

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 بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : télécommunication
Spécialité : Réseaux et télécommunications

Présenté par :

Ayache Nihal

&

Driouech Khadidja

THEME:

N° :RT5

Conception et Optimisation d'une antenne patch basée sur la technologie SIW

Proposé par : DR. BENDOUMIA Rédha
&
DR. ABED Ahcene

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

*Tous d'abord nous tenons à remercier le bon **Dieu** tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrant Monsieur **BENDOUMIA RÉDHA** pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de notre mémoire d'afin d'étude.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury **Même BERKAT** et **Même BOUTALAB** qui m'ont fait l'honneur d'accepter de jurer notre travail.*

Nous adressons nos sincère remerciements à tous les professeurs qui par leurs conseils et leurs efforts durant tous les années passées nous sommes là, vraiment un grand remerciement pour leurs qualités d'enseignement qui nous a été dispensé.

Dédicaces

En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers :

Ma très chère mère **SOUAD, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

** Mon très cher père **ZOUBIR**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

***Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je suis puisse vous combler de bonheur.*

Mon chère frère **ACHRAF, décédé dont j'ai toujours souhaité la présence dans ma vie, Mon petit frère **AKRAM**, que j'aime et Ma sœurs **LOUBNA** puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.*

Mon chère oncle **HAMZA mon modèle merci pour tous ce que tu me donne. Mes tantes **ZINEB**, **LIELA**, **SIHAM** que j'aime.*

** Ma cher binôme **KHADIDJA**, merci d'être la meilleure version de toi-même, ta contribution a été essentielle à cette réussite.*

** Mon premier amie d'enfance, mon épaule solide **HASSNAA**.*

** **A** tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.*

NIHAL

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier **Dieu** de m'avoir donnée la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie ce travail

A ma merveilleuse mère **Salima, qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à poursuivre mes rêves. Sans toi, je n'aurais pas acquis la force et la résilience nécessaires pour obtenir à ce stade. Je t'aime maman et j'implore le tout puissant pour qu'elle, t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

** A mon cher père **Hakim**, ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Que dieu te garde et te protège.*

** A mes ailes, sans lesquelles je n'aurais pas volé vers mon rêve, à mes frères **Mahdi et Abd el rahim**.*

A mes deux chéris musqués, aux deux belles et épanouies, mes deux sœurs **Ilhem et Amina.*

Vous êtes mes yeux avec lesquels j'ai vu le chemin, et les deux étoiles qui m'ont guidé dans l'obscurité de route. Que dieu te garde pour moi et fasse de toi la joie des yeux de mes parents.

Sans oublier mon binôme **Nihal, pour son soutien morale sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

A tous les membres de **ma grande famille, qui n'ont jamais cessé de me donner un coup de main, ce travail est le résultat de vos encouragements.*

A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.

**Et enfin à moi même*

Vous êtes ici aujourd'hui, debout au bout de ce long chemin, fier, fort et inébranlable. Je te dédie cette remise de diplôme parce que tu n'as pas désespéré, tu n'as pas reculé et parce que tu mérites d'être fier de tout ce que tu as accompli.

KHADIDJA

ملخص:

مع التطور السريع لأنظمة الاتصالات اللاسلكية، أصبح من الضروري تطوير هوائيات مدمجة وفعالة ومنخفضة التكلفة. يهدف هذا مشروع التخرج إلى تصميم وتحسين هوائي باتش باستخدام تقنية الدليل الموجي المدمج في الركيزة SIW. تتيح هذه التقنية الجمع بين مزايا الأدلة الموجية المعدنية التقليدية، مثل الفقد المنخفض والعزل الكهرومغناطيسي الجيد، وبين ميزة الدمج السهل والدمج المكثف للدوائر المسطحة.

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو تصميم هوائي باتش عالي الأداء، يتمتع بتوجيهية جيدة وعرض نطاق ترددي واسع وكفاءة عالية، مع تقليل الفقد والتداخل إلى الحد الأدنى. سيشمل العمل نمذجة الهوائي ومحاكاته وتحسينه باستخدام برامج المحاكاة الكهرومغناطيسية مثل HFSS، بالإضافة إلى إجراء تحليل مقارنة للنتائج المتحصل عليها بهدف التحقق من صحة التصميم النهائي.

كلمات المفاتيح: تكنولوجيا SIW ; موجة موجات; HFSS ; هوائي.

Résumé :

Avec l'évolution rapide des systèmes de télécommunications sans fil, les antennes compactes, efficaces et à faible coût deviennent essentiels. Ce projet de fin d'études porte sur la conception et l'optimisation d'une antenne patch basée sur la technologie des structures intégrées en substrat (SIW – Substrate integrated waveguide). Cette technologie permet de combiner les avantages des guides d'ondes classiques, tels que les faibles pertes et une bonne isolation électromagnétique, avec la compacité et la facilité d'intégration des circuits planaires.

L'objectif du projet est concevoir une antenne patch performante, présentant une bonne directivité, une large bande passante et une haute efficacité, tout en minimisant les pertes et les interférences. Le travail inclura la modélisation, la simulation et l'optimisation de l'antenne à l'aide de logiciel électromagnétique tels que HFSS, ainsi qu'une analyse comparative des résultats obtenus pour valider la conception finale.

Mots clés : Technologie SIW ; guide d'ondes ; HFSS ; Antenne.

Abstract:

With the rapid evolution of wireless telecommunication systems, compact, efficient, and low-cost antennas have become essential. This final-year project focuses on the design and optimization of a patch antenna based on Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology. This technology combines the advantages of traditional waveguides, such as low losses and good electromagnetic isolation, with the compactness and ease of integration of planar circuits.

The objective of the project is to design a high-performance patch antenna with good directivity, wide bandwidth, and high efficiency, while minimizing losses and interference. The work will include modelling, simulation, and optimization of the antenna using electromagnetic software such as HFSS, as well as a comparative analysis of the results obtained to validate the final design.

Keywords: SIW technology; waveguide; HFSS; antenna.

Liste des acronymes et Abréviations

- OEM : Onde électromagnétique.
- HFSS : High Frequency Structure Simulator.
- SIW : Substrat Integrated wave-guide.
- MLT : Modèle de la ligne de transmission.
- TM : Transverse magnétique.
- TE : Transverse électrique.
- TEM : Transverse électromagnétique.
- E : Champs électrique.
- G : Gain.
- D : Directivité.
- η : Rendement.
- FA : Facteur d'antenne.
- z_{in} : Impédance d'entrée.
- R : Résistance de l'antenne.
- X : Réactance de l'antenne.
- S11 : Coefficient de réflexion.
- z_c : Impédance caractéristique.
- Bp : bande passante.
- Fmax : Fréquence maximale.
- Fmin : Fréquence minimale.
- F_c : 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.
- h : épaisseur du substrat.
- t : épaisseur du 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.
- λ_c : Longueur d'onde correspond à la fréquence de coupure.
- λ_g : La longueur d'onde du guide.
- 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.
- GHz : Giga Hertz.
- a_r : longueur de port.
- L_s : longueur slot

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1:Généralités sur les antennes	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique de l'antenne.....	5
I.3. Principe de fonctionnement	6
I.4. Type d'antenne.....	6
I.4.1 Antenne filaires	7
I.4.1.1 Caractéristiques principales	7
I.4.1.2 Exemples.....	7
I.4.2 Antenne imprimées	8
I.4.2.1 Caractéristiques principales	8
I.4.2.2 Applications courantes.....	8
I.4.3 Antenne à ouverture.....	8
I.4.3.1 Caractéristiques principales	8
I.4.3.2 Exemples.....	9
I.4.3.3 Applications courantes.....	9
I.4.4 Antenne à réflecteur.....	10
I.4.4.1 Caractéristiques principales	10
I.4.4.2 Composantes principaux.....	10
I.4.4.3 Applications.....	11
I.4.5 Antenne à fente.....	11
I.4.5.1 Caractéristiques principales.....	11
I.4.5.2 Types courantes.....	12
I.4.5.3 Applications.....	12
I.5. Caractéristiques des antennes.....	12
I.5.1. Impédance d'entrée	12
I.5.2. Coefficient de réflexion	13

I.5.3. Diagramme de rayonnement	13
I.5.4. Polarisation de l'antenne	14
I.5.5. Bande passante.....	14
I.5.6. Gain de l'antenne.....	15
I.5.7. Rendement et directivité.....	15
I.5.7.1 Rendement	15
I.5.7.2 Directivité.....	15
I.5.8. Facteur d'antenne	16
I.6. Pertes dans les antennes.....	16
I.7. Antennes imprimées	16
I.7.1. Architecture d'une antenne imprimée	16
I.7.2. Domaine d'application	17
I.7.3. Caractéristiques géométriques	17
I.7.3.1 Largeur du patch.....	17
I.7.3.2 Longueur du patch	18
I.8. Présentation d'une antenne Patch	18
I.9. Avantages et les inconvénients.....	19
I.10. Méthode d'alimentation.....	20
I.10.1 Sonde coaxial.....	20
I.10.2 Ligne micro ruban	21
I.10.3 Couplage par fente.....	21
I.10.4 Alimentation à proximité.....	22
I.11. Méthode d'analyse	23
I.11.1 Méthode analytique	23
I.11.1.1 Méthode de la ligne de transmission	23
I.11.1.2 Modèle de la cavité électromagnétique	23
I.11.2 Méthode numérique	23
I.12. Conclusion	24

Chapitre II : Technologie SIW

II.1. Introduction	26
II.2. Fonctionnement d'un guide d'onde.....	26

II.3. Les notions de base de la théorie des guides d'ondes.....	27
II.4. Types d'un guide d'onde	27
II.4.1. Guides d'ondes métalliques	27
II.4.1.1 Guides d'ondes rectangulaire	28
II.4.1.2 Guides d'ondes circulaire	28
II.4.1.3 Guides d'ondes elliptique.....	29
II.4.2. Guides d'ondes diélectriques	29
II.4.3. Guides d'ondes planaires.....	30
II.4.4. Guides d'ondes diffusées.....	31
II.5. Modes de polarisations	31
II.6. Caractéristiques de guide d'onde	33
II.6.1. Fréquence de coupure	33
II.6.2. Longueur d'onde.....	33
II.6.3. Vitesse de phase.....	33
II.6.4. Atténuation.....	34
II.7. Technologie micro ruban.....	34
II.7.1. Définition d'une ligne micro ruban	35
II.7.2. Structure d'une ligne micro ruban.....	35
II.7.3. Avantages et les inconvénients des lignes micro-rubans.....	36
II.8. Technologie SIW	36
II.8.1. Modes de propagation dans un guide d'onde SIW	36
II.8.2. Conception du SIW	37
II.8.3. Structure SIW	38
II.8.4. Géométrie d'une structure SIW	38
II.8.5. Dimensionnement d'une structure SIW	39
II.8.6. Quelques exemples de circuits SIW	40
II.8.6.1. Circuits passifs à base de SIW	40
II.8.6.2. Circuits actifs à base de SIW	41
II.8.6.3. Antennes SIW.....	42
II.8.7. Avantages de technologie SIW	42
II.9. Intégration dans le guide d'ondes SIW	43

II.9.1. Alimentation.....	43
II.9.2. Adaptation.....	43
II.9.2.1. Adaptation du guide SIW à la ligne micro-ruban.....	44
II.9.2.2. Adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance	44
II.10. Conclusion	45

Chapitre III : Antennes patch à base de la technologie SIW

III.1. Introduction.....	47
III.2. Antenne patch.....	47
III.2.1 Définition	47
III.2.2 Description de l'antenne patch.....	47
III.2.3. Types d'antenne patch	48
III.2.3.1. Antenne patch rectangulaire	48
III.2.3.2. Antenne patch circulaire	49
III.2.4. Avantages et inconvénients des antennes patch	49
III.2.4.1. Avantages.....	49
III.2.4.2. Inconvénients	50
III.2.5. Caractéristiques.....	50
III.2.5.1. Coefficient de réflexion.....	50
III.2.5.2. Bande passante	50
III.2.5.3. Impédance d'entrée	51
III.2.5.4. Diagramme de rayonnement	51
III.2.5.5. Angle d'ouverture.....	52
III.2.5.6. Directivité.....	52
III.2.5.7. Rendement	52
III.2.5.8. Gain.....	53
III.2.5.9. Facteur de qualité	53
III.2.5.10. Facteur d'antenne.....	53
III.2.5.11. Polarisation	54
III.3. Antenne patch SIW	54
III.3.1. Définition	54
III.3.2. Structure des antennes patch SIW.....	55

III.3.3. Principe de fonctionnement.....	56
III.3.4. Avantages d'un antenne patch SIW.....	56
III.4. Domaine d'application	57
III.5. Conclusion	57
 Chapitre IV :Conception,résultats et interprétation 58	
IV.1 Introduction	59
IV.2 Description du logiciel HFSS.....	59
IV.2.1. Interface principale du HFSS.....	61
IV.2.2 Comment commencer HFSS	61
IV.2.3 Comment ouvrir un nouveau projet	62
IV.2.4. Sauvegarder le projet	62
IV.2.5. Insérer une conception de HFSS	62
IV.3 Simulation d'un Guide d'ondes en SIW	62
IV.4. Dimensions de la ligne micro-ruban et de la transition micro-ruban.....	64
IV.5 Antenne patch octogonale	65
IV.5.1. Dimensionnement	65
IV.5.2. Résultat	67
IV.6 Antenne patch SIW octogonale.....	69
IV.6.1. Dimensionnement	69
IV.6.2 Résultat	70
IV.7 Antenne patch SIW octogonale à fentes	72
IV.7.1. Dimensionnement.....	72
IV.8 Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	81
Référence	

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les antennes

Figure I.1 : Antenne simple	5
Figure I.2 : différents types d'antennes	6
Figure I.3 : Antenne dipôle	7
Figure I.4 : Boucle magnétique	7
Figure I.5 : Antenne parabolique	9
Figure I.6 : Antenne cornet	9
Figure I.7 : Antenne à fentes.....	9
Figure I.8 : Exemples d'antennes à réflecteurs	10
Figure I.9 : Exemple d'utilisation d'une antenne à fentes	11
Figure I.10 : Différentes manières de représenter le diagramme de rayonnement	13
Figure I.11 : Différents types de polarisations.....	14
Figure I.12 : Structure de base d'une antenne imprimées	17
Figure I.13 : Forme générale d'une antenne patch rectangulaire.....	19
Figure I.14 : Antenne imprimée alimentée par sonde	20
Figure I.15 : Alimentation par ligne micro ruban.....	21
Figure I.16 : L'alimentation par une ligne microbande axiale(a), décalée (b) et avec encoche(c).....	21
Figure I.17: Alimentation par fente.....	22
Figure I.18: Alimentation couplée par proximité.....	22

Chapitre II : Technologie SIW

Figure II.1 : Exemple d'un guide d'onde	27
Figure II.2 : Guide d'onde rectangulaire.....	28
Figure II.3 : Guide d'onde circulaire	29
Figure II.4 : Illustration graphique d'un guide d'onde en fibre optique.....	30
Figure II.5 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire	30
Figure II.6 : Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé	31
Figure II.7 : Structure d'une ligne micro ruban	35
Figure II.8 : Configuration de la structure du SIW	38
Figure II.9 : La géométrie d'une structure SIW.....	39

Figure II.10 : Duplexeur SIW.....	40
Figure II.11 : Coupleur SIW	40
Figure II.12 : Filtre passe-bande SIW	40
Figure II.13 : Guide d'onde rectangulaire	40
Figure II.14 : Exemple de circuit actif SIW, a) oscillateur SIW, b) amplificateur SIW	42
Figure II.15 : Antenne SIW	42
Figure II.16 : Dimension géométriques de la ligne micro-ruban et de sa transition.....	44
Figure II.17 : Dimensions et espacements des fentes.....	45
Chapitre III : Antenne patch à base de la technologie SIW	
Figure III.1 : Antenne patch.....	47
Figure III.2 : Différentes formes d'antennes microbande	48
Figure III.3 : Antenne patch rectangulaire.....	48
Figure III.4 : Antenne patch circulaire	49
Figure III.5 : Visualisation de la bande passante à -10 dB d'une antenne	50
Figure III.6 : Formes typiques de diagramme de rayonnement	51
Figure III.7 : Représentation du rayonnement et angle d'ouverture d'une antenne	52
Figure III.8 : Configuration possibles de la dispersion énergétique des antennes dans l'espace	52
Figure III.9 : Polarisation de l'onde électromagnétique.....	54
Figure III.10: Antenne patch SIW.....	55
Figure III.11 : La structure de base d'une antenne patch SIW	56
Chapitre IV : Conception, résultats et interprétation	
Figure IV .1 : Fenêtre principal de logiciel HFSS.....	61
Figure IV .2 : Logiciel HFSS.....	61
Figure IV .3 : Fenêtre de HFSS.....	62
Figure IV .4 : Guide d'onde SIW.....	63
Figure IV .5 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.....	63
Figure IV .6 : Résultats de simulation du guide SIW.....	64
Figure IV .7 : Dimensions de la ligne et la transition micro-ruban.....	65

Figure IV .8 : Présentation de l'antenne patch octogonale sur le substrat avec HFSS	66
Figure IV .9 : Distribution du champ électrique E obtenue par l'antenne patch octogonale ..	67
Figure IV .10 : Coefficient de réflexion obtenu par l'antenne patch octogonale	67
Figure IV .11 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch octogonale	68
Figure IV .12 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch octogonale.....	68
Figure IV .13 : Présentation de l'antenne patch SIW octogonale	70
Figure IV .14 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale	70
Figure IV .15 : Coefficient de réflexion d'antenne patch SIW octogonale	71
Figure IV .16 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale	71
Figure IV .17 : Conception de l'antenne patch SIW à fente rectangulaire réalisée sous HFSS	73
Figure IV .18 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire	73
Figure IV .19 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire.....	74
Figure IV .20 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire	74
Figure IV .21 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire	75
Figure IV .22 : Conception de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique réalisée sous HFSS.....	76
Figure IV .23 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique	76
Figure IV .24 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique	77
Figure IV .25 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique	78
Figure IV .26 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique	78

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les antennes

Tableau I.1 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation..... 23

Chapitre IV : Conception, résultats et interprétation

Tableau IV .1 : Paramètres de structure du guide d'onde SIW 63

Tableau IV .2 : Paramètres de l'antenne patch octogonale 66

Tableau IV .3 : Résultats du coefficient de réflexion de l'antenne patch..... 67

Tableau IV .4 : Résultats du coefficient de réflexion..... 77

Introduction générale

L'étude des outils et techniques ne cesse d'évoluer grâce à des innovations constantes visant à simplifier la vie des utilisateurs de technologies. Le domaine des télécommunications, en particulier, est l'un des secteurs les plus touchés par ces avancées, avec pour objectif principal de transmettre l'information de manière toujours plus rapide et fiable. Cette dynamique engendre une concurrence intense entre les entreprises du secteur.

L'amélioration des systèmes de télécommunication repose en grande partie sur l'optimisation de leurs composants. Les ingénieurs sont ainsi confrontés au défi de concilier performance et rentabilité, en développant des éléments à la fois efficaces et économiques. Parmi les composants essentiels d'un système de communication, on retrouve les supports de transmission tels que les guides d'ondes, la fibre optique ou les câbles coaxiaux, les dispositifs électroniques passifs comme les antennes, les filtres et les résistances, ainsi que les composants actifs tels que les transistors et les amplificateurs. Dans le cadre de cette étude, l'antenne constitue l'élément central de notre analyse.

L'antenne constitue un élément essentiel dans tout système radioélectrique. Elle joue le rôle de convertisseur, transformant l'énergie électrique en énergie électromagnétique rayonnante. Sa conception requiert une grande précision et repose sur une base théorique rigoureusement étudiée, dans le but de maximiser l'efficacité de rayonnement dans la direction souhaitée. Les antennes sont utilisées dans divers domaines tels que les réseaux mobiles, les réseaux sans fil, la télévision terrestre ou encore les systèmes satellitaires. Toute amélioration apportée à une antenne a un impact significatif sur la qualité globale du système, se traduisant par des changements notables dans ses paramètres de performance.

Le deuxième élément étudié dans ce travail est le guide d'onde, un support de transmission destiné à canaliser le signal électromagnétique dans un espace confiné par des conducteurs. Il est souvent préféré aux autres types de lignes de transmission en raison de ses faibles pertes et de sa capacité à transmettre des puissances élevées. Toutefois, l'intégration des guides d'ondes classiques avec d'autres composants électroniques reste complexe et onéreuse. Pour surmonter cette difficulté, une technologie innovante a émergé : le guide d'onde intégré au substrat (SIW), qui combine les avantages des guides d'ondes traditionnels avec une meilleure intégration dans les circuits.

La technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) représente une approche innovante qui combine les avantages des guides d'ondes classiques avec ceux des circuits planaires. Elle repose sur l'intégration de guides d'ondes au sein d'un substrat diélectrique, où les parois métalliques latérales sont remplacées par deux rangées de vias métalliques. Cette configuration permet de bénéficier des faibles pertes et des hauts facteurs de qualité propres aux guides d'ondes volumiques, tout en profitant de la facilité d'intégration, du faible coût, du poids réduit et de la miniaturisation offerts par les technologies planaires.

Ce travail de recherche explore la conception et l'amélioration d'une antenne patch innovante, combinant les technologies de substrat intégré guide d'ondes (SIW) et de fentes rayonnantes. L'étude est structurée en 4 chapitres principaux, chacun dédié à un aspect spécifique du développement :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les antennes : définitions, classifications, paramètres caractéristiques (gain, directivité, bande passante, etc.) et domaines d'application. Ce chapitre fournit les notions de base nécessaires à l'analyse des structures rayonnantes.
- Le deuxième chapitre est consacré aux guides d'ondes et à la technologie SIW. Il aborde les principes de propagation dans les guides d'ondes classiques, puis introduit la technologie SIW, ses avantages, ses paramètres de conception et son potentiel dans l'intégration d'antennes.
- Le troisième chapitre traite des antennes patch intégrées dans des structures SIW. Il présente leur architecture, les méthodes de conception, ainsi que les bénéfices qu'apporte cette combinaison en termes de performances électromagnétiques et de compacité.
- Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'étude pratique et à la simulation d'antennes patch octogonale intégrées en technologie SIW, à l'aide du logiciel ANSYS HFSS. Les performances de chaque antenne sont analysées et comparées selon plusieurs critères tels que le coefficient de réflexion (S_{11}), la bande passante, le diagramme de rayonnement et le gain.

Chapitre I

Généralités sur les antennes

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de comprendre le principe de fonctionnement des antennes. Le chapitre se déroule comme suit, la première partie passe en revue l'historique et les principes de fonctionnement pour une meilleure compréhension des types d'antennes, la seconde partie sur les caractéristiques de l'antenne (impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, gain, etc.), puis nous concentrons notre étude sur l'antenne patch et leur technique d'alimentation.

I.2. Historique de l'antenne

L'histoire des antennes débute avec les découvertes de James Clerk Maxwell en 1864, qui théorise les ondes électromagnétiques, et les expériences de Heinrich Hertz dans les années 1880, confirmant leur existence. Les premières antennes sont développées par Guglielmo Marconi au début du XXe siècle, notamment l'antenne à dipôle pour la radio. Au fil du temps, les antennes évoluent dans les années 1920-1930, des modèles directionnels et paraboliques apparaissent pour la radio et la télévision, et des avancées notables sont réalisées durant la Seconde Guerre mondiale pour les radars. Les années 1950 et 1960 marquent l'essor des communications par satellite, nécessitant des antennes paraboliques. Dans les années 1980, l'essor de la téléphonie mobile favorise la miniaturisation des antennes, et les années 2000 voient l'essor du Wi-Fi et du Bluetooth, avec des antennes adaptées à ces technologies. Aujourd'hui, les antennes sont cruciales pour des systèmes comme la 5G, qui utilisent des technologies avancées telles que le MIMO (Multiple-Input/Multiple-Output) pour gérer des débits élevés et des fréquences très élevées.



Figure I.1 : Antenne Simple.

I.3. Principe de fonctionnement

Pour garantir la propagation dans l'air, un dispositif doit générer une onde rayonnée. (i) L'antenne d'émission transforme la puissance électromagnétique, produite par un générateur, en puissance rayonnée, agissant ainsi comme un transducteur. Inversement, (ii) une antenne de réception capte la puissance rayonnée et la convertit en puissance électromagnétique, jouant un rôle similaire à celui d'un télescope qui capte la lumière des étoiles et la transforme. Notons, (iii) une antenne peut servir à la fois pour l'émission et la réception avec les mêmes caractéristiques rayonnantes, grâce à la réciprocité de son fonctionnement, un principe découlant du théorème de réciprocité. Toutefois, dans des cas particuliers où l'antenne utilise des matériaux non linéaires ou anisotropes, elle peut ne pas être réciproque. En raison de cette réciprocité, on ne fait généralement pas de distinction entre l'émission et la réception pour une antenne. Ainsi, les performances d'une antenne sont souvent décrites de manière uniforme, sans préciser si elle est en mode émission ou réception. Pour mieux comprendre cette transformation de la puissance guidée en puissance rayonnée, nous présenterons différentes antennes, classées par ordre chronologique d'apparition [2].

I.4. Type d'antenne

Pour choisir l'antenne la mieux adaptée à une application spécifique, il est crucial de comprendre les différents types d'antennes et leurs principes de fonctionnement. Les antennes sont généralement classées en cinq grandes familles, dont chacune peut être facilement identifiée par sa forme. Chaque type d'antenne est conçu pour répondre à des besoins particuliers. Bien que tous les types d'antennes ne puissent être mentionnés, nous nous concentrerons sur les modèles les plus courants [4].

