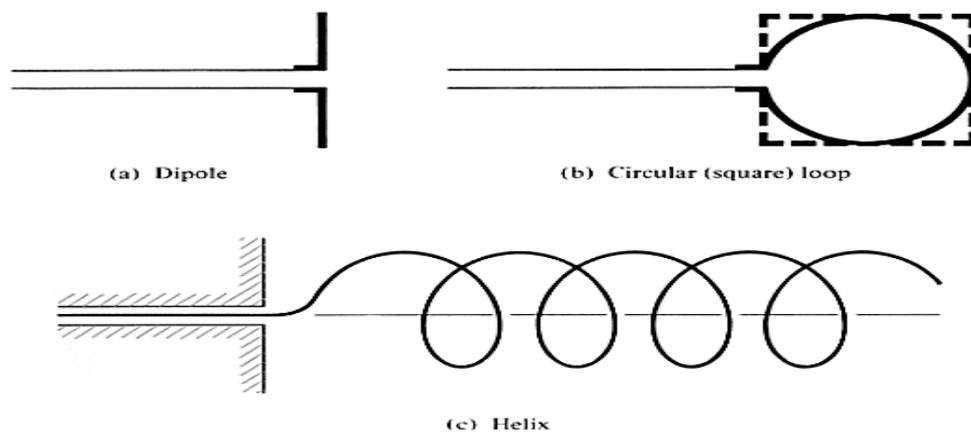


Figure I.8 antenne dipôle, circulaire, hélice

I.8.1.2 Antennes fentes

Les antennes à fentes sont des appareils destinés à émettre ou à recevoir des ondes électromagnétiques, utilisant des ouvertures ou des fentes sur des surfaces conductrices pour émettre ou capturer des signaux. Elles sont fréquemment employées dans des contextes où une large bande passante ou une grande directivité sont requises.

Cette catégorie d'antenne est largement déployée à bord d'avions ou de véhicules spatiaux en raison de leur facilité de montage sur leurs surfaces [10].

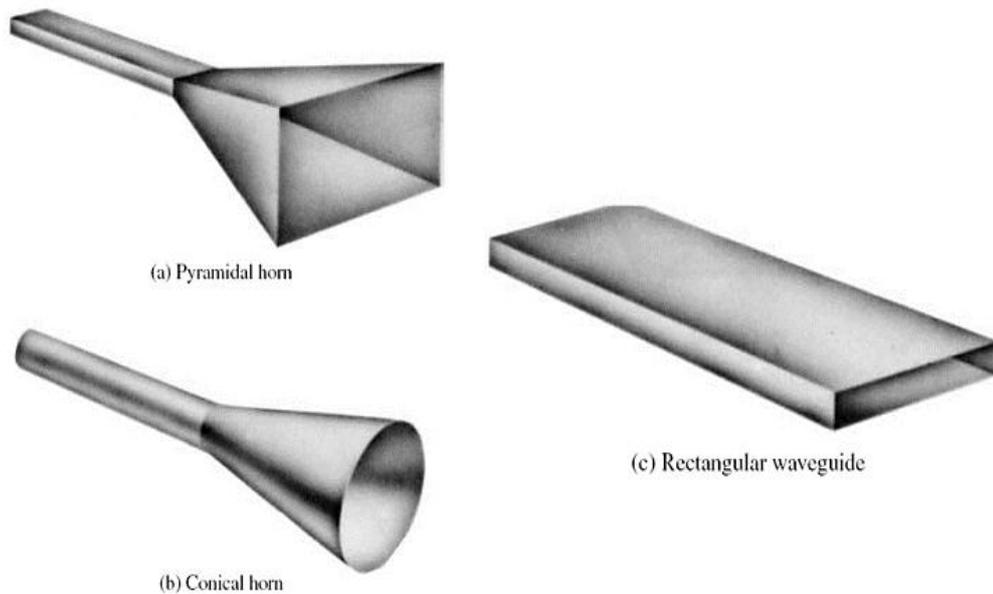


Figure I.9 les antennes à fentes

I.8.1.3 Antennes microrubans

Les antennes microrubans, largement employées dans les systèmes de communication sans fil, sont particulièrement prisées dans les appareils compacts comme les téléphones portables, les drones et les capteurs sans fil.

Leur popularité a connu une croissance significative depuis les années 70, initialement dans le domaine spatial avant de s'étendre aux applications commerciales.

Ces antennes se composent d'un patch métallique monté sur un substrat avec un plan de masse. Le patch peut adopter diverses formes, bien que les formes rectangulaires et circulaires soient les plus courantes [10].

I.9 diviseur de puissance

Le diviseur de puissance joue un rôle essentiel dans les applications micro-ondes et radiofréquences (RF). Doté de trois ports, il est largement employé dans les amplificateurs de puissance équilibrés, les systèmes radar et les déphaseurs. Le diviseur le plus célèbre est celui conçu par Wilkinson, qui lui a

donné son nom.

I.9.1 Quelques types de diviseurs de puissance

Les diviseurs de puissance se classent généralement en deux catégories principales : réactives et résistives, chacune étant adaptée à des applications spécifiques. Parmi les trois types courants de diviseurs de puissance, on retrouve le diviseur de puissance à jonction en T, le diviseur de puissance résistif et le diviseur de puissance de Wilkinson. Le diviseur de puissance de Wilkinson est largement privilégié pour garantir une adaptation optimale et une isolation élevée entre les ports de sortie. Quant au diviseur de puissance résistif, il trouve couramment sa place dans les équipements en raison de sa large bande passante, malgré les pertes de puissance engendrées.

I.9.1.1 Diviseur résistif adapté

Un diviseur résistif adapté est un montage électrique constitué de deux résistances qui réduisent une tension à une fraction de sa valeur initiale. Son application courante est de fournir une tension de référence à partir d'une source de tension plus élevée où d'ajuster une tension à un niveau spécifique. Pour créer un diviseur de puissance résistif adapté, on dispose des résistances sur les trois accès, comme le montre l'illustration suivante.

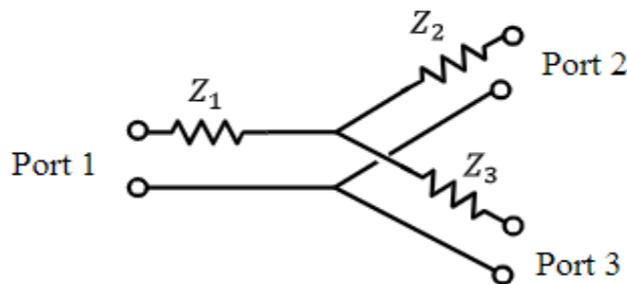


Figure I.10 Diviseur de puissance résistif adapté

I.9.1.2 Diviseur de Wilkinson (WPD Wilkinson Power Divider)

Le diviseur de puissance de Wilkinson (WPD) est un dispositif à trois ports présentant des pertes. Il est supposé que tous les ports sont adaptés, avec une isolation efficace entre les deux ports de sortie [11].

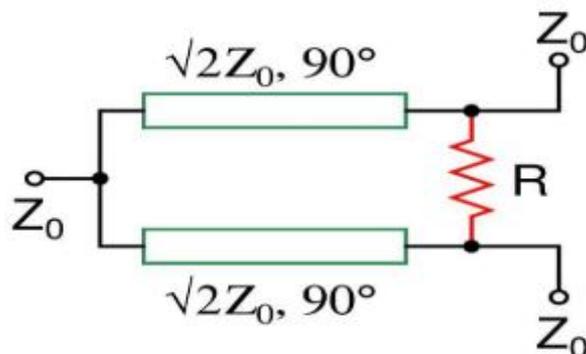


Figure I. 11 Diviseur de Wilkinson à deux voies de puissances égales.

I.9.1.3 Diviseur de Gysel (GPD Gysel Power Divider)

Le diviseur de puissance de Gysel est similaire au diviseur de Wilkinson, tous deux étant des réseaux à trois ports. Cependant, le GPD comporte deux résistances d'isolement dont les autres bornes sont connectées à la masse, comme illustré dans la Figure I.13. L'avantage principal du GPD réside dans sa capacité de dissipation thermique. Contrairement au WPD où il n'y a pas de connexion directe à la masse et où la résistance se trouve sur le plan supérieur, dans un GPD, les deux résistances sont connectées au plan de masse, permettant ainsi une meilleure dissipation de la chaleur [12].

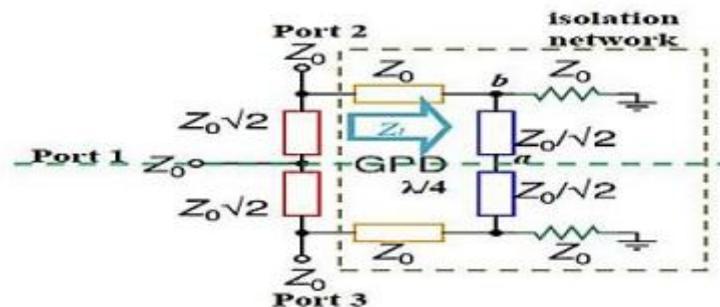


Figure I.12 Diviseur de puissance de Gysel bidirectionnel

I.10 Coupleur

Les coupleurs sont des dispositifs électroniques employés pour répartir, fusionner ou connecter le signal électrique entre des lignes de transmission ou des circuits différents, tout en réduisant les pertes et en préservant les propriétés essentielles du signal telles que son impédance et sa phase. Leur utilisation est répandue dans une variété de circuits, notamment dans les systèmes de communication, les amplificateurs, les filtres et les réseaux d'antennes.

I.10.1 Quelques types de coupleurs

I.10.1.1 Coupleurs passifs planaires

Le terme "ligne planaire" désigne un arrangement de conducteurs placés sur une ou les deux surfaces d'une plaque de diélectrique. Ces conducteurs sont formés de rubans, et la partie inférieure du substrat, souvent métallisée, sert de plan de masse. Les caractéristiques de la propagation des signaux dans cette configuration sont influencées par les dimensions de la ligne et la permittivité du substrat [13].

I.10.1.2 Coupleurs à lignes couplées

Quand deux lignes de transmission non blindées sont placées à proximité l'une de l'autre, la puissance peut être transférée d'une ligne à l'autre en raison de l'interaction des champs électromagnétiques. Ces lignes sont appelées lignes couplées et sont généralement composées de trois conducteurs en proximité. On part du principe que ces lignes couplées opèrent en mode TEM. La configuration d'un coupleur à lignes couplées est illustrée dans la figure I.14.

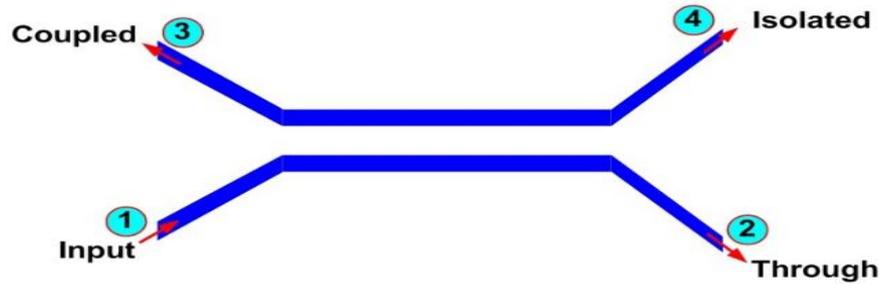


Figure I.13 Géométrie d'un coupleur à ligne couplées

I.10.1.3 Coupleur de Lange

Il est souvent très ardu d'atteindre un couplage de 3 dB ou 6 dB en utilisant uniquement des lignes couplées. Pour améliorer ce couplage, plusieurs lignes parallèles sont employées, permettant aux champs de frange de contribuer au couplage. Le coupleur le plus couramment utilisé est le coupleur de Lange, représenté dans la figure I.15. Il fait appel à quatre lignes couplées avec des interconnexions pour obtenir un couplage plus élevé. Avec cette configuration, il est relativement simple d'obtenir un couplage de 3 dB, avec une bande passante d'une octave ou plus. Cependant, la fabrication de ces coupleurs de Lange à haute fréquence nécessite une grande précision, car les lignes sont très fines et rapprochées [13].

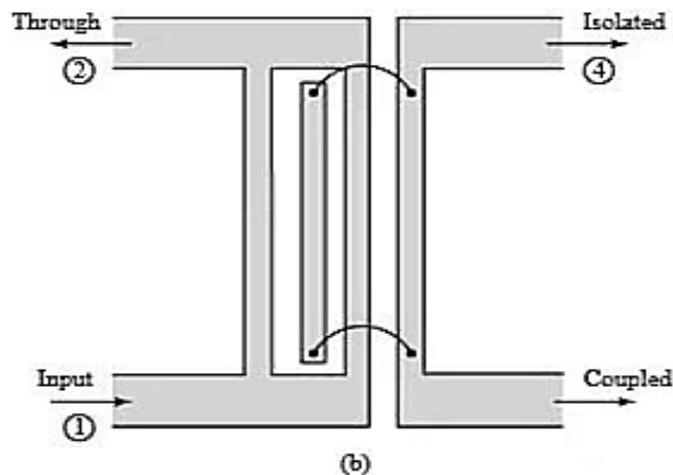


Figure I.14 Géométrie d'un coupleur de Lange

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes lois de l'électromagnétisme. Ensuite, nous avons présenté les différentes architectures des guides d'ondes et le Principe de fonctionnement. nous avons abordé les utilisations des guides d'ondes en télécommunications. En fin nous avons présenté les types des antennes des diviseurs et des coupleurs.

