



Mémoire de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Présenté par :

Serrai Imene

Benaissa faten

N° : ST6

Conception des filtres micro-ondes basés sur des structures SIW

Encadré par :

Dr. Rédha Bendoumia

&

Dr.Ahcène Abed

Année Universitaire 2024-2025

Nous rendons grâce à Allah, source infinie de sagesse et de force, pour nous avoir guidés sur ce chemin et nous avoir offert la persévérance nécessaire à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur **Redha Bendoumia**, notre encadrant, pour sa guidance experte, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'attention portée à notre travail, ainsi que pour leurs remarques pertinentes qui ont enrichi et affiné notre réflexion.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement nos familles, en particulier nos parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de nos années d'études. Leur présence et leur confiance ont été une source de force précieuse.

Nos remerciements vont aussi à nos collègues étudiants, pour leur soutien moral et les moments d'entraide partagés.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches pour leur bienveillance et leur encouragement.

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents

Maman, tu as toujours été une source d'inspiration inépuisable. Ton soutien inconditionnel, ta bienveillance et ta sagesse ont été les piliers qui m'ont guidé(e) tout au long de ce parcours. Dans les moments de doute, tu savais trouver les mots justes, et ton amour m'a porté(e) chaque jour.

Papa, ta force tranquille, ton sens du devoir et ta confiance en moi ont toujours été une boussole. Par ton exemple, tu m'as appris la persévérance, l'humilité et le goût du travail bien fait.

À ma famille

Pour leur présence rassurante, leurs encouragements et leur amour indéfectible. Votre soutien a été essentiel à chaque étape de cette aventure.

À mes amis

Pour leur écoute, leur patience et leurs mots réconfortants. Vous avez su alléger les moments de stress et rendre ce parcours plus humain et plus joyeux.

Cette dédicace est un modeste hommage à votre amour, votre amitié et votre foi en nous. Mille mercis, du fond du cœur.

Serrai Imene

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents
, pour leur amour inconditionnel, leur soutien sans faille et leurs prières constantes
tout au long de mon parcours.

À mes frères et sœur,
Pour leur encouragement et leur présence rassurante.

À mes amis fidèles,
Qui ont su m'apporter motivation et sérénité dans les moments difficiles.
Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce
travail.

Merci du fond du cœur.

Benaissa Fatene

ملخص:

يتطلب تطوير أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة أجهزة ميكروويف وترددات لاسلكية عالية الأداء، مدمجة وموثوقة. وفي هذا الإطار، تبرز تقنية "الموجهات المدمجة في الركيزة كحل واعد، إذ تجمع بين مزايا الموجهات المعدنية التقليدية، مثل انخفاض الفقد وعزل كهرومغناطيسي جيد، ومزايا الدوائر المستوية، كسهولة التصغير والتكامل على اللوحات الإلكترونية

يندرج هذا مشروع نهاية الدراسة ضمن هذا السياق، ويهدف إلى تصميم، محاكاة، وتحسين مرشحات ميكروويف تعتمد على تقنية الموجهات المدمجة في الركيزة بهدف تطوير مرشحات ذات انتقائية عالية. فقد إدخال منخفض وأبعاد مدمجة مما يجعلها مناسبة لتطبيقات أنظمة الاتصالات الحديثة

كلمات المفاتيح: الموجهات المدمجة في الركيزة ميكروويف

Résumé : Le développement des systèmes de communication sans fil modernes exige des dispositifs RF et micro-ondes à la fois performants, compacts et fiables. Dans ce contexte, la technologie des guides d'ondes intégrés au substrat (SIW – Substrate Integrated Waveguide) représente une solution prometteuse. Elle combine les avantages des guides d'ondes métalliques classiques (faibles pertes, bonne isolation électromagnétique) avec les atouts des circuits planaires, notamment en matière de miniaturization et d'intégration sur carte. Ce projet de fin d'études s'inscrit dans cette dynamique et porte sur la conception, la simulation et l'optimisation de filtres micro-ondes basés sur la technologie SIW. L'objectif est de développer des filtres présentant une sélectivité accrue, une faible perte d'insertion et une compacité élevée, adaptés aux applications dans les telecommunications.

Mots clés : SIW; micro-ondes; HFSS

Abstract : The development of modern wireless communication systems requires RF and microwave devices that are efficient, compact, and reliable. In this context, Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology offers a promising solution by combining the advantages of traditional metallic waveguides (low losses, good electromagnetic isolation) with the benefits of planar circuits, particularly in terms of miniaturization and integration. This final year project focuses on the design, simulation, and optimization of microwave filters using SIW technology. The objective is to develop filters with high selectivity, low insertion loss, and good compactness for telecommunications applications. **Keywords :** SIW; microwave ; HFSS

- **GHz** : Giga Hertz
- **dB** : décibel
- **SNR** : Signal-to-Noise Ratio
- **BER** : Bit Error Rate
- **ACLR** : Adjacent Channel Leakage Ratio
- **ACPR** : Adjacent Channel Power Ratio
- **SIW** : Substrate Integrated Waveguide
- **RF** : Radio Frequency
- **SoS** : System-on-Substrate
- **PCB** : Printed Circuit Board
- **TM** : Transverse Magnetic
- **TE** : mode électrique
- **CSRR** : Complementary Split Ring Resonator
- **HFSS** : High Frequency Structure Simulator
- **FEM** : Finite Element Method

- **F_c** : Fréquence de coupure.
- **Q** : Facteur de Qualité
- **ϵ** : Perméabilité magnétique
- **c** : vitesse de la lumière
- **λ** : longueur d'onde
- **λ_c** : Longueur d'onde correspond à la fréquence de coupure
- **λ_g** : Longueur d'onde du guide
- **D** : le diamètre des via
- **P** : la distance entre deux vias adjacents centre à centre
- **h** : la hauteur du substrat
- **L** : la longueur du côté de plan de masse
- **f_c** : Fréquence de coupure du mode le plus bas
- **L_{SIW}** : Longueur SIW
- **W_{SIW}** : Largeur SIW

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Généralité sur les filtres	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 DEFINITION.....	3
I.3 GUIDES D'ONDES.....	3
I.3.1 GUIDES D'ONDES RECTANGULAIRES	4
I.3.2 GUIDES D'ONDES CIRCULAIRES.....	4
I.3.3 GUIDES D'ONDES ELLIPTIQUES	5
I.4 LES EQUATION MAXWELL	5
I.5 LA PROPAGATION DANS UN GUIDE D'ONDE.....	6
I.5.1 MODE TM.....	6
I.5.2 MODE TE	6
I.5.3 MODE TEM.....	6
I.6 CLASSIFICATION DES FILTRES HYPER-FREQUENCES	7
I.6.1 SELON LA FONCTION FILTRAGE.....	7
I.6.1.1 Filtre passe-bas	7
I.6.1.2 Filtre passe – haute	7
I.6.1.3 Filtre passe- bande.....	8
I.6.1.4 Filtre coup-bande.....	8
I.6.2 CLASSIFICATION SELON LA TECHNOLOGIE DE FABRICATION.....	9
I.6.2.1 Filtres a technologie micro-strip (microruban).....	9
I.6.2.2 Filtre a guide d'onde.....	10
I.6.2.3 Filtre à Cavité Résonante.....	11
I.6.2.4 Filtres SAW (Surface Acoustic Wave) et BAW (Bulk Acoustic Wave).....	12
I.7 TYPE DES FILTRES.....	13
I.7.1 FILTRE PASSIF.....	13
I.7.2 FILTRE ACTIF	14
I.8 CARACTERISTIQUES ET PARAMETRES CLES DES FILTRES	14
I.9 APPLICATIONS DES FILTRES	14
I.9.1 SYSTEMES DES TELECOMMUNICATIONS	14
I.9.2 RADARS ET SYSTEME DE DEFENSE (MILITAIRES, AERIENS, MARITIMES).....	14