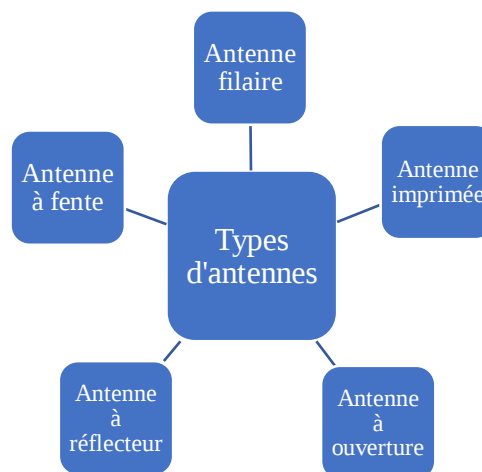


Figure I.2: Différents types d'antennes.

I.4.1. Antennes filaires

Sont des dispositifs de rayonnement ou de réception d'ondes électromagnétiques, composés principalement de fils conducteurs (généralement en métal comme le cuivre ou l'aluminium). Elles sont parmi les plus anciennes et les plus simples formes d'antennes, utilisées dans une variété d'applications, notamment la radio, la télévision, les communications militaires et les systèmes de transmission à longue distance [3].

I.4.1.1. Caractéristiques principales

- Simplicité de conception : Elles sont souvent constituées d'un ou plusieurs fils tendus, formant des structures linéaires, en boucle ou autres configurations.
- Polyvalence : Elles peuvent être utilisées pour une large gamme de fréquences, des basses fréquences (LF) aux hautes fréquences (HF).
- Faible coût : Leur fabrication est économique, car elles nécessitent peu de matériaux complexes.
- Installation flexible : Elles peuvent être installées horizontalement, verticalement ou en forme de dipôle, selon les besoins.

I.4.1.2. Exemples

- Antenne dipôle demi-onde : Deux fils de longueur égale, alimentés au centre.

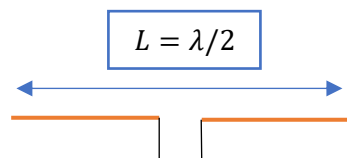


Figure I.3: Antenne dipôle [3].

- Antenne monopôle : Un seul fil, souvent utilisé avec un plan de masse.
- Antenne en boucle : Un fil formant une boucle fermée.

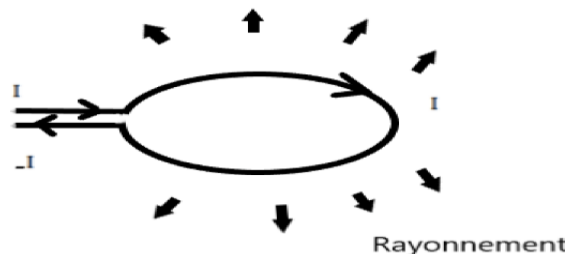


Figure I.4 : Boucle magnétique.

Ces antennes sont particulièrement appréciées pour leur efficacité dans les communications à longue distance et leur adaptabilité à différents environnements.

I.4.2. Antennes imprimées

Les antennes imprimées (ou antennes planaires) sont des antennes fabriquées à l'aide de techniques de fabrication de circuits imprimés. Elles sont constituées d'une structure métallique (généralement en cuivre) déposée sur un substrat diélectrique, comme une plaque de circuit imprimé. Ces antennes sont compactes, légères et faciles à intégrer dans des dispositifs électroniques modernes [1].

I.4.2.1. Caractéristiques principales

- Compacité : Leur forme plate et mince les rend idéales pour les appareils portables (smartphones, tablettes, objets connectés).
- Fabrication précise : Elles sont produites par des procédés de gravure ou de sérigraphie, permettant une grande précision dans leur conception.
- Large bande passante : Elles peuvent être conçues pour fonctionner sur une large gamme de fréquences, y compris les fréquences micro-ondes.
- Intégration facile : Elles sont souvent intégrées directement dans les circuits électroniques, réduisant les coûts et la complexité.

I.4.2.2. Applications courantes

- Télécommunications mobiles (4G, 5G).
- Réseaux sans fil (Wi-Fi, Bluetooth).
- Systèmes de communication par satellite.
- Dispositifs IoT (Internet des Objets).

Les antennes imprimées sont des solutions modernes et efficaces pour les systèmes de communication sans fil, grâce à leur petite taille et leur facilité d'intégration.

I.4.3. Antennes à ouverture

Sont des antennes qui utilisent une surface ou une ouverture pour rayonner ou capter les ondes électromagnétiques. Elles sont caractérisées par une structure qui guide les ondes vers une ouverture, d'où elles sont émises ou reçues. Ces antennes sont souvent utilisées pour les hautes fréquences, notamment dans les domaines des micro-ondes et des ondes millimétriques [5].

I.4.3.1. Caractéristiques principales

- Directivité élevée : Elles offrent un rayonnement directionnel, ce qui les rend idéales pour les applications nécessitant une transmission précise sur de longues distances.
- Gain élevé : Leur conception permet de concentrer l'énergie dans une direction spécifique, augmentant ainsi leur efficacité.

- Large bande passante : Elles peuvent fonctionner sur une large gamme de fréquences, en particulier dans les gammes micro-ondes et millimétriques.
- Structure complexe : Elles sont souvent constituées de guides d'ondes, de réflecteurs ou de lentilles pour diriger les ondes.

I.4.3.2. Exemples

- Antennes paraboliques : Utilisent un réflecteur parabolique pour focaliser les ondes vers un point focal.

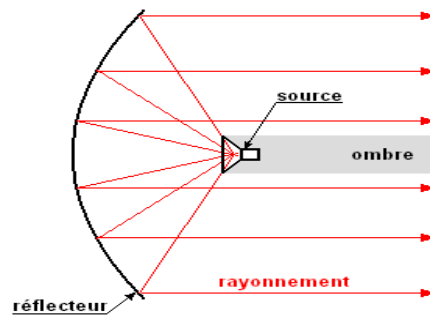


Figure I.5 : Antenne parabolique.

- Antennes à cornet : Utilisent un guide d'onde en forme de cornet pour diriger les ondes.



Figure I.6 : Antenne cornet.

- Antennes à fente : Utilisent des fentes dans une surface métallique pour rayonner les ondes.

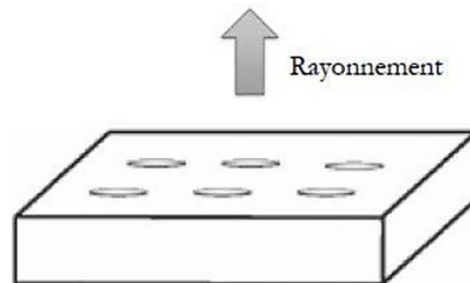


Figure I.7 : Antenne à fentes.

I.4.3.3. Applications courantes

- Communications par satellite.
- Radars (aériens, maritimes, météorologiques).
- Télécommunications à longue distance.
- Radioastronomie.

Les antennes à ouverture sont des dispositifs performants pour les applications nécessitant une grande directivité et un gain élevé, particulièrement dans les domaines des hautes fréquences.

I.4.4. Antennes à réflecteur

Sont des antennes qui utilisent une surface réfléchissante (généralement de forme parabolique) pour diriger et concentrer les ondes électromagnétiques vers un point focal ou dans une direction spécifique. Elles sont conçues pour offrir une directivité élevée et un gain important, ce qui les rend idéales pour les communications à longue distance et les applications nécessitant une précision de rayonnement [4].

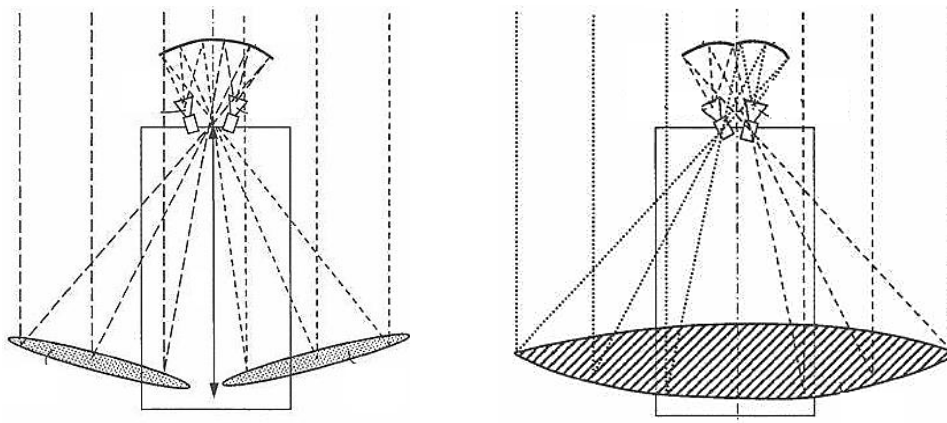


Figure I.8 : Exemples d'Antennes à réflecteurs.

I.4.4.1. Caractéristiques principales

- Réflecteur parabolique : La surface réfléchissante, souvent en métal, est façonnée en parabole pour focaliser les ondes.
- Directivité : Le rayonnement est concentré dans une direction étroite, ce qui permet une transmission ou une réception précise.
- Haut gain : Le réflecteur amplifie le signal en concentrant l'énergie, ce qui améliore la portée et l'efficacité.
- Fréquences élevées : Elles sont particulièrement efficaces pour les micro-ondes et les ondes millimétriques.

I.4.4.2. Composants principaux

- Réflecteur : La surface parabolique qui réfléchit les ondes.
- Source d'alimentation : Un élément rayonnant (comme une antenne dipôle ou un cornet) placé au point focal du réflecteur.
- Support structurel : Un système pour maintenir la source d'alimentation en place.

I.4.4.3. Applications

- Communications par satellite : Pour recevoir et émettre des signaux vers des satellites.
- Radars : Utilisées dans les systèmes radar pour détecter des objets à grande distance.
- Radioastronomie : Pour capter les signaux provenant de l'espace.
- Télécommunications à longue distance : Comme les liaisons point à point.

Les antennes à réflecteur sont des dispositifs performants pour les applications nécessitant une grande précision de rayonnement et une portée étendue, grâce à leur capacité à concentrer les ondes électromagnétiques.

I.4.5. Antennes à fentes

Les antennes à fentes sont des antennes qui rayonnent ou reçoivent des ondes électromagnétiques à travers des fentes découpées dans une surface métallique, généralement un guide d'ondes ou une plaque conductrice. Ces fentes agissent comme des ouvertures qui perturbent le courant électrique sur la surface, générant ainsi un rayonnement [4].

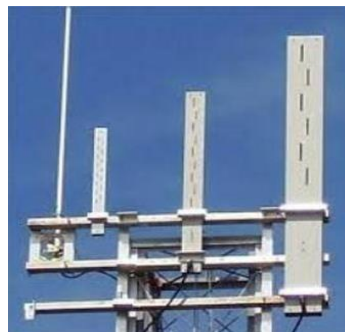


Figure I.9 : Exemple d'utilisation d'une antenne à fentes.

I.4.5.1. Caractéristiques principales

- Simplicité de conception : Elles sont faciles à fabriquer en découpant des fentes dans une surface métallique.
- Directivité : Leur rayonnement peut être directionnel, en fonction de la disposition et de la taille des fentes.
- Intégration facile : Elles peuvent être intégrées dans des structures existantes, comme les

avions ou les véhicules, sans ajouter de volume significatif.

- Large bande passante : Elles peuvent être conçues pour fonctionner sur une large gamme de fréquences.

I.4.5.2. Types courants

- Antennes à fente unique : Une seule fente est utilisée pour le rayonnement.
- Antennes à fentes multiples : Plusieurs fentes sont disposées en réseau pour améliorer la directivité et le gain.

I.4.5.3. Applications

- Radars : Utilisées dans les systèmes radar embarqués, notamment sur les avions et les navires.
- Communications mobiles : Intégrées dans les dispositifs portables et les infrastructures de télécommunications.
- Systèmes de navigation : Employées dans les systèmes GPS et autres technologies de localisation.

Les antennes à fentes sont des solutions compactes et efficaces pour les applications nécessitant une intégration discrète et une performance de rayonnement directionnel.

I.5. Caractéristiques des antennes

Les performances d'une antenne peuvent être évaluées à l'aide de plusieurs paramètres. Nous présenterons ci-dessous les principales caractéristiques.

I.5.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne correspond à l'impédance qu'elle présente à ses bornes. Elle est exprimée par la formule suivante et se représente par :

$$Z_{in} = R_{in} + jx_{in} \quad (I.1)$$

La résistance d'entrée R_{in} représente un élément de dissipation et se compose de deux éléments, R_{rad} la résistance de rayonnement, associée à la puissance rayonnée, et R_{perte} la résistance de perte, liée à la puissance dissipée par effet Joule.

La partie imaginaire de l'impédance d'entrée, appelée réactance x_{in} est quant à elle liée à la puissance réactive stockée autour de l'antenne.

Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, l'impédance de l'alimentation doit être égale à l'impédance conjuguée de l'antenne. Étant donné que le paramètre S11 dépend de la fréquence.

L'expression de l'impédance d'entrée en fonction de S11 est donnée par la relation suivante [7] :

$$z_{in} = z_c \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (I.2)$$

Avec z_c : Impédance caractéristique.

I.5.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre essentiel dans l'analyse des performances d'une antenne. Il correspond au rapport entre l'onde réfléchie à l'entrée de l'antenne et l'onde incidente. Ce coefficient dépend de l'impédance d'entrée z_{in} de l'antenne ainsi que de son impédance caractéristique z_c (généralement $z_c = 50$ ohms) [8] :

$$S_{11} = \frac{z_{in} - z_c}{z_{in} + z_c} \quad (I.3)$$

Le coefficient de réflexion permet d'évaluer la qualité d'adaptation d'une antenne. Plus sa valeur absolue est faible, meilleure est l'adaptation de l'antenne. En général, la fréquence de résonance d'une antenne correspond à la fréquence où le coefficient de réflexion atteint son minimum [9].

I.5.3. Diagramme de rayonnement

Les antennes ne sont généralement pas omnidirectionnelles, elles émettent ou reçoivent préférentiellement dans certaines directions. Le diagramme de rayonnement illustre la répartition de la puissance rayonnée par l'antenne dans l'espace. Il met en évidence les directions (θ_0, ϕ_0) où cette puissance est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. Dans ce diagramme, on représente la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$. Cette fonction varie entre 0 et 1 en fonction de la direction. Le diagramme de rayonnement peut être représenté sous différentes formes (figures). En général, il est tracé dans les plans horizontaux ($\theta=90^\circ$) et verticaux $\phi=\text{constante}$, ou encore dans les plans E et H [6].

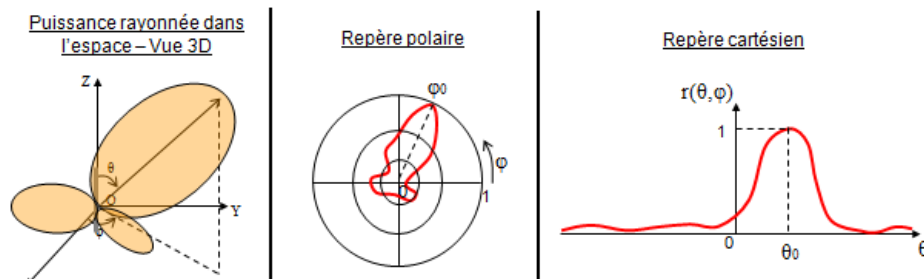


Figure I.10 : Différentes manières de représenter le diagramme de rayonnement [6].

Le diagramme de rayonnement d'une antenne dépend principalement de sa géométrie et peut également varier en fonction de la fréquence. À l'exception des antennes omnidirectionnelles, la répartition de la puissance rayonnée dans l'espace n'est générée

Pour une antenne omnidirectionnelle, la fonction caractéristique de rayonnement reste constante et égale à 1, quelle que soit la. En général, la puissance est répartie en un ou plusieurs « lobes », dont la partie principale représente la direction privilégiée du rayonnement. Les lobes latéraux, souvent considérés comme indésirables, provoquent une perte de puissance. C'est pourquoi nous cherchons à l'atténuer [6].

I.5.4. Polarisation de l'antenne

Les ondes électromagnétiques véhiculent des champs vectoriels, ce qui leur confère une polarisation. Celle-ci est définie à partir du champ électrique, tandis que le champ magnétique en découle directement [5] :

- **Polarisation rectiligne** : Le champ électrique reste aligné selon une direction fixe, perpendiculaire à la propagation de l'onde. La direction de polarisation dépend de l'orientation des courants circulant sur l'élément de l'antenne. La position du point d'alimentation est déterminante, car elle influence cette orientation, qui est parallèle aux courants. Ainsi, la polarisation est alignée sur l'axe Oy.
- **Polarisation circulaire** : Une onde présente une polarisation circulaire lorsque l'extrémité de son vecteur champ électrique décrit un cercle en un point donné de l'espace lors de sa propagation.

Toutes les antennes ne produisent pas une polarisation rectiligne. Leur structure et leur mode d'alimentation permettent d'obtenir d'autres types de polarisation, comme une polarisation elliptique ou circulaire. Par exemple, une excitation en deux points avec deux sources de même amplitude mais déphasées de 90° engendre une polarisation circulaire [5].

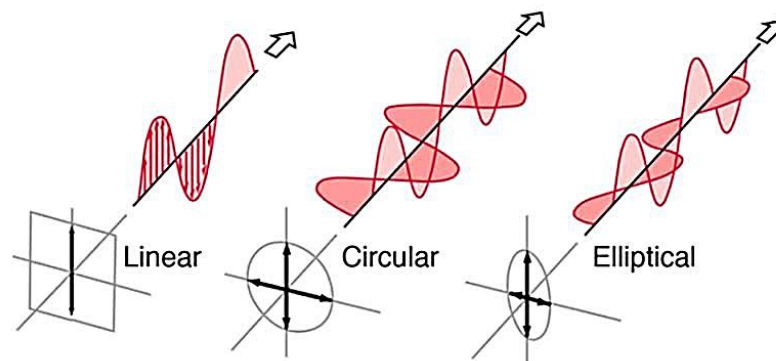


Figure I.11 : différents types de polarisations [5].

I.5.5. Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences sur lequel l'antenne fonctionne de manière optimale pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique

dans son environnement. Elle est délimitée par des critères de performance spécifiques, définissant une plage de fréquences comprise entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} . Ainsi, la bande passante est donnée par [8] :

$$BP\% = \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right) \times 100 \quad (I.4)$$

Avec :

f_c : Est la fréquence centrale ou de résonance.

I.5.6. Gain de l'antenne

Le gain d'une antenne est un paramètre comparable à la directivité. Il représente, dans une direction donnée (θ, ϕ) , le rapport entre la puissance $P(\theta, \phi)$ rayonnée par l'antenne par unité d'angle solide dans cette direction et celle émise par une antenne isotrope. Il s'exprime par [8] :

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{P_a} \quad (I.5)$$

G : le gain de l'antenne.

$P(\theta, \phi)$: la puissance rayonnée par une antenne.

P_a : puissance d'entrée.

Le gain résulte de deux facteurs : la directivité et les pertes.

$$G(\theta, \phi) = \eta \times D(\theta, \phi) \quad (I.6)$$

I.5.7. Rendement et directivité

I.5.7.1. Rendement

Le rendement d'une antenne est défini comme le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance totale fournie à l'antenne, soit [7] :

$$\eta = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} = \frac{4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a}}{4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_r}} = \frac{P_r}{P_a} \quad (I.7)$$

$P(\theta, \phi)$: La puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, ϕ) .

P_r : La puissance totale rayonnée.

I.5.7.2. Directivité

La directivité d'une antenne correspond au rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction donnée (θ, ϕ) et celle qu'émettrait une source isotrope de

référence par unité d'angle solide, pour une même puissance totale rayonnée [8].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (I.8)$$

La directivité permet de déterminer les directions où la densité de puissance est supérieure ou inférieure à celle d'une antenne isotrope [8].

I.5.8. Facteur d'antenne

Le facteur d'antenne (FA) est un paramètre utilisé en métrologie. Il représente le rapport entre le champ électrique efficace rayonné et la tension mesurée immédiatement après l'antenne. Ce facteur, qui exprime le taux de conversion entre le champ reçu et la tension transformée, dépend du rapport entre l'impédance de l'air et celle de la ligne, du gain de l'antenne et de la longueur d'onde. Il est utilisé pour comparer différentes antennes à une antenne de référence, en mesurant le facteur d'antenne dans un champ constant.

I.6. Pertes dans les antennes

Les pertes dans les antennes désignent la réduction de l'énergie transmise ou reçue par l'antenne. Elles sont causées par plusieurs facteurs :

- Pertes ohmiques : Résistance des matériaux conducteurs qui dissipe de l'énergie sous forme de chaleur.
- Pertes diélectriques : Absorption d'énergie par les matériaux isolants utilisés dans l'antenne.
- Pertes par rayonnement : Inefficacité dans le rayonnement de l'antenne.
- Pertes de propagation : Absorption et diffusion du signal durant sa transmission dans l'air.
- Pertes de réflexion : Mauvaise adaptation de l'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission, causant des réflexions du signal.
- Pertes dues à l'environnement : Conditions climatiques ou environnementales qui affectent la performance de l'antenne.

I.7. Antennes imprimées

Les antennes imprimées sont conçues sur un substrat diélectrique à l'aide de techniques de gravure semblables à celles utilisées pour les circuits imprimés. Elles se caractérisent par leur compacité, leur légèreté et leur facilité d'intégration dans des systèmes électroniques, notamment pour des applications en télécommunications, radar et dispositifs sans fil. Un exemple typique d'antenne imprimée est l'antenne patch, appréciée pour sa simplicité et ses excellentes performances à haute fréquence [4].

I.7.1. Architecture d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée se compose d'un élément rayonnant métallique, de forme arbitraire, déposé sur un substrat diélectrique. La face inférieure de ce substrat est métallisée pour former un plan de masse. Les formes les plus courantes des éléments rayonnants sont le carré, le rectangle, le disque et l'anneau, bien que des géométries plus complexes soient parfois utilisées [6].

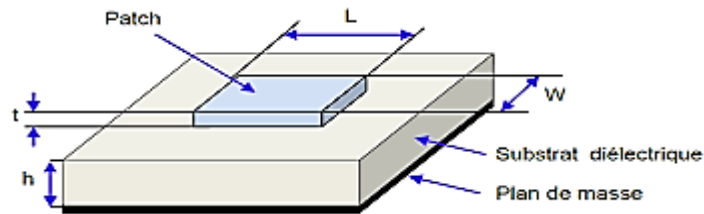


Figure I.12 : Structure de base d'une antenne imprimée

L : Longueur du patch, **W** : Largeur du patch, **h** : épaisseur du substrat et **t** : épaisseur du patch.

I.7.2. Domaine d'application

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les domaines des **télécommunications**, des **radars**, et des **dispositifs sans fil** en raison de leur compacité, de leur légèreté et de leur facilité d'intégration dans des systèmes électroniques. Elles sont utilisées dans des applications telles que les **réseaux mobiles**, le **Wi-Fi**, le **Bluetooth**, ainsi que dans les **systèmes GPS** et les **communications par satellite**. Ces antennes sont également présentes dans des dispositifs comme les **capteurs sans fil** [6].

I.7.3. Caractéristiques géométriques

I.7.3.1. Largeur du patch

La largeur du patch de l'antenne a peu d'impact sur la fréquence de résonance et le diagramme de rayonnement, mais elle influence l'impédance d'entrée et la bande passante de l'antenne. L'impédance d'entrée dépend de la largeur du patch et peut être calculée par une formule spécifique [6].

$$R_{IN} = 90 \frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (I.9)$$

Avec :

R_{IN} : Impédance d'entrée de l'antenne.

ϵ_r : Permittivité relative du substrat.

L : Longueur du patch de l'antenne.

Pour optimiser le rendement de l'antenne, la largeur du patch doit être choisie selon une certaine relation avec la fréquence de résonance fondamentale (f_{01}).

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{I.10})$$

c : Vitesse de la lumière dans le vide, ($c=3 \times 10^8$ m/s).

f_{01} : Fréquence de résonance fondamentale de l'antenne.

Cependant, une largeur trop grande peut dégrader le diagramme de rayonnement, provoquant l'apparition de lobes secondaires. En résumé, bien choisir la largeur du patch est crucial pour équilibrer l'impédance et les performances de rayonnement.

I.7.3.2. Longueur du patch

La longueur du patch de l'antenne détermine la fréquence de résonance. Cependant, il est important de tenir compte de deux fois une longueur, qui correspond à l'extension des champs électromagnétiques autour du patch (voir équation I.9).

La longueur réelle du patch est donc :

$$L = \frac{\lambda_{g \text{ dielectric}}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{I.11})$$

$\lambda_{g \text{ dielectric}}$: Longueur d'onde effective dans le substrat diélectrique.

ΔL : Débordement des champs électromagnétiques au bord du patch.

$$\text{Avec} \quad \Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)} \quad (\text{I.12})$$

Cela donne la longueur effective du patch :

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (\text{I.13})$$

L_{eff} : Longueur effective du patch.

I.8. Présentation d'une antenne Patch

Une antenne patch est une antenne plane de forme spécifique, composée d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique sur lequel repose un ou plusieurs éléments métalliques. Elle existe sous diverses formes et dimensions et possède plusieurs caractéristiques avantageuses, notamment un large diagramme de rayonnement, facilitant son intégration dans des réseaux bidimensionnels.