Chapitre II

Technologie SIW

II.1 Introduction

La technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) marque une avancée significative dans le domaine des composants et des systèmes micro-ondes. Son caractère novateur réside dans l'intégration directe de guides d'ondes dans le substrat du circuit, ce qui élimine le besoin de composants distincts.

Les progrès récents dans les systèmes de communication RF, micro-ondes et sans fil sont marqués par des vitesses de transfert de données élevées, nécessitant des substrats diélectriques à faibles pertes, faciles à intégrer et peu coûteux à fabriquer. La technologie SIW répond à ces exigences en combinant les avantages des techniques micro-ruban en termes de compacité et d'intégration, ainsi que ceux des guides d'ondes pour réduire les pertes de rayonnement. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de circuits micro-ondes à faible coût [14].

II.2 Définition du SIW

La technologie SIW se distingue par son intégration dans un substrat diélectrique tout en restant compatible avec les circuits planaires. Les structures SIW sont à la base de la conception de plusieurs circuits planaires Millimétriques.

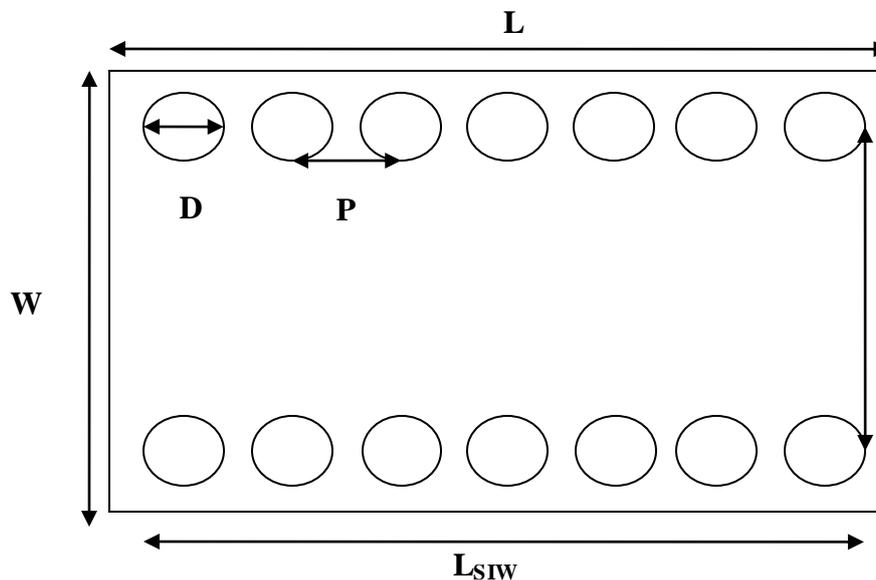


Figure II.1 Structure d'un guide SIW avec ses paramètres .

Cette technologie permet l'intégration du guide d'onde dans le substrat en utilisant des rangées de trous métallisés pour remplacer les parois latérales métalliques. Ces trous métallisés délimitent un guide où les modes vont se propager. L'utilisation de ces modes dans des cavités est directement liée aux performances électriques du substrat (pertes diélectriques), du métal (pertes conductrices), ainsi qu'à la forme et aux dimensions de la structure SIW [15].

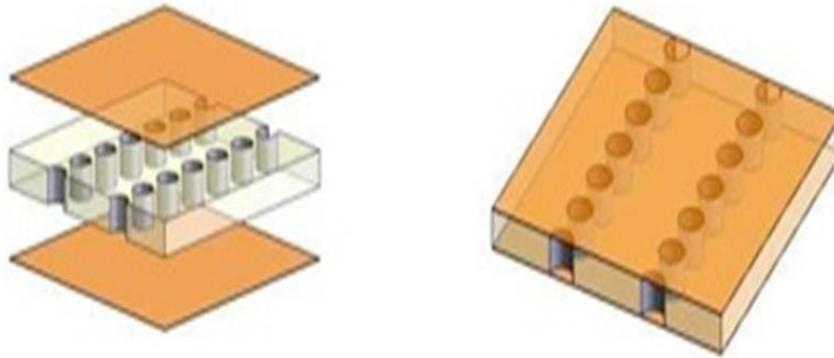


Figure II.2 Exemple d'une structure en technologie SIW.

II.3 Historique

L'une des premières structures intégrées développées, appelée guide d'ondes laminé [16], Remonte à 1998. Par la suite, la technologie SIW a été appliquée à divers composants micro-ondes et ondes millimétriques, incluant des circuits actifs, des composants passifs et des antennes. Il est important de noter que les techniques de guide d'ondes intégré avaient été proposées bien avant et avaient fait l'objet d'un dépôt de brevet [17], mais elles n'avaient pas attiré beaucoup d'attention jusqu'aux environs de l'an 2000, lorsque ce schéma SIW a été unifié au sein du concept des SIC. Bien entendu, une version bien plus ancienne de résonateurs embarqués avait également été présentée, mais il est légitime de se demander si ces structures devraient être considérées comme faisant partie intégrante des circuits intégrés sur substrat [18].

II.4 Principe de SIW

Au sein de ces systèmes, les diviseurs de puissance et les antennes basées sur la technologie SIW gagnent en importance. Dans un contexte spatial, les contraintes de fiabilité et de compacité sont particulièrement strictes. De plus, le choix des matériaux est restreint, limitant ainsi les possibilités d'innovation. Cependant, les progrès réalisés dans la précision et la fiabilité des techniques de fabrication ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer les composants. Ces travaux sont donc motivés par le désir constant d'accroître les performances et la fiabilité tout en réduisant l'encombrement, en exploitant le potentiel offert par la technologie SIW [19].

II.5 Paramètres d'un guide d'onde SIW

La conception des structures SIW repose sur la manipulation de leurs paramètres afin d'obtenir une structure efficace. Ces paramètres, décrits comme suit [20], jouent un rôle crucial dans l'obtention d'une architecture de qualité.

- **D** : Le diamètre des Vias.
- **P** : La distance entre deux Vias adjacents centre à centre.
- **h** : La hauteur du substrat .
- **WD** :L'écartement réel entre deux rangés de Vias (centre à centre) qu'il ne correspond pas à la largeur effective.
- **L** : Longueur du côté de plan de masse.

Afin de réduire les pertes dues au rayonnement, il est essentiel de satisfaire à certaines conditions spécifiques. Les équations (II.1) et (II.2) sont employées dans ce but, visant à maintenir les pertes de rayonnement à un niveau minimal. Ces équations permettent de définir les dimensions et l'espacement des Vias métalliques de manière à garantir un confinement efficace du champ électromagnétique et à diminuer les pertes par rayonnement

$$D \leq \frac{\lambda_g}{5} \quad (II.1)$$

$$D < P \leq 2D \quad (II.2)$$

Avec λ_g est la longueur d'onde du guide.

Une équation empirique initiale a été avancée pour estimer la largeur effective du guide d'onde. En pratique, cette valeur équivaut à la largeur d'un guide d'onde rectangulaire dans une technologie volumique traditionnelle, avec une fréquence de coupure identique à celle du guide SIW étudié.

$$f_c = \frac{c}{2w} \quad (II.3)$$

Avec c la vitesse de la lumière.

La largeur effective WD de coupure est donnée par :

$$WD = \frac{w}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (II.4)$$

La formulation conclusive pour concevoir un guide d'onde SIW est la suivante :

$$W_{siw} = WD + \frac{D^2}{0.95 \times P} \quad (II.5)$$

II.6 Méthodes numérique utilisées pour la conception de circuits SIW

Les méthodes numériques ont joué un rôle historiquement crucial dans le développement des technologies des circuits SIW. Elles ont progressé pour devenir des instruments incontournables dans la conception et l'optimisation de ces circuits. En offrant des moyens efficaces pour évaluer les performances, réaliser des simulations précises et adapter la conception aux exigences spécifiques, ces méthodes ont permis une exploration et une exploitation complètes des capacités des guides d'ondes intégrés au substrat dans les domaines des systèmes micro-ondes et millimétriques.

II.6.1 Méthode des Moments

La méthode des moments (MoM) est une méthode numérique très répandue dans le domaine de l'électromagnétisme, employée pour résoudre des problèmes relatifs à la diffraction et à la propagation des ondes électromagnétiques.

La méthode des Moments est une approche fréquemment utilisée pour résoudre les équations de Maxwell sous forme intégrale, en les transformant en un système linéaire d'équations. Tout d'abord, l'équation intégrale décrivant le problème physique est convertie en une matrice représentant des sommes de fonctions pondérées. Ensuite, les éléments de cette matrice sont évalués. Enfin, le système matriciel est résolu. Cette méthode a été popularisée dans le domaine du Génie Électrique par Harrington [21].

La méthode des moments est une approche flexible et largement adoptée pour résoudre une diversité de problèmes en électromagnétisme. Elle couvre un large éventail d'applications, de la conception d'antennes à l'analyse de la compatibilité électromagnétique, en passant par la simulation de circuits intégrés. Souvent utilisée pour aborder des défis tels que la modélisation des antennes, des transitions entre guides et des circuits planaires, elle offre une solution efficace et précise pour ces différentes problématiques.

II.6.2 Méthode des différences finies

La méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD) est une technique de modélisation électromagnétique ancienne, largement répandue et très utilisée. Elle offre une représentation très réaliste de la structure étudiée [22].

Elle est dans le domaine temporel (FDTD) est une technique numérique utilisée pour simuler la propagation des ondes électromagnétiques dans les guides d'ondes intégrés au substrat. Elle fonctionne en discrétisant l'espace et le temps, ce qui permet d'analyser le comportement dynamique des signaux à l'intérieur des circuits SIW.

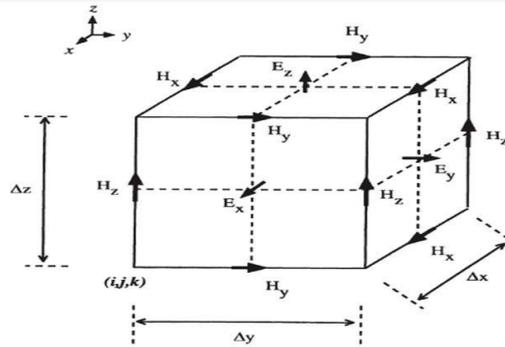


Figure II.3 Maillage cartésien pour la méthode FDTD.

II.6.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) a été développée par A. Hérnikoff et R. Courant dans les années 1940 pour la résolution de problèmes en mécanique des structures [23].

Par la suite, quelques années plus tard, elle a été appliquée en électromagnétisme pour résoudre les équations de Maxwell [24].

Cette méthode constitue un outil mathématique discret pour la résolution des équations aux dérivées partielles. La FEM est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour modéliser les structures SIW. Elle permet de résoudre les équations des champs électromagnétiques à l'intérieur du guide d'ondes intégré au substrat en discrétisant la structure en éléments finis.

II.7 Quelque exemple des circuits à base de SIW

Pour amorcer notre exploration, il est opportun de contextualiser la technologie SIW (Guide d'Onde Intégré au Substrat) en tant que méthode innovante et efficace pour la conception de circuits dans les domaines des micro-ondes et des radiofréquences (RF). Ensuite, elle pourrait esquisser quelques exemples caractéristiques de circuits souvent élaborés grâce à cette technologie.

II.7.1 Circuits passifs à base de SIW

Des circuits passifs basés sur la technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) comprennent une variété de composants utilisés dans les applications micro-ondes et RF.

La technologie SIW regroupe la plupart des composants micro-ondes traditionnels, en constituant ainsi une version évoluée du guide d'ondes, tout en offrant d'autres avantages, tels que sa compacité [25].

La Figure I.4 illustre divers exemples de composants passifs, tels qu'un filtre

Passe-bande [26], une cavité rectangulaire [27], un coupleur [28], ainsi qu'un duplexeur SIW [29].

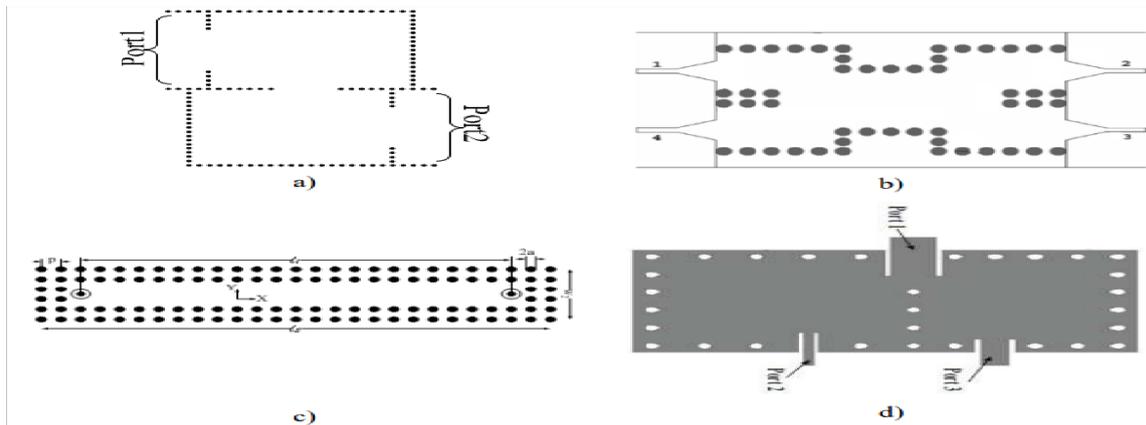


Figure II.4 Exemples des circuits passifs SIW

II.7.2 Circuits actifs à base de SIW

Les circuits actifs exploitant la technologie SIW intègrent des éléments actifs tels que des amplificateurs, des oscillateurs et divers dispositifs électroniques dans des configurations SIW, adaptées aux applications micro-ondes et RF.