I.9.3 SATELLITES ET COMMUNICATION SPATIAL	14
I.9.4 SYSTEME DE RADIODIFFUSION	15
I.10 AVANTAGE DES FILTRES HYPERFREQUENCES.....	15
I.11 LIMITES DES FILTRES HYPERFREQUENCES.....	15
I.12 UTILISATION DES FILTRES ELECTRIQUES	15
I.13 CONDITION AUX LIMITES POUR UN FILTRE SIW	16
I.14 CONCLUSION	16

Chapitre II : Filtres à base d'un guide d'ondes intégré au
substrat(SIW)

II.1 INTRODUCTION.....	18
II.2 GUIDE D'ONDES INTEGRE AU SUBSTRAT (SIW)	18
II.3 PARAMETRES D'UN GUIDE D'ONDES INTEGRE AU SUBSTRAT	19
II.4 QUELQUES EXEMPLES DE CIRCUITS SIW.....	21
II.4 .1 CIRCUITS PASSIFS A BASE DE SIW	21
II.4.2. CIRCUITS ACTIFS A BASE DE SIW	22
II.5 CARACTERISTIQUES DE TECHNOLOGIE SIW	23
II.6 QUELQUES EXEMPLES DE GUIDES D'ONDES SIW	24
II.6.1 GUIDE D'ONDES EN BANDE S.....	24
II.6.2 GUIDE D'ONDES EN BANDE C	24
II.6.3 GUIDE D'ONDES DANS LA BANDE X.....	24
II.7 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNOLOGIE SIW	24
II.8 CONCEPTION D'UN FILTRE A BASE DE SIW.....	25
II.9 APPLICATIONS DES FILTRES SIW	26
II.9.1 FILTRE SIW MONTE EN SERIE AVEC ANTENNE DE CORRECTION.....	26
II.9.2 NOUVELLE TOPOLOGIE D'UN FILTRE PASSE-BANDE SIW BI-MODE.....	27
II.9.3 FILTRE SIW A CAVITE CIRCULAIRE EN BI-MODE.....	27
II.9.4 FILTRE SIW COMPLEMENTAIRE A ANNEAU	28
II.10 CONCLUSION	28

Chapitre III : conception et simulation des filtre à guide
d'onde SIW

III.1 INTRODUCTION	30
--------------------------	----

III.2 PRESENTATION DU LOGICIEL HFSS	30
III.3 FENETRE HFSS	31
III.4 PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT HFSS.....	32
III.5 AVANTAGE DE HFSS	33
III.6 SIMULATION D'UN GUIDE D'ONDES SIW	33
III.7 CONCEPTION D'UN FILTRE A BASE D'UN GUIDE D'ONDES SIW	36
III.7.1 TOPOLOGIE 1	38
III.7.2 TOPOLOGIE 2	39
III.7.3 TOPOLOGIE 3	40
III.7.4 TOPOLOGIE 4	42
III.7.5 TOPOLOGIE 5	44
III.7.6 TOPOLOGIE 6	45
III.8 COMPARAISON ENTRE LES 6 TOPOLOGIES	47
III.9 CONCLUSION	47
CONCLUSION GENERALE.....	49
BIBLIOGRAPHIE	50

Chapitre I : Généralité sur les filtres

Figure I.1 : Schéma de filtre simplifié	3
Figure I.2 : Représentation d'un guide d'onde rectangulaire	4
Figure I.3: Représentation graphique d'un guide d'onde circulaire	4
Figure I.4: Représentation graphique d'un guide d'onde elliptique.....	5
Figure I.5: Gain en dB d'un filtre passe-bas	7
Figure I.6: Gain en dB d'un filtre passe-haut	7
Figure I.7: Gain en dB d'un filtre passe-bande	8
Figure I.8: Gain en dB d'un filtre coupe-bande.....	8
Figure 1.9 : Configuration typique de filtre microstrip.....	9
Figure I.10: Filtres de réception en guides d'ondes	10
Figure I.11 : Filtre à post à guide d'ondes... ..	11
Figure I.12: Filtre à Cavité Résonante.....	11
Figure I.13 : Filtres SAW et BAW	13

Chapitre II : Filtres à base d'un guide d'ondes intégré au substrat(SIW)

Figure II.1 : structure d'un Guide d'ondes (SIW).....	19
Figure II.2 : Guide d'ondes SIW avec ses paramètres.....	20
Figures II.3 : Exemples des circuits passifs SIW.....	21
Figure II.4 : Amplificateur SIW.....	22
Figure II.5: Oscillateur SIW.....	22
Figure II.6 : Filtre SIW associé en cascade avec une antenne patch.....	26
Figure II.7: Disposition (lay-out) d'un filtre SIW passe bande.....	27
Figure II.8: Filtre SIW bi-mode à cavité circulaire.....	27
Figure II.9: Filtre SIW à deux résonateurs.....	28

Chapitre III : conception et simulation des filtre à guide d'onde SIW

Figure III.1 : Interface principale d'ANSYS HFSS.....	31
Figure III.2:Processus de création et de simulation d'un projet dans HFSS.....	32
Figure III.3 : guide d'onde SIW.....	34
Figure III.4 : Structure du guide d'onde SIW.....	34
Figure III.5 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.....	35

Figure III.6 : Résultats simulation d'un guide d'ondes.....	35
Figure III.7 : Guide d'ondes SIW avec les paramètres.....	36
Figure III.8 : structure1 d'un Guide d'ondes SIW.....	36
Figure III.9 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW.....	37
Figure III.10 : Résultats simulation d'un guide d'ondes	37
Figure III.11 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 1 ^{ère} topologie.....	38
Figure III.12 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 1 ^{ère} topologie....	38
Figure III.13 : Résultats simulation d'un guide d'ondes SIW pour la 1 ^{ère} topologie.....	39
Figure III.14 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 2 ^{ème} topologie.....	39
Figure III.15 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 2 ^{ème} topologie...	40
Figure III.16 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 2 ^{ème} topologie	40
Figure III.17 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 3 ^{ème} topologie.....	41
Figure III.18 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 3 ^{ème} topologie...	41
Figure III.19 : Résultats simulation d'un guide d'ondes SIW pour la 3 ^{ème} topologie.....	41
Figure III.20 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 4 ^{ème} topologie.....	42
Figure III.21 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 4 ^{ème} topologie...	43
Figure III.22 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 4 ^{ème} topologie	43
Figure III.23 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 5 ^{ème} topologie.....	44
Figure III.24 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 5 ^{ème} topologie...	44
Figure III.25 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 5 ^{ème} topologie	45
Figure III.26 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 6 ^{ème} topologie.....	45
Figure III.27 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 6 ^{ème} topologie...	46
Figure III.28 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 6 ^{ème} topologie	46

Tableau I.1 Les différentes équations de maxwell.....	5
Tableau II.1 Avantages et inconvénients de technologie SIW.....	25
Tableau III.1 : Paramètres du guide d'onde SIW.....	35
Tableau III.2 : Paramètres du guide d'onde SIW.....	37
Tableau III.3 : Paramètres du guide d'onde SIW pour les topologies suivants.....	47

Dans un contexte de développement accéléré des technologies de télécommunications, des systèmes radar, des satellites et des dispositifs sans fil, le besoin en dispositifs radiofréquences et micro-ondes compacts, performants et facilement intégrables est devenu incontournable. Parmi ces dispositifs, les filtres jouent un rôle essentiel en permettant la sélection ou la suppression de certaines bandes de fréquences, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité des signaux, à la réduction des interférences et à la protection des systèmes récepteurs sensibles.