Les éléments et les lignes d'alimentation de ces antennes sont généralement réalisés par photogravure sur le substrat diélectrique. Ces antennes se distinguent par leur faible profil, leur adaptabilité aux surfaces planes et courbes, ainsi que leur simplicité et leur faible coût de fabrication grâce aux technologies modernes des circuits imprimés. De plus, elles sont mécaniquement robustes lorsqu'elles sont fixées sur des surfaces rigides.

La structure de base d'une antenne patch est illustrée par la (figure I.13), avec les différentes dimensions suivantes :

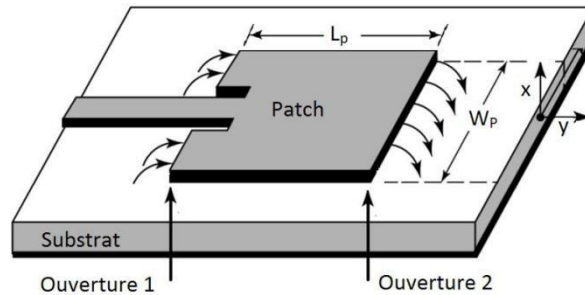


Figure I.13 : Forme générale d'une antenne patch rectangulaire [9].

I.9. Avantages et les inconvénients

La technologie des antennes imprimées est dérivée de celle des circuits imprimés, ce qui leur confère plusieurs avantages par rapport aux antennes classiques (cornet, dipôle filaire, etc.) :

- Poids léger et encombrement réduit, avec possibilité de configurations conformes.
- Faible coût de fabrication, facilitant la production en masse.
- Épaisseur et volume réduits.
- Simplicité de conception et facilité de reproduction.
- Possibilité d'impression sur des substrats souples.
- Intégration facile dans des appareils électroniques transportables (téléphones mobiles, ordinateurs portables, appareils photo numériques, etc.).
- Polarisation modulable simplement en ajustant la position de l'alimentation.
- Compatibilité avec les circuits hybrides.

Cependant, malgré ces avantages, les antennes imprimées présentent aussi certains inconvénients par rapport aux antennes traditionnelles :

- Bande passante souvent limitée, généralement entre 1 et 5 % pour des éléments résonants de géométrie simple.
- Gain généralement faible.
- Facteur de qualité (Q) élevé, variant d'environ 50 à 75.
- Rendement de surface limité en raison de plusieurs facteurs :
Pertes diélectriques.

Excitation d'ondes de surface dans le substrat diélectrique.

Pertes dans les lignes d'alimentation.

- Risque de rayonnement parasite au niveau des jonctions avec l'alimentation.
- Capacité limitée à supporter de fortes puissances.
- Difficulté à obtenir une pureté de polarisation optimale.
- Sensibilité aux tolérances de fabrication, notamment pour les motifs imprimés de petite taille [6].

I.10. Méthode d'alimentation

L'alimentation électrique joue un rôle crucial dans la conception des antennes imprimées, car elle affecte directement leurs performances et caractéristiques de rayonnement. Il existe deux principaux types de méthodes d'alimentation :

- (i) Alimentation de contact (par exemple, via sonde coaxiale, ligne micro-ruban, etc.).
- (ii) Alimentation par proximité (comme les micro-rubans mezzanine, slots, ou circuits ouverts).

La méthode la plus courante est l'alimentation par ligne micro-ruban, suivie de l'alimentation par sonde coaxiale, par couplage de proximité, ou par circuit ouvert. Ces méthodes influencent toutes la manière dont l'antenne rayonne et ses performances globales.

I.10.1. Sonde coaxiale

L'alimentation coaxiale, également appelée alimentation par sonde, est une méthode fréquemment utilisée pour exciter les antennes micro-ruban. Cette technique consiste à faire passer une ligne coaxiale à travers le plan de masse et le substrat diélectrique. Son conducteur central est relié directement à l'élément rayonnant en un point spécifique, situé sur l'axe de symétrie et proche du bord de l'antenne, afin d'assurer une adaptation optimale de l'impédance. Ce point de contact est soudé à l'élément rayonnant, tandis que le conducteur extérieur de la ligne coaxiale est raccordé au plan de masse, comme illustré dans (la figure I.14) [12] :

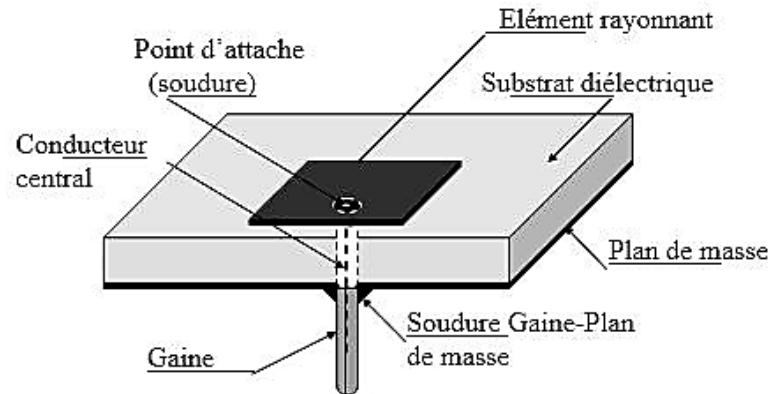


Figure I.14 : Antenne imprimée alimentée par sonde [12].

L'alimentation des antennes par sondes pose plusieurs défis, notamment le perçage du substrat, la soudure à haute fréquence, une flexibilité en termes de conception, ainsi que la gestion des câbles dans un espace restreint. Toutefois, la modélisation basée sur la méthode des lignes de transmission s'avère efficace pour ce type d'alimentation, y compris en présence d'une fente annulaire.

I.10.2. Ligne micro ruban

L'alimentation par ligne micro-ruban est simple à réaliser, car elle peut être intégrée directement sur le même côté du substrat que l'élément rayonnant.

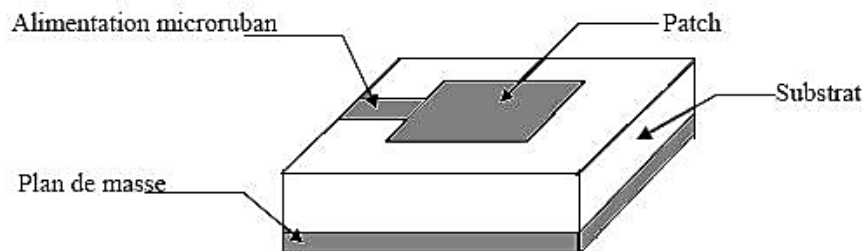


Figure I.15 : Alimentation par ligne micro ruban [10].

Cette méthode d'alimentation peut être mise en œuvre de plusieurs façons : par une connexion directe à l'axe de symétrie de l'élément rayonnant (figure 16.a), par un léger décalage par rapport à cet axe (figure 16.b), ou encore en intégrant une encoche au niveau du point d'alimentation (figure 16.c). Elle se distingue par sa simplicité de fabrication, sa facilité de modélisation et sa capacité à assurer une bonne annonce [10].

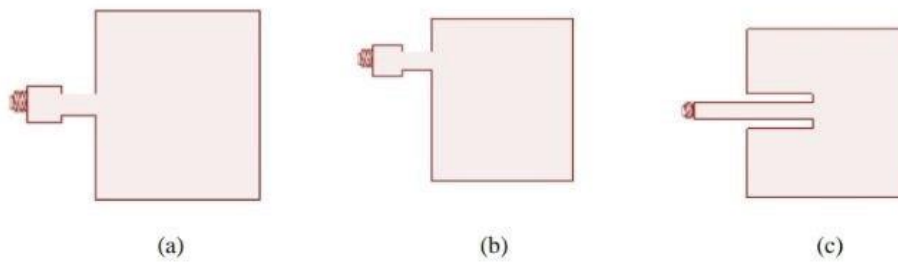


Figure I.16 : Alimentation par ligne micro ruban, (a) Axial, (b) Décalée, (c) Axial avec encoche [10].

Cette technique se caractérise par une fabrication simple, une modélisation aisée et une excellente.

I.10.3. Couplage par fente

L'alimentation par ligne micro-ruban ou coaxiale peut entraîner une asymétrie, favorisant ainsi l'apparition de modes d'ordre supérieur et un rayonnement en polarisation croisée. Pour résoudre ce problème, l'alimentation par fente a été mise au point. Cette technique repose sur une petite fente pratiquée dans le plan de masse, permettant un couplage électromagnétique entre deux substrats : l'un supporte l'élément rayonnant, tandis que l'autre intègre la ligne micro-ruban [14].

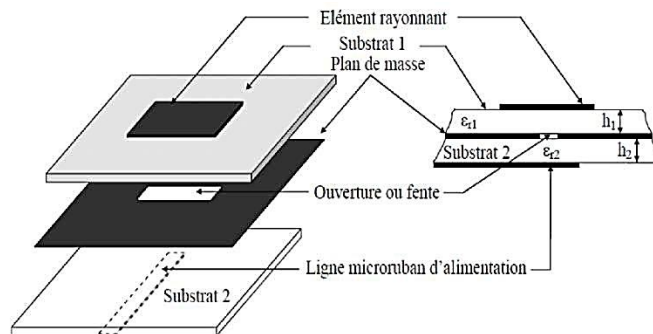


Figure I.17 : Alimentation par fente [12].

Cette approche permet d'optimiser séparément la ligne d'alimentation et le patch, facilitant ainsi la modélisation et minimisant les rayonnements parasites. Cependant, sa fabrication demeure complexe et sa bande passante.

I.10.4. Alimentation à proximité

L'alimentation à proximité fonctionne par couplage électromagnétique entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant. La ligne d'alimentation est placée sur un substrat inférieur, tandis que le patch rayonnant repose sur un substrat supérieur, avec un plan de masse intermédiaire. L'adaptation de l'impédance se fait en ajustant la longueur de la ligne d'alimentation. Cependant, cette méthode est complexe à fabriquer en raison de l'alignement précis des deux couches diélectriques et entraîne une augmentation de l'épais [13].

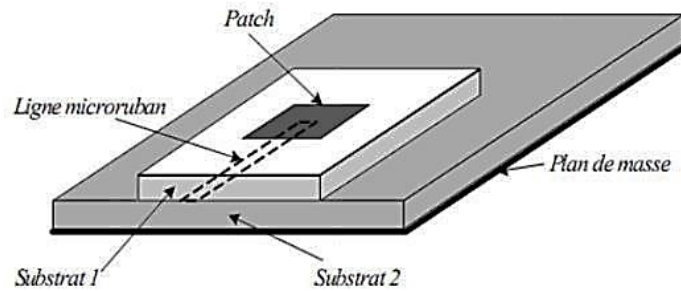


Figure I.18 : Alimentation couplée par proximité [13].

L'adaptation de l'impédance s'effectue en modifiant la longueur de la ligne d'alimentation. Toutefois, cette technique présente des défis de fabrication en raison de l'alignement précis requis entre les deux couches diélectriques. De plus, elle entraîne une augmentation de l'épaissement.

Caractéristiques	Alimentation par ligne micro ruban	Alimentation par sonde coaxiale	Alimentation par ouverture	Alimentation par proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvres à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tableau I.1 : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation [14].

I.11. Méthode d'analyse

Il existe plusieurs méthodes pour analyser les antennes imprimées, qui peuvent être regroupées en deux grandes catégories : méthodes classiques approximatives (analytique) et méthodes numériques (full-wave).

I.11.1. Méthode analytique

Ces méthodes se reposent sur les équations de l'électromagnétisme, mais avec des hypothèses simplifiées pour créer des modèles plus simples. Cela donne des résultats approximatifs. Les modèles les plus couramment utilisés pour analyser les antennes imprimées sont : le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité électromagnétique [15].

I.11.1.1. Modèle de la ligne de transmission

Le modèle de la ligne de transmission est largement utilisé pour analyser et concevoir des antennes micro-ruban. Initialement, la méthode MLT était limitée aux antennes micro-ruban rectangulaires planes, mais elle a été étendue à d'autres structures par la suite. Un patch rectangulaire peut être vu comme deux fentes rayonnantes parallèles, séparées par la longueur du patch et perpendiculaires au trajet du courant dominant. Bien que ce modèle fournisse une bonne compréhension physique, il offre moins de précision. Les paramètres clés de ce modèle sont l'impédance caractéristique et la constante de propagation effective [16].

I.11.1.2. Modèle de la cavité électromagnétique

Tout comme le modèle précédent, le modèle de cavité offre également une bonne interprétation physique. Cependant, il est plus adapté pour étudier des formes géométriques différentes de l'élément rayonnant. Ce modèle est basé sur la région entre la surface métallique du patch et le plan de masse, qui est considérée comme une cavité. Les murs latéraux de cette cavité sont magnétiques, tandis que les faces supérieure et inférieure sont des murs électriques. C'est au niveau des murs latéraux que les courants de surface sont calculés et que le rayonnement est généré [16].

I.11.2. Méthode numérique

Les techniques numériques permettent d'analyser la distribution du courant sur la surface de l'élément conducteur et le plan de masse, soit en fonction de la fréquence, soit dans le temps. Elles sont capables de traiter des structures complexes, y compris les objets multicouches. Cependant, elles demandent beaucoup de temps de calcul et d'espace mémoire, et elles offrent peu d'interprétations physiques [16].

Parmi les méthodes numériques les plus utilisées, on trouve :

- La méthode des moments.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des différences finies.
- La méthode de la matrice des lignes de transmission.

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les éléments de base des antennes imprimées tels que leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques (le gain, la directivité, le coefficient de

réflexion...), leurs paramètres géométriques, leurs descriptions, leurs types d'antennes (filaire, à fente, à ouverture...), leurs avantages et inconvénients, ainsi que les domaines de leurs applications. En dernier lieu, une présentation de quelques méthodes d'alimentations et les méthodes d'analyses clôt ce chapitre.

Le chapitre suivant portera sur la technologie SIW.

Chapitre II

Technologie SIW

II.1. Introduction

Les guides d'ondes jouent un rôle fondamental dans les systèmes de communication haute fréquence, servant de structures pour guider et transmettre les ondes électromagnétiques avec une perte minimale. Avec l'évolution des technologies sans fil et la demande croissante de systèmes compacts et performants, de nouvelles solutions ont émergé pour répondre à ces besoins. Parmi elles, la technologie SIW s'impose comme une alternative prometteuse aux guides d'ondes classiques, combinant les avantages des guides d'ondes traditionnels et des circuits planaires.

Ce chapitre vise à explorer les principes de base des guides d'ondes, leurs caractéristiques et leurs modes de propagation, tout en introduisant la technologie micro-ruban, largement utilisée pour son intégration facile et ses performances. Ensuite, nous nous concentrerons sur la technologie SIW, en examinant sa conception, ses avantages et ses applications dans les circuits passifs, actifs et les antennes. Enfin, nous aborderons les défis liés à l'alimentation et à l'adaptation de ces structures, des aspects essentiels pour garantir des performances optimales. À travers cette étude, nous chercherons à démontrer comment la technologie SIW, grâce à sa compacité, son faible coût et sa compatibilité avec les circuits planaires, ouvre de nouvelles perspectives pour les systèmes de communication modernes.

II.2. Fonctionnement d'un guide d'onde

Un guide d'onde est une structure permettant de canaliser et de transmettre des ondes électromagnétiques ou acoustiques en minimisant les pertes d'énergie grâce à la réflexion interne sur ses parois. Lorsqu'une onde entre dans le guide, elle se propage sous forme de modes spécifiques (TE, TM ou TEM pour les ondes électromagnétiques), dépendant de la fréquence et de la géométrie du guide. Les guides d'ondes peuvent être métalliques (pour les micro-ondes), en fibre optique (pour la lumière) ou acoustiques (pour les ondes sonores), chacun exploitant les propriétés de confinement et de réflexion pour optimiser la transmission. Utilisés dans les télécommunications, les radars, les circuits haute fréquence et l'imagerie médicale, ils assurent une transmission efficace en entraînant la dispersion.



Figure II.1: exemple d'un guide d'onde [17].

II.3. Les notions de base de la théorie des guides d'ondes

Le guide d'ondes est un type spécifique de ligne de transmission utilisé pour les applications micro-ondes. Il se présente sous la forme de tubes métalliques fabriqués à partir de matériaux de haute qualité, tels que le cuivre et le laiton, parfois partiellement argentés ou même plaqués d'or pour améliorer leur conductivité. Avec les avancées technologiques récentes, ces guides sont désormais constitués de cuivre électriquement plaqué d'une fine couche de fibres de carbone [17].

Un guide d'ondes peut présenter une section transversale rectangulaire, circulaire ou elliptique, la section rectangulaire étant la plus couramment utilisée pour les connexions de courte distance. Comparés aux fils conducteurs et aux lignes coaxiales, les guides d'ondes offrent plusieurs avantages, notamment une réduction significative des pertes lors de la transmission. En effet, les champs électriques et magnétiques responsables du transport de l'énergie sont inexistantes au niveau des parois métalliques, ce qui les confine exclusivement à l'intérieur du guide et limite ainsi les pertes d'énergie. De plus, leur structure entièrement blindée garantit une excellente protection contre les interférences extérieures, assurant ainsi une transmission fiable même pour les signaux [17].

II.4. Types d'un guide d'onde

Les guides d'ondes se déclinent en plusieurs types selon leur géométrie, leur mode de fonctionnement et leur domaine d'application. Sur le principe distingué :

II.4.1. Guides d'ondes métalliques

Ce sont des structures creuses en métal utilisées pour la transmission des micro-ondes et des ondes radiofréquences. Ils permettent de guider les ondes électromagnétiques en les confinant grâce à la réflexion sur leurs parois conductrices. Les principaux types sont :

II.4.1.1. Guide d'onde rectangulaire

Un guide d'ondes rectangulaire est une structure creuse à section rectangulaire, composée de quatre parois conductrices idéales. Il s'agit d'un guide simple, rempli d'air ou considéré comme vide, permettant de diriger une onde électromagnétique à travers un milieu diélectrique (l'air) grâce aux réflexions successives sur ses parois conductrices [18].

Ce type de guide est couramment utilisé pour le transport de puissances élevées sur des distances dépassant quelques décimètres, avec des fréquences variant de quelques hertz à plusieurs centaines de gigahertz. Ses dimensions internes sont définies par sa largeur a et son épaisseur b , avec $a > b$. L'axe de propagation est généralement orienté selon la direction z , comme illustré dans (la figure II.2) [18] :

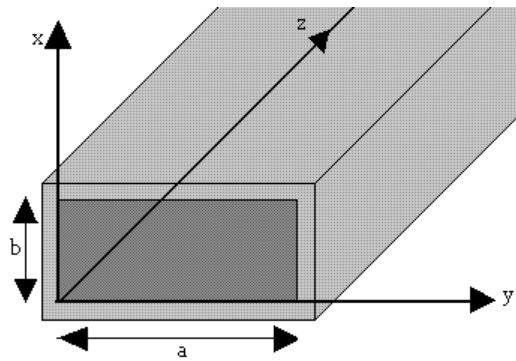


Figure II.2 : guide d'onde rectangulaire [18].

II.4.1.2. Guide d'onde circulaire

Un guide d'ondes circulaire est une structure creuse à section cylindrique, constituée d'une paroi conductrice idéale. Il permet la propagation des ondes électromagnétiques en les confinant à l'intérieur du cylindre, où elles se réfléchissent sur la paroi conductrice.

Comme le guide d'ondes rectangulaire, il est utilisé pour transmettre des signaux à haute fréquence et de grandes puissances sur des distances importantes. Il est particulièrement employé dans les applications radar, les communications à hyperfréquences et certaines liaisons satellitaires.

Le guide d'ondes circulaire est défini par son **rayon intérieur** R et l'axe de propagation est généralement considéré comme étant l'axe z . Sa géométrie permet la propagation de

plusieurs modes, dont les modes **TE (Transversal Électrique)** et **TM (Transversal Magnétique)**, chacun ayant des caractéristiques spécifiques en fonction des besoins de transmission.

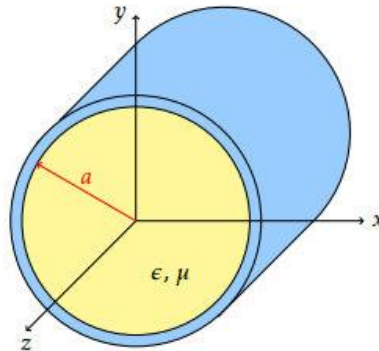


Figure II.3: guide d'onde circulaire [19].

II.4.1.3. Guide d'onde elliptique

Un guide d'ondes elliptique est une structure creuse de section transversale elliptique, constituée d'une paroi conductrice idéale. Il permet la propagation des ondes électromagnétiques en les confinant à l'intérieur de sa cavité, où elles subissent des réflexions successives sur la paroi conductrice. Ce type de guide est une alternative aux guides d'ondes rectangulaires et circulaires, offrant une flexibilité supplémentaire dans la gestion des modes de propagation. Il est particulièrement utilisé dans les systèmes de communication à haute fréquence, les applications radar et certaines transmissions optiques en raison de ses propriétés uniques en matière de polarisation et d'atténuation. Le guide d'ondes elliptique est défini par ses deux axes principaux, le grand axe a et le petit axe b .

II.4.2. Guides d'ondes diélectriques

Le guide d'onde diélectrique correspond à la fibre optique, constituée de deux milieux diélectriques (généralement en verre de silice ou en plastique) ayant des indices de réfraction différents, permettant ainsi de confiner et de guider la lumière au sein de son cœur. La fibre optique est un support de transmission de forme cylindrique, composé d'un cœur central d'indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine d'indice n_2 , elle-même protégée par un revêtement extérieur. Pour assurer la propagation de l'onde électromagnétique dans le cœur, la condition $n_2 < n_1$ doit être respectée [18].

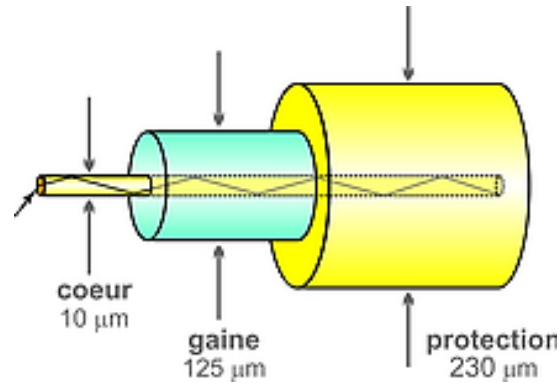


Figure II.4: Illustration graphique d'un guide d'ondes en fibre optique [18].

II.4.3. Guides d'ondes planaires

Un guide d'onde plan structural est habituellement illustré par un milieu diélectrique de hauteur h et d'indice nf , délimité en bas et en haut par un substrat et un superstrate (généralement l'air) d'indices respectifs ns et nc , tous deux plus petits que nf . La lumière se propage toujours préférentiellement via un faisceau de mesure qui a lieu dans la boucle d'angle Ng sub. Deux niveaux parlent aussi analogiquement, inférieur en substrat de type ns et supérieur en couverture nc . La lumière est confinée selon l'axe vertical (x) et elle se propage par la direction (z). Étant donné l'invariance de cette structure dans la direction (y), la lumière ne peut être confinée dans cette direction [20].

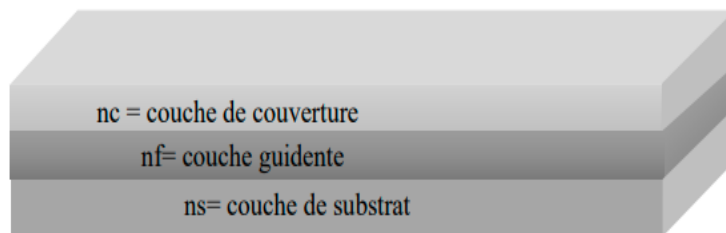


Figure II.5 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire [20].

Pour que l'énergie lumineuse puisse être confinée dans un guide d'indice nf , deux conditions essentielles doivent être remplies [20].

- Les indices de réfraction des trois milieux formant le guide plan doivent satisfaire l'inégalité $nf > ns \geq nc$.

- L'épaisseur du guide doit être supérieure à une valeur critique, en dessous de laquelle le guidage de la lumière n'est plus possible.

II.4.4. Guides d'ondes diffusés

La figure (II.6) illustre le schéma de principe d'un guide d'onde de type diffusé. Ce guide est constitué de trois régions distinctes [20] :

- Une région de substrat semi-infinie $y = 0$ caractérisée par un indice de réfraction n_0 .
- Une fine couche enfoncée dans le substrat, où l'indice de réfraction est légèrement augmenté à $n_0 + \Delta n$. Cette couche est la zone active qui permet le guidage de la lumière.
- Une région supérieure de couverture semi-infinie $y > 0$ avec un indice de réfraction n_c , qui sert à confiner la lumière dans la couche enfoncée [20].

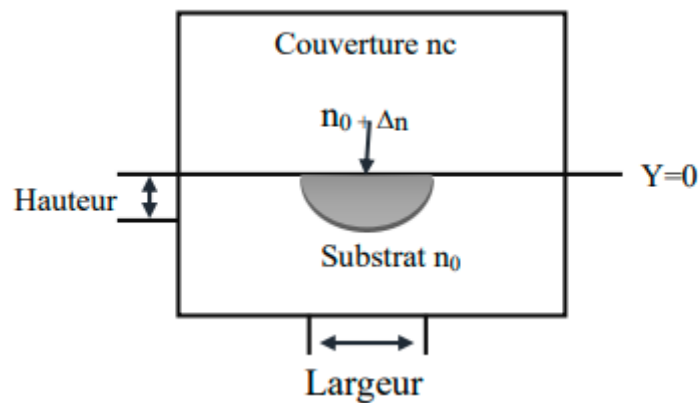


Figure II.6: Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé [20].