Moins d'attention a été portée à la réalisation de composants actifs en technologie SIW par rapport aux circuits passifs. Cependant, de nouvelles opportunités de conception émergent. Celles-ci impliquent principalement l'intégration de dispositifs actifs dans des circuits passifs SIW, exploitant ainsi les avantages technologiques tels qu'une faible perte, une isolation élevée et une taille compacte, afin d'obtenir des performances optimales à moindre coût. Un exemple notable est celui des développements récents dans le domaine des oscillateurs en 2012 [30].

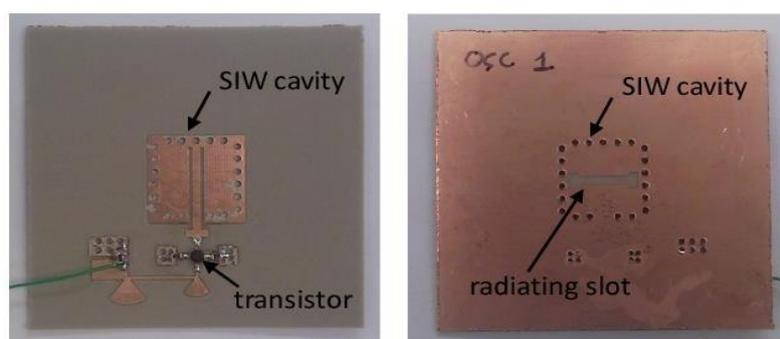


Figure II.5 Oscillateur SIW

II.7.3 Antennes à base de SIW

Les antennes SIW, qui sont intégrées dans des substrats diélectriques, jouent un rôle crucial dans les systèmes de communication sans fil et les applications micro-ondes. Leur conception compacte et leur

intégration directe avec d'autres composants garantissent des performances élevées tout en occupant peu d'espace. Disponibles sous différentes formes telles que les antennes à fente, à patch, imprimées ou à cornet, elles sont adaptées à une variété d'applications telles que la communication, le radar, la télédétection et l'imagerie. Leur flexibilité de conception permet d'ajuster les performances en termes de bande passante, de directivité, de gain et de polarisation, les rendant polyvalentes et adaptées à de nombreux besoins en communication sans fil.

Les circuits de dérivation interconnectés à l'aide de lignes SIW préservent les performances grâce à leurs faibles pertes lors du passage d'une onde d'un bloc à l'autre. Après connexion, les pertes sont inférieures à 0,17 dB, ce qui est bien en deçà des pertes rencontrées avec des conducteurs et des câbles [31].



Figure II.6 Antennes SIW

II.8 Règles de conception à base de SIW

- Faites le choix du diamètre des Vias métalliques (D) ainsi que de la distance Entre les Vias (P), en fonction des exigences de performance et des contraintes de fabrication. Ces paramètres jouent un rôle crucial dans la propagation des ondes guidées et dans la gestion de la fuite de champ.
- Disposez soigneusement les Vias métalliques sur les couches conductrices supérieure et inférieure du substrat diélectrique, en assurant une soudure correcte pour garantir une bonne conductivité électrique.
- Assurez-vous de l'intégrité structurale et électrique de la conception SIW en vérifiant l'absence de court-circuits non désirés ou de perturbations électromagnétiques.
- Procédez à l'optimisation de la conception en réalisant des simulations et des ajustements afin d'atteindre les performances souhaitées, telles que la bande passante, le rendement et les pertes de rayonnement.
- En suivant ces étapes de conception, vous pourrez réaliser une structure SIW efficace qui répond aux exigences spécifiques du système de communication ou des composants utilisés.

II.9 Avantages et inconvénients de la technologie SIW

Le tableau ci-dessous représente les avantages et les inconvénients de cette technologie [32].

Tableau II.1 les Avantages et inconvénients de la technologie SIW.

Avantages	Inconvénients
<p>1) Une intégration haute densité permettant le montage des composants discrets sur le châssis SIW.</p> <p>2) Les structures SIW ne sont pas impactées par le métal, ce qui réduit les pertes de conductivité.</p> <p>3) Coûts de réalisation réduits.</p> <p>4) Faibles pertes.</p> <p>5) Un facteur de qualité élevé.</p> <p>6) Des dimensions plus compactes.</p> <p>7) Une facilité d'intégration avec d'autres systèmes.</p> <p>8) Une capacité de traitement haute puissance.</p>	<p>1) Les pertes par fuite revêtent une importance notable et sont conditionnées par l'espacement entre les trous présents dans la couche supérieure.</p> <p>2) Les pertes diélectriques, en comparaison avec celles dans l'air, sont engendrées par l'usage d'un diélectrique dans une configuration SIW.</p> <p>3) En raison de leur sensibilité à la fréquence, il est nécessaire d'envisager des déploiements mm-Wavre pour les SIW.</p> <p>4) Les SIW présentent une fréquence de coupure inférieure.</p>

II.10 Conclusion

Après avoir abordé les fondamentaux des guides d'ondes SIW, nous examinons le principe de fonctionnement de cette technologie, qui repose sur les paramètres spécifiques des guides d'ondes SIW. Afin de minimiser les pertes de rayonnement, il est crucial de respecter certaines conditions particulières.

Dans la deuxième partie, nous explorons les méthodes numériques employées pour concevoir des circuits basés sur la technologie SIW. Ensuite, nous présentons quelques exemples de circuits utilisant cette technologie. Enfin, nous concluons ce chapitre en discutant des règles de conception spécifiques aux circuits SIW, ainsi que des avantages et inconvénients de cette technologie. L'objectif est de fournir une compréhension approfondie de la technologie SIW.

Chapitre III

Conception et simulation des guides d'onde SIW

III.1 Introduction

Ce chapitre se penche sur la simulation des guides d'ondes, avec un accent particulier sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus grâce à la technique SIW. Nous examinons attentivement les propriétés et les représentations issues de cette simulation, réalisée à l'aide du logiciel HFSS. HFSS 15.0, un outil de simulation électromagnétique de pointe, est utilisé spécifiquement pour ces simulations de guides d'ondes, offrant une résolution efficace des problèmes en trois dimensions.

III.2 Logiciel de simulation HFSS

III.2.1 Présentation du logiciel

HFSS, abréviation de High Frequency Structure Simulator, représente un logiciel de simulation électromagnétique (EM) 3D utilisé pour la conception et la simulation de produits électroniques à haute fréquence. Il permet de modéliser divers éléments tels que des antennes, des réseaux d'antennes, des composants RF ou micro-ondes, des interconnexions haute vitesse, des filtres, des connecteurs, des boîtiers IC et des cartes de circuits imprimés. Cette plateforme est largement employée par des ingénieurs à travers le monde pour concevoir des composants électroniques destinés aux systèmes de communication, aux systèmes radar, aux systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS), aux satellites, aux produits Internet des objets (IoT) et autres dispositifs RF et numériques à haut débit [35].

Grâce à ses solveurs polyvalents et son interface graphique intuitive, HFSS offre des performances remarquables et une analyse approfondie des problèmes EM 3D. Son intégration avec les outils thermiques, structurels et de dynamique des fluides d'ANSYS permet une analyse multiphasique complète des produits électroniques, assurant leur fiabilité thermique et structurelle. HFSS est reconnu pour sa précision et sa fiabilité, notamment grâce à sa technique de maillage adaptatif automatique et à ses solveurs sophistiqués, qui peuvent être accélérés par la technologie de calcul haute performance (HPC) [33].



Figure III.1 Logo HFSS

III.2.2 Méthode des éléments finis

HFSS utilise cette méthode pour résoudre les solutions décrites par des équations aux dérivées intégrales et partielles [34].

III.2.3 Installation

L'installation de HFSS peut présenter des variations mineures selon la version utilisée et le système d'exploitation de votre ordinateur. Toutefois, voici une procédure générale que vous pouvez suivre :

1. Commencez par double-cliquer sur le fichier d'installation.
2. Suivez les instructions pour installer HFSS.
3. Installez les bibliothèques requises.
4. Installez le gestionnaire de simulation à distance.

III.2.4 Interface HFSS

Les figures présentent respectivement l'interface principale et l'arbre de gestion du logiciel HFSS.

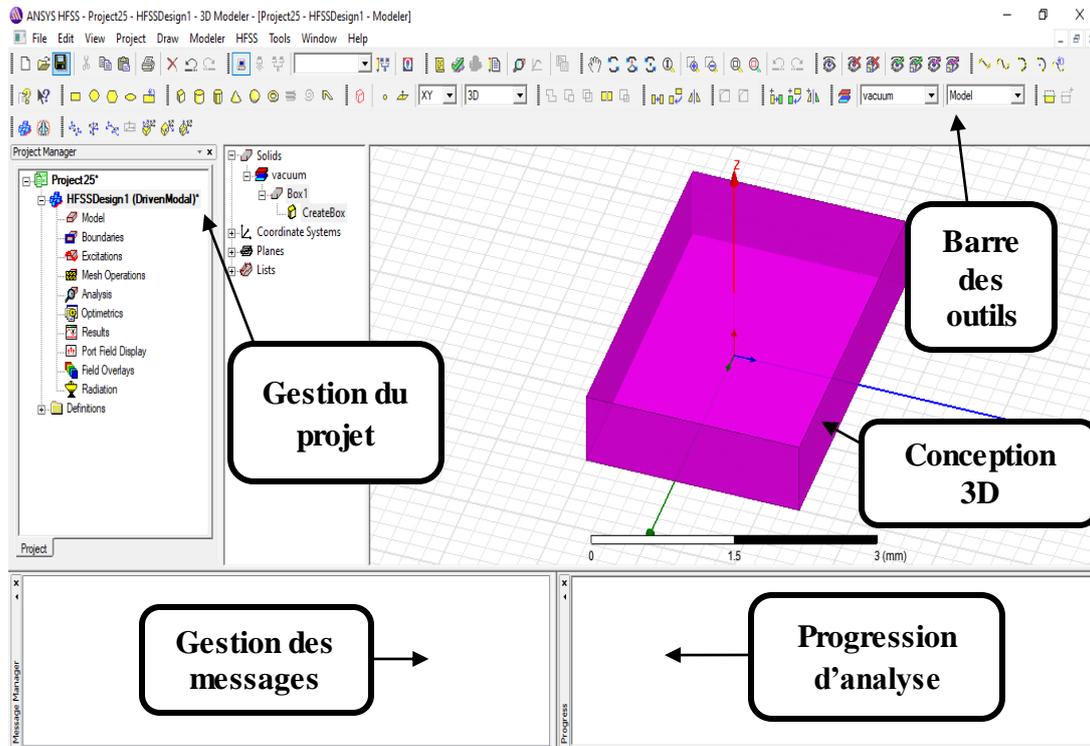


Figure III.2 Fenêtre principale du HFSS.

- ✓ **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 l'affichage et permet de changer les paramètres 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.2.5 Processus de fonctionnement de HFSS

Le schéma suivante représente le Processus HFSS [34].