Historiquement, différentes technologies ont été développées pour la réalisation de filtres micro-ondes, telles que les filtres à cavité, les filtres à microbandes et les filtres à composants discrets (RLC). Bien que largement utilisées, ces technologies présentent certaines limitations, notamment en termes de taille, de pertes à haute fréquence et de difficultés d'intégration dans des circuits modernes.

Pour pallier ces inconvénients, de nouvelles solutions technologiques ont émergé, parmi lesquelles la technologie SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) s'est imposée comme une alternative prometteuse. La structure SIW combine les avantages des guides d'ondes métalliques classiques — comme la faible perte et la haute sélectivité — avec ceux des technologies planaires, à savoir la compacité, la légèreté et la facilité d'intégration dans des circuits imprimés standards.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de simuler des filtres micro-ondes basés sur la technologie SIW, en mettant en évidence les avantages de cette approche par rapport aux technologies conventionnelles. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel de simulation HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), reconnu pour sa précision dans la modélisation électromagnétique des structures RF et micro-ondes.

Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux des filtres, leurs classifications, leurs caractéristiques principales, ainsi que les différentes technologies utilisées dans la conception de filtres micro-ondes.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la technologie SIW, ses principes de fonctionnement, ses caractéristiques, ses avantages, ainsi que les différentes topologies de filtres pouvant être réalisées en utilisant cette technologie.

Le troisième chapitre, nous détaillons la méthodologie de conception et de simulation des filtres SIW à l'aide du logiciel HFSS. Les résultats obtenus sont analysés et discutés afin de valider les performances de la structure conçue

Chapitre I

Généralité sur les filtres

I.1 Introduction

Dans les systèmes des communications, on utilise un filtre afin de choisir les signaux désirés. La fonction de filtrage découle du phénomène de résonance à une certaine fréquence.

Les filtres trouvent leur application dans de nombreux domaines, notamment dans les systèmes de transmission et de réception des satellites de télécommunication.

Dans ce chapitre, nous introduisons le concept des filtres en général, avant d'aborder leur progression historique. Nous mettrons également l'accent sur leurs usages et spécificités dans le secteur des systèmes électroniques et télécommunications, sans oublier de mentionner leurs différentes catégories.

I.2 Définition

Les filtres sont des dispositifs passifs ou actifs qui choisissent, suppriment ou isolent des signaux se trouvant dans différentes bandes de fréquences. Ces éléments sont donc essentiels dans de nombreux systèmes de transmission à radiofréquence et hyperfréquence (tels que les téléphones mobiles, les satellites, les radars, etc.) [1].



Figure I.1 : Schéma de filtre simplifié

I.3 Guides d'ondes

Un guide d'ondes est une structure spécialisée utilisée pour diriger les ondes électromagnétiques d'un point à un autre avec une perte de signal minimale, à des fréquences élevées. Contrairement aux lignes de transmission traditionnelles, les guides d'ondes ne possèdent pas de conducteur central. Ils sont creux et s'appuient sur les réflexions à l'intérieur des parois du tube pour guider les ondes et transmettre la puissance d'un point à un autre. Ils sont largement utilisés dans les communications micro-ondes et radiofréquences, les systèmes optiques, ainsi que dans les applications radar.

I.3.1 Guides d'ondes rectangulaires

Un guide d'onde rectangulaire, illustré par la figure (1.2), est constitué de quatre parois métalliques généralement perçues comme idéales qui créent un passage totalement clos et creux. Ce dernier est défini par ses dimensions transversales : une largeur a et une hauteur b . À l'intérieur du guide, un matériau diélectrique, le plus souvent l'air, facilite la diffusion de la lumière. Les murs métalliques retiennent la lumière à l'intérieur du guide pendant que l'axe de propagation z dirige cette dernière dans sa direction de propagation [2].

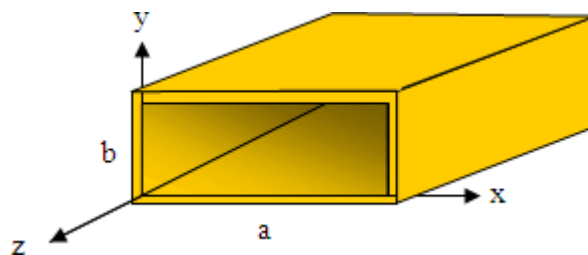


Figure I.2 : Représentation d'un guide d'onde rectangulaire

I.3.2 Guides d'ondes circulaires

Le guide d'onde circulaire est une autre forme de guide d'onde employée pour transmettre les ondes électromagnétiques. À l'inverse des guides d'onde de forme rectangulaire, celui-ci possède une section transversale de forme circulaire. On utilise les guides d'onde circulaires dans plusieurs domaines, y compris l'ingénierie des télécommunications, l'instrumentation, l'électronique et l'ingénierie radar. En général, les guides d'onde de forme circulaire sont ceux qui affichent les pertes les plus faibles. Ils offrent aussi la possibilité de véhiculer deux signaux possédant des polarisations orthogonales au sein d'un même guide. Toutefois, assurer une perpendicularité parfaite entre les champs électriques et magnétiques s'avère être un défi, ce qui conduit fréquemment à opter pour des guides d'onde rectangulaires ou elliptiques [2].

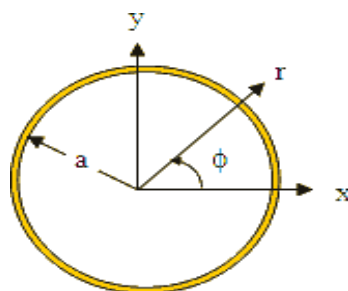


Figure I.3: Représentation graphique d'un guide d'onde circulaire

I.3.3 Guide d'onde elliptique

Si la forme de la section du guide d'ondes est elliptique on dit alors que c'est un guide d'ondes elliptique, il est largement utilisé dans les équipements électroniques pour l'alimentation d'antenne. C'est un support de transmission léger, facile à installer et flexible.



Figure I.4: Représentation graphique d'un guide d'onde elliptique

I.4 Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont des formalisations mathématiques, Ils décrivent les différents phénomènes magnétiques, électriques et lumineux. Ils fournissent des relations entre

les variations des grandeurs électromagnétiques ($\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{D}$, $\vec{H}$) en tout point M (x, y, z) de l'espace. Le fondement de la théorie de l'électromagnétisme est basé sur 4 équations de Maxwell.

Et qui corresponde aux lois suivantes :

La loi de Gauss, La loi de Maxwell-flux, La loi de Faraday, La loi d'Ampère-Maxwell

Nom de l'équation	Forme différentielle	Forme d'intégrable
Maxwell- Gauss	$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Maxwell-flux	$\text{div}(\vec{B}) = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
Maxwell-Faraday	$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{d\vec{B}}{dt}$	$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Maxwell- Ampère	$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 (j + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt})$	$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (j + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint \vec{E} \cdot d\vec{S})$

Tableau I.1 : Les différentes équations de maxwell.

Avec :

j : Densité de courant.

μ_0 : Perméabilité de vide.

ϵ_0 : Permittivité de vide.

$\vec{E}$: est le vecteur d'intensité du champ électrique.

$\vec{B}$: est le vecteur d'intensité du champ magnétique.

ρ : La densité volumique d'une charge électrique.

I.5 La Propagation dans un guide d'onde

Les guides d'ondes assurent la propagation de l'Energie électromagnétique dans une direction préférée, où les ondes se propagent à l'intérieur des parois du guide, et une telle onde est appelée onde guidée. L'objectif est d'atteindre l'autre extrémité du tube sans avoir une perte d'Energie.

Les équations de Maxwell précédentes doivent être vérifiées en tout point du milieu considéré pour avoir une onde propagée [3].

Les principaux modes de propagation de l'onde électromagnétique, sont deux, le mode magnétique (TM) et le mode électrique (TE), cependant il existe un troisième mode TEM applicable pour certains cas.