Ce guide d'onde diffusé repose sur une modulation locale de l'indice de réfraction dans le substrat, créant ainsi une structure capable de confiner et de guider la lumière efficacement.

II.5. Modes de polarisations

Les champs électromagnétiques E et H capables de se propager dans un guide d'onde doivent satisfaire à la fois les équations de Maxwell et les conditions aux limites imposées par les parois du guide dans les trois directions. Cependant, dans les sections précédentes, l'étude théorique s'est concentrée sur une solution particulière des champs E et H , dite fondamentale, afin de simplifier l'analyse. En réalité, il existe de nombreuses solutions possibles pour E et H , chacune correspondant à un mode de propagation. Ces modes sont caractérisés par deux entiers

positifs, n et m , qui permettent de les identifier et de les distinguer les uns des autres [21].

Pour illustrer des solutions en deux catégories principales :

- TE_{mn} , où m, n sont des entiers positifs ou nuls, à l'exception du cas où $m = n = 0$.
- TM_{mn} , où m, n sont des entiers strictement positifs. Chaque mode est caractérisé par une fréquence de coupure spécifique.

$$f_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \frac{k_z}{k}} \quad (\text{II.1})$$

Un mode correspond à une solution de l'équation de dispersion. En analysant le diagramme du champ associé à chaque mode, il est possible de les classer en :

- Mode TE : Dans ce mode, le champ électrique E est une composante transverse, ce qui implique qu'il est perpendiculaire à l'axe de propagation. Si l'on désigne $\vec{z}$ comme le vecteur unitaire de cet axe de propagation, alors le champ électrique. Cela se traduit par la relation [18] :

$$\vec{E} \perp \vec{z} \text{ et } E_z = 0$$

- Mode TM : Dans ce mode, le champ magnétique H est une composante transverse, ce qui signifie qu'il est perpendiculaire à l'axe de propagation [18].

$$\vec{H} \perp \vec{z} \text{ et } H_z = 0$$

- Mode TEM (Onde Transverse Électromagnétique) : Dans ce mode, les champs électriques et magnétiques sont tous deux orientés perpendiculairement [18].

$$E_z = H_z = 0$$

- Modes hybrides : Dans ce cas, aucune composante n'est transverse, ce qui signifie que le champ électrique E et le champ magnétique H peuvent avoir des composantes dans toutes les directions :

$$E_z \neq 0 \text{ Et } H_z \neq 0$$

Ces symboles seront employés par la suite dans ce manuscrit, bien que d'autres notations puissent parfois être utilisées pour désigner ces modes, comme le mode H, correspondant au mode TE, et le mode E, correspondant au mode TM [21].

II.6. Caractéristiques de guide d'onde

Les guides d'ondes possèdent plusieurs caractéristiques essentielles qui influencent leur capacité à confiner et à transmettre la lumière ou les ondes électromagnétiques. Voici les principaux :

II.6.1. Fréquence de coupure

La fréquence de coupure f_c est la fréquence minimale à partir de laquelle une onde électromagnétique peut se propager dans un mode donné. Elle est déterminée par la géométrie du guide d'onde ainsi que par les propriétés physiques du diélectrique (ϵ , μ). La propagation de l'onde est régie par les conditions suivantes [18] :

- Si $f > f_c$, l'onde se propage.
- Si $f < f_c$, aucune propagation n'a lieu.

II.6.2. Longueur d'onde

La longueur d'onde guidée λ_g est déterminée par la constante de phase β , qui décrit la variation de phase du signal le long de l'axe de propagation dans le guide d'ondes. Après simplification, on obtient la formule suivante [21] :

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.2})$$

Avec c : vitesse de la lumière dans le vide.

II.6.3. Vitesse de phase

La vitesse de phase dans un guide d'onde est la vitesse à laquelle une onde électromagnétique se propage dans le guide. Elle dépend de la fréquence de l'onde et des propriétés du guide d'onde, telles que sa géométrie et le matériau dont il est constitué. Cette vitesse est plus élevée que la vitesse de propagation réelle, mais il s'agit d'une vitesse apparente [21].

$$v_{p_z} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{fc_{mn}}{f}\right)^2}} \quad (\text{II.3})$$

Avec
$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.4})$$

On observe que la vitesse de phase dépend de la fréquence fc_{mn} , ce qui indique que la propagation est dispersive. De plus, la vitesse de phase est supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide $v_{p_z} > v_p$. Bien que cela semble contredire la théorie de la relativité, qui interdit la propagation de toute forme d'énergie à une vitesse supérieure à celle de la lumière, cette valeur

n'est pas erronée. En effet, la phase de l'onde ne transporte pas l'information ou l'énergie associée à l'onde [21].

II.6.4. Atténuation

L'atténuation dans un guide d'onde est généralement exprimée par un coefficient d'atténuation α , qui représente la diminution de l'amplitude du signal par unité de longueur. Elle peut être calculée à partir des pertes par conduction et diélectriques selon la formule générale [18] :

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (\text{II.5})$$

Où :

α_c : Représente l'atténuation due aux pertes par conduction sur les parois du guide.

α_d : Représente l'atténuation due aux pertes diélectriques du matériau remplissant le guide.

Pour une onde TEM : $\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2}$

Pour une onde TE ou TM : $\alpha_d = \frac{k^2 \tan \delta}{2\beta}$

Avec :

β : constante de phase.

$\tan \delta$: les pertes tangentielles propres à chaque diélectrique.

$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}$: est le nombre d'ondes sans pertes.

Exprimé en Neper/m, avec : $1 N_p = 8.686 \text{ dB}$.

II.7. Technologie micro ruban

La technologie des micro-rubans est largement utilisée dans les circuits micro-ondes passifs. Elle consiste en un ruban métallique sur un substrat diélectrique, avec le plan de masse en dessous. Les champs électromagnétiques sont principalement concentrés dans le substrat, avec une petite portion dans l'air. Cela empêche une ligne micro-ruban de supporter un mode TEM pur, car la vitesse de phase dans le diélectrique diffère de celle dans l'air [22].

II.7.1. Définition d'une ligne micro ruban

La ligne micro-ruban (ou micro bande) est la plus couramment utilisée parmi les lignes de transmission planaires dans les fréquences classiques (< 20 GHz). Développée dans les années 1950 par Grieg et Engelmann, elle est largement employée pour la conception de circuits hyperfréquences. Cette structure est composée d'un conducteur métallique placé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique, avec un plan de masse sur la face inférieure. Le mode de propagation fondamental dans ce type de ligne n'est pas le mode TEM (Transverse Electro-Magnetic), car la section transversale n'est pas homogène. Toutefois, comme les amplitudes des composantes longitudinales des champs électriques et magnétiques sont suffisamment faibles pour être négligées, on parle de mode quasi-TEM. Cela permet de modéliser la structure comme une ligne de transmission ayant une impédance caractéristique « Z_c » dans un milieu homogène équivalent, caractérisé par une permittivité relative effective « $\epsilon_{r\text{ eff}}$ » [22].

II.7.2. Structure d'une ligne micro ruban

Il s'agit d'une structure planaire composée d'un ruban métallique mince et étroit déposé sur la première face d'une plaque diélectrique, tandis que la deuxième face de cette plaque est entièrement recouverte de métal, formant ainsi un plan de masse. La configuration générale d'une ligne micro-ruban est présentée dans la figure II.7. Cette ligne est constituée d'un conducteur de largeur W et d'épaisseur t , placé à une distance h d'un plan de masse. La ligne micro-ruban est fabriquée à l'aide des techniques de circuits imprimés. Elle est couramment utilisée pour la réalisation de circuits intégrés micro-ondes et peut remplacer les guides d'ondes traditionnels dans les applications à faibles puissances. Par rapport aux circuits utilisant des guides d'ondes, les circuits micro-ruban sont plus légers et prennent moins de place [22].

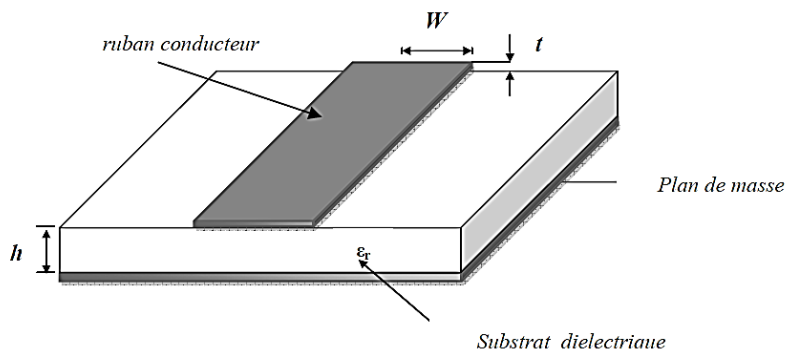


Figure II.7: Structure d'une Ligne micro ruban [22].

II.7.3. Avantages et les inconvénients des lignes micro-rubans**a) Avantages**

- Facilité de fabrication.
- Compacité.
- Faible coût.
- Stabilité et fiabilité.
- Bande passante large.

b) Inconvénients

- Pertes à haute fréquence.
- Sensibilité aux variations environnementales.

II.8. Technologie SIW

La technologie SIW, qui fait partie de la famille des circuits intégrés sur substrat (SIC), a été introduite pour la première fois en 1994. Elle est de plus en plus considérée comme une solution prometteuse pour la conception de dispositifs hyperfréquences performants, tels que des filtres, coupleurs, oscillateurs, antennes et circulateurs, entre autres. La technologie SIW combine une approche planaire, similaire à celle des micro-rubans ou des lignes coplanaires, avec des cavités intégrées dans le substrat, permettant la manipulation de modes de propagation volumiques [23].

En plus d'être compatible avec les technologies planaires, la technologie SIW présente la plupart des caractéristiques des guides d'ondes volumiques traditionnels (rectangulaires ou circulaires). Cela se traduit par des modes de propagation spécifiques et un facteur de qualité élevé. Ce dernier dépend principalement de la tangente de pertes du matériau et de l'épaisseur du substrat utilisé [23].

II.8.1. Modes de propagation dans un guide d'onde SIW

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, un guide d'onde rectangulaire classique supporte deux types de modes de propagation : les modes TE_{mn} et TM_{mn} . Cependant, dans un guide SIW, bien que les modes TE soient similaires à ceux d'un guide d'onde classique (en supposant que les pertes par rayonnement sont négligeables), les modes TM ne peuvent pas

exister. En effet, les modes (TM) nécessitent la présence de courants électriques surfaciques sur les parois latérales du guide, ce qui est difficile à réaliser dans une structure SIW en raison des espaces diélectriques entre les Vias métallisés qui forment les parois latérales [21].

Le mode fondamental d'un guide SIW correspond au mode TE_{10} , identique à celui d'un guide d'onde rectangulaire classique. Par ailleurs, parmi les modes TE_{mn} , seuls les modes TE_{m0} peuvent se propager efficacement. Cela s'explique par leur densité de courant électrique verticale sur les parois latérales, qui ne rencontre aucune contrainte pour circuler, contrairement aux autres modes [21].

II.8.2. Conception du SIW

Le SIW est construit à l'aide de tableaux métallisés intégrés dans le substrat via des trous métallisés, connectés à des plans de masse. Ces éléments peuvent être facilement interconnectés avec d'autres composants du système sur une structure de substrat unique, sans nécessiter de réglage. Ce système peut être miniaturisé en un petit format appelé "Système dans un Paquet" (SIP), offrant une taille compacte et un coût réduit.

Un guide d'ondes intégré dans un substrat SIW est réalisé en métallisant des tableaux dans le substrat, entre les couches métalliques supérieure et inférieure, remplaçant ainsi les parois latérales métalliques traditionnelles. Les propriétés de propagation des modes dans le SIW sont très similaires à la distribution du champ électromagnétique du mode TE_{10} dans un guide d'ondes rectangulaire métallique conventionnel [17].

La structure SIW est entièrement définie par trois paramètres clés : le diamètre des Vias d , l'espacement entre les centres de deux Vias adjacents (appelé pitch p), et la distance entre les deux rangées de Vias, mesurée de centre à centre, notée a_{SIW} . Ces paramètres sont illustrés dans (la Figure II.8) :

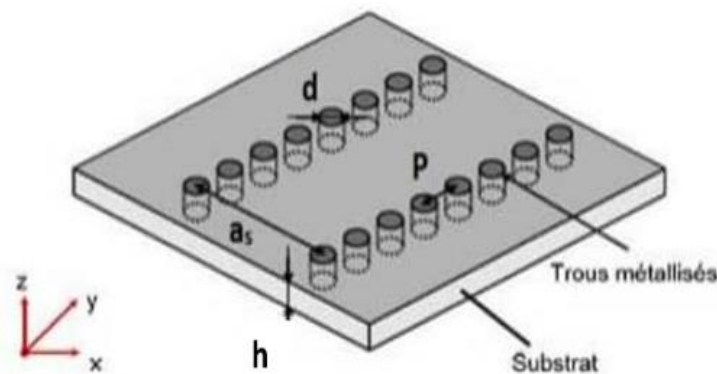


Figure II.8 : configuration de la structure du SIW.

L'augmentation de la hauteur du substrat accroît son volume, ce qui contribue à réduire les pertes conductrices. En général, les pertes par rayonnement ne sont pas influencées par l'épaisseur du substrat. Un autre paramètre géométrique clé est le diamètre d des vias. Lorsque ce diamètre augmente, les pertes conductrices augmentent également, tandis que les pertes diélectriques diminuent, car le volume occupé par le diélectrique est réduit.

Un comportement similaire est observé avec l'espacement p entre les vias. Réduire cet espacement entraîne une augmentation des pertes conductrices, due à la surface métallique plus importante, tandis que les pertes diélectriques restent pratiquement inchangées.

II.8.3. Structure SIW

Les études théoriques indiquent que les caractéristiques de propagation dans une structure SIW sont comparables à celles d'un guide d'onde rectangulaire. Plus précisément, en négligeant les pertes de rayonnement entre les trous métalliques, les modes de propagation SIW correspondent exactement aux modes (TE) d'un guide d'onde rectangulaire, mais pas aux modes transverses magnétiques (TM) [17].

En effet, les modes TM nécessitent la présence de courants surfaciques sur les deux plans conducteurs horizontaux du guide d'onde rectangulaire. Cependant, dans le cas de la technologie SIW, l'espace créé par les trous métalliques empêche la circulation efficace de ces courants horizontaux. Par conséquent, le mode fondamental dans une structure SIW est celui qui présente un courant électrique sur les plans métalliques supérieur et inférieur, ce qui explique la similarité entre un guide d'onde rectangulaire et la technologie SIW [17].

II.8.4. Géométrie d'une structure SIW

Outre les dimensions des tiges cylindriques métalliques, une nouvelle largeur est définie pour le guide SIW, correspondant à la distance entre les deux rangées de Vias, mesurée de centre à centre des cylindres métalliques. Cette dimension est illustrée dans la figure (II.9) ci-dessous. Ainsi, les dimensions clés à considérer sont les suivantes [18] :

- d : diamètre d'un via.
- P : espacement entre les centres de deux vias adjacents (pitch).
- a_{SIW} : largeur entre les deux rangées de vias, mesurée de centre à centre.
- a_{RGW} : largeur entre les deux rangées de vias.
- h : épaisseur du substrat.

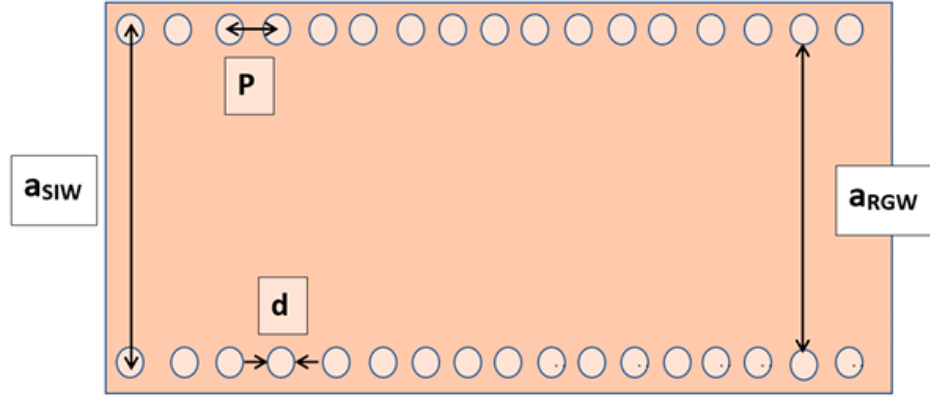


Figure II.9 : la géométrie d'une structure SIW.

II.8.5. Dimensionnement d'une structure SIW

Pour concevoir un guide d'onde intégré au substrat, où les parois latérales sont remplacées par deux rangées de vias, la première contrainte à considérer est leur positionnement. L'espacement entre ces cylindres métalliques, noté p , doit être suffisamment réduit pour minimiser les pertes par rayonnement entre les trous métalliques, tout en étant assez grand pour éviter tout chevauchement des vias. Ces deux exigences se traduisent par les conditions suivantes [24] :

$$P > d$$

$$P < 2d$$

Le diamètre d constitue également un paramètre clé influençant les pertes par rayonnement. Afin que ces pertes restent négligeables, il doit satisfaire la condition suivante [24] :

$$d < \frac{\lambda_g}{5}$$

λ_0 : La longueur d'onde dans le vide.

$$\lambda_g = \frac{c}{F_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

ϵ_r Représentant la permittivité relative du diélectrique sélectionné pour le substrat. [24].

Un autre paramètre essentiel est l'espacement entre les deux rangées de vias, noté a_{SIW} . Celui-ci est dérivé de a_{RGW} , qui correspond à la largeur d'un guide d'onde rectangulaire rempli d'un diélectrique de permittivité ϵ_r (plutôt que d'être vide) [18].

Le guide d'onde rectangulaire rempli d'un diélectrique de permittivité relative ϵ_r présente les mêmes caractéristiques modales qu'un guide d'onde rectangulaire classique (creux). Son mode fondamental TE_{10} est associé à une fréquence de coupure.

La fréquence de coupure du mode fondamental d'un guide d'onde rectangulaire rempli d'un diélectrique est donnée par [18] :

$$f_c = \frac{c}{2a_{RWG}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.7})$$

On aura donc :

$$a_{RWG} = \frac{c}{2f_c\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.8})$$

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

$$a_{SIW} = a_{RWG} + \frac{d^2}{0,95P} \quad (\text{II.9})$$

II.8.6. Quelques exemples de circuits SIW

Les circuits intégrés sur substrat (SICs, Substrat Integrated Circuits) peuvent être réalisés en combinant des structures synthétisées, telles que les guides d'ondes intégrés, avec d'autres circuits planaires, comme les lignes micro-rubans ou d'autres configurations, sur un même substrat diélectrique. Cette section rappelle différents composants SICs, à la fois passifs et actifs, qui peuvent être intégrés de cette manière [17].

II.8.6.1. Circuits passifs à base de SIW

En ce qui concerne les circuits passifs, la plupart des composants hyperfréquences conventionnelles ont été implémentés en utilisant la technologie SIW. Cette approche permet de réaliser des composants de taille réduite par rapport aux solutions classiques basées sur les guides d'ondes. Parmi les composants passifs qui ont été particulièrement étudiés, on trouve les filtres (tels que les filtres passe-bande), les cavités rectangulaires, les coupleurs et les duplexeurs SIW. Ces composants sont illustrés dans (les figures II.10, II.11 II.12, II.13) [26] :

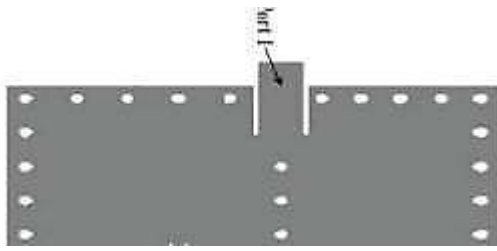


Figure II.10 : duplexeur SIW [26].

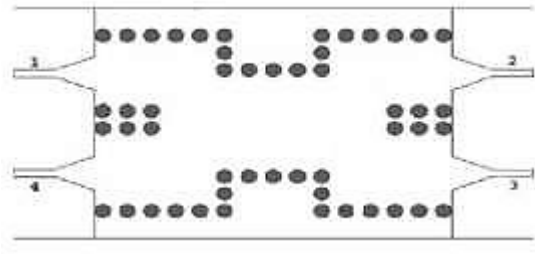


Figure II.11 : coupleur SIW [26].

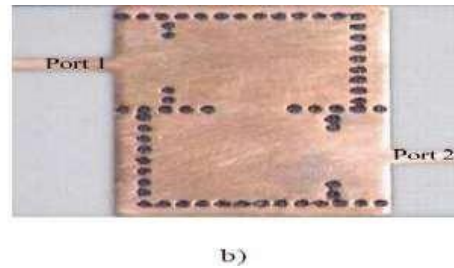
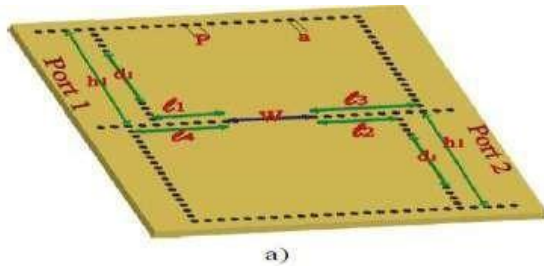


Figure II.12 : filtre passe-bande SIW [26].

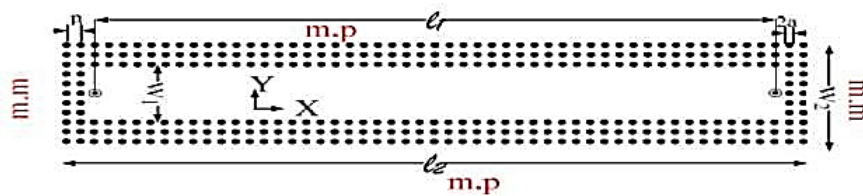


Figure II.13: Guide d'onde rectangulaire SIW [26].

II.8.6.2. Circuits actifs à base de SIW

L'implémentation de composants actifs dans la technologie SIW a reçu moins d'attention que celle des circuits passifs. Cependant, elle ouvre de nouvelles perspectives pour une intégration complète de type SOS (System-on-Substrat). La conception et l'optimisation de ces circuits actifs reposent sur l'intégration de dispositifs actifs au sein de structures SIW passives, en exploitant les avantages de cette technologie, tels que les faibles pertes, l'isolation élevée et la compacité, afin d'atteindre des performances optimales à un coût réduit. Généralement, l'une des faces conductrices du SIW est utilisée pour supporter la fonction active, les connexions étant assurées par des lignes micro-ruban. Parmi les développements récents, on peut citer les oscillateurs, les mélangeurs et les amplificateurs conçus en 2012, qui illustrent les progrès réalisés dans ce domaine. Quelques exemples sont illustrés dans (la figure II.14) [21] :

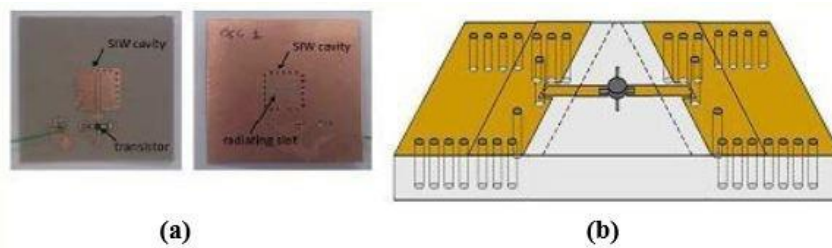


Figure II.14: exemple de circuits actifs SIW, a) oscillateur SIW, b) amplificateur SIW [21].

II.8.6.3. Antennes SIW

Les antennes de dimensions réduites, combinant de bonnes performances de rayonnement et une isolation efficace, sont fortement demandées, en particulier dans les secteurs de l'aéronautique, des télécommunications et des systèmes embarqués. Les antennes SIW, grâce à leurs propriétés avantageuses, se révèlent particulièrement adaptées à ces applications. Des exemples de ces antennes sont illustrés dans (la figure II.15) [27].

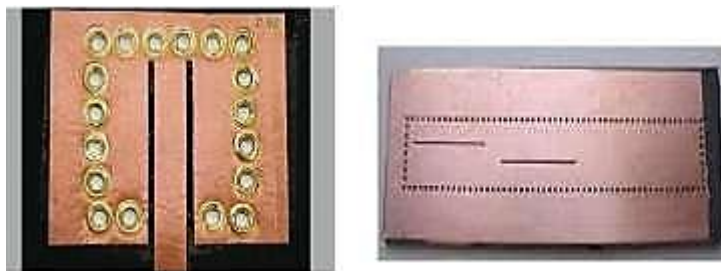


Figure II.15: antenne SIW [27].

II.8.7. Avantages de technologie SIW

La technologie (SIW) est très prometteuse, car elle allie les avantages des guides d'ondes traditionnels et des lignes de transmission planaires. À l'instar des guides d'ondes, elle permet de bénéficier de pertes faibles, d'un facteur de qualité élevé, d'une capacité à gérer de fortes puissances et d'un rayonnement minimal. Par ailleurs, comme les lignes de transmission planaires, elle autorise une fabrication compacte et économique, tout en facilitant l'intégration avec d'autres composants. Cette combinaison en fait une solution idéale pour les applications hyperfréquences modernes.

Les guides d'ondes intégrés au substrat présentent plusieurs avantages notables :

- Coûts de réalisation réduits

- Pertes faibles
- Facteur de qualité élevé
- Taille compacte
- Facilité d'intégration avec d'autres systèmes et composants.

Ces caractéristiques en font une solution attrayante pour les applications hyperfréquences modernes.