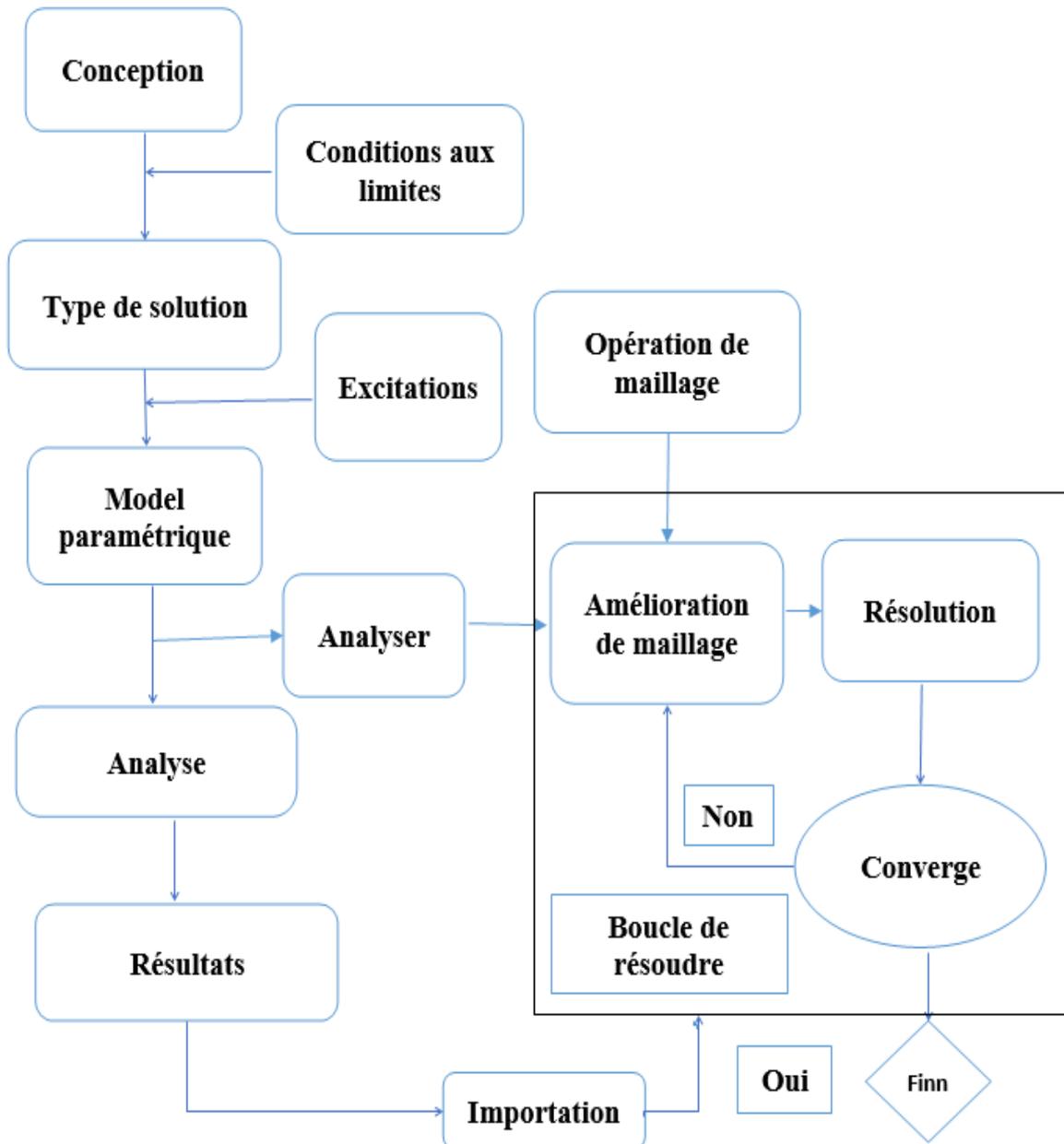


Figure III.3 Processus HFSS

III.3 Simulation d'un Guide d'ondes en SIW

Dans cette section, nous avons appliqué les équations de conception des composants SIW pour concevoir un guide d'onde intégré au substrat, fonctionnant à une fréquence de 10 GHz dans le mode TE₁₀. Le tableau III.1 présente les divers paramètres du guide d'ondes. Ce guide d'onde est conçu pour fonctionner dans la bande des 10 GHz en mode face et perspective.

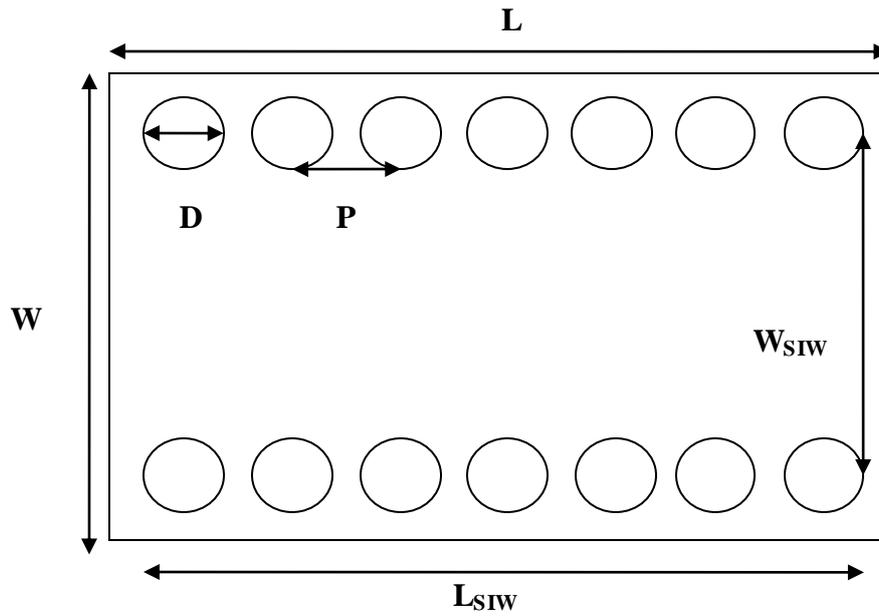


Figure III.4 Guide d'ondes en SIW

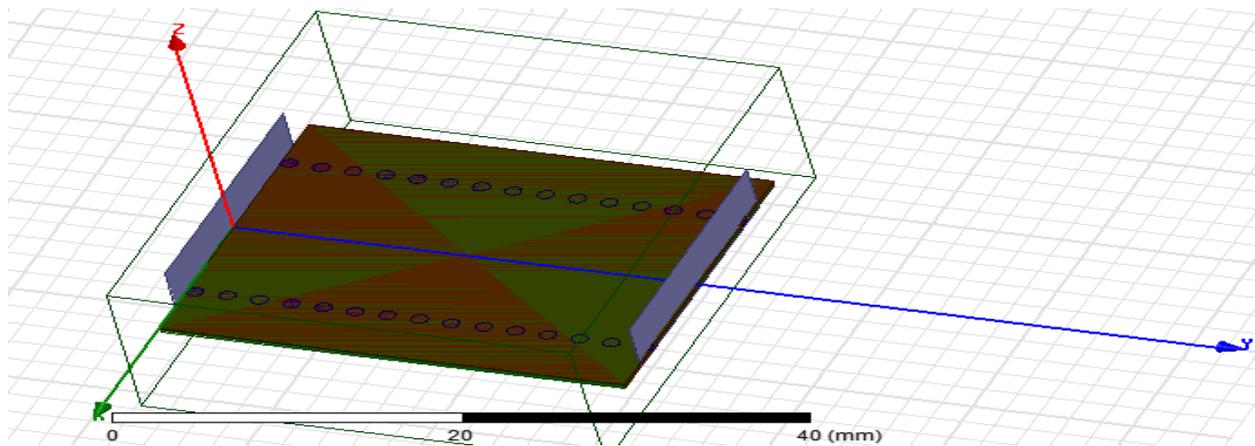


Figure III.5 Structure du guide SIW

Tableau III.1 Paramètres du guide d'onde SIW

Paramètres	Dimensions
Fréquence de coupure du mode le plus bas f_c	10 GHz
Hauteur du GND, h	0.017 mm
Largeur du guide d'onde, W	25 mm
Longueur du guide d'onde, L	30 mm
Diamètre des Vias, D	1 mm
Distance entre les Vias du centre au centre, P	2 mm
Longueur SIW, L_{siw}	29 mm
Largeur SIW, W_{siw}	15.17mm

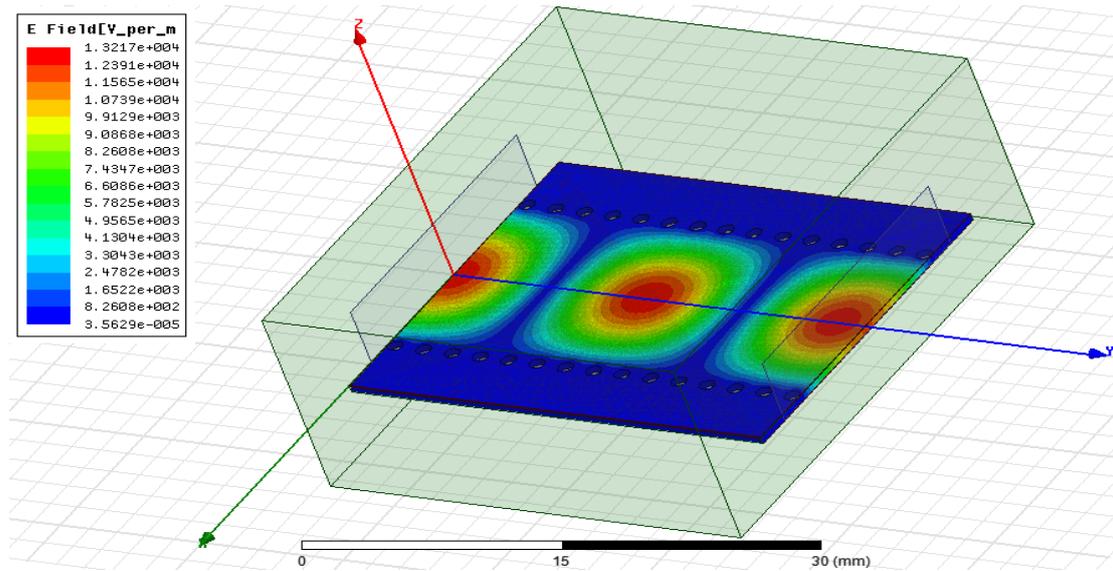


Figure III.6 Distribution du champ électrique dans le guide SIW

Après avoir conçu ce guide d'onde avec le logiciel HFSS et réalisé une simulation numérique, nous obtenons des données sur les puissances réfléchies à l'entrée et à la sortie, ainsi que sur le coefficient de transmission. Dans la Figure III.6, nous observons la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur du guide d'onde SIW. Cette figure met en évidence un meilleur guidage à faible perte des ondes électromagnétiques. Notamment, nous remarquons que la puissance est bien confinée entre les deux rangées de Vias, ce qui témoigne de l'efficacité du dispositif de guidage. Cette observation suggère que le guide d'onde SIW est capable de conduire les ondes électromagnétiques avec peu de pertes, ce qui est crucial pour de nombreuses applications où la conservation de la puissance du signal est primordiale.



Figure III.7 Résultats de simulation du guide SIW

La figure III.7 présente les données relatives au coefficient de transmission S_{21} et au coefficient de réflexion S_{11} du guide SIW. Nous observons une transmission adéquate avec une atténuation de seulement -3 dB, ce qui indique une bonne capacité du guide à transmettre les ondes sans pertes significatives. De plus, plusieurs pics de résonance sont perceptibles, caractérisés par des niveaux de réflexion descendant jusqu'à -65 dB. Cette observation suggère une bonne capacité du guide à confiner les ondes et à minimiser les réflexions indésirables, ce qui est crucial pour assurer une performance optimale du dispositif.

III.4 Conception d'un guide d'onde SIW

Dans cette section, nous efforcerons de concevoir un guide d'ondes SIW équipé de 2 ports de manière équivalente. Des recherches ont démontré l'efficacité de l'insertion de Vias pour la conception d'un guide d'ondes, donc dans notre cas, nous envisageons d'intégrer des Vias métalliques à différentes positions dans notre guide d'ondes afin d'obtenir des performances optimales. La structure de notre guide d'ondes SIW est illustrée dans la figure ci-dessous.

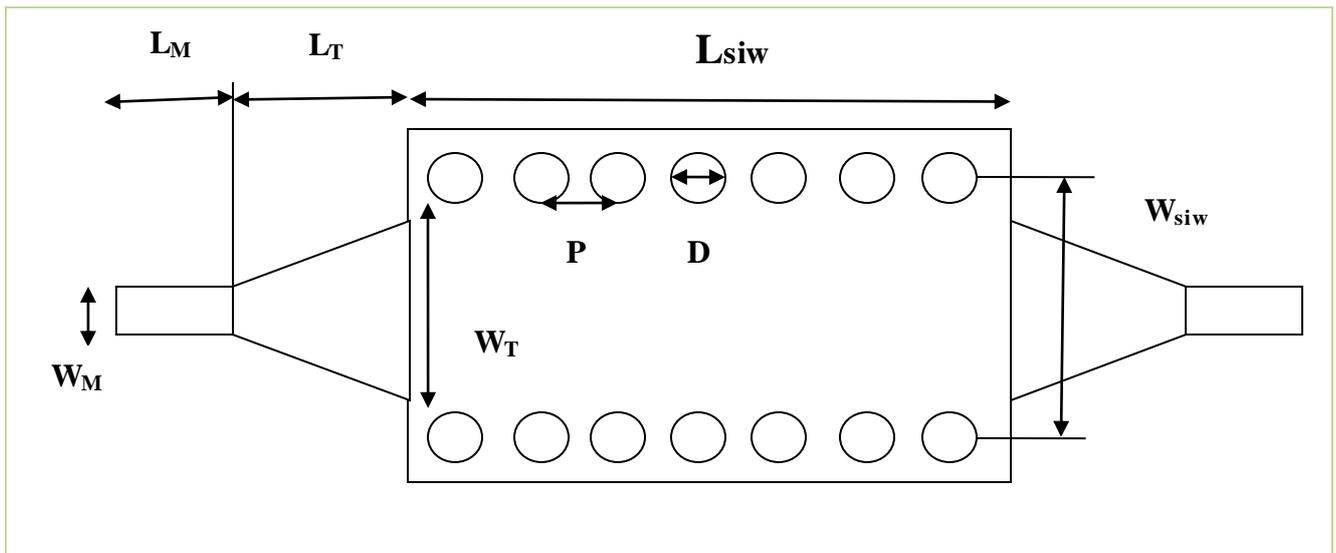


Figure III.8 Guide d'onde SIW avec les paramètres

III.4.1 Guide d'onde SIW avec $D = 1$ mm

Nous allons réaliser trois structures pour un diamètre de Vias de 1 mm noté D , en variant l'espacement entre les Vias, noté P .