I.5.1 Mode TM

TM est l'abréviation des ondes magnétiques transversales, est défini par le fait que le vecteur (H) est toujours perpendiculaire à la direction de propagation.

I.5.2 Mode TE

On note les ondes électriques transversales (TE), appelées aussi ondes (H). Le vecteur (E) est perpendiculaire à la direction de propagation.

I.5.3 Mode TEM.

Ce mode de propagation est caractérisé par le fait que le vecteur électrique (E) et le vecteur magnétique (H) sont tous deux perpendiculaires à la direction de propagation.

I.6 Classification des filtres hyper-fréquences

I.6.1 Selon la fonction filtrage

I.6.1.4 Filtre passe-bas

Il s'agit de filtres de premier ordre qui autorisent le passage des signaux électriques allant de 0 Hz jusqu'à une fréquence spécifique, désignée sous le nom de fréquence de coupure (f_c). Cependant, ils atténuent les signaux à des fréquences nettement plus élevées [4].

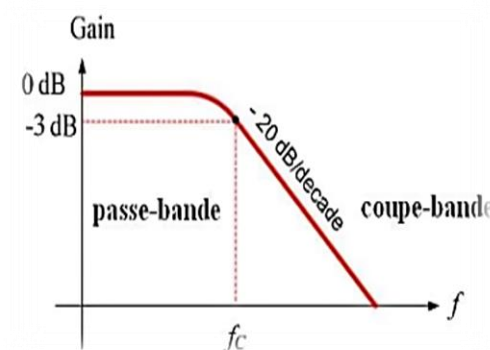


Figure I.5: Gain en dB d'un filtre passe-bas

I.6.1.2 Filtre passe – haute

Il s'agit de filtres de premier ordre qui réalisent l'action inverse d'un filtre passe-bas. Ils autorisent les signaux électriques dont la fréquence dépasse une certaine fréquence de coupure (f_c), tout en empêchant ceux dont la fréquence est inférieure à cette fréquence limite, qui commence à 0 Hz [4].

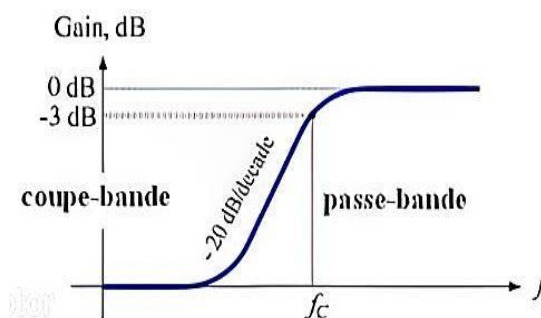


Figure I.6: Gain en dB d'un filtre passe-haut

I.6.1.3 Filtre passe- bande

Il s'agit de filtres de deuxième ordre qui autorisent la transmission des signaux électriques dans une gamme de fréquences déterminée $[f_{C1}, f_{C2}]$, tout en réduisant les signaux dont les fréquences sortent de cette plage, c'est-à-dire qu'ils ont des zones d'atténuation à la fois en dessous et au-dessus de cette fréquence [4].

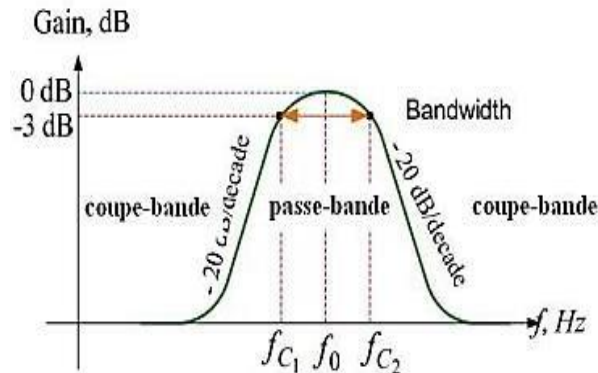


Figure I.7: Gain en dB d'un filtre passe-bande

I.6.1.4 Filtre coupe-bande

Ce sont des filtres du second ordre qui effectuent l'opération contraire d'un filtre passe-bande, autorisant les fréquences situées hors du domaine prédéfini $[f_{C1}, f_{C2}]$ à passer, tout en empêchant celles qui se trouvent dans cette plage de passer [4].

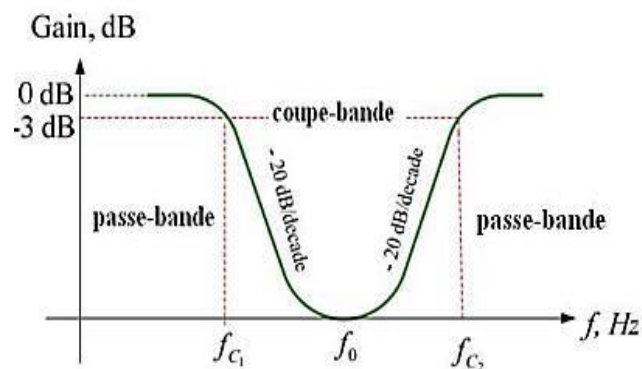


Figure I.8: Gain en dB d'un filtre coupe-bande

I.6.2 Classification selon la technologie de fabrication

I.6.2.1 Filtres à technologie micro-strip (microruban)

À un niveau élevé, le microstrip fait référence à un type de technologie de ligne de transmission planaire qui consiste en un ruban métallique séparée d'un plan de masse par un substrat diélectrique, comme illustré dans la figure (1.9).

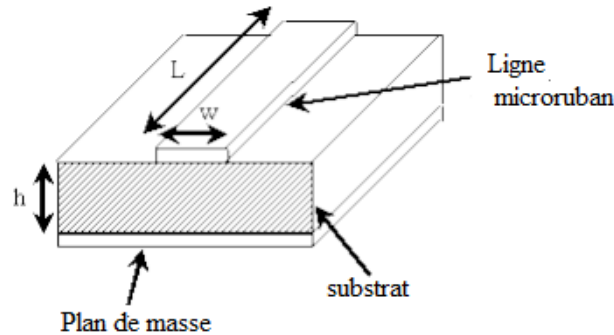


Figure 1.9 : Configuration typique de filtre microstrip.

Plus précisément, la conception et la construction d'un filtre microstrip sont similaires à la manière dont les circuits sont configurés sur un circuit imprimé (PCB). Cependant, une distinction clé d'un filtre microstrip est que les motifs de conducteurs métalliques imprimés sur le substrat diélectrique solide sont là pour créer des résonateurs plutôt que de simples interconnexions.

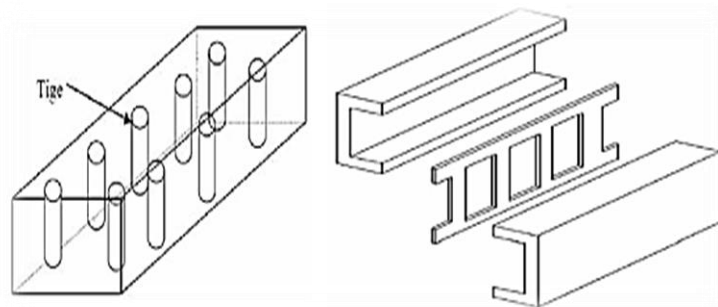
Les motifs métalliques des éléments en bande sont placés sur une couche isolante diélectrique solide avec une couche métallique de masse située sous le diélectrique. Les champs entourant la bande traversent deux milieux différents, une partie du champ étant dans le substrat et une autre dans l'air au-dessus de la bande.