II.9. Intégration dans le guide d'ondes SIW

La technologie SIW a été largement adoptée pour sa facilité d'intégration dans divers composants électroniques, qu'ils soient passifs (comme les antennes et les filtres) ou actifs (tels que les transistors et les amplificateurs). Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de nous concentrer sur l'antenne planaire, réputée pour ses excellentes performances de rayonnement et sa compacité. La mise en œuvre de la technologie SIW sur cette antenne s'avère relativement simple, car celle-ci est déjà conçue selon une architecture planaire, avec un substrat diélectrique métallisé comprenant un plan de masse sur la face inférieure et un élément rayonnant (patch) sur la face supérieure. L'application de la technologie SIW consistera essentiellement à transformer le substrat de l'antenne en un guide d'onde en intégrant des rangées de Vias sur les parois latérales du substrat. Cependant, un défi majeur réside dans l'alimentation et l'adaptation de cette structure SIW, un aspect qui fera l'objet de notre étude dans cette partie du travail [18].

II.9.1. Alimentation

Très répandue et simple à implémenter dans une technologie planaire, la ligne micro-ruban constitue un choix pertinent pour l'alimentation de ce type de structure, grâce à son faible rayonnement parasite et à sa bande passante relativement satisfaisante. Le dimensionnement de cette ligne sera réalisé en suivant des règles de conception spécifiques afin d'obtenir une impédance caractéristique de 50Ω . Il est à noter que le mode de propagation dominant dans cette ligne est exclusivement le mode TEM [18].

II.9.2. Adaptation

Étant donné que le guide d'onde SIW possède sa propre impédance et fonctionne avec un mode fondamental TE_{10} , l'adaptation entre ce mode et le mode TEM de la ligne micro-ruban, ainsi que l'adaptation des impédances entre le guide SIW et la ligne, constitue un aspect

crucial dans la conception de cette structure.

L'adaptation d'une antenne SIW repose sur deux aspects essentiels : d'une part, l'adaptation de l'alimentation au guide SIW, et d'autre part, l'adaptation de l'antenne elle-même pour qu'elle résonne à la fréquence souhaitée [18].

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

Pour assurer la connexion entre le guide d'onde SIW et la ligne micro-ruban, permettant ainsi au signal électrique de passer de l'alimentation à la structure SIW, un tronçon de ligne quart d'onde est utilisé. Cette transition, appelée transition micro-ruban vers SIW (Micros trip-to-SIW), sert à adapter l'impédance du mode fondamental du guide SIW (TE_{10}) au mode TEM qui se propage dans la ligne micro-ruban. Les dimensions de cette transition sont déterminées en suivant des règles de conception spécifiques, qui dépendent des propriétés physiques du diélectrique sélectionné pour la conception de la structure. Ainsi, pour cette structure SIW, les dimensions seront définies comme illustré dans (la figure II.16) [18] :

- **Wf** : La largeur de la ligne micro-ruban d'alimentation, dimensionnée pour obtenir une impédance caractéristique de 50Ω .
- **Lf** : La longueur de la ligne micro-ruban.
- **Wt** : La largeur de la transition.
- **Lt** : La longueur de la transition.

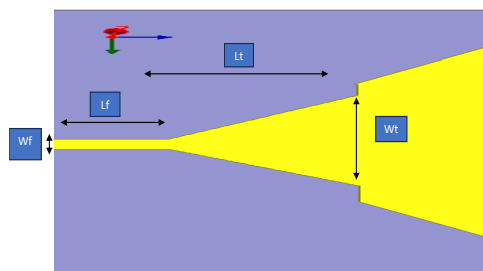


Figure II.16 : Dimensions géométriques de la ligne micro-ruban et de sa transition [18].

II.9.2.2. Adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance

Pour concevoir une antenne à fentes, un réseau de fentes sera intégré sur l'élément rayonnant de l'antenne, c'est-à-dire sur la paroi supérieure du guide SIW. Cette configuration permettra à l'antenne de fonctionner dans la bande passante micro-onde souhaitée. Les dimensions des fentes joueront un rôle crucial, car elles devront être optimisées pour que l'antenne résonne à la fréquence de coupure choisie.

Les fentes permettront d'adapter l'antenne à la fréquence de résonance souhaitée. La longueur des fentes, notée b , peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante [18] :

$$b = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (\text{II.10})$$

La largeur des fentes, notée c , a une influence moindre, car elle n'affecte pas significativement le fonctionnement de l'antenne à la fréquence souhaitée (ce qui sera démontré par des simulations dans la partie pratique du travail). Cependant, elle doit tout de même respecter la règle suivante :

$$c < \frac{b}{2}$$

La distance longitudinale entre les centres de deux fentes adjacentes est fixée à $\frac{\lambda_g}{2}$, tandis que l'écart entre le centre de la dernière fente et le mur des vias est défini à $\frac{\lambda_g}{4}$.

La figure suivante illustre les dimensions des fentes ainsi que leur positionnement :

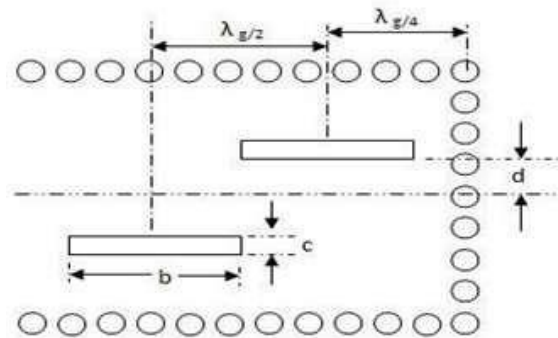


Figure II.17 : Dimensions et espacements des fentes [18].

II.10. Conclusion

Ce chapitre aborde les concepts clés des guides d'ondes, en explorant leurs types (circulaire, rectangulaire, elliptique), leurs caractéristiques (fréquence de coupure, longueur d'onde, vitesse de phase, atténuation, impédance) et leurs modes de polarisation. Il présente également la technologie micro-ruban, ses avantages et inconvénients, ainsi que son rôle dans les circuits haute fréquence. Ensuite, il se concentre sur la technologie SIW, une solution innovante offrant compacité, faible coût et facilité d'intégration avec les antennes et circuits planaires. Les aspects clés comme la conception, le dimensionnement, les modes de propagation et les applications (circuits passifs, actifs et antennes) sont détaillés. Enfin,

l'adaptation entre le guide SIW et la ligne micro-ruban, ainsi que l'optimisation de l'antenne pour la fréquence de résonance, sont soulignées comme essentielles pour des performances optimales. Ce chapitre fournit ainsi une base solide pour la conception et l'application des technologies SIW dans les systèmes micro-ondes et millimétriques.

Chapitre III

Antennes patch à base de la technologie SIW

III.1. Introduction

Les antennes patch sont largement utilisées dans les systèmes de communication grâce à leur compacité, leur légèreté et leur facilité d'intégration. Toutefois, elles présentent certaines limites, notamment en termes de bande passante et de polarisation. Pour y remédier, la technologie SIW a été introduite, permettant d'améliorer les performances des antennes patch tout en maintenant une intégration simple. Ce chapitre présente les antennes patch, leurs structures, leurs types et leurs caractéristiques, avant de se focaliser sur les antennes patch SIW, leurs avantages, ainsi que leurs domaines d'application.

III.2. Antenne patch

III.2.1 Définition

Une antenne patch, également appelée antenne imprimée micro ruban ou antenne à microbande, est une antenne plane très utilisée dans les systèmes de communication sans fil en raison de sa compacité, de sa légèreté et de sa facilité de fabrication. Elle se compose d'un élément rayonnant métallique, appelé "patch", placé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique isolant, tandis que la face inférieure de ce dernier est recouverte d'un plan de masse conducteur. Comme toute antenne, elle joue le rôle de transducteur électromagnétique, en convertissant l'énergie électromagnétique guidée en énergie rayonnée dans l'espace libre, et inversement lorsqu'elle fonctionne en réception [28].

III.2.2 Description de l'antenne patch

Dans sa configuration de base (Figure III.1), une antenne imprimée se compose d'un conducteur métallique de forme arbitraire, placé sur un substrat diélectrique et surmontant un plan de masse. Ce dernier permet d'augmenter la puissance rayonnée, de réduire les pertes par effet Joule et d'élargir la bande passante de l'antenne [29].

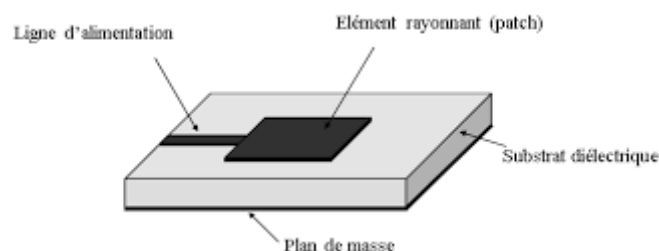


Figure III.1: Antenne patch [29].

L'élément rayonnant peut adopter différentes formes, comme illustré dans la Figure III.2.

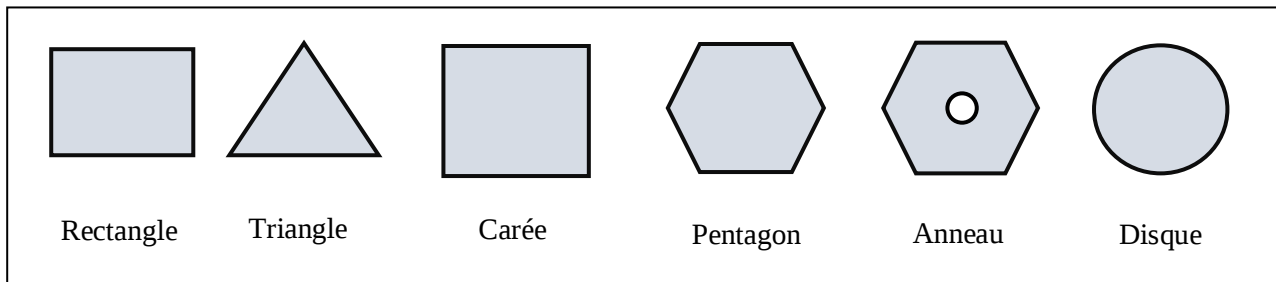


Figure III.2: Différentes formes d'antennes microbande.

Pour optimiser l'efficacité d'une antenne, il est recommandé d'utiliser un substrat diélectrique relativement épais et à faible constante diélectrique. Cette configuration amplifie les effets de bord, ce qui améliore le rayonnement du champ électromagnétique [30].

III.2.3. Types d'antenne patch

Les antennes patch se déclinent en plusieurs configurations, notamment les formes rectangulaire, circulaire et à résonateur en anneau fendu. Le choix de la géométrie influence directement les performances de l'antenne, car celle-ci détermine à la fois la fréquence de résonance et la bande passante [31].

III.2.3.1. Antenne patch rectangulaire

L'antenne patch rectangulaire est l'un des types d'antennes à microbande les plus courants, en particulier pour des applications à haute fréquence. Elle est composée d'un patch métallique rectangulaire placé sur un substrat diélectrique, avec un plan de masse situé en dessous.

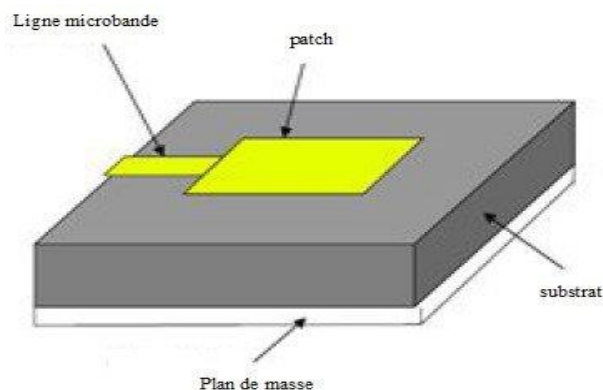


Figure III.3: Antenne patch rectangulaire [31].

III.2.3.2. Antenne patch circulaire

L'antenne patch circulaire est une autre variante de l'antenne à microbande, dont le patch rayonnant a une forme circulaire au lieu de rectangulaire. Elle est souvent utilisée dans des applications nécessitant une polarisation circulaire et offre de bonnes performances dans des configurations spécifiques, comme les communications par satellite et les systèmes GPS.

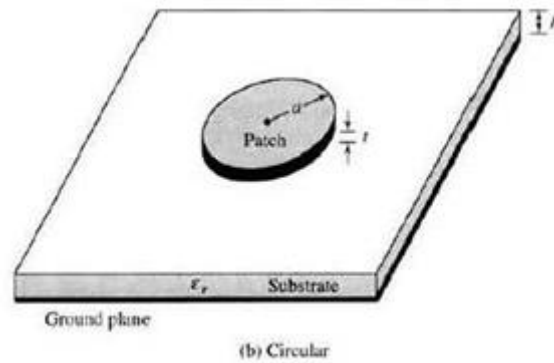


Figure III.4: Antenne patch circulaire [4].

III.2.4. Avantages et inconvénients des antennes patch

Si l'antenne patch offre de nombreux avantages, elle a aussi ses contraintes [32,33].

III.2.4.1. Avantages

- Faible masse, faible volume.
- Faible épaisseur.
- Possibilité d'être imprimée sur des substrats souples.
- Possibilité d'être intégrée dans des appareils électroniques transportables (téléphones mobiles, ordinateurs personnels (pc), assistants personnels (PDA), récepteurs portables GPS, transpondeurs RFID, appareils photos numériques).
- Facilités de fabrication.
- Mise en réseau.
- Intégration aisée de composants ou de circuits actifs hybrides (réseaux linéaires ou planaires technologie MIC « composants rapportés »).
- Faible coût de fabrication (production automatisée de masse).

III.2.4.2. Inconvénients

- Bande passante réduite.
- Gain modéré.
- Faible tolérance à la puissance.
- Polarisation imparfaite.
- Rayonnement directionnel.
- Pertes par ondes de surface.

III.2.5. Caractéristiques

III.2.5.1. Coefficient de réflexion

Le paramètre S_{11} présenté dans la figure III.5, ou coefficient de réflexion, quantifie l'adaptation d'impédance de l'antenne patch en mesurant la puissance réfléchie. Une valeur faible de S_{11} indique une bonne absorption de l'énergie incidente par l'antenne. Ce critère constitue le principal indicateur utilisé lors du processus d'optimisation des performances de l'antenne [30].

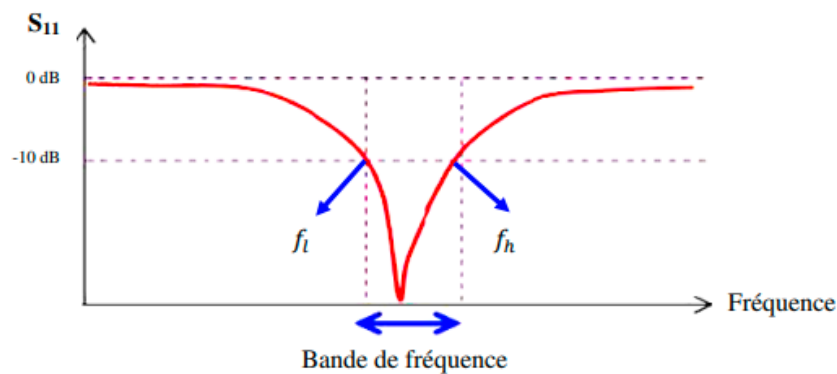


Figure III.5: Visualisation de la bande passante à -10 dB d'une antenne [33].

III.2.5.2. Bande passante

La bande passante d'une antenne micro ruban correspond à la plage de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion reste en dessous d'un seuil donné (généralement -10 dB). Elle caractérise l'intervalle où le transfert d'énergie entre la source et l'antenne (ou entre l'antenne et le récepteur) est optimal (voir figure III.5). Cette valeur est typiquement déterminée à partir de la courbe du coefficient de réflexion [33].

$$B_{p(GHz)} = f_h - f_l \quad (III.1)$$

Avec :

f_h : Représente la fréquence maximale de la bande passante et f_l : Représente la fréquence

minimale de la bande passante (voir figure III.5).

III.2.5.3. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (Z_{in}) d'une antenne patch est une grandeur complexe (comportant une partie réelle résistive et une partie imaginaire réactive) qui caractérise la façon dont l'antenne se comporte vis-à-vis de la ligne de transmission qui l'alimente [31].

$$z_{in} = R_{in} + j \cdot X_{in} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

z_{in} : Impédances d'entrée (ohms).

R_{in} : Résistances d'antenne (ohms).

III.2.5.4. Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement est une représentation graphique qui montre comment une antenne émet ou reçoit les ondes électromagnétiques dans l'espace. Il permet de visualiser la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions, généralement en champ lointain. Ce diagramme met en évidence le lobe principal, qui indique la direction où le rayonnement est le plus intense, ainsi que les lobes secondaires et les éventuelles zones de faible rayonnement. Il constitue un outil essentiel pour évaluer les performances directionnelles d'une antenne, sa directivité et son gain. Les ingénieurs l'utilisent pour optimiser l'orientation et le positionnement des antennes, afin d'assurer une transmission ou une réception optimale dans la direction souhaitée. Le diagramme est souvent présenté en coordonnées polaires avec une échelle logarithmique (en décibels) pour mieux comparer les intensités de rayonnement dans différentes directions [33].

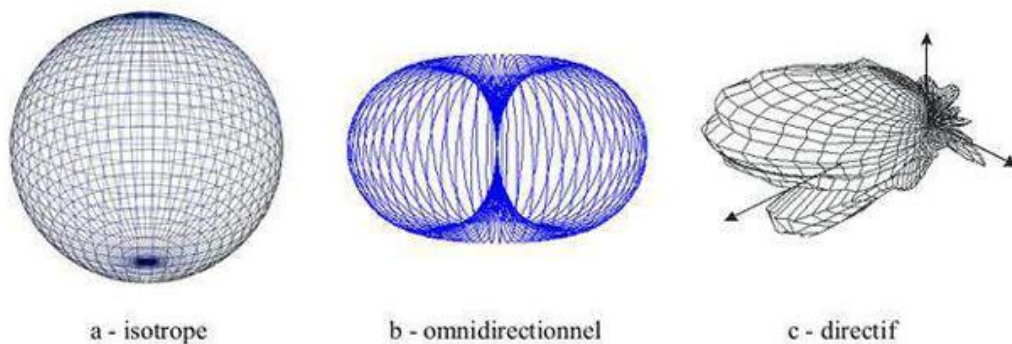


Figure III.6: Formes typiques de diagramme de rayonnement [34].

III.2.5.5. Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture d'une antenne patch correspond à l'angle dans lequel la puissance rayonnée tombe à la moitié (soit -3 dB) de la puissance maximale émise dans la direction principale [34].

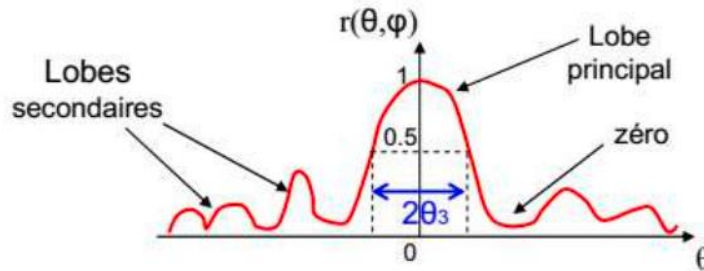


Figure III.7: Représentation du rayonnement et angle d'ouverture d'une antenne [34].

III.2.5.6. Directivité

La directivité $D(\theta, \phi)$ est définie comme le rapport de la densité de puissance rayonnée par l'antenne dans la direction (θ, ϕ) sur celle produite par une antenne isotrope sans pertes, pour une puissance d'alimentation identique [30].

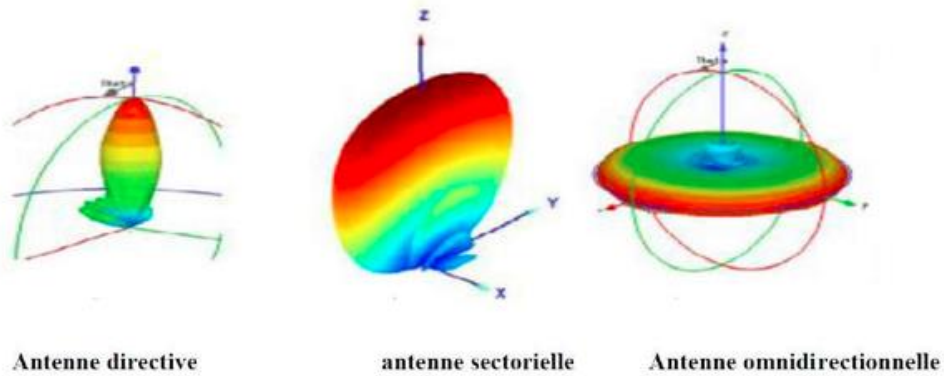


Figure III.8: Configurations possibles de la dispersion énergétique des antennes dans l'espace

III.2.5.7. Rendement

Le rendement η d'une antenne représente le rapport entre la puissance rayonnée p_r et la puissance d'alimentation p_t , caractérisant son efficacité de conversion énergétique [32].

$$\eta = \frac{p_r}{p_t} \quad (\text{III.3})$$

III.2.5.8. Gain

Le gain (G) est déterminé par deux facteurs : la directivité et les pertes [30].

$$G(\theta, \varphi) = \eta * D(\theta, \varphi) \quad (\text{III.4})$$

III.2.5.9. Facteur de qualité

Le facteur de qualité est une caractéristique intrinsèque d'une antenne, inspirée de la théorie des circuits électroniques linéaires. Généralement calculé à la fréquence de résonance, il est directement lié à la bande passante de l'antenne.

D'un point de vue général, le facteur de qualité d'une antenne est défini comme le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle de son impédance d'entrée. Mathématiquement, il s'exprime comme suit [34] :

$$Q_{total} = \frac{IM(Z)}{Re(Z)} = W \frac{W_{stockée}}{P_{dissipée}} \quad (\text{III.5})$$

III.2.5.10. Facteur d'antenne

Le facteur d'antenne F_A est un paramètre utilisé en métrologie pour caractériser la réponse d'une antenne en réception. Il définit le rapport entre le champ électrique incident efficace E_{eff} et la tension mesurée V aux bornes de l'antenne et donné par [34] :

$$F_A = \frac{E_{eff}}{V} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

E_{eff} : Le champ électrique efficace rayonné est donné par :

$$E_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.7})$$

E : Le champ électrique.

III.2.5.11. Polarisation

La polarisation d'une antenne est définie par celle de l'onde qu'elle émet dans une direction donnée. Elle correspond à l'orientation du champ électrique, donc à celle des éléments rayonnants de l'antenne. Le plan électrique, ou plan E, est parallèle au vecteur du champ électrique E de l'onde émise. Lorsque ce plan est perpendiculaire au sol, on parle de polarisation verticale ; s'il est parallèle au sol, il s'agit alors d'une polarisation horizontale. Le vecteur du champ électrique instantané décrit une trajectoire dans le temps, appelée figure de polarisation. Cette figure est généralement une ellipse, avec des cas particuliers [30] :

- Si le vecteur suit une trajectoire rectiligne, on parle de polarisation linéaire.
- Si le vecteur décrit un cercle, on parle de polarisation circulaire.

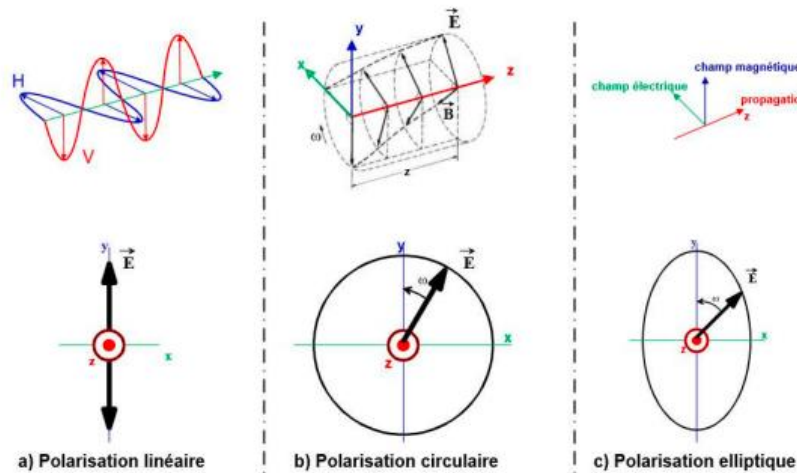


Figure III.9: Polarisation de l'onde électromagnétique [30].

III.3. Antenne patch SIW

III.3.1. Définition

Une antenne patch SIW est une antenne micro strip qui utilise la technologie des guides d'ondes intégrés dans un substrat pour optimiser la performance et la compacité. Elle est composée d'un patch rayonnant, généralement en forme rectangulaire ou circulaire, intégré dans une cavité SIW. La cavité SIW est formée par des vias métalliques entourant le patch et reliant deux couches métalliques (supérieure et inférieure) à travers un substrat diélectrique. Cette structure permet de confiner les ondes électromagnétiques tout en facilitant leur propagation et leur rayonnement à travers le patch [35].

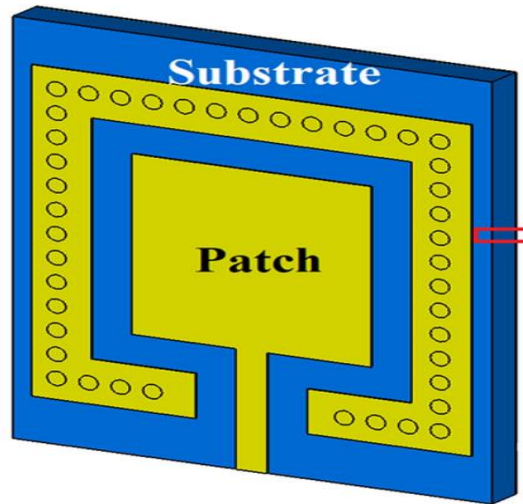


Figure III.10: Antenne patch SIW.