III.4.1.1 Structure 1

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 50% de P . Donc D est égal à 1 et P est égal à 2.

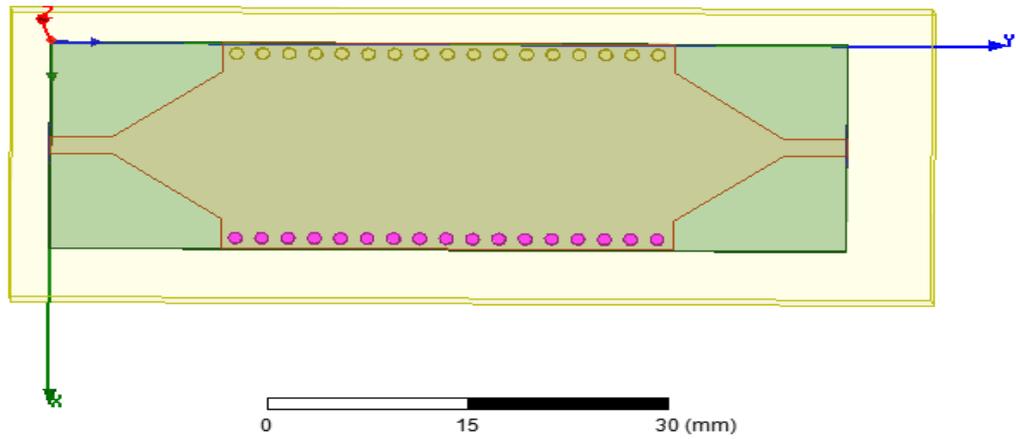


Figure III.9 Structure 1 d'un guide d'onde SIW

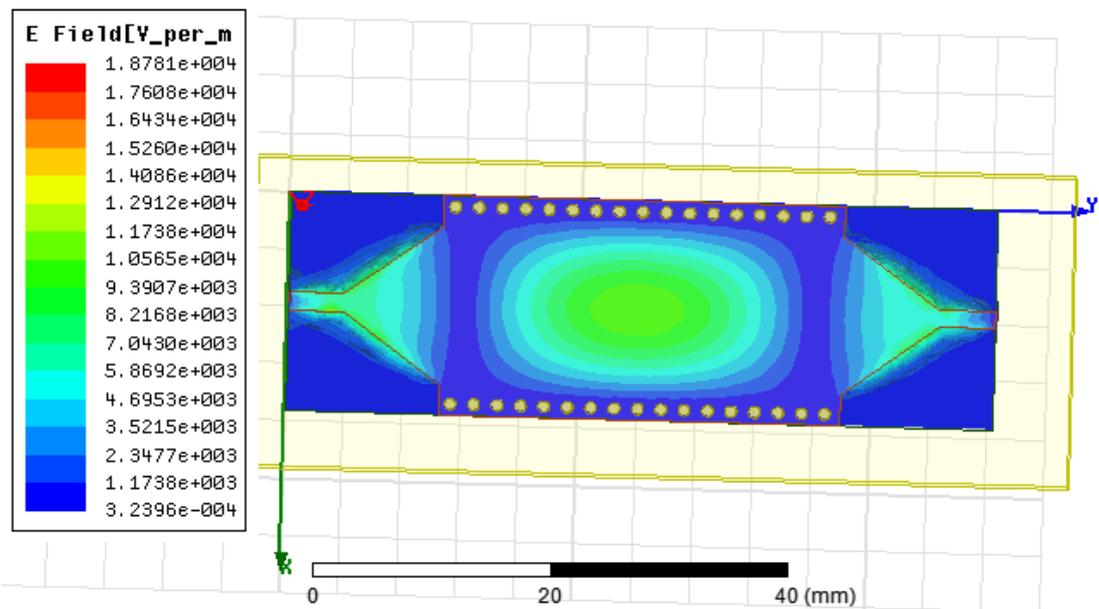


Figure III.10 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 1^{ème} structure

Tableau III.2 les Paramètres du guide d'onde SIW pour la 1^{er} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.46	19.15	17.15	34.3	8.31	4.77	13.72	1.56	1	2

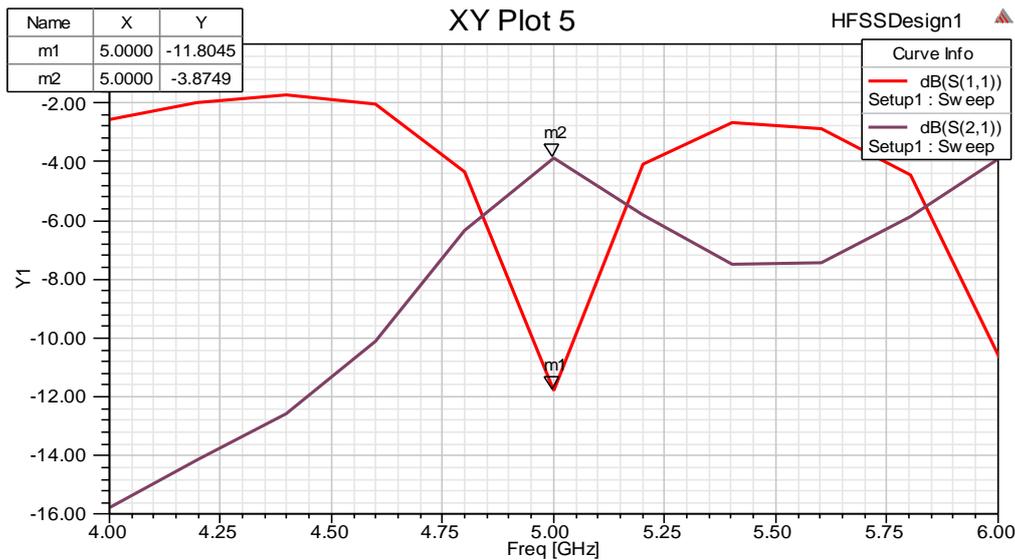


Figure III.11 Résultats de simulation du un guide d'onde SIW pour la 1^{ème} structure

Les résultats de simulation pour la figure III.11 une faible réflexion de puissance avec un coefficient de réflexion minimale de -11.8045 dB, ce qui témoigne d'une bonne adaptation d'impédance. Malgré des pertes de transmission, le coefficient de transmission maximal de -3.8749 dB reste relativement faible, ce qui suggère une transmission efficace des ondes électromagnétiques à travers le guide d'onde. Ces résultats indiquent une performance satisfaisante de la structure pour une fréquence de fonctionnement de 5 GHz, avec une optimisation réussie pour minimiser les pertes de réflexion et garantir une transmission efficace.

III.4.1.2 Structure 2

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 25% de P ou D est égal à 1 et P est égal à 4.

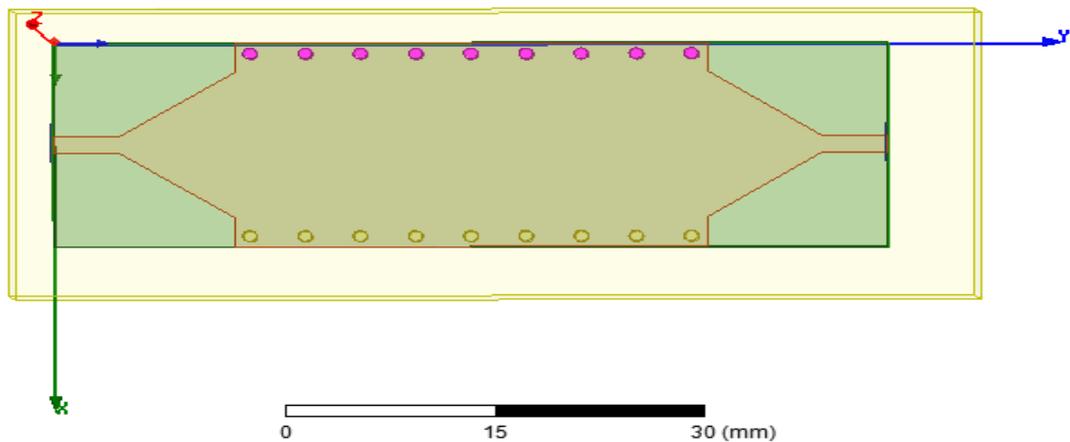


Figure III.12 Structure 2 d'un guide d'onde SIW

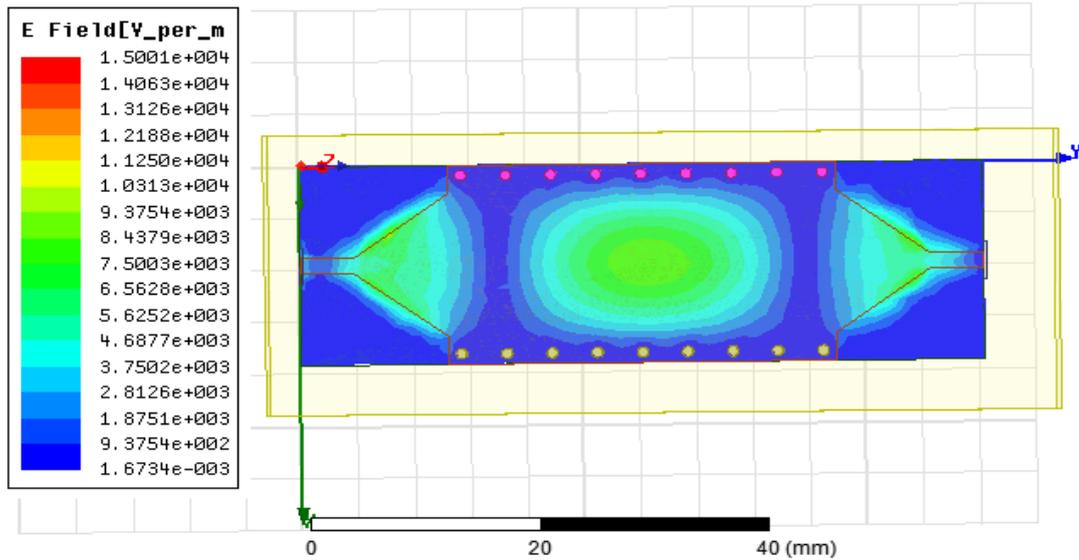


Figure III.13 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 2^{ème} structure

Tableau III.3 les Paramètres du guide d'onde SIW pour la 2^{ème} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.46	19.15	17.15	34.3	8.31	4.77	13.72	1.56	1	4

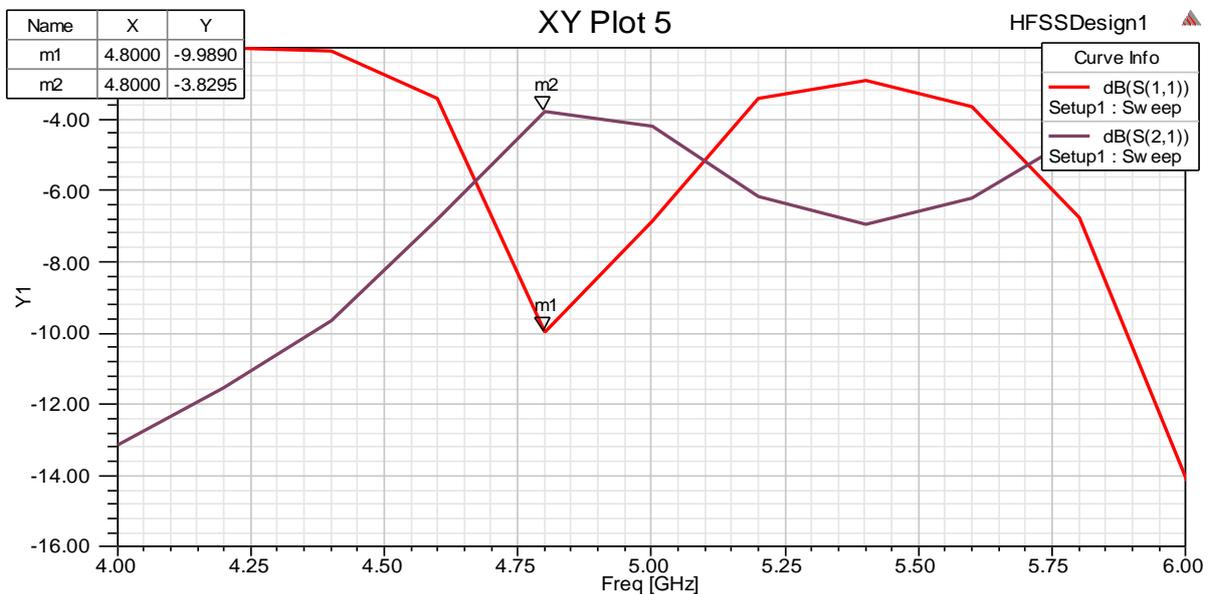


Figure III.14 Résultats de simulation du guide d'onde SIW pour la 2^{ème} structure

À une fréquence de 4.8 GHz, les résultats de simulation pour la figure III.14 montrent une réflexion de puissance modérée avec un coefficient de réflexion minimale de -9.9890 dB. La transmission de puissance à travers le guide d'onde est relativement efficace, comme le montre le coefficient de transmission maximal de -3.8295 dB.