La permittivité plus élevée du substrat diélectrique entraîne une concentration du champ électrique dans le substrat, ce qui signifie que les pertes de champ dues au choix du matériau deviennent un facteur à prendre en compte. Les matériaux standards pour PCB, comme le FR4, peuvent être utilisés en dessous de 1 GHz pour des filtres de faible qualité (faible Q). Une perte plus faible et une augmentation de Q peuvent être obtenues en utilisant des matériaux céramiques [5].

Ce type de ligne de transmission imprimée est une option de filtrage populaire, car ces filtres peuvent couvrir une large gamme de fréquences.

I.6.2.2 Filtre a guide d'onde

Les résonateurs en guides d'ondes sont des composants précieux pour la conception de filtres, car ils offrent des facteurs de qualité à vide très élevés, permettant ainsi d'obtenir des réponses très sélectives avec de faibles pertes. Ils présentent également une excellente réjection hors bande. Utilisant l'air comme diélectrique, qui possède des propriétés isolantes remarquables, ces résonateurs peuvent également supporter de fortes puissances, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications de communications spatiales [6]. Les filtres de réception des répéteurs de radars sont conçus grâce à cette technologie. Parmi ces filtres, on peut citer deux exemples : les filtres à tiges et les filtres à inserts métalliques .



1: Filtres à tige.

2: Filtres à insert métalliques

Figure I.10 : Filtres de réception en guides d'ondes [6].

Les inserts métalliques disposés en parallèle au champ électrique du mode fondamental remplissent le rôle de filtre. Des réflexions vont se produire au niveau des fentes de la lamelle métallique, ce qui permettra de choisir une bande de fréquence spécifique. L'absence de matériau diélectrique, l'emploi de bons conducteurs contribue à réduire les pertes. On peut améliorer la sélectivité de ces filtres en accroissant le nombre de résonateurs employés, ce qui favorise une augmentation des pertes d'insertion

Le principal inconvénient de la technologie volumique est la masse importante qu'elle génère. De plus, la fabrication des filtres à guides d'ondes est complexe et exige un travail mécanique particulier, ce qui conduit à une augmentation des coûts.

Dans les satellites de télécommunication, un filtre à large bande est utilisé pour l'émission. La technologie de guide d'ondes à nervures (figure I.10) est la meilleure solution qui répond aux critères de filtrage, puisqu'elle présente une rupture dans le guide qui compromet l'uniformité de celui-ci, élargissant ainsi la bande passante. [7]

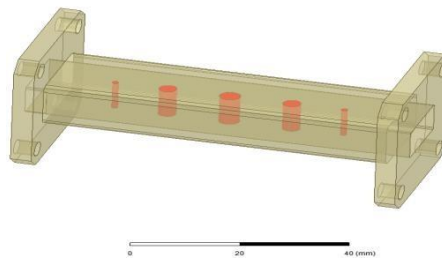


Figure I.11 Filtre à post à guide d'ondes [7].

I.6.2.3 Filtre à Cavité Résonante

Les filtres à cavité résonante sont généralement composés de cavités monomodes, bimodes ou multimodes, conçues à partir de cavités circulaires ou rectangulaires séparées par des iris de couplage. Les iris offrent la possibilité de modifier les fréquences de résonance des cavités et garantissent un couplage par champ magnétique réglé selon le positionnement de ces iris et leurs tailles.

Le couplage est réalisé par un champ magnétique ajusté en fonction de la position et des dimensions de ces iris. Ils se servent également de vis de réglage [8].

Bien que ce genre de filtres convienne idéalement aux hautes puissances, ils sont également sensibles aux variations de fabrication. Par conséquent, des vis de réglage sont fréquemment employées pour modifier le comportement des champs dans les cavités. Ces vis peuvent aussi être utilisées pour corriger les écarts de température.

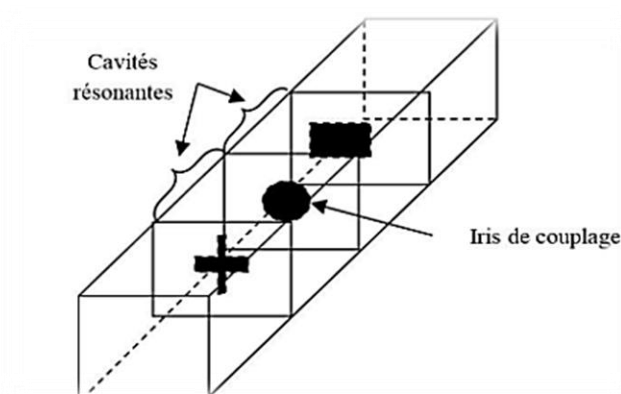


Figure I.12: Filtre à Cavité Résonante [8].

I.6.2.4 Filtres SAW (Surface Acoustic Wave) et BAW (Bulk Acoustic Wave)

Pour une application spécifique, il est crucial de saisir les besoins de l'application de filtrage et de déchiffrer les spécifications électriques du filtre. Chaque application de filtre disposera d'une fréquence centrale, d'une largeur de bande, d'un niveau de signal voulu et de spécifications pour l'atténuation. C'est généralement un ingénieur système qui est responsable de la définition de ces exigences. Il choisit le filtre pour s'assurer qu'il satisfait ces critères tout en respectant les contraintes budgétaires, et élabore un plan pour son incorporation dans le design du système. Pour les appareils sans fil modernes, cela nécessite généralement la création de banques de filtres constituées de nombreux filtres respectant des critères stricts pour être en conformité avec les normes sans fil et les lois des agences réglementaires [9].

Voici les principales spécifications électriques pour la conception de filtres RF :

Type de filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande/rejet de bande)

Fréquence de bande passante (Hz)

Fréquence de rejet (Hz)

Rejet ou rejet hors bande (dB)

Atténuation (dB)

Pertes d'insertion (dB)

Isolation (dB)

Sélectivité (dB)

Facteur Q

Ripple (dB)

Gestion de la puissance d'entrée (dB)

Correspondance d'impédance d'entrée et de sortie (Ohms) .

La majorité des standards de communication sans fil privilégient l'utilisation de filtres passe-bande, souvent associés à d'autres filtres de ce type, pour faciliter un filtrage sur plusieurs bandes de fréquence. Les filtres SAW et BAW sont souvent utilisés à cette fin, leur format réduit permettant de concevoir des banques de filtres plus petites comparativement à d'autres technologies de filtrage. Ces filtres passe-bande sont conçus pour atténuer les éléments des signaux hors bande détectés par le récepteur [10]. Cette fonctionnalité est cruciale, car le contenu hors bande fréquentiel peut provoquer une désensibilisation du récepteur, diminuant ainsi le rapport signal sur bruit (SNR) ou majorant le taux d'erreur binaire (BER). En outre, il est courant d'utiliser des filtres à la sortie d'un émetteur afin de

diminuer le nombre des dispositifs émetteurs à puissance plutôt élevée génère des produits non linéaires, comme les harmoniques et les spurs. L'usage de filtres optimise le rapport de fuite inter-canal (ACLR) ainsi que le rapport de puissance inter-canal (ACPR). En outre, l'emploi de ces filtres permet à des émetteurs sans fil qui échoueraient autrement un test de conformité sans fil de le réussir sans nécessiter une refonte majeure [11].

Les filtres SAW sont généralement plus abordables que les filtres BAW et sont largement disponibles sur le marché. Cependant, leur utilisation est généralement limitée à des fréquences de fonctionnement inférieures à 2,5 GHz. Pour les applications nécessitant des performances supérieures ou des fréquences plus élevées—comme celles des technologies 3G, 4G, Wi-Fi 6E et la 5G sub-6 GHz—les filtres BAW constituent une meilleure option. Ces derniers sont conçus pour offrir une meilleure atténuation dans la bande passante, un rejet hors bande plus efficace, une capacité de gestion de puissance accrue et un facteur de qualité (Q) supérieur par rapport aux filtres SAW.