III.3.2. Structure des antennes patch SIW

La structure d'une antenne patch basée sur un guide d'ondes intégré dans un substrat (SIW) est composée de plusieurs éléments fondamentaux qui assurent son fonctionnement efficace. Cette antenne repose sur une conception intégrée et compacte, combinant des technologies de micro-ondes et de rayonnement. Elle se compose généralement d'un substrat diélectrique, de vias métalliques, d'un patch rayonnant et de couches métalliques [36].

Une antenne patch se compose de plusieurs éléments fondamentaux :

- Substrat diélectrique : Base de l'antenne, souvent en FR4, avec des propriétés diélectriques spécifiques pour minimiser les pertes.
- Patch rayonnant : Un élément métallique (rectangulaire, circulaire, etc...) imprimé sur la couche supérieure, dimensionné pour résonner à une fréquence spécifique.
- Cavité SIW : Formée par des vias métalliques qui confinent les ondes électromagnétiques, améliorant la propagation et le rayonnement.
- Couches métalliques : Un plan de masse inférieur et un plan rayonnant supérieur assurent l'isolation et le rayonnement efficace [36].

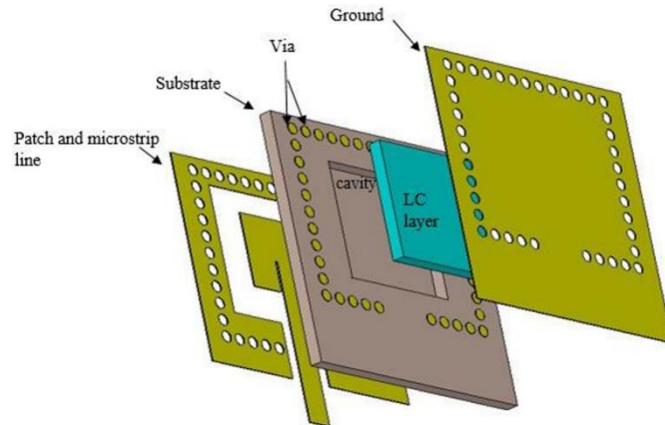


Figure III.11 : la structure de base d'une antenne patch SIW.

III.3.3. Principe de fonctionnement

Une antenne patch SIW fonctionne en combinant les principes d'un guide d'ondes intégré au substrat et d'une antenne patch classique. La structure est constituée d'un substrat diélectrique sur lequel est gravé un patch métallique, alimenté par un guide d'ondes SIW formé par deux rangées de Vias métallisés. Ces Vias créent des parois latérales artificielles, confinant le champ électromagnétique à l'intérieur du substrat, similairement à un guide d'ondes traditionnel mais avec une meilleure intégration dans un circuit imprimé. Lorsqu'un signal haute fréquence est injecté (via une ligne micro ruban ou un couplage par fente), il se propage dans le guide SIW en mode TE_{10} avant d'exciter le patch. Le champ entre le patch et le plan de masse génère un rayonnement en mode TM_{10} , perpendiculaire à la surface de l'antenne. Le SIW réduit les pertes par rayonnement parasite et améliore l'efficacité, tout en permettant une conception compacte et compatible avec les technologies PCB. Cette configuration est particulièrement adaptée aux fréquences millimétriques (5G, radars) où les performances et la miniaturisation sont critiques.

III.3.4. Avantages d'une antenne patch SIW

Les antennes patch basées sur la technologie SIW présentent plusieurs avantages significatifs, ce qui les rend idéales pour diverses applications modernes :

- Compacte et légère
- Facilité d'intégration
- Haute efficacité de rayonnement
- Directivité et gain améliorés

- Large bande passante
- Faibles pertes
- Adaptabilité aux fréquences millimétriques

III.4. Domaine d'application

Grâce à leurs multiples avantages qui surpassent leurs quelques limitations, les antennes imprimées trouvent des applications variées dans divers secteurs technologiques. Leurs domaines d'application couvrent notamment [29,30] :

- Télécommunications satellitaires.
- Commande et contrôle.
- Télémétrie (télémessure) par missile.
- Équipements portatifs.
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Antenne d'émission utilisée en médecine.
- Récepteur satellite de navigation.

III.5. Conclusion

Les antennes patch, notamment celles basées sur la technologie SIW, offrent une solution performante, compacte et adaptée aux systèmes de communication modernes. Grâce à leurs avantages en termes d'intégration, de bande passante et d'efficacité, elles sont largement utilisées dans des domaines variés comme les radars, les satellites et les réseaux 5G. Leur évolution continue en fait une technologie d'avenir dans le domaine des télécommunications.

Chapitre IV

*Conception, résultats et
interprétation*

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la conception des antennes patch en décrivant les différentes étapes de mise en œuvre d'un projet sous le logiciel HFSS, version 15.0. La démarche consiste d'abord à modéliser la structure géométrique de l'antenne avant de passer à la phase de simulation électromagnétique. Cette simulation nous permettra d'extraire deux types de paramètres essentiels : les paramètres internes, tels que le paramètre S_{11} et les impédances, qui caractérisent le comportement électrique de l'antenne, ainsi que les paramètres externes, comme le gain et la directivité, qui décrivent ses performances rayonnées. Nous détaillerons ainsi la procédure complète de conception, depuis la création du modèle jusqu'à l'analyse des résultats, afin d'obtenir des simulations fiables et exploitables.

IV.2 Description du logiciel HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel de simulation électromagnétique spécialisé dans l'analyse des structures haute fréquence. Il permet d'étudier avec précision le comportement des champs électromagnétiques grâce à des outils performants comme le calcul des paramètres S, la détermination des fréquences de résonance et la visualisation des distributions de champ. Pour résoudre numériquement les équations de Maxwell, HFSS utilise la méthode des éléments finis, une approche puissante capable de traiter des géométries complexes.

Dans HFSS, chaque projet est organisé sous forme de dossiers contenant un ou plusieurs designs. Chaque design intègre la description géométrique 3D de la structure, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, ainsi que les résultats de simulation. L'interface intuitive du logiciel, notamment via la fenêtre Project Manager, facilite la création et la modification des modèles. Un des principaux avantages de HFSS réside dans sa capacité à fournir directement des résultats essentiels comme les paramètres S, le taux d'onde stationnaire (VSWR) et l'impédance en fonction de la fréquence, permettant ainsi une analyse rapide et efficace des performances électromagnétiques.

Cette version présente une meilleure organisation des idées tout en conservant toutes les informations techniques importantes. Les deux paragraphes se complètent logiquement : le premier présente le logiciel et ses capacités, le second décrit l'organisation d'un projet typique.

IV.2.1 Interface principale du HFSS

Les différents éléments de l'interface principale de HFSS sont présentés dans la Figure IV.1.

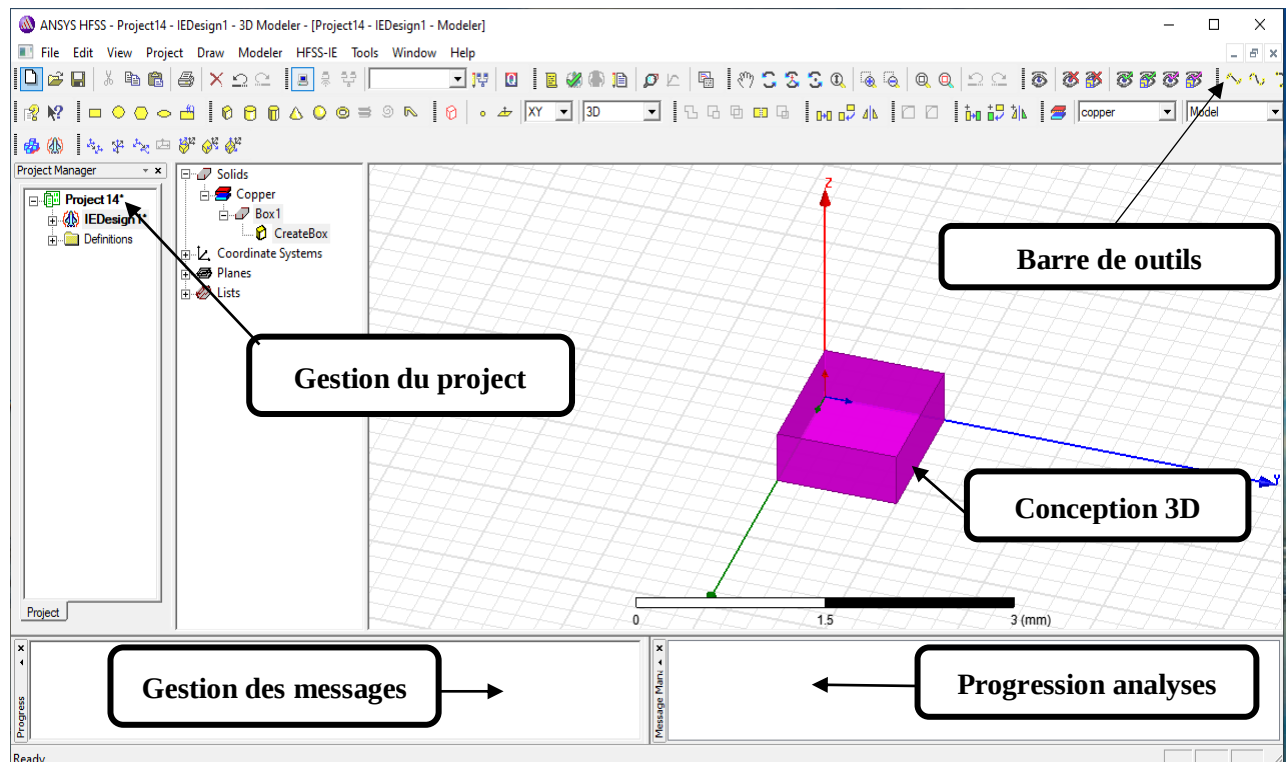


Figure IV.1 : Fenêtre principale du HFSS.

1. **Le Project Manager** : Il présente une vue structurée du projet sous forme d'arbre de conception.
2. **La fenêtre Propriétés** : Elle permet d'afficher et de modifier les paramètres des attributs du modèle.
3. **Le Message Manager** : Cet outil affiche l'ensemble des erreurs et avertissements avant le lancement de la simulation.
4. **La barre d'outils** : regroupe toutes les fonctions indispensables à la modélisation 3D.
5. **La fenêtre 3D** : Modeler présente le modèle et son architecture pour une conception en temps réel.
6. **La fenêtre Progress** : montre l'état d'avancement des calculs pendant la simulation.

IV.2.2 Comment commencer HFSS

Vérifiez que HFSS est installé sur votre machine. Son icône, présente sur le bureau, permet de l'ouvrir par un simple double-clic.



Figure IV.2 : Logiciel HFSS.

IV.2.3 Comment ouvrir un nouveau projet

Lorsque vous lancez HFSS (version 15), un projet nommé Project 1 par défaut apparaît dans l'arborescence du Project Manager. Ce projet contient les définitions de configuration, telles que :

- Le matériau utilisé.
- Les conditions aux limites.
- Les ports d'excitation.

Tous ces paramètres sont enregistrés sous le nœud principal du projet.

IV.2.4 Sauvegarder le projet

Dans le menu Fichier, sélectionnez Enregistrer sous (Save As*). Utilisez l'explorateur de fichiers pour naviguer vers le dossier où vous souhaitez sauvegarder le projet (par exemple : C:\Ansoft\HFSS 15\Project). Double-cliquez sur le dossier, puis cliquez sur Enregistrer (*Save) pour valider.

IV.2.5 Insérer une conception de HFSS

Dans le menu Project, cliquez sur Insert HFSS Design. Une nouvelle conception apparaît alors dans l'arborescence du projet, nommée par défaut "Model". La fenêtre 3D Modeler s'ouvre automatiquement à droite du Project Manager.

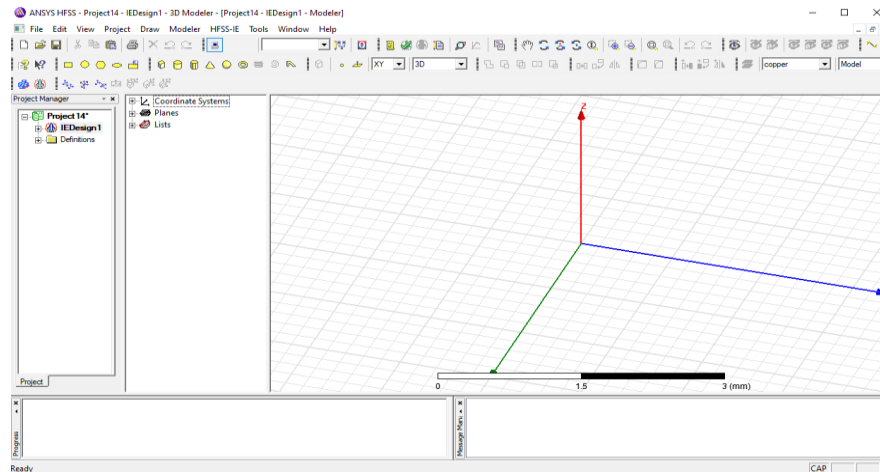


Figure IV.3 : Fenêtre de HFSS.

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

La Figure IV.4 représente la géométrie du guide d'onde modélisé sous HFSS, tandis que le tableau IV.1 rassemble l'ensemble des paramètres caractéristiques du dispositif, évalués à la fréquence de 10 GHz.

- Matériau diélectrique : Rogers RT/duroid 5880(tm).
- Constante diélectrique : $\epsilon_r = 2.2$.
- Épaisseur du substrat : $h = 0,508 \text{ mm}$ (standard pour circuits micro-ondes).
- Axe de propagation des ondes : direction z (convention standard).

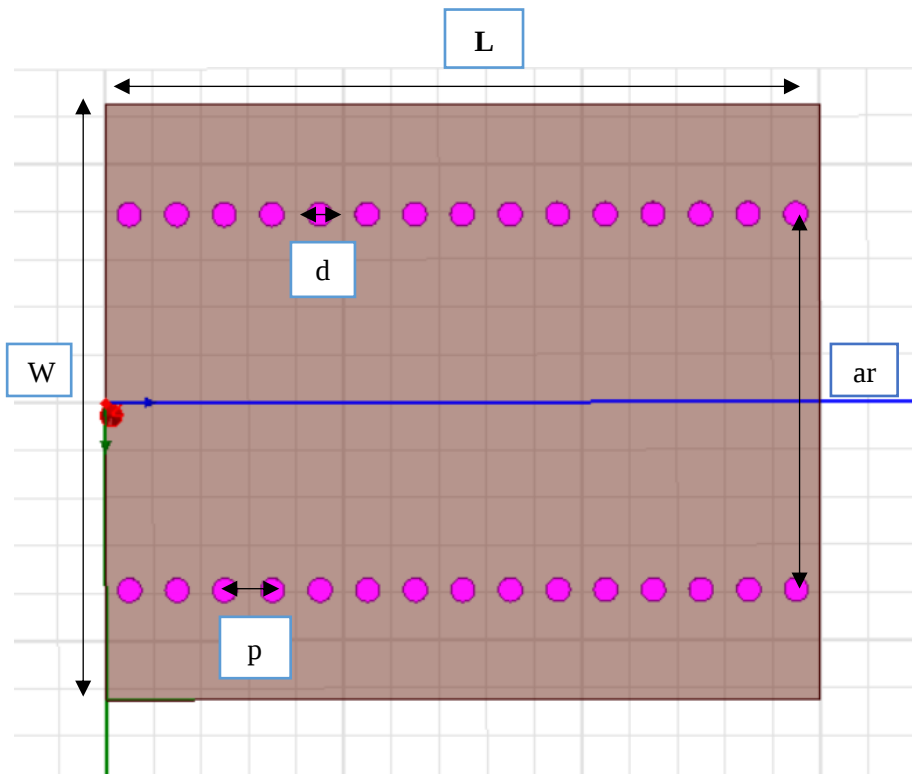


Figure IV.4 : Guide d'onde SIW.

Paramètres	Valeurs
Fc : 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 IV.1 : Paramètres de structure du guide d'onde SIW.

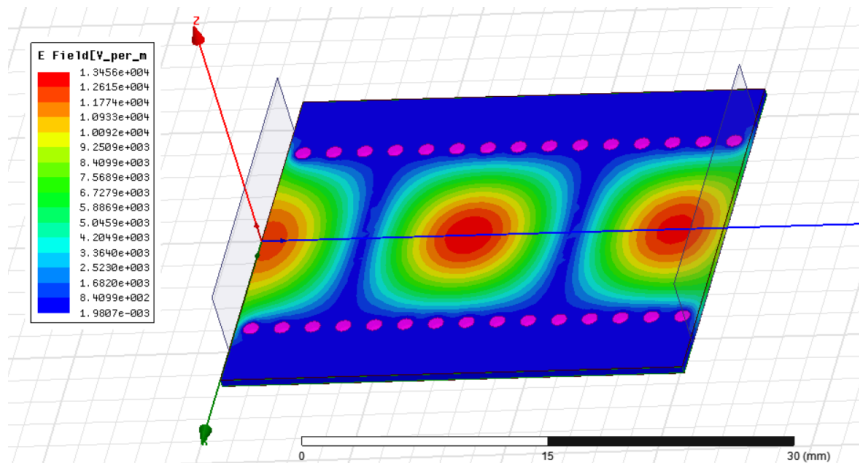


Figure IV.5 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.

Après la conception du guide d'onde à l'aide du logiciel HFSS et la réalisation de simulations numériques, nous avons obtenu des données concernant les puissances réfléchies aux ports d'entrée et de sortie, ainsi que le coefficient de transmission. La figure IV.5 illustre la distribution du champ électromagnétique au sein du guide d'onde SIW. Cette représentation met en évidence un guidage efficace et à faible perte des ondes électromagnétiques. On observe notamment que la puissance est bien confinée entre les deux rangées de Vias, ce qui reflète la bonne performance du dispositif. Ces résultats confirment la capacité du guide d'onde SIW à transmettre les ondes électromagnétiques avec des pertes minimales, un aspect essentiel dans les applications où la préservation de la puissance du signal est déterminante.

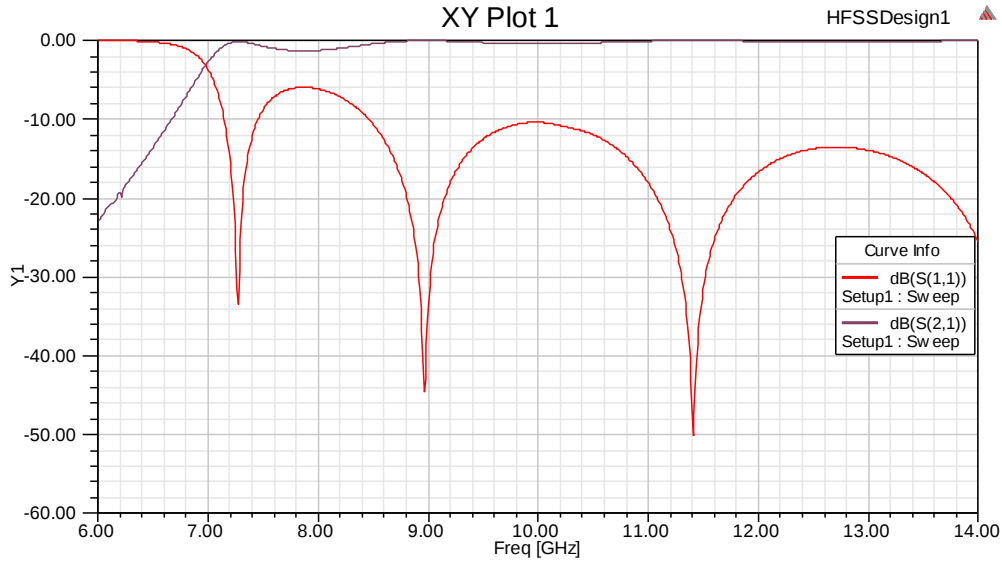


Figure IV.6 : Résultats de simulation du guide SIW.

La figure IV.6 présente les courbes du coefficient de transmission S_{21} et de réflexion S_{11} du guide d'onde SIW. On y observe une transmission efficace avec des niveaux atteignant jusqu'à -3 dB, accompagnée de plusieurs pics de résonance dont les valeurs descendent jusqu'à -50 dB, témoignant d'une bonne adaptation et d'un faible taux de réflexion dans la bande considérée.

IV.4. Dimensions de la ligne micro-ruban et de la transition micro-ruban

Dans ce projet, les antennes patch sont alimentées par une ligne micro-ruban directe, une méthode largement répandue en raison de sa simplicité et de son efficacité. Les dimensions choisies pour la ligne d'alimentation sont les suivantes :

- $Wf = 3 \text{ mm}$ Est la largeur de la ligne micro-ruban.
- $Lf = 9.51 \text{ mm}$ Est la longueur de la ligne micro-ruban.

Afin d'assurer une excellente adaptation d'impédance entre la ligne de transmission et l'antenne patch, les paramètres suivants ont été retenus pour la ligne micro-ruban :

- $Wt = 25.8 \text{ mm}$ Est la largeur de la transition.
- $Lt = 14.89 \text{ mm}$ Est la longueur de la transition.

Les dimensions ont été déterminées à l'aide des équations suivantes :

$$L_t = \frac{\lambda_g}{4} = 14.9 \text{ mm} \quad (\text{IV.1})$$

Avec λ_g la longueur d'onde guidée :

$$\lambda_g = \frac{c}{fc\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{IV.2})$$

Application numérique :

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

La largeur de la transition correspond à 80 % de celle du patch.

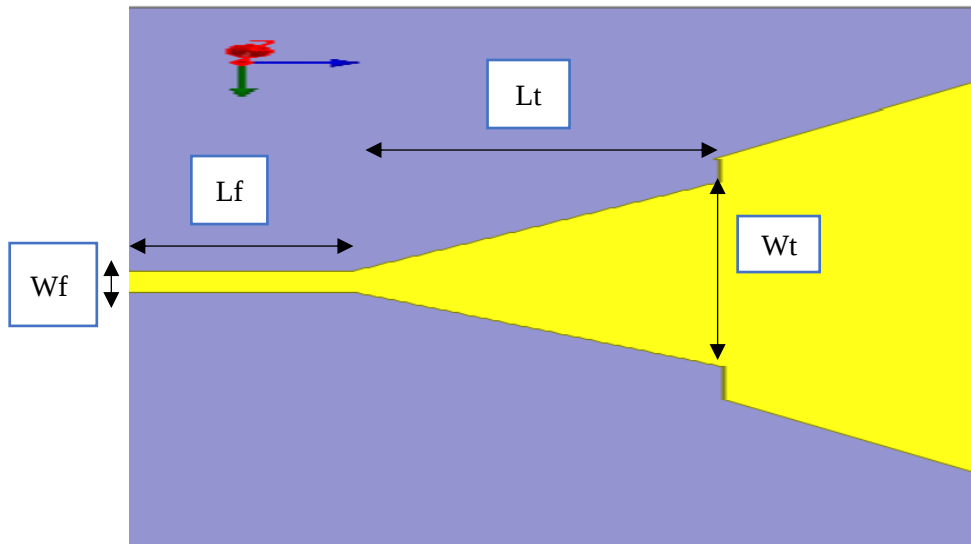


Figure IV.7 : Dimensions de la ligne et la transition micro-ruban.

Ce chapitre a présenté l'ensemble du processus de conception, de modélisation et de simulation d'antennes patch à l'aide du logiciel HFSS. Trois types de structures ont été étudiés : le guide d'onde en technologie SIW, l'antenne patch octogonale, ainsi que l'antenne patch SIW avec et sans fente. Les simulations ont permis d'obtenir des résultats précis sur les performances électromagnétiques de chaque structure, notamment les coefficients de réflexion (S_{11}), la distribution du champ électrique, la densité de courant et les diagrammes de rayonnement.

IV.5 Antenne patch octogonale

IV.5.1 Dimensionnement

La structure est implantée sur un substrat diélectrique, dont les caractéristiques physiques jouent un rôle essentiel dans les calculs ultérieurs. Pour la fréquence mentionnée précédemment, les paramètres adoptés sont les suivants :

- Le substrat utilisé est en FR4-époxy, avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4,4$.
- La hauteur du substrat est notée $h = 1,6 \text{ mm}$.

- La propagation s'effectue selon l'axe z.

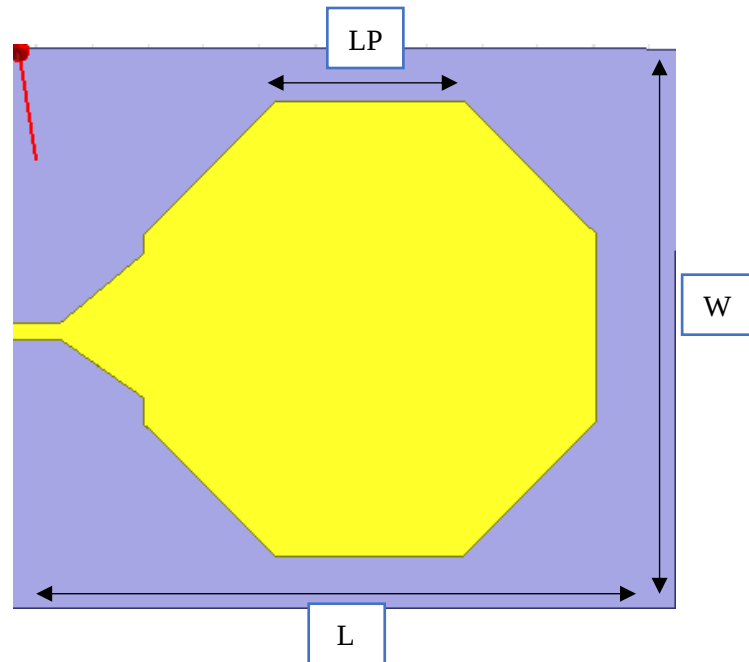


Figure IV.8 : Présentation de l'antenne patch octogonale sur substrat avec HFSS.