Bien que ces valeurs indiquent une performance moyenne, elles restent acceptables pour de nombreuses applications. Des ajustements pourraient être envisagés pour améliorer davantage les performances de la structure.

III.4.1.3 Structure 3

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 75% de P ou D est égal à 1 et P est égal à 1.33.

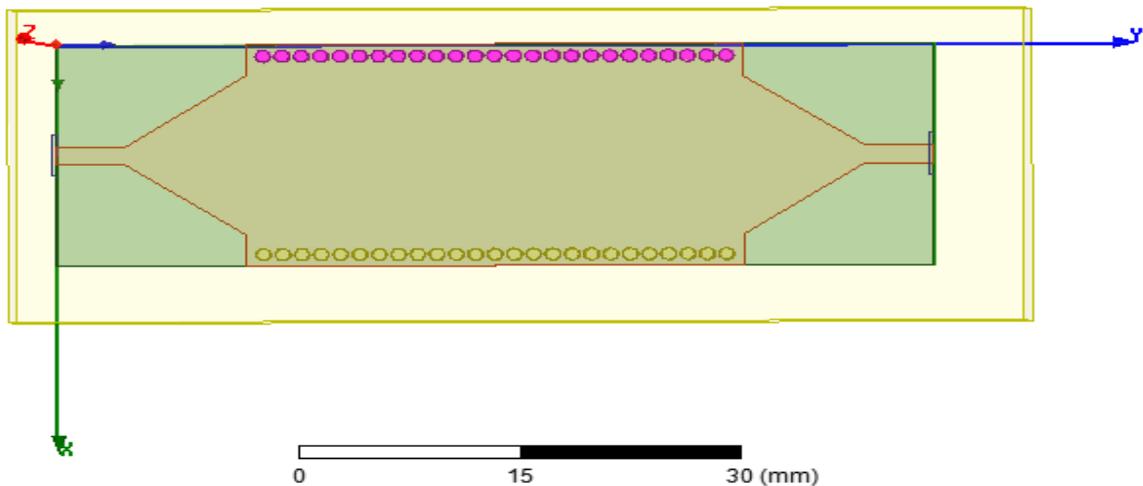


Figure III.15 Structure 3 d'un guide d'onde SIW

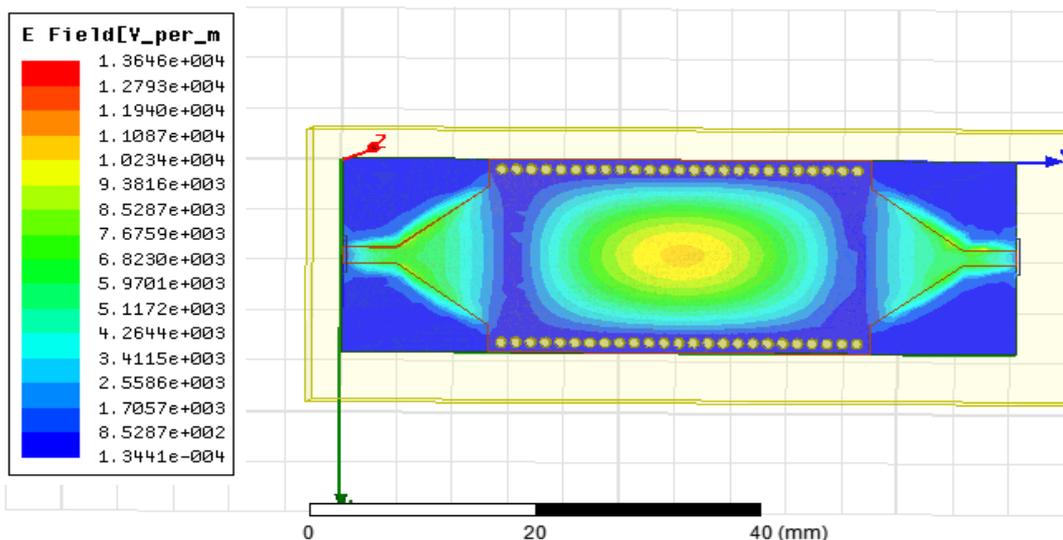


Figure III.16 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 3^{ème} structure

Tableau III.4 Paramètres du guide d'onde SIW pour la 3^{ème} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.46	19.15	17.15	34.3	8.31	4.77	13.72	1.56	1	1.33

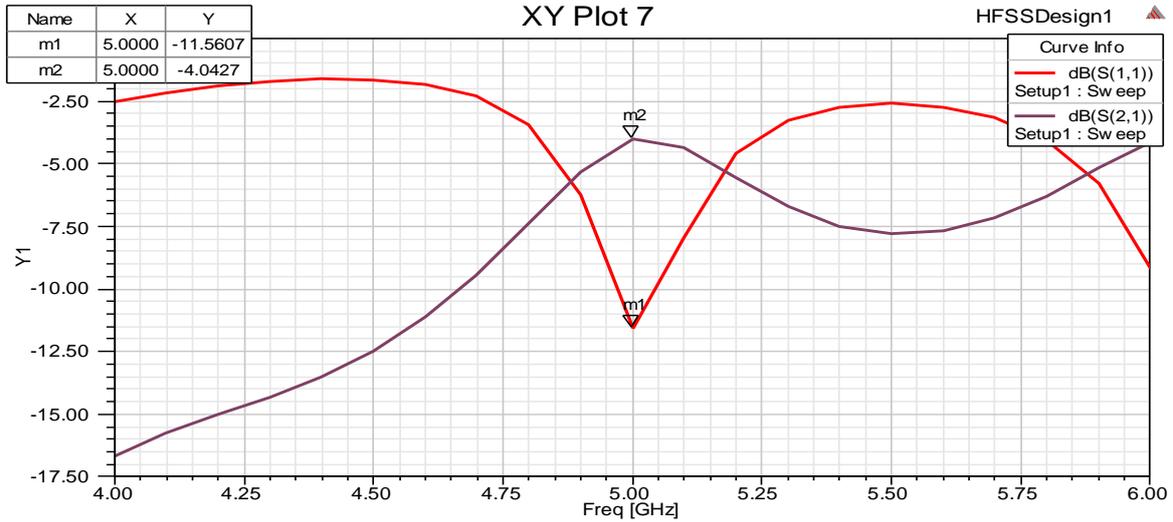


Figure III.17 Résultats de simulation du un guide d'onde SIW pour la 3^{ème} structure

Les résultats de simulation pour la figure III.17 une faible réflexion de puissance avec un coefficient de réflexion minimale de -11.5607 dB, témoignant d'une bonne adaptation d'impédance. Bien que la transmission de puissance soit efficace, avec un coefficient de transmission maximal de -4.0427 dB, il subsiste une certaine perte de puissance. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent des performances prometteuses pour la structure du guide d'onde SIW à une fréquence de fonctionnement de 5 GHz, mais des possibilités d'amélioration pour réduire davantage les pertes de transmission peuvent être envisagées.

III.4.1.4 Comparaison entre les trois structures pour D=1mm

Le tableau ci-dessous représente les résultats de de simulation pour les trois structures 1,2,3.

Tableau III.5: Résultats de simulation pour les trois structures 1,2,3.

Structure	1	2	3
Valeur de P [mm]	2	4	1.33
Coefficient de réflexion en dB	-11.8045	-9.9890	-11.5607
Coefficient de transmission en dB	-3.8749	-3.8295	-4.0427

- ❖ Les deux structures 1 et 3 présentent des coefficients de réflexion minimale similaires.
- ❖ La structure 2 se distingue par un coefficient de réflexion minimale plus bas, indiquant une réduction significative de la réflexion de puissance par rapport aux autres structures.

III.4.2 Guide d'onde SIW avec D = 0.66 mm

Dans cette partie nous allons réaliser trois structures pour un diamètre de Vias de 0.66 mm noté D, en variant l'espacement entre les Vias, noté P.

III.4.2.1 Structure 4

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 50% de P ou D est égal à 0.66 et P est égal à 1.33.

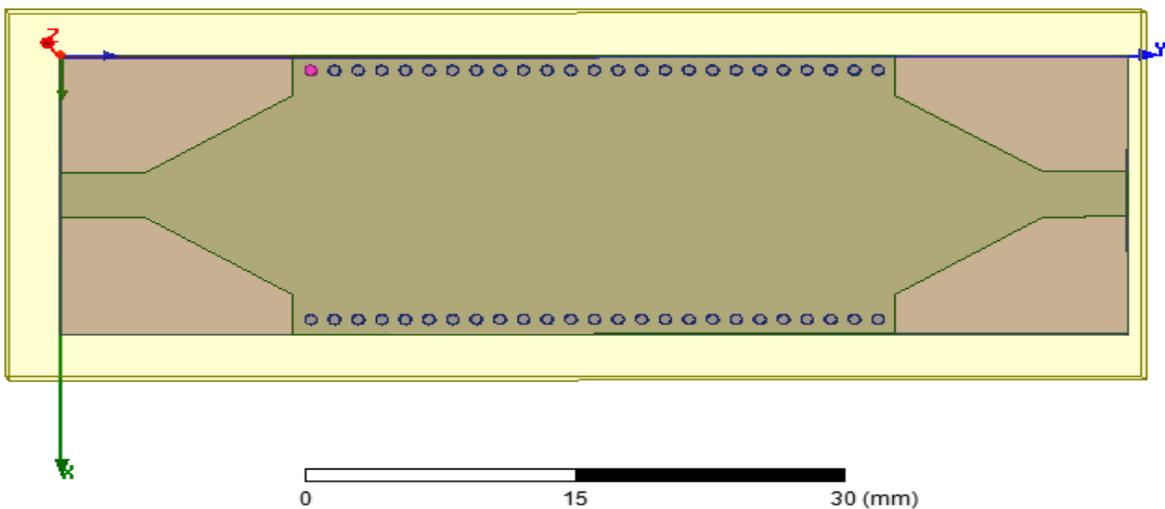


Figure III.18 Structure 4 d'un guide d'onde SIW

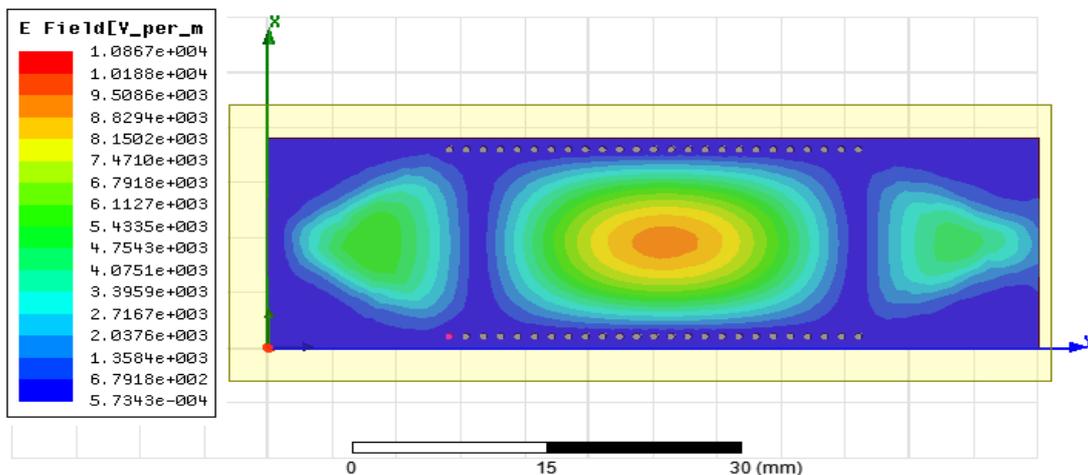


Figure III.19 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 4^{ème} structure

Tableau III.6 Paramètres du guide d'onde SIW pour la 4^{ème} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.08	18.96	16.96	33.92	8.31	4.77	13.56	3.05	0.66	1.33

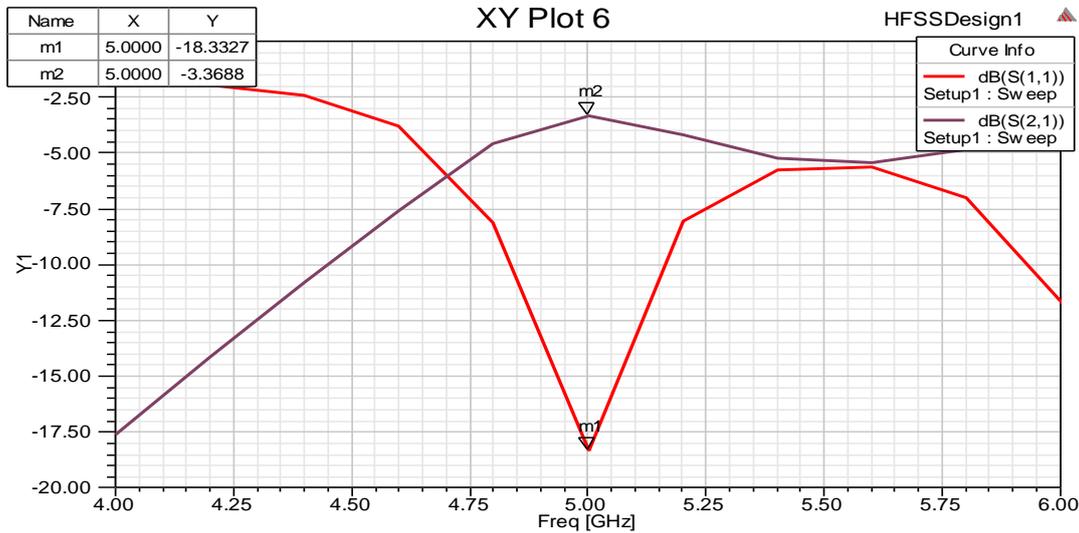


Figure III.20 Résultats de simulation du un guide d'onde SIW pour la 4^{ème} structure

Les résultats de simulation pour la figure III.20 sont très prometteurs. Avec un coefficient de réflexion minimale de -18.3327 dB, la réflexion de puissance est très faible, indiquant une excellente adaptation d'impédance. De plus, le coefficient de transmission maximal de -3.3688 dB témoigne d'une transmission efficace de la puissance à travers le guide d'onde.