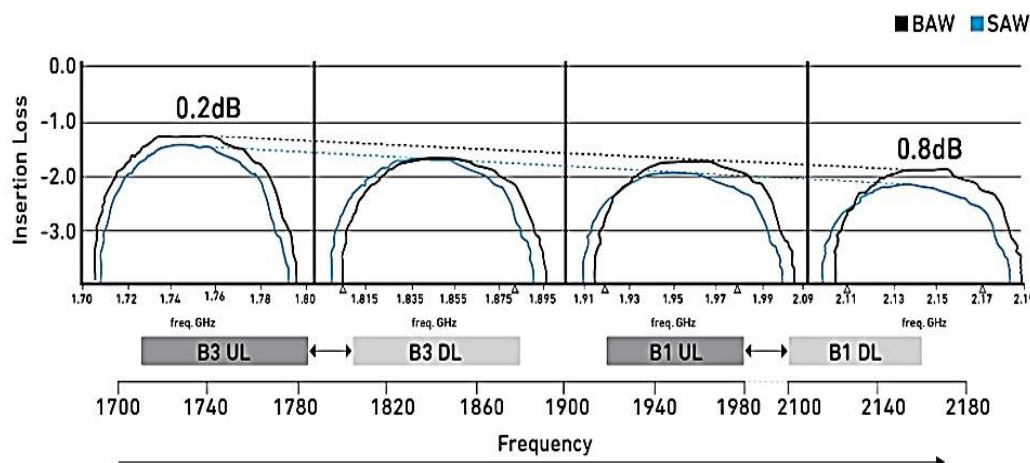


Figure I.13 : Filtres SAW et BAW [10].

I.7 Type des filtres

I.7.1 Filtre passif

Plusieurs solutions ont été élaborées pour rendre les installations industrielles moins sensibles à la pollution harmonique. À l'heure actuelle, la méthode la plus couramment utilisée est le filtrage passif des harmoniques. Un filtre passif a pour fonction de modifier localement l'impédance du réseau, afin de détourner les courants harmoniques et réduire les tensions harmoniques là où cela est requis. On combine des composants capacitifs et inductifs pour parvenir à une résonance série ajustée à une fréquence spécifique [12].

I.7.2 Filtre actif

Le filtre actif représente aujourd'hui une approche plus avancée que le filtre passif, bénéficiant des technologies les plus modernes proposées par les fabricants de ces équipements. Le fonctionnement du filtre actif repose sur l'idée qu'il génère des courants qui contrent les harmoniques créées, visant ainsi à restaurer un courant sollicité par la charge. Ces filtres actifs, également connus sous le nom de compensateurs actifs, sont déployés en série dans une installation requérant [12].

I.8 Caractéristiques et paramètres Clés des filtres

- **Fréquence de coupure (f_c)** : les filtres hyperfréquence fonctionnent dans des plages de fréquences hautes, exigeant une connaissance approfondie des caractéristiques spectrales des signaux.
- **La fréquence centrale (f_0) et la largeur de bande (B_w)** : sont des éléments cruciaux qui déterminent leur aptitude à choisir ou éliminer certaines fréquences Dans la conception et l'efficacité des filtres [12].
- **Pente d'atténuation** : Rapidité avec laquelle les fréquences hors bande sont atténuées.

I.9 Applications des filtres :

I.9.1 Systèmes des Télécommunications : comme la Téléphone, télévision, Radios, transmission de données et Communications sans fil (4G, 5G, Wi-Fi). Les filtres hyperfréquences sont utilisés pour sélectionner et isoler des bandes de fréquences spécifiques, permettant une transmission efficace des signaux sans interférence.

I.9.2 Radars et système de défense (militaires, aériens, maritimes) :

Les filtres hyperfréquences sont utilisés pour filtrer les échos de retour, ce qui permet une détection plus précise des cibles (avions, navires, etc.) [12].

I.9.3 Satellites et communication spatial:

Les filtres hyperfréquences sont essentiels pour séparer les canaux de communication montants (up Link) et descendants (down Link), optimisant ainsi l'utilisation du spectre.

I.9.4 Système de radiodiffusion:

Dans un système de radiodiffusion, les filtres jouent un rôle essentiel pour garantir la qualité du signal transmis et reçu en limitant les interférences, en améliorant la sélectivité des canaux et en protégeant les équipements .

I.10 Avantage des filtres hyperfréquences

- L'évaluation et la correction continues des harmoniques de tension ou de courant.
- Ils ne requièrent pas d'énergie active à l'exception des pertes internes associées aux semi-conducteurs et aux bobines.
- Ils sont capables de s'ajuster aux variations liées à la charge non linéaire.
- Ils possèdent des propriétés de réactivité rapide et une bande passante suffisante pour compenser plusieurs harmoniques dans l'ensemble du système.
- Le filtre a un volume physique plus compact.

I.11 Limites des filtres hyperfréquences

Les filtres hyperfréquence possèdent des propriétés distinctives, y compris des pertes de transmission, des réflexions et des distorsions qui tendent à se renforcer avec l'augmentation des fréquences. L'efficacité de filtration est influencée par la structure du filtre et les paramètres de conception, ce qui peut entraîner des concessions entre sélectivité et pertes [13].

I.12 Utilisation des filtres électriques

Les filtres électriques, couramment employés dans divers domaines que nous énumérerons

- **Les filtres de communication radio** : ces derniers sont employés dans les récepteurs, dont un filtre d'entrée sélectionne la bande de fréquences, en supprimant les signaux dont la fréquence diffère de celle de la bande choisie.
- **Les filtres de modulation et de démodulation** : dans le cadre d'une transmission, l'utilisation d'un signal porteur (fréquence porteuse) est systématique. Il devient alors primordial de restreindre autant que possible le spectre des fréquences émises afin d'éviter une surcharge du support de transmission.
- **Un filtre de modulation assure cette fonction** : de la même manière, lors de la réception, le filtre ne captera que la gamme de fréquences correspondant au signal transmis.

Les filtres de traitement spectral : l'examen d'un signal enseveli dans le bruit nécessite le recours à un filtre en peigne, qui n'est rien d'autre qu'une série de filtres ne permettant la transmission que d'une bande de fréquences très étroite.

- **Les filtres pour optimiser le rapport signal/bruit** : lorsque les fréquences d'un signal englouti dans le bruit sont connues, on peut améliorer la qualité de ce signal grâce à un filtre qui ne laissera passer que ces fréquences spécifiques [14].

I.13 Conditions aux limites pour un filtre SIW

Conditions aux limites de court-circuit (pour le champ électrique)

Le champ électrique est généralement nul aux interfaces des vias métalliques (qui simulent les parois du guide d'ondes) et aux extrémités du guide d'ondes.

Conditions de continuité (pour le champ magnétique)

Le champ magnétique doit être continu à travers les interfaces des vias et aux extrémités du guide d'ondes

I.14 Conclusion

Ce chapitre retrace l'évolution des filtres, depuis leur conception originale jusqu'à leurs versions les plus récentes, dans plusieurs secteurs vitaux de la vie courante tels que les télécommunications, les énergies renouvelables et le domaine médicale. Les filtres ont été divisés en deux principales catégories : passifs et actifs, selon les composants employés dans leur élaboration. Par ailleurs, quels que soient leur nature, ils ont été classés en quatre catégories en fonction de leur comportement fréquentiel : passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande.

Chapitre II

**Filtres à base d'un guide d'ondes intégré au
substrat(SIW)**

II.1 Introduction

Les développements récents de systèmes de communication sans fil et micro-ondes exigent des substrats diélectriques à faible perte, capables de garantir des vitesses de transmission de données élevées. La technologie des guides d'ondes intégrés au substrat (Substrate Integrated Waveguide - SIW) représente une solution innovante qui allie les avantages des guides d'ondes traditionnels, tels que de faibles pertes et une excellente sélectivité, à ceux des circuits imprimés, notamment une fabrication peu coûteuse et une intégration facile avec d'autres composants RF et micro-ondes [15].