Paramètres	Valeurs
F_c : Fréquence de coupure	2.4 GHz
h : Hauteur de substrat	1.6 mm
L : Longueur de plan de masse et substrat	120 mm
W : Largeur de plan de masse et substrat	100 mm
L_p : Longueur de patch	32.32 mm
Th : Hauteur de patch	0.017 mm

Tableau IV.2 : Paramètres de l'antenne patch octogonale.

IV.5.2 Résultat

Suite à la conception d'une antenne patch à l'aide du logiciel HFSS, la simulation numérique a permis d'obtenir la distribution du champ électrique associé à cette antenne.

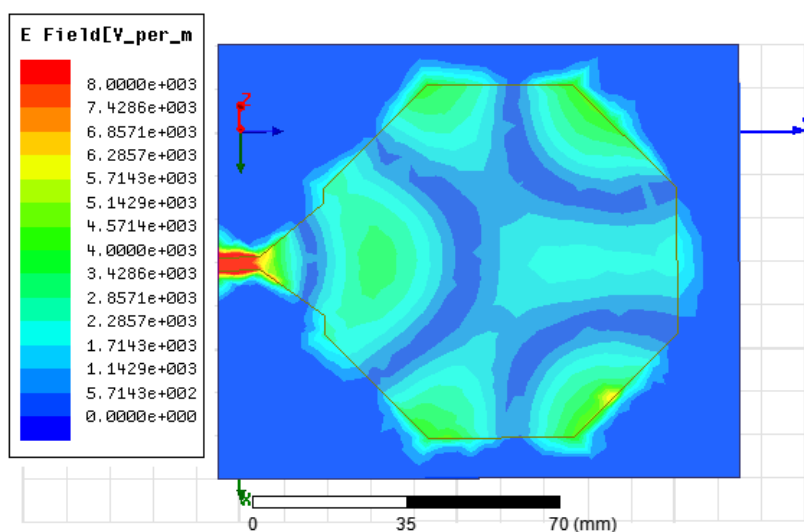


Figure IV.9 : Distribution du champ électrique E obtenue par l'antenne patch octogonale.

La représentation du coefficient de réflexion de cette antenne est donnée dans la figure IV.10.

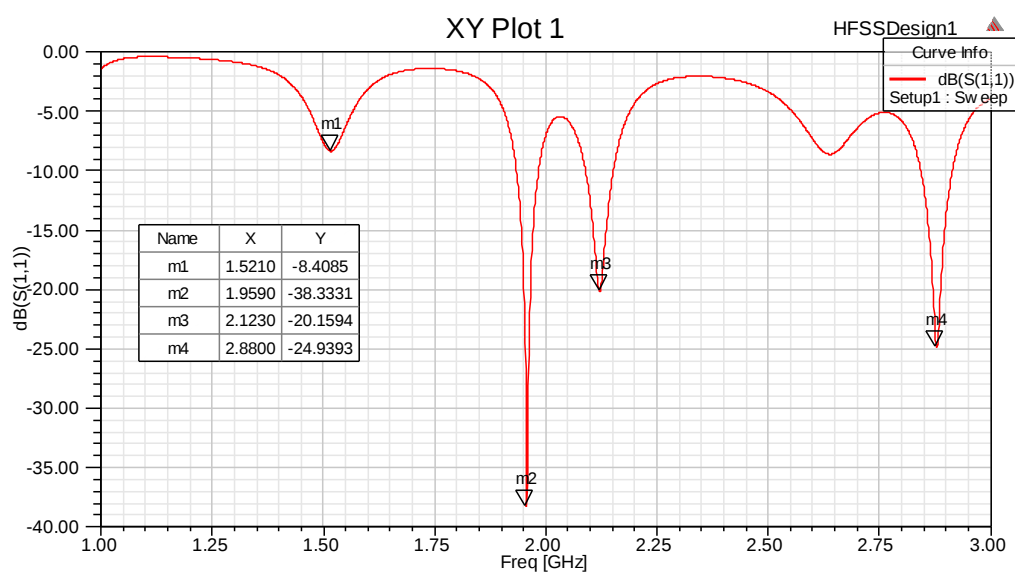


Figure IV.10 : Coefficient de réflexion obtenu par l'antenne patch octogonale.

	Fréquences GHz	S11 (dB)
M1	1.5210	-8.4085
M2	1.9590	-38.3331
M3	2.1230	-20.1594
M4	2.8800	-24.9393

Tableau IV. 3 : Résultats du coefficient de réflexion de l'antenne patch octogonale.

La courbe du coefficient de réflexion S_{11} met en évidence trois résonances marquées aux fréquences de 1,959 GHz, 2,123 GHz et 2,880 GHz. Ces valeurs, toutes inférieures à -10 dB, indiquent une bonne adaptation d'impédance et un faible taux de réflexion, ce qui confirme que l'antenne fonctionne efficacement dans plusieurs bandes de fréquences. Ce comportement multi bande est particulièrement avantageux pour les applications sans fil nécessitant la prise en charge de plusieurs standards.

La figure IV.11 présente l'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant est nettement observable.

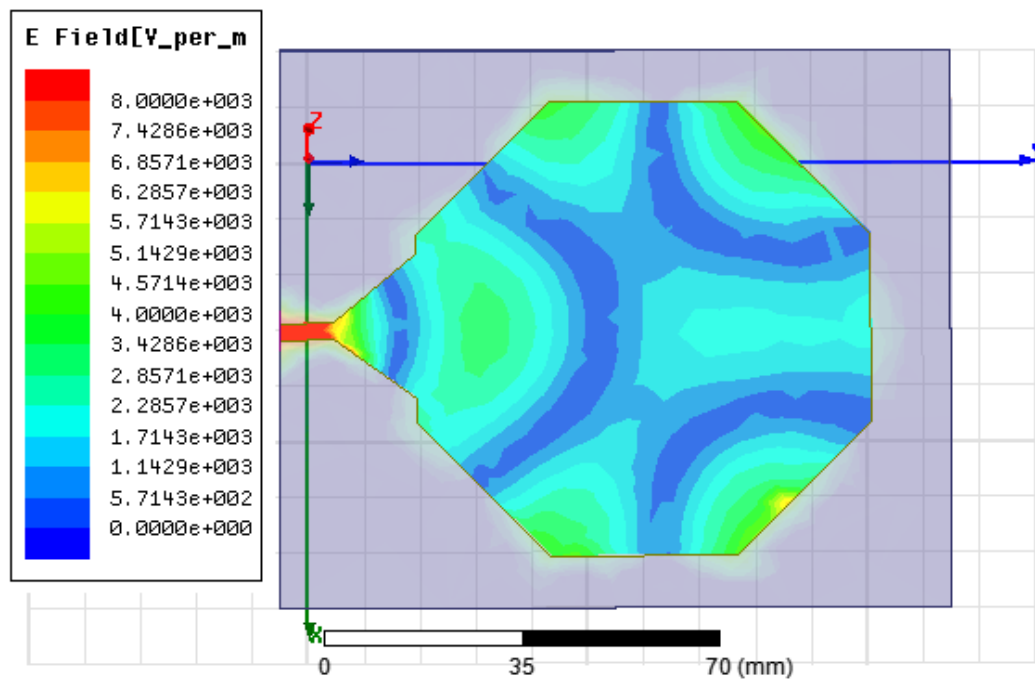


Figure IV.11 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch octogonale.

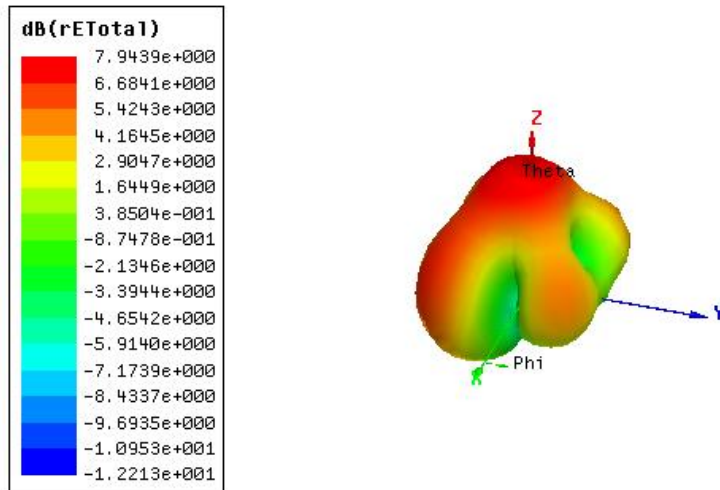


Figure IV.12 : Diagramme de rayonnement en 3D obtenue par l'antenne patch octogonale.

Cette simulation met en évidence une forte concentration du champ électrique à l'entrée du dispositif, indiquant une excitation efficace. On observe une bonne propagation du champ à l'intérieur de la cavité, avec une distribution relativement homogène dans certaines zones. Le diagramme de rayonnement montre une directivité marquée, avec un maximum dans une direction principale, traduisant une émission préférentielle. Ces résultats suggèrent un bon couplage entre la source et la cavité, ainsi qu'un rayonnement globalement contrôlé et orienté.

IV.6 Antenne patch SIW octogonale

IV.6 .1 Dimensionnement

Afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne patch, l'intégration de via est envisagée comme une solution d'ajustement. L'ajout de ces Vias doit toutefois respecter certaines conditions essentielles pour garantir l'efficacité du dispositif.

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

Et

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

Et

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

- Diamètre des Vias $d = 1 \text{ mm}$.
- Le pas entre les Vias du centre au centre $p = 2 \text{ mm}$.

- La largeur d'un guide d'onde rempli par un substrat est calculée par l'équation suivante :

$$a_{RWG} = \frac{c}{2 \times F_c \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (IV.6)$$

Application numérique :

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

- La largeur du guide SIW sera :

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

Application numérique :

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

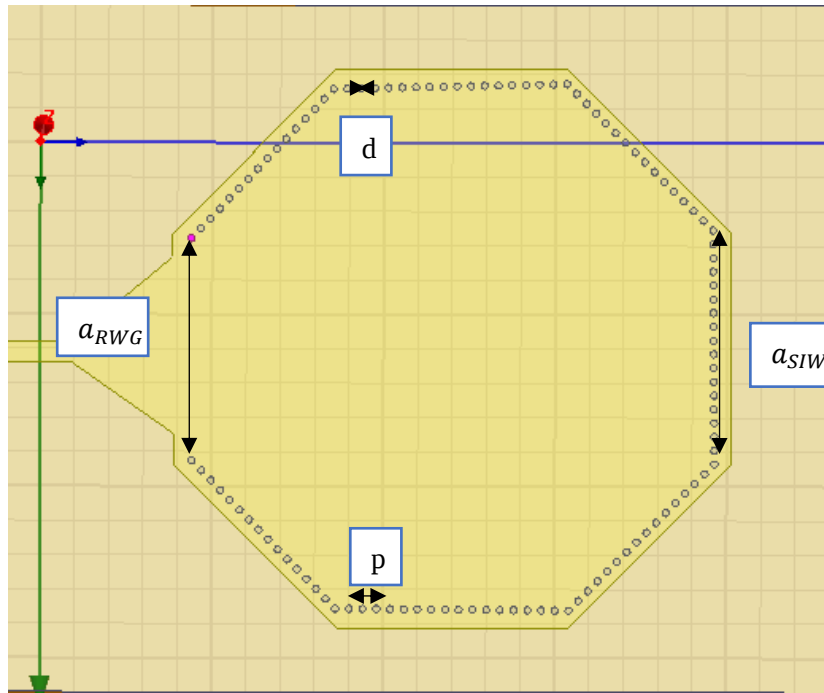


Figure IV.13 : Présentation de l'antenne patch SIW octogonale.

IV.6 .2 Résultat

Après la conception de l'antenne patch SIW à l'aide du logiciel HFSS, la simulation numérique a permis de visualiser l'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant. Celui-ci est clairement observable dans la figure IV.14 :

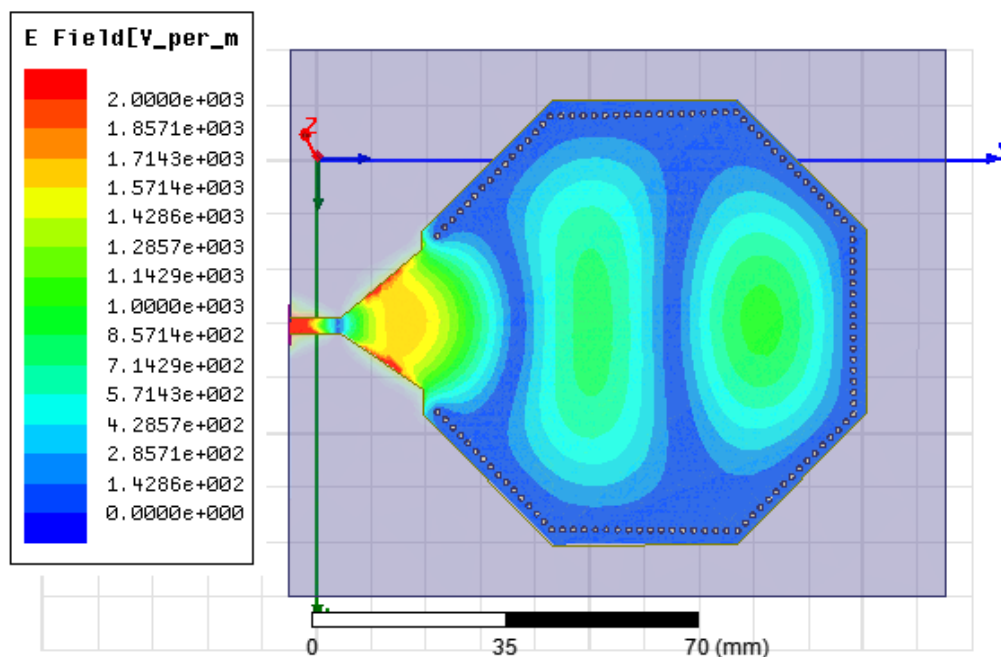


Figure IV.14 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale.

La figure IV.15 présente le coefficient de réflexion obtenu pour cette antenne.

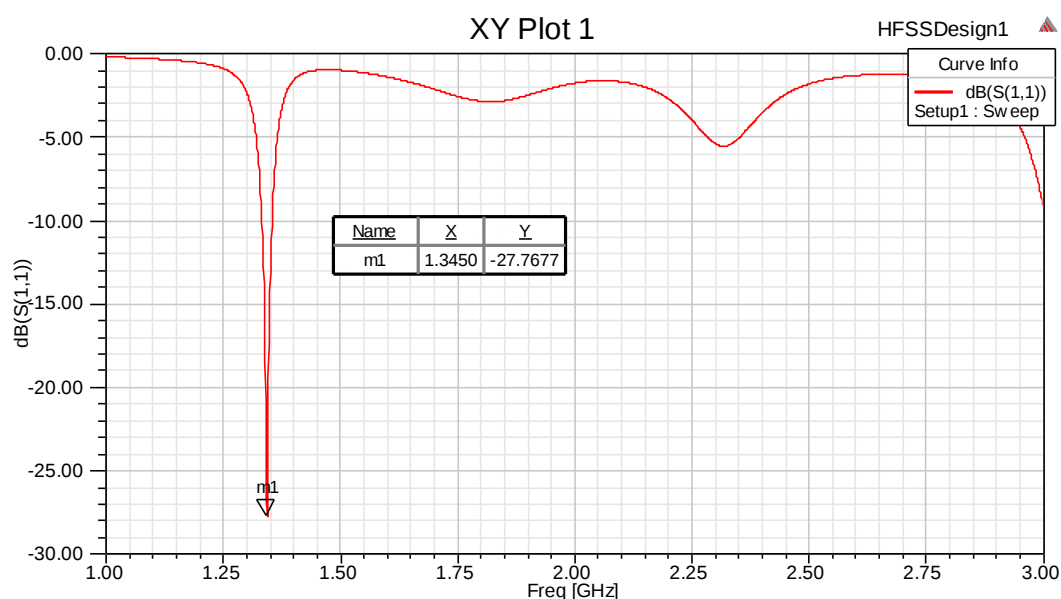


Figure IV.15 : Coefficient de réflexion d'antenne patch SIW octogonale.

Le résultat de la simulation indique une forte résonance à 1.3450 GHz, avec une valeur minimale de $S_{11} = -27.7677 \text{ dB}$, ce qui confirme une excellente adaptation à cette fréquence. Cette valeur très basse signifie que moins de 0.167 % de la puissance est réfléchi, ce qui est un indicateur de haute performance en termes d'efficacité de rayonnement pour une antenne,

ou de transmission pour un circuit RF. La courbe reste au-dessus de -10 dB en dehors de la fréquence de résonance, ce qui montre que le dispositif est principalement conçu pour fonctionner de manière optimale dans une bande étroite centrée autour de 1.345 GHz.

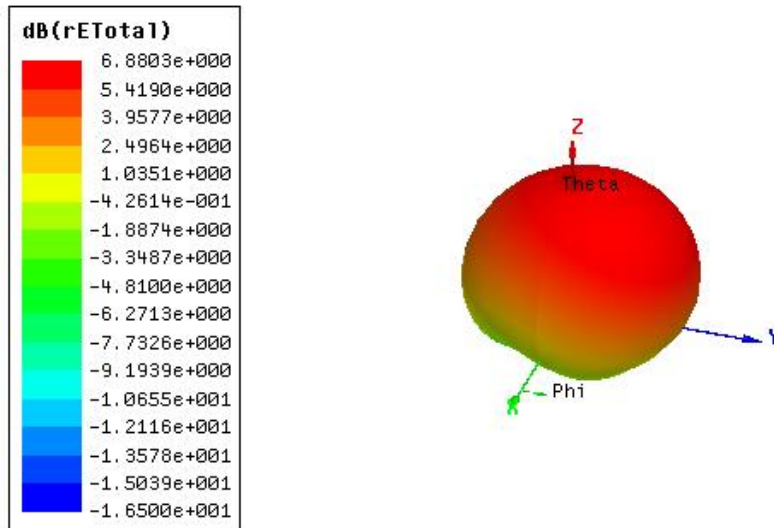


Figure IV.16 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale.

La figure IV.16 présente un rayonnement principalement dirigé vers l'axe Z, avec une bonne directivité et une répartition homogène du champ, ce qui indique un fonctionnement efficace et stable et on remarque la réduction des lobes secondaires.

IV.7 Antenne patch SIW octogonale à fentes

IV.7 .1 Dimensionnement

➤ Fente rectangulaire

Une antenne patch à fente est une variante d'antenne patch qui intègre une ou plusieurs fentes (ou ouvertures) dans la surface conductrice du patch ou dans le plan de masse pour améliorer certaines performances électromagnétiques, comme la bande passante, la polarisation ou la directivité.

Pour résonner à la fréquence de 2,4 GHz, dans la bande S. Comme tout projet d'ingénierie, la conception de cette structure doit répondre à un cahier des charges précis, établi en fonction de l'objectif fixé dès le départ, à savoir garantir un fonctionnement optimal à la fréquence cible de 2,4 GHz.

Les dimensions des fentes peuvent être déterminées à l'aide des équations suivantes :

$$L_s = \frac{\lambda_c}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (\text{IV.8})$$

Avec

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \quad (\text{IV.9})$$

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 largeur W_s n'a pas une influence majeure, toutefois elle doit être inférieure à la moitié de L_s .

Donc on choisit $W_s = 1 \text{ mm}$.

La géométrie complète de l'antenne patch SIW à fente conçue sur substrat est présentée dans la figure IV.17 :

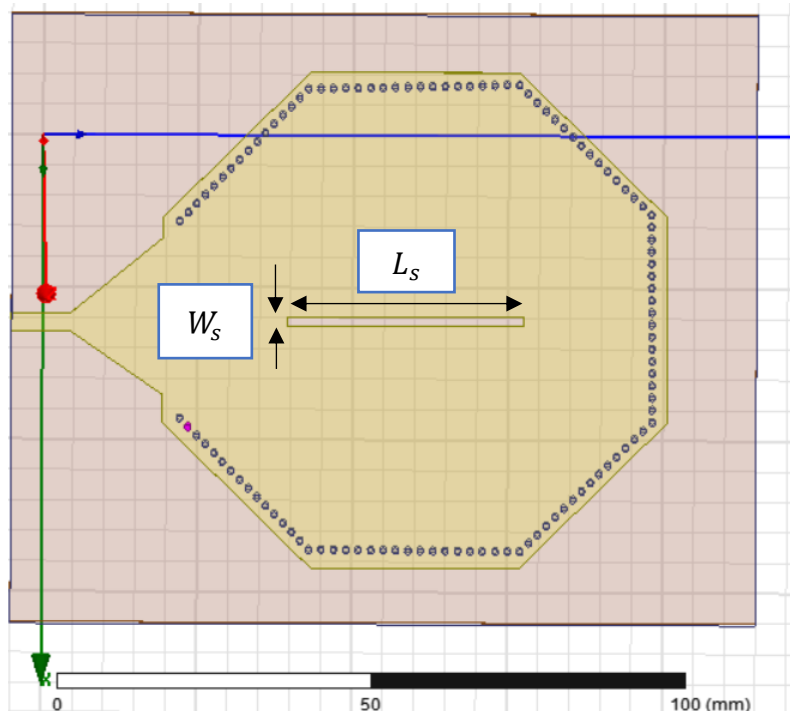


Figure IV.17 : Conception de l'antenne patch SIW à fente rectangulaire réalisée sous HFSS.

Le champ électrique simulé de l'antenne patch SIW à fente, conçu via HFSS, est présenté dans la figure IV.18 :

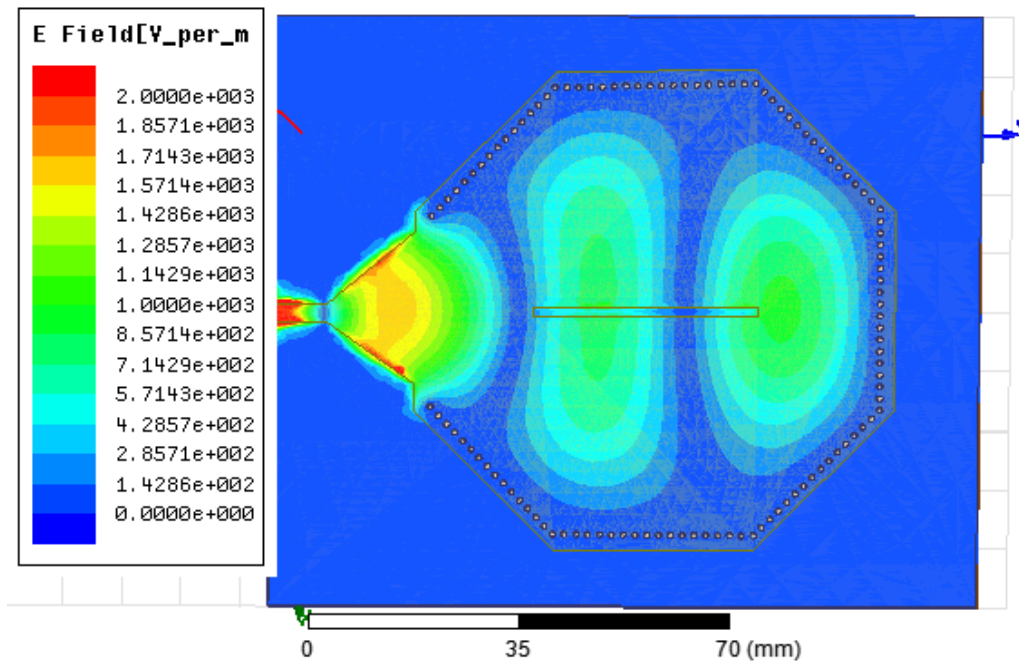


Figure IV.18 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire.

Le coefficient de réflexion. Qui est présenté dans la figure IV.19 :

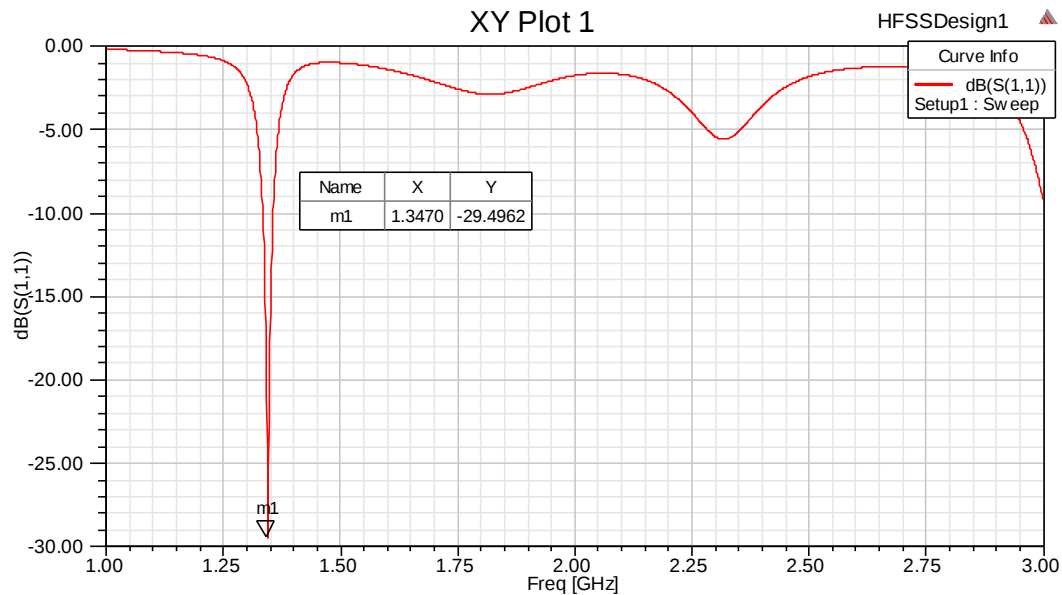


Figure IV.19 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire.