III.4.2.2 Structure 5

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 25% de P ou D est égal à 0.66 et P est égal à 2.64.

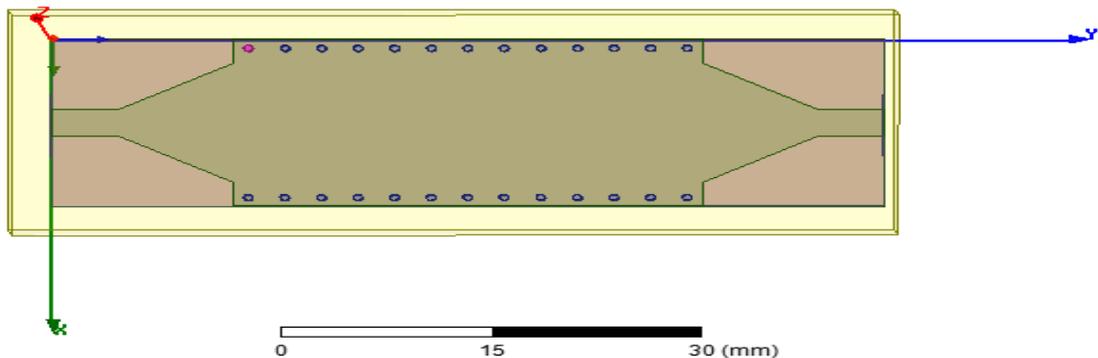


Figure III.21 Structure 5 d'un guide d'onde SIW

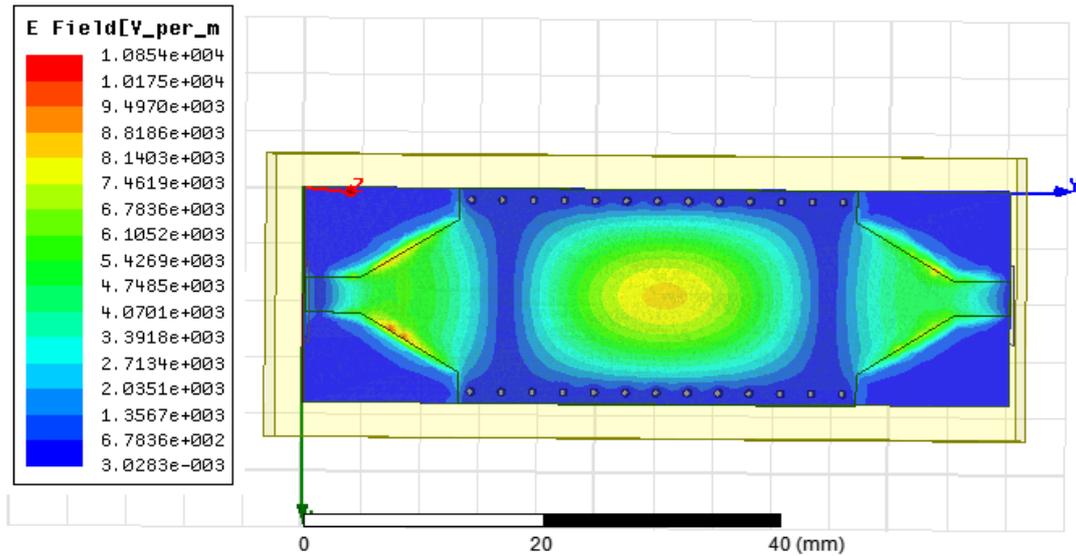


Figure III.22 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 5^{ème} structure

Tableau III.7 Paramètres du guide d'onde SIW pour la 5^{ème} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.08	18.96	16.96	33.92	8.31	4.77	13.56	3.05	0.66	2.64

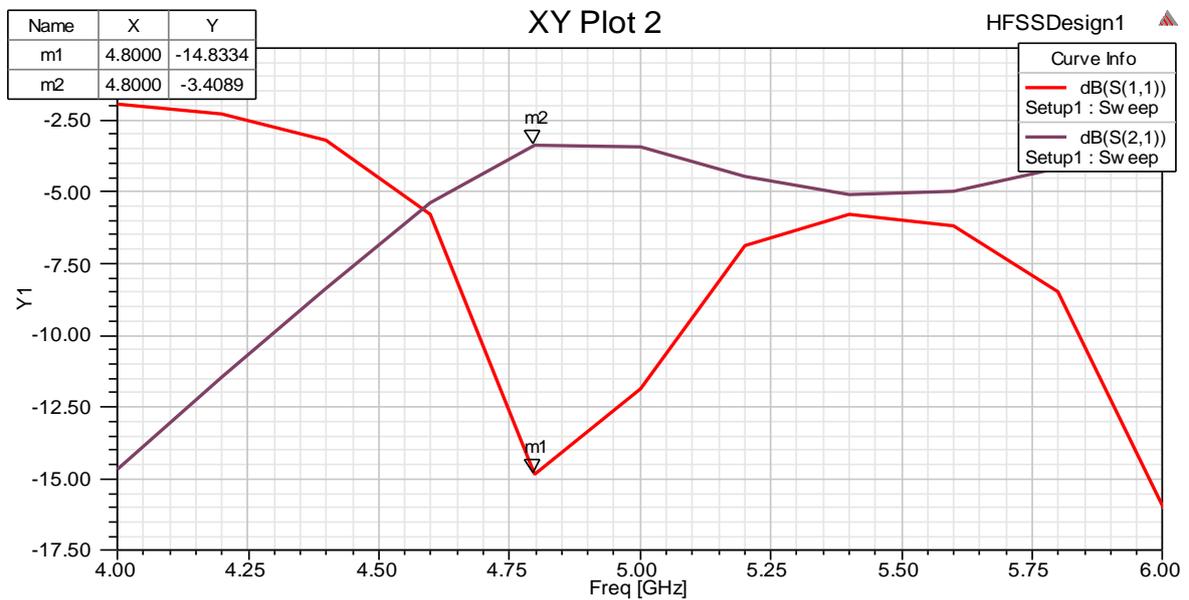


Figure III.23 Résultats de simulation du un guide d'onde SIW pour la 5^{ème} structure

À une fréquence de 4.8 GHz, les résultats de simulation pour la figure III.23 montrent une réflexion de puissance relativement faible avec un coefficient de réflexion minimale de -14.8334 dB. La transmission de puissance à travers le guide d'onde est efficace, comme le montre le coefficient de transmission maximal de -3.4089 dB. Ces résultats suggèrent une bonne adaptation d'impédance et une conception optimisée de la structure du guide d'onde SIW pour cette fréquence.

III.4.2.3 Structure 6

La structure ci-dessous représente un guide d'onde SIW avec des paramètres où D est égal à 75% de P ou D est égal à 0.66 et P est égal à 0.88.

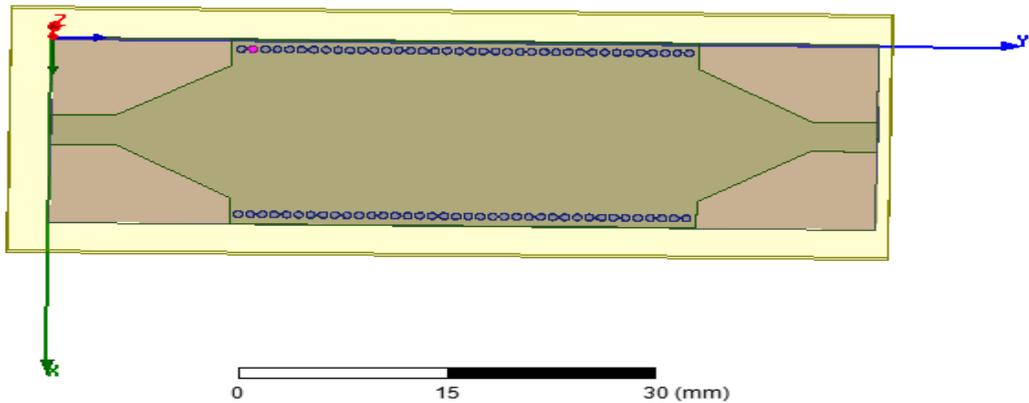


Figure III.24 Structure 6 d'un guide d'onde SIW

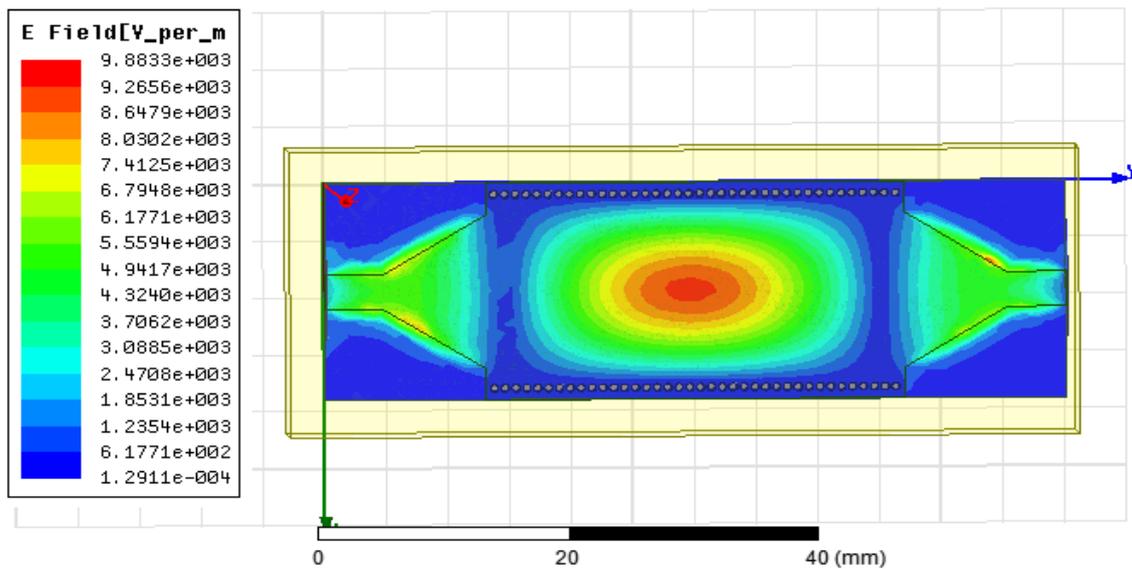


Figure III.25 Distribution du champ électrique dans un guide d'onde SIW pour la 6^{ème} structure

Tableau III.8 Paramètres du guide d'onde SIW pour la 6^{ème} structure

Paramètres	L	W	W _{SIW}	L _{SIW}	L _T	L _M	W _T	W _M	D	P
Valeur [mm]	60.08	18.96	16.96	33.92	8.31	4.77	13.56	3.05	0.66	0.88

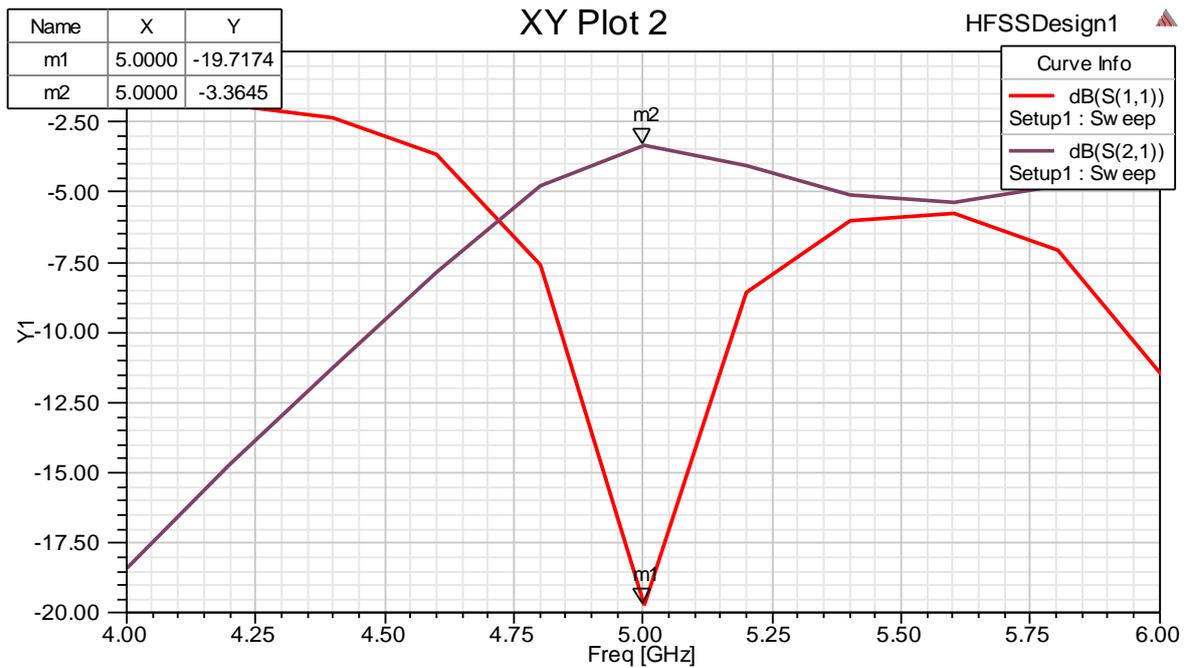


Figure III.26 Résultats de simulation du un guide d'onde SIW pour la 6^{ème} structure

Les résultats de simulation pour la figure III.26 indiquent des performances remarquables. Avec un coefficient de réflexion minimale de -19.7174 dB, la réflexion de puissance est très faible, ce qui témoigne d'une excellente adaptation d'impédance. De plus, le coefficient de transmission maximal de -3.3646 dB montre une transmission efficace de la puissance à travers le guide d'onde. Ces résultats suggèrent une conception optimale de la structure du guide d'onde SIW pour une fréquence de fonctionnement de 5 GHz.