Grâce à ces avantages, la technologie SIW est devenue un choix privilégié pour la conception de divers circuits hyperfréquences, tels que les filtres, diviseurs de puissance, antennes et oscillateurs. Les filtres SIW, en particulier, jouent un rôle clé dans la sélection des fréquences en réduisant les interférences et en optimisant les performances des systèmes de communication.

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail la technologie SIW et les filtres qui en découlent. Nous commencerons par examiner ses paramètres caractéristiques et son rôle dans les systèmes micro-ondes et les communications sans fil. Ensuite, nous décrirons les guides d'ondes SIW dans différentes bandes de fréquences (S, X et C) et présenterons quelques exemples de circuits basés sur cette approche. Enfin, nous analyserons les avantages et les inconvénients de cette technologie avant de conclure ce chapitre.

II.2 Guide d'ondes intégré au substrat (SIW)

Le guide d'ondes intégré au substrat (SIW) représente une nouvelle génération de lignes de transmission qui combine les avantages des technologies planaires et volumiques. Il permet d'obtenir des performances proches de celles des guides d'ondes métalliques traditionnels tout en restant compatible avec la fabrication sur circuit imprimé (PCB) [16].

La structure du SIW repose sur l'intégration d'un guide d'ondes dans un substrat diélectrique. Les plans métalliques supérieur et inférieur du substrat jouent le rôle de parois conductrices, comme dans un guide d'ondes classique. Cependant, à la différence des guides d'ondes métalliques conventionnels, les parois latérales du SIW sont remplacées par deux rangées de vias métallisés (trous percés et revêtus de métal) qui assurent la continuité électrique entre les deux plans métalliques.

Cette configuration permet de confiner l'onde électromagnétique à l'intérieur du guide et d'assurer une transmission efficace du signal. Grâce à sa facilité de fabrication, son coût réduit et ses bonnes performances en termes de pertes et de sélectivité, la technologie SIW est devenue une solution privilégiée dans les systèmes de communication sans fil, les radars et les applications hyperfréquences avancées [15].

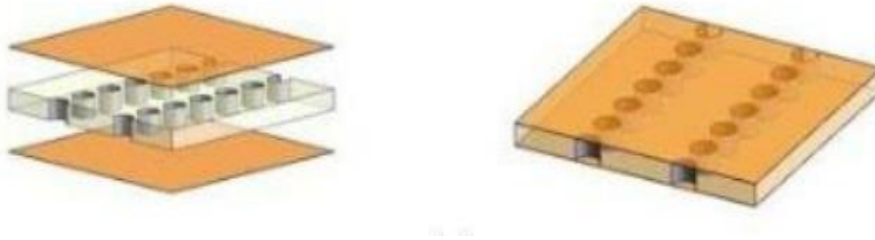


Figure II.1 : structure d'un Guide d'ondes (SIW)

II.3 Paramètres d'un guide d'ondes intégré au substrat

La conception des structures SIW repose sur des paramètres géométriques essentiels, qui doivent être soigneusement choisis pour garantir de bonnes performances électromagnétiques. Ces paramètres sont définis comme suit [17] :

D : Le diamètre des vias ;

P : La distance entre deux vias adjacents centre à centre ;

h : La hauteur du substrat ;

W_{SIW} : L'écartement réel entre deux rangés de vias (centre à centre) qu'il ne correspond pas à la largeur effective ;

L_{SIW} : Longueur du côté de plan de masse.

La fréquence de coupure d'un guide d'ondes rectangulaire classique (rempli d'air) dans le mode TE_{10} est donnée par :

$$f_c = \frac{c}{2W} \quad (II.1)$$

Avec c est la vitesse de la lumière

La largeur effective de coupure w_d est donnée par [18]:

$$W_D = \frac{W}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (II.2)$$

Où : ϵ_r est la permittivité relative du substrat

Pour un guide SIW, la largeur réelle W_{SIW} est plus grande que W_D , en raison des fuites entre les vias. Une approximation largement utilisée dans la littérature permet de corriger cela :

$$W_{SIW} = W_D + \frac{D^2}{0.95 \times P} \quad (II.3)$$

$$L_{SIW} = L_D + \frac{D^2}{0.95 \times P} \quad (II.4)$$

OU : w_{siw} , L_{siw} , w_d et L_d sont respectivement les largeurs et longueurs du guide d'onde rectangulaire en technologie SIW et de son guide d'onde rectangulaire classique équivalent [18].

Avec

$$P = \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\epsilon_r} \quad (II.5)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (II.6)$$

Pour construire un guide SIW deux conditions sont nécessaire. Ces équation permettent de définir les dimensions et l'espacement des vias métalliques de manière garantir un confinement efficace du champ électromagnétique et à diminuer les pertes par rayonnement [18] :

$$D = \frac{\lambda_g}{5} \quad (II.7)$$

$$D < P \leq 2D \quad (II.8)$$

Ou :

λ_g : La longueur d'onde guidée

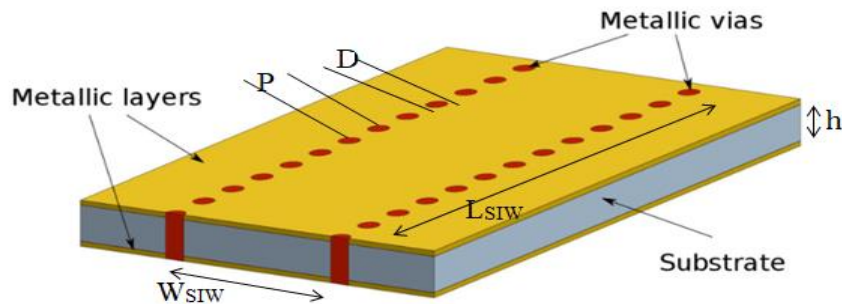


Figure II.2 : Guide d'ondes SIW avec ses paramètres [19].

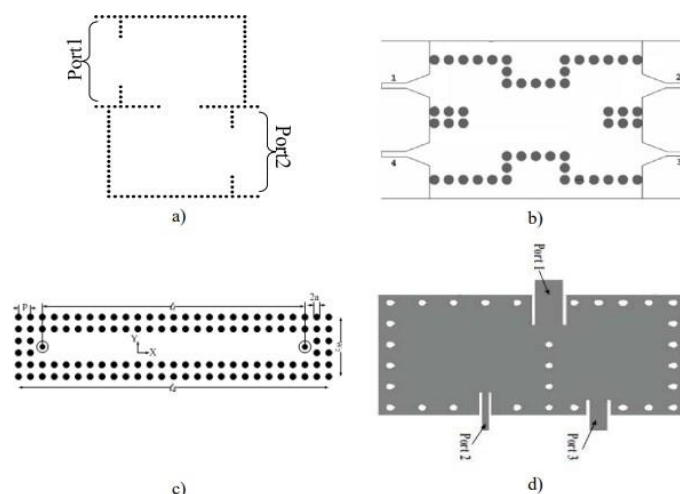
II.4 Quelques exemples de circuits SIW

Le SIW peuvent être réalisés en combinant les structures synthétisées mentionnées précédemment avec d'autres circuits planaires, tels que les lignes microruban ou d'autres technologies similaires, sur un même substrat diélectrique. Cette approche permet une intégration optimisée des composants, réduisant ainsi l'encombrement et améliorant les performances des systèmes hyperfréquences.

Dans cette section, nous passons en revue divers circuits intégrés au substrat, qu'ils soient passifs ou actifs, et leurs applications dans les systèmes de communication et de traitement des signaux hyperfréquences.