La structure simulée présente une résonance nette à 1,3470 GHz avec une bonne coefficient de réflexion de -29,4962 dB, indiquant une très bonne adaptation d'impédance. Ce résultat montre que l'antenne est optimisée pour fonctionner en bande étroite, avec un minimum

de pertes par réflexion autour de la fréquence ciblée.

La figure IV.20 met en évidence l'effet de proximité à travers la distribution visible de la densité de courant :

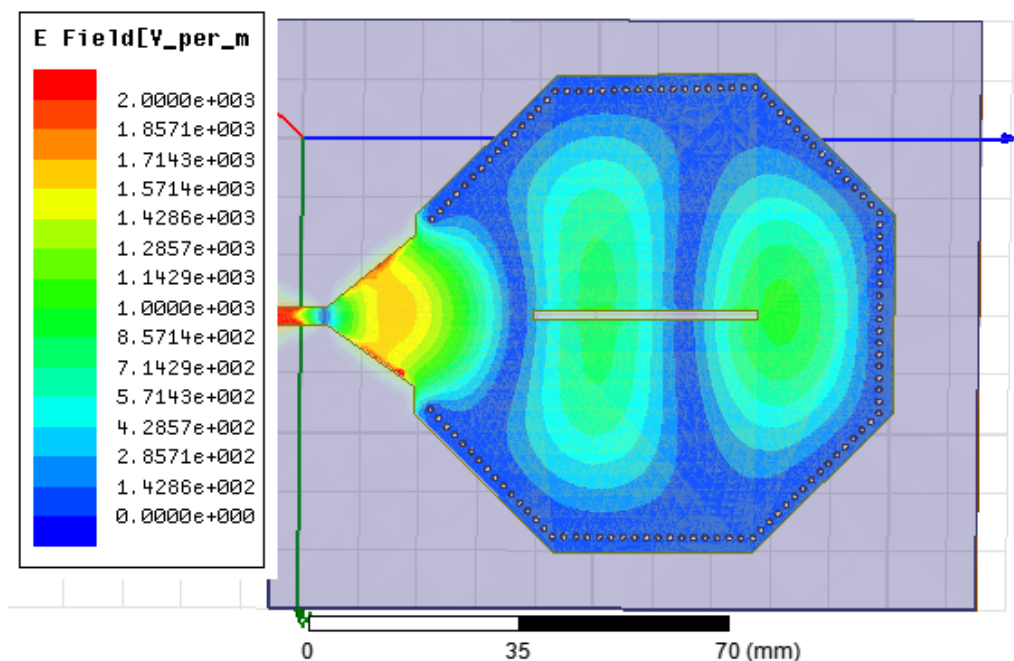


Figure IV.20 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire.

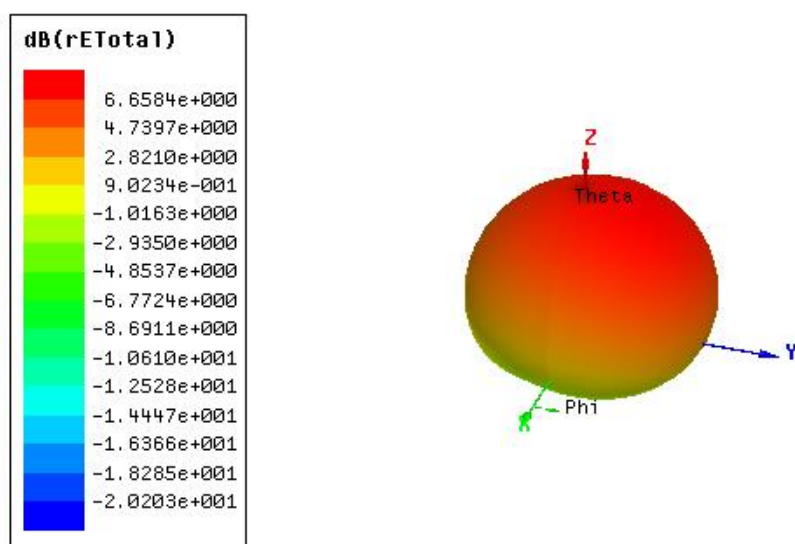


Figure IV.21 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale à fente rectangulaire.

Le diagramme montre un rayonnement quasi omnidirectionnel dirigé principalement selon l'axe Z, avec un gain maximal de 6,65 dB, caractéristique d'une antenne patch SIW à fente à directivité modérée.

➤ Fente elliptique

Dans un premier temps, une fente de forme rectangulaire a été intégrée à la structure de l'antenne afin d'analyser ses performances électromagnétiques. Cette configuration a permis d'obtenir une fréquence de résonance centrée autour de 1,3470 GHz, avec un coefficient de réflexion atteignant -29,4962 dB et une bande passante relativement étroite. Bien que les résultats soient acceptables, certaines limitations ont été observées, notamment en termes d'adaptation d'impédance et d'efficacité rayonnée, ce qui suggère un potentiel d'amélioration par l'optimisation de la géométrie de la fente.

Pour surmonter ces limites, la forme de la fente a été modifiée en une structure elliptique avec les dimensions suivante :

Grand axe $D = 38$ mm

La largeur d n'a pas une influence majeure, toutefois elle doit être inférieure à la moitié de D .

Donc $d = 19$ mm

La figure IV.22 illustre la géométrie complète de l'antenne patch à fente intégrée en technologie SIW, conçue sur substrat.

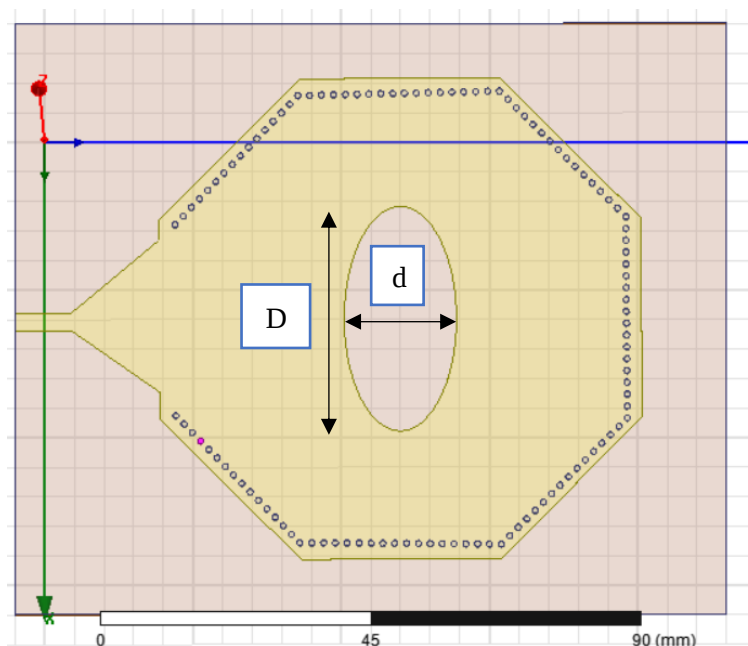


Figure IV.22 : Conception de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique réalisée sous HFSS.

Le champ électrique simulé de l'antenne patch SIW à fente, conçu via HFSS, est présenté dans la figure IV. 23 :

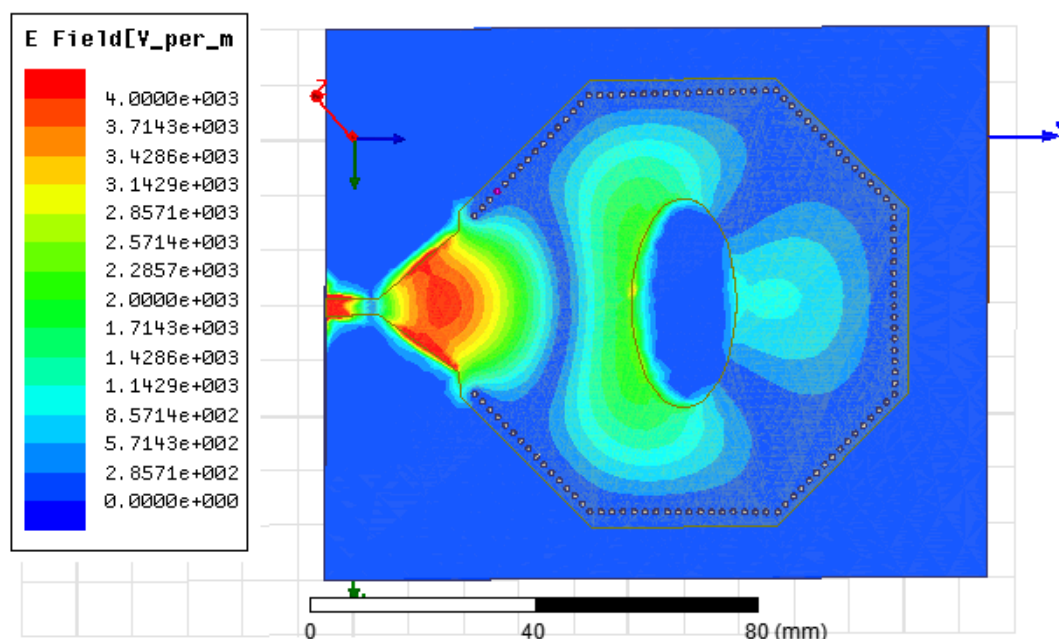


Figure IV. 23 : Distribution du champ électrique de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique.

Le coefficient de réflexion. Qui est présenté dans la figure IV.24 :

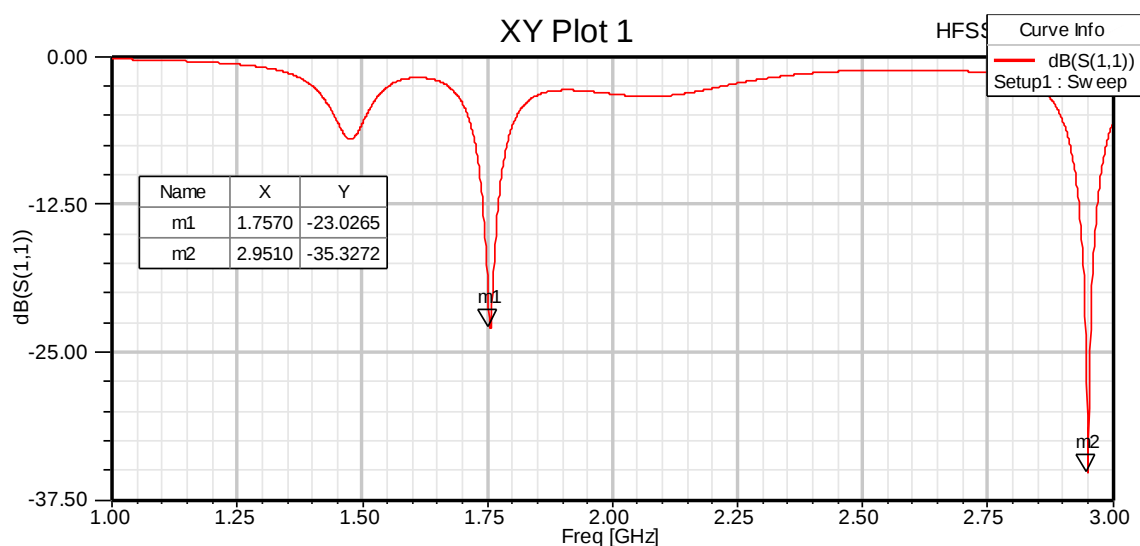


Figure IV.24 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique.

Cette nouvelle configuration a permis d'obtenir de meilleures performances, avec deux fréquences de résonances situées à 1.7570 GHz et 2.9510 GHz, un coefficient de réflexion amélioré, et un élargissement notable de la bande passante. De plus, une amélioration du gain et de la directivité a été observée. Ainsi, la forme elliptique s'est avérée plus efficace que la forme rectangulaire, offrant une meilleure adaptation et des caractéristiques de rayonnement plus performantes.

	Fréquences GHz	S11 (dB)
M1	1.7570	-23.0265
M2	2.9510	-35.3272

Tableau IV.4 : Résultats du coefficient de réflexion

L'effet de proximité est mis en évidence dans la figure IV.25 par la distribution de la densité de courant.

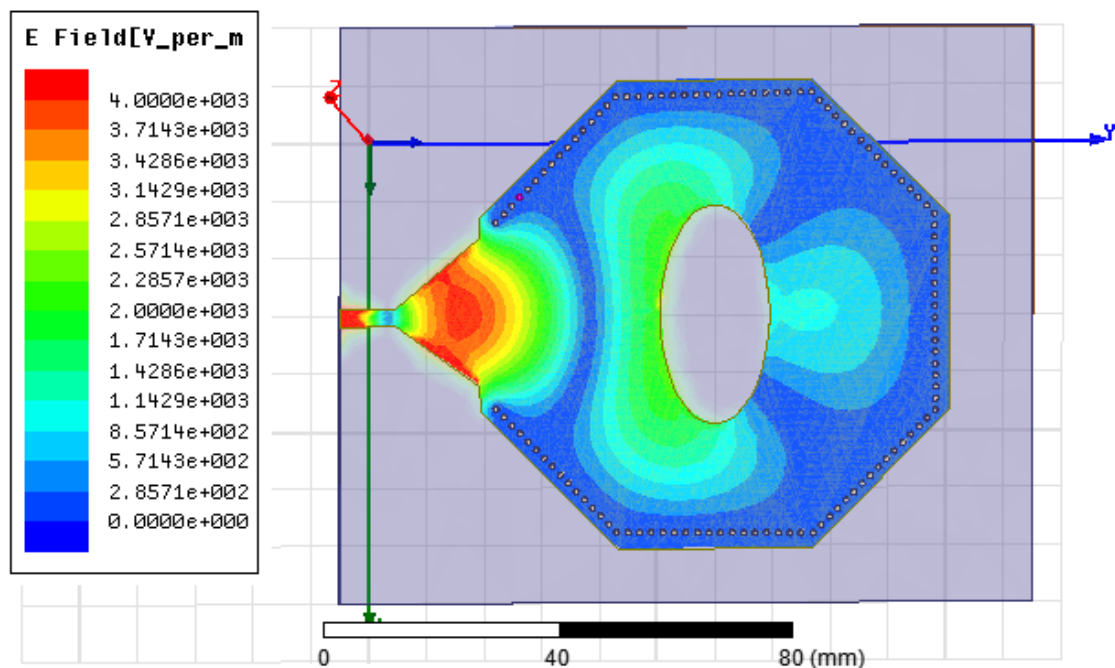


Figure IV.25 : Répartition de la densité de courant illustrant l'effet de proximité dans l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique.

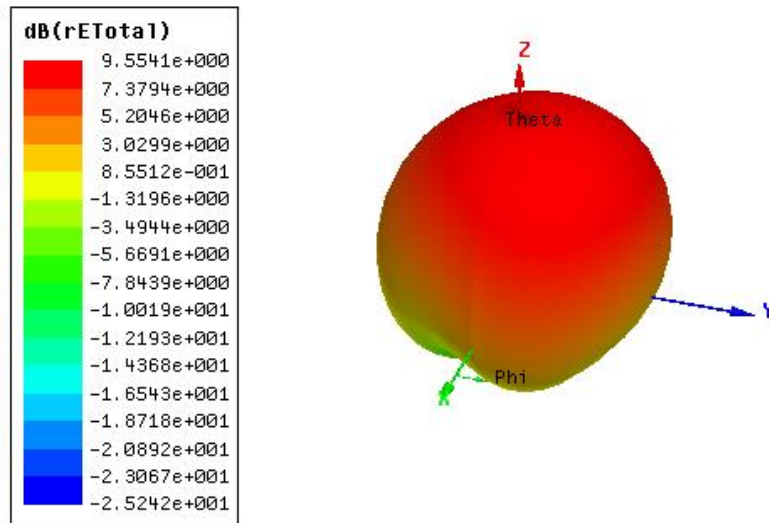


Figure IV.26 : Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch SIW octogonale à fente elliptique.

Le résultat du diagramme de rayonnement montre un comportement proche de celui d'un diagramme omnidirectionnel.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble du processus de conception, de modélisation et de simulation d'antennes patch à l'aide du logiciel HFSS. Trois types de structures ont été étudiés : le guide d'onde en technologie SIW, l'antenne patch octogonale, ainsi que l'antenne patch SIW avec et sans fente.

Les simulations ont permis d'obtenir des résultats précis sur les performances électromagnétiques de chaque structure, notamment les coefficients de réflexion (S_{11}), la distribution du champ électrique, la densité de courant et les diagrammes de rayonnement.

Ce travail de recherche s'est inscrit dans le cadre du développement de systèmes de communication sans fil plus performants, compacts et à faibles pertes. Nous avons centré notre étude sur la conception, la simulation et l'optimisation d'antennes patch basées sur la technologie innovante des guides d'ondes intégrés au substrat (SIW). Cette technologie combine les avantages des guides d'ondes traditionnels, comme une faible perte et une bonne isolation électromagnétique, avec ceux des circuits planaires, notamment leur compacité et leur intégration facile.

À travers une approche progressive, nous avons d'abord présenté les bases théoriques des antennes patch et des guides d'ondes, en mettant en évidence leurs propriétés, leurs domaines d'application et leurs limites. Ensuite, une étude approfondie de la technologie SIW a permis d'en démontrer les atouts techniques majeurs, notamment en termes de bande passante, d'efficacité de rayonnement, de directivité et de miniaturisation.

L'utilisation du logiciel HFSS a permis de modéliser différentes structures d'antennes patch SIW, d'en simuler les performances électromagnétiques et d'en analyser les résultats. Les simulations ont mis en évidence une amélioration significative du coefficient de réflexion, de la bande passante et du diagramme de rayonnement, notamment avec les configurations à fente elliptique. Les performances obtenues confirment ainsi la pertinence de la solution proposée pour répondre aux exigences des systèmes modernes, notamment ceux déployés dans les technologies 5G, les radars et les communications satellites.

En somme, cette étude démontre le potentiel de la technologie SIW comme solution de choix pour les antennes de nouvelle génération, tout en ouvrant la voie à de futures recherches sur l'intégration de réseaux d'antennes complexes, l'exploitation de nouvelles topologies ou encore l'optimisation multi-objectifs pour des applications spécifiques.

- [1] ATTI BAKOUCHE et MEKAOUCHE MAGDOULA, « l'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité », Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2014.
- [2] <https://stm.cairn.info/les-antennes--9782100519897-page-5?lang=fr>
- [3] ABERKNE DJAMILA et ROUIFED CHAHIRA, « étude des antennes à ouvertures rayonnantes », Mémoire de Master, Université de Tizi ousou, 2011.
- [4] KHALFI FERIEL et AZZI RANIA, « simulation et conception d'une antenne micro ruban 2.4 Ghz », Mémoire de Master, Université Médéa, 2020.
- [5] MOHAMED MANSOURI et HAITHEM EZZEROU, « Conception et Simulation d'une Antenne patch ultra large bande [1-8GHz] », Mémoire de Master, Université de Blida 1, 2019.
- [6] A Alshehri, Novel ultra-wideband antennas for wireless systems, Concordia University, 2008.
- [7] TOUKALI SAMIRE et VALAOU KHADRA, « conception et simulation d'un réseau linéaire d'antenne imprimée », Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [8] ERROUANE MOHAMED EL AMINE et BOUDAUD EL HACHMI BOUHADJAR, « conception d'un réseau d'antenne patch pour les réseaux mobiles 5G millimétriques », Mémoire de Master, Université Ain Temouchent, 2021.
- [9] ADJOUT HADDA IKRAM, « conception et réalisation d'une antenne patch rectangulaire de fréquence 2.4 GHz », Mémoire de Master, Université de Blida, 2021.
- [10] BAHLOUL MOHAMMED SALIM, « étude et conception de réseaux d'antennes imprimées larges bandes à polarisation par une analyse tridimensionnelle en utilisant une méthode intégrale », thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2020.
- [11] KADRI, BOUFELDJA, « Modélisation et Synthèse de réseaux périodiques et non périodiques d'antennes micro rubans par l'application d'un Algorithme Génétique-Flou », thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2011.
- [12] BENCHERIF YASMINA et BOUGUENINA FADHIA, « réseaux d'antenne patch pour application spatial », mémoire de Master, Université Ain Temouchent, 2020.
- [13] MELIHI SOUHILA et FENGAL TINE HINAN, « Antenne de téléphonie mobile, caractérisation et optimisation », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2016.
- [14] BOUSSAHA SOMIA « contribution à l'étude et à la modélisation des antennes imprimées rectangulaire, application aux systèmes de communication », Mémoire de magister en télécommunication, Université Guelma, 2012.
- [15] GANDOURA IBTISSEM et LAMER SOUMIA « conception et réalisation des antennes fractales imprimées ultra large bande (ULB) a bande rejetée », Mémoire de Master, Université

de Guelma, 2019

[16] CHERQUI FARIDA et ABDLLAOUI WAHIBA « étude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle de la cavité », Mémoire de Master, Université de Tizi Ouzou, 2012

[17] GHLOUCI ISMAHENE et GACI RAYHANA, « simulation des nouvelles formes d'antenne cornet en technologie SIW hyperfréquence », Mémoire de Master, Université Tlemcen, 2021.

[18] BENABDELHAK MERIEM CHAHINEZ, « conception et étude paramétrique d'une antenne patch à fentes dans la bande Ku », Mémoire de Master, Université Bejaia, 2018.

[19] DERRIS ASMA et MOKRI BOCHRA, « conception des antennes à onde de fuite reconfigurables en technologie SIW », Mémoire de Master, Université Tlemcen, 2021.

[20] RABAH HACINI et BOUBAKEUR HOUNI, « Étude de la biréfringence d'un guide d'onde en arête à base du matériau (SiOxNy) », Mémoire de Master, Université Ouargla, 2015.

[21] LAMRI YASMINE, « étude et conception d'un coupleur à base de la technologie SIW », Mémoire de Master, Université Blida 1, 2020.

[22] NAHAL SABRINA et BELOUIDIANE ASMA, « Caractérisation de la ligne de transmission micro ruban par l'approche quasi-statique », Mémoire de Master, Université Ouargla, 2022.

[23] BELKACEM HADJIRA et ABDELDJALIL AMINA, « modélisation et caractérisation de filtres en technologie émergente SIW (substrat integrated waveguide) pour applications haute fréquence en télécommunications (Wireless systems) », Mémoire de Master, Université Tlemcen, 2018.

[24] BOULEFDAOUI AMINA et JAMAI SAFIA, « Conception et simulation d'une antenne cornet SIW dans le domaine spatial », Mémoire de Master, Université-Ain-Temouchent, 2022.

[25] DJELITA CYRINA HAIFA et GHEZLI RANIA, « Etude et conception d'une antenne patch à fente à l'aide de la technologie SIW », Mémoire de Master, Université Blida 1, 2024.

[26] KOUSSI KARIMA et JAMIA SAFIA, « Etude et conception d'un filtre guide d'onde intégré au substrat avec une perturbation via », Mémoire de Master, Université Ouargla, 2022.

[27] YAZI HANA et KHIDOURI HANINI, « Conception et Simulation des Coupleurs Bicoche 3 dB /90° en Technologie SIW », Mémoire de Master, Université OUARGLA, 2020

[28] Mouloud BOUZOUAD, « Analyse et conception d'antennes micro ruban sur des substrats a bandes interdites électromagnétiques », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

- [29] BENMEZIANE MOHAMED et SALEMI SALAH EDDINE, « Etude et Simulation des paramètres d'une antenne patch rectangulaires 2.45GHz, sous l'effet de la température », Mémoire de Master, Université MEDEA, 2021.
- [30] ANES AROUDJ et ABDELKHALEK HERIHIRI, « Conception et réalisation d'une antenne patch rectangulaire 2.4GHz à base du Logiciel HFSS », Mémoire de Master, Université MEDEA, 2021.
- [31] BOUSSADA MOHAMED LAMINE et RAHICHE BILLEL, « Etude et simulation d'un méta substrat pour la réalisation des antennes patch », Mémoire de Master, Université BLIDA 1, 2017.
- [32] ADJOUT HADDA IKRAM, « Conception et réalisation d'une antenne patch rectangulaire de fréquence 2.4GHz », Mémoire de Master, Université BLIDA 1, 2021.
- [33] BEDDIAF CHAHINAZ, « Etude et conception d'une antenne patch tri-band (L1-L2- L5 du GPS) pour les récepteurs GNSS », Mémoire de Master, Université Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [34] MAALOUL ELHADI et HAMADOU AKRAM, « Etude et Simulation d'une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande », Mémoire de MASTER, Université Ouargla, 2018.
- [35] « Wideband Dual-Polarized SIW Cavity-Backed Patch Antenna with Multimode Characteristics », 2020.
- [36] « A CSRR-Fed SIW Cavity-Backed Fractal Patch Antenna for Wireless Energy Harvesting and Communication », 2015.