III.4.2.4 Comparaison entre les trois structures 4, 5 et 6 avec D=0.66

Le tableau ci-dessous représente les résultats de de simulation pour les trois structures 4, 5 et 6.

Tableau III.9 Résultats de simulation pour les trois structures 4, 5 et 6.

Structure	4	5	6
La valeur de P[mm]	1.33	2.64	0.88
Coefficient de réflexion en (dB)	-18.3327	-14.8334	-19.7174
Coefficient de transmission en (dB)	-3.3688	-3.4089	-3.3646

- ❖ La 4^{ème} et la 6^{ème} structures ont des coefficients de réflexion minimale que la 5^{ème}, indiquant une réduction plus importante de la réflexion de puissance.

- ❖ La 5^{ème} structure a un coefficient de transmission le plus bas, tandis que la 4^{ème} et la 6^{ème} ont le plus élevé, suggérant une transmission de puissance légèrement plus efficace.

- ❖ Globalement, la 6^{ème} structure avec un espacement entre les Vias de 0.88 mm semble offrir les

meilleures performances, avec le coefficient de réflexion minimale le plus bas et le coefficient de transmission maximal le plus élevé, suggérant une meilleure adaptation d'impédance et une Transmission de puissance plus efficace dans cette configuration.

III.4.3 Comparaison entre les six structures

Le tableau ci-dessous représente les résultats de de simulation pour les six structures

Tableau III.10 Résultats de simulation pour toutes structures

Structure	D [mm]	P[mm]	f[GHz]	S ₁₁ [dB]	S ₂₁ [dB]
1	1	2	5	-11.8045	-3.8749
2	1	4	4.8	-9.9890	-3.8295
3	1	1.33	5	-11.5607	-4.0427
4	0.66	1.33	5	-18.3327	-3.3688
5	0.66	2.64	4.8	-14.8334	-3.4089
6	0.66	0.88	5	-19.7174	-3.3646

❖ Le diamètre des Vias semble avoir un impact significatif sur les performances, avec des diamètres plus petits conduisant à des coefficients de réflexion minimale plus bas, ce qui est généralement souhaitable.

❖ L'espacement entre les Vias affecte également les performances, bien que dans une moindre mesure que le diamètre des Vias. Des espacements plus petits semblent généralement améliorer les performances.

❖ Les variations de fréquence semblent également influencer les performances, avec des fréquences plus basses conduisant à des performances différentes.

❖ La meilleure structure c'est la 6^{ème} structure en termes de performances, bien que sa mise en œuvre soit entravée par le diamètre des Vias.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation du logiciel de simulation HFSS, en soulignant ses fenêtres principales et les tâches essentielles pour les simulations. Ensuite, nous détaillons la conception d'un guide d'onde SIW en utilisant ce logiciel. Enfin, nous procédons à la simulation de six structures différentes (structure 1, structure 2, structure 3, structure 4, structure 5, structure 6), en variant le diamètre des Vias (noté D) et l'espacement entre les Vias (noté P).

Nous observons les différences entre ces structures et concluons que plusieurs facteurs influencent

l'adaptation des ondes électromagnétiques, notamment :

❖ Impact du diamètre des Vias : les Vias de plus petit diamètre entraînent généralement des pertes de réflexion moindres, améliorant ainsi les performances du guide d'onde SIW en termes de réflexion minimale.

❖ Influence de l'espacement entre les Vias : un espacement réduit entre les Vias peut améliorer les performances, bien que cela puisse accroître la complexité de la conception et de la fabrication.

L'étude de ces structures met en évidence l'importance de l'optimisation des paramètres de conception pour obtenir les performances requises dans diverses applications RF et micro-ondes utilisant des guides d'ondes SIW.

Les besoins croissants en développement de nouvelles technologies compactes, performantes et moins coûteuses posent des défis importants pour les systèmes de télécommunications. Dans ce contexte, la technologie SIW s'avère prometteuse grâce aux avantages qu'elle offre dans la réalisation de composants ou sous-systèmes nécessaires aux applications micro-ondes et millimétriques.

La technologie SIW suscite un grand intérêt chez les chercheurs et les industriels, car elle permet d'intégrer les guides d'ondes métalliques aux circuits planaires sans perte de performances de transmission. Les travaux présentés dans ce mémoire contribuent au développement de nouveaux coupleurs passifs basés sur la technologie SIW.

Ce mémoire est structuré en trois sections principales :

Le premier chapitre offre un aperçu général des guides d'ondes, expliquant leur principe de fonctionnement, les différents types de guides d'ondes et leurs utilisations.

La deuxième chapitre aborde les généralités sur la technologie SIW, décrivant son principe, les étapes pour concevoir efficacement une structure SIW, ainsi que les avantages et inconvénients de cette technologie.

Le troisième chapitre constitue le cœur de notre étude, présentant en détail les résultats obtenus à l'aide du programme HFSS. Il inclut des modifications de différents paramètres géométriques d'un guide d'onde SIW. Nous avons réalisé six structures différentes en variant le diamètre des Vias (noté D) et l'espacement entre les Vias (noté P). La sixième structure s'est avérée la meilleure en termes de performances, bien que sa mise en œuvre soit entravée par le diamètre des Vias.

Enfin, nous mettons en lumière les structures candidates étudiées et analysées dans ce mémoire, soulignant leur pertinence pour la recherche internationale. Nous espérons que cette étude inspirera d'autres étudiants à poursuivre ce travail, à améliorer nos résultats et à explorer d'autres structures de filtres et des règles de conception plus précises pour faciliter les processus de conception futurs, et nous avons accumulé une masse importante de connaissances aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique, et nous estimons qu'elle nous sera très utile à l'avenir, en tant que futur Ingénieur.

- [1] BOUBEKRI Fayçal CHAKHA Amara Saliha « Etude et dimensionnement d'un guide d'onde en arête à base du matériau » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA ,2013/2014.
- [2] NOURI Keltouma, « conception, Réalisation et caractérisation de filtres et de duplexeurs en technologies guides d'ondes et SIW application aux systèmes de communication » Thèse de doctorat, Université Dr Moulay Tahar SAIDA. Octobre 2015.
- [3] maurizio bozzi1, luca perregrini1, ke wu2, paolo arcioni1, "current and future research trends in substrate integrated waveguide technology", radioengineering, vol. 18, no. 2, department of electronics, university of pavia, pavia, italy, p202, june 2009.
- [4] "substrate integrated transmission lines: review and applications ", volume 1, no. 1, p348, january 2021.
- [5] Y. Modi and C. A. Balanis, "PEC-PMC Baffle Inside Circular Cross Section Waveguide for Reduction of Cut-Off Frequency," in IEEE Microwave and Wireless
- [6] 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.
- [7] D. Grenier, " Electromagnétique et transmission des ondes " Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Québec, 2012.
- [8] Licence Djebbari et Barkat. "Conception, simulation et la réalisation d'un guide d'onde rectangulaire en bande X ", Université de Tlemcen, Mai 2014
- [9] A. Kamil, Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz), grade du Maître ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 2011.
- [10] O. Picon et coll. Les antennes. Théorie, conception et applications. (antennes kml)
- [11] E. J. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on, vol. 8, no. 1, pp. 16- 18, 1960. (diviseur)
- [12] U. H. Gysel, "A new N-way power divider/combiner suitable for high,"power applications," in Microwave Symposium, 1975 IEEE-MTT-S International. IEEE, 1975, pp. 116-118
- [13] BECHAREF Kada et BENZAI Amina, « Contribution à la Conception d'un Coupleur Directif en Technologie SIW dans la band X », mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay – Saida, juin 2014. Coupleurs
- [14] <https://www.rapport-gratuit.com/caracteristiques-du-guide-dondes-en-technologie-siw> consulté le 04 mai 2024.

- [15] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11053/1/Ms> consulté le 10 mai 2024.
- [16] HIROSHI, U., TAKESHI, T., FUJII, M. Development of a 'laminated waveguide'. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 12, pp. 2438–2443, 1998.
- [17] SHIGEKI, F. Waveguide Line (in Japanese). Japan Patent 06-053, Feb. 25, 1994.
- [18] FLEMING, W. J. New automotive sensors—A review. IEEE Sensors Journal, vol. 8, no. 11, pp. 1900-1921, 2008.
- [19] Y. D. Dong, T. Yang, and T. Itoh, "Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 57, no. 9, pp. 2211–2223, Sep. 2009.
- [20] m. cherifi, miraoui, "conception des nouvelles configurations des filtres hyperfréquences par technologie siw", p18 p26 p15 p53 p20, juin 2017
- [21] Harrington R.F, Field Computation by Moment Methods, réimprimée, illustrée ed., USA, 1993 Oxford University Press, Ed. ISBN: 9780198592174, 1993,
- [22] M. Y. Mah, A. Ferendeci, L. L. Liou, "Equivalent Circuit Parameter Extraction of Microstrip Coupling Lines Using FDTD Method," IEEE Transaction on Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 3, no. 3, pp. 1488-1491, Jun 2000.
- [23] R. Courant, "Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration," Bulletin of the American Mathematical Society, vol. 49, no. 1, pp. 1-23, 1943
- [24] Lezhu Zhou and L.E., Davis, "Finite element method with edge elements for waveguides loaded with ferrite magnetized in arbitrary direction," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 44, no. 6, pp. 809-815, June 1996.
- [25] F. Xu, K. WU, "Guide-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," IEEE Trans Microw Theory Tech., Jan. vol 53, no.1, pp.66-73, 2005.
- [26] M. Georgiadis, A. Wu, K. Bozzi, "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas," Microwaves Antennas & Propagation IET. June, vol. 5, no. 8, pp. 909-920. 2011.
- [27] N. Raveu, G. Prigent, O. Pigaglio, H. Baudrand, K. Al-Abdullah, A. Ismail, "Alhzzoury Substrate Integrated Waveguide Filter Design with Wave Concept Iterative Procedure," Microwave and Optical Technology Letters. vol., Dec. 53, no. 12, pp. 2939-2942. 2011

- [28] M. ABRI, H. BADAOUUI , Z. BERBER, "A Bow-Tie Bluetooth/Wimax Antenna Design for Wireless Networks Applications," *International Journal of Information & Network Security (IJINS)* Vol.1, No.3, August 2012, pp. 207-215 ISSN: 2089-3299.
- [29] M. Abri, H. Abribadaoui, H. Dib , A. S. E. Gharnaout, "Bi-band bow-tie antennas array design using a simple equivalent transmission line model," *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.4, No.4, pp 279-290, July 2012
- [30] N. Raveu, H. Baudrand, K. Al-Abdullah, A. Ismail Alhzzoury, " Caractérisation des circuits SIW par méthode modale," 18èmes Journées Nationales Microondes, Mai.2013.
- [31] m. cherifi, l. miraoui, " conception des nouvelles configurations des filtres hyperfréquences par technologie siw", p18 p26 p15 p53 p20, juin 2017.
- [32] n. ahmed, "contribution à la conception et à la réalisation des configurations compactes des filtres siw dgs pour les applications de télécommunications spatiales", thèse de doctorat, centre universitaire belhadj bouchaïb-ain témouchent, p 14, 2020.
- [33] <https://sofronicautomation.com/hfss-2> consulté le 24 mai 2024.
- [34] h. yazi, h. khidouri, " conception et simulation des coupleurs bicouche 3 db /90° en Technologies siw", université kasdimerbahouargla, p13 p15 p06, octobre 2020.