II.4 .1 Circuits Passifs à Base de SIW

La technologie SIW a permis d'adapter la plupart des composants passifs hyperfréquences classiques aux circuits intégrés, offrant ainsi une solution compacte et performante par rapport aux guides d'ondes conventionnels. Grâce à cette approche, il est possible de concevoir des circuits présentant une meilleure isolation électromagnétique. Parmi les composants passifs, les filtres ont particulièrement retenu l'attention en raison de leur rôle essentiel dans la gestion du spectre des signaux hyperfréquences. Quelques exemples représentatifs de circuits passifs basés sur la technologie SIW sont illustrés en Figure comme le filtre passe-bande SIW, la cavité rectangulaire SIW, le coupleur SIW, les duplexeurs et multiplexeurs SIW [20].



Figures II.3 : Exemples des circuits passifs SIW, a) Filtre passe-bande SIW, b) Coupleur SIW, c) Guide rectangulaire SIW et d) Duplexeur SIW

II.4.2 Circuits actifs à Base de SIW

L'intégration de composants actifs dans la technologie SIW a suscité moins d'intérêt que celle des circuits passifs. Toutefois, de nouvelles perspectives de conception ouvrent la voie à une intégration complète de type System-on-Substrate (SoS).

La conception et l'optimisation des circuits actifs reposent sur l'incorporation de dispositifs actifs au sein de circuits passifs SIW, en exploitant les avantages de cette technologie, notamment les faibles pertes, une isolation élevée et une compacité accrue, afin d'améliorer les performances tout en réduisant les coûts [20].

En général, l'une des faces conductrices du SIW est utilisée pour intégrer la fonction active, avec une connexion assurée par des lignes micro ruban. Les avancées récentes ont permis le développement d'oscillateurs, de mélangeurs et d'amplificateurs, dont quelques exemples sont illustrés dans les figures (II.4) et (II.5)

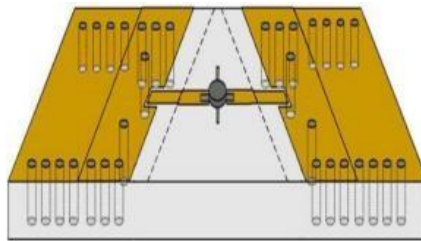


Figure II.4 : Amplificateur SIW

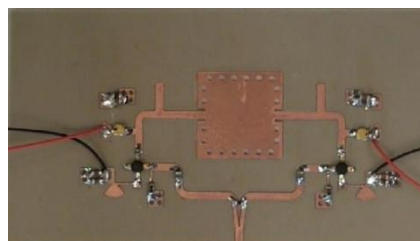


Figure II.5: Oscillateur SIW

II.5 Caractéristiques de technologie SIW

La technologie SIW est une approche prometteuse qui permet de conserver les avantages des guides d'ondes tout en restant compatible avec les procédés de fabrication standard. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- **Comportement des courants magnétiques** : La structure en vias métalliques crée une discontinuité qui limite la circulation des courants horizontaux, empêchant ainsi la propagation des modes transverses magnétiques (TM).
- **Mode fondamental TE_{10}** : Grâce à la présence de courants électriques sur les faces supérieure et inférieure du substrat, la structure SIW présente un mode de propagation similaire à celui d'un guide d'onde rectangulaire.
- **Distribution des champs électromagnétiques** : La répartition des champs électriques et magnétiques dans un guide d'onde SIW est comparable à celle d'un guide d'onde rectangulaire, garantissant ainsi des performances de propagation optimales.
- **Correspondance des modes** : En négligeant les pertes de rayonnement entre les vias métalliques, les modes de propagation du SIW sont équivalents à ceux d'un guide d'onde rectangulaire possédant les mêmes caractéristiques.
- **Facilité d'intégration** : Le SIW permet d'intégrer aisément des composants micro-ondes, qu'ils soient passifs ou actifs, directement sur un même substrat. Cela favorise la miniaturisation des systèmes et assure une compatibilité avec les circuits imprimés classiques [21].

Cette technologie offre ainsi une solution efficace pour les applications en hyperfréquences et millimétriques, combinant performance, compacité et compatibilité avec les procédés de fabrication standard.

II.6 Quelques exemples de guides d'ondes SIW

II.6.1 Guide d'ondes en bande S

La bande S représente une plage précise de fréquences dans le spectre électromagnétique, s'étendant de 2 à 4 GHz [22].

Les fréquences de cette bande peuvent être exploitées dans les applications ci-après :

- Radars météorologiques
- Émetteurs audios et vidéo
- Réseau Wi-Fi

II.6.2 Guide d'ondes en bande C

Il s'agit du segment du spectre électromagnétique correspondant aux fréquences :

- De 3.4 GHz à 4.2 GHz pour la réception.
- De 5.725 GHz à 7.075 GHz pour les transmissions réservées au service de radiodiffusion.
- Pour des applications telles que les radars météorologiques, on utilise des fréquences allant de 4 GHz à 8 GHz.
- Cette gamme de fréquences est employée pour la transmission par satellite en direction descendante [22].

II.6.3 Guide d'ondes dans la bande X

Utilisée dans les communications gouvernementales et les systèmes militaires cryptés, Il s'agit d'une gamme de fréquences comprise entre 8 et 12 GHz.

II.7 Avantages et inconvénients de la technologie SIW

Le tableau ci-dessous représente les avantages et les inconvénients de cette technologie

Avantages	Inconvénients
Les guides d'ondes intégrés au substrat présentent des atouts tels que : • Une densité élevée de l'assemblage des composants discrets sur le châssis SIW • Les structures SIW ne sont pas influencées par le métal, car la perte de conducteur est moindre • Faible couts de réalisation • Faibles pertes • Un facteur de qualité élevé • Taille réduite • Facilité d'intégration avec d'autres systèmes • Capacité de traitement haute puissance	• Les pertes dues aux fuites sont considérables et varient en fonction de la séparation effectuée par les orifices disposés dans la couche supérieure • Pertes diélectriques, par rapport à l'air dues à l'utilisation d'un diélectrique dans une structure SIW • Dépend de la fréquence, les implémentations mm-Wave de SIW doivent donc être envisagées • SIW montre une fréquence de coupure inférieure

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de technologie SIW

II.8 Conception d'un filtre à base de SIW

Pour la création d'un filtre SIW utilisant des cavités résonnantes, chaque cavité renferme des champs électromagnétiques confinés, étant donné que la procédure comprend plusieurs étapes afin d'obtenir des résultats exacts [23]:

- Commencez par définir les dimensions des cavités résonnantes (taille des vias, espacement entre vias, longueur et largeur du filtre, identification de l'entrée et de la sortie du signal...)

- Deuxièmement, déterminez le mode de résonance utilisé dans la technique SIW, où TE_{101} est TM_{010} placé pour l'alésage rectangulaire et est pour l'alésage cylindrique.

- En troisième lieu, pour valider les formules d'analyse dimensionnelle, on réalise des simulations électromagnétiques grâce au logiciel HFSS, en prenant en compte l'épaisseur du substrat du filtre SIW, dont l'épaisseur optimale a été définie par ces mêmes simulations, afin de minimiser les pertes.

- Enfin, pour obtenir une réponse optimale, on doit procéder à une série de modifications du logiciel de simulation.

II.9 Applications des filtres SIW

Les filtres hyperfréquences constituent des composants essentiels dans diverses installations de communication. Selon le système en question et l'emplacement du filtre dans ce dernier, leur conception doit répondre à des exigences électriques ainsi qu'à des restrictions spécifiques de coût, de poids et d'espace occupé. Ainsi, nous concentrons nos efforts sur la technologie SIW qui répond à ces critères évoqués précédemment. Nous avons sélectionné plusieurs applications qui ont bénéficié des améliorations apportées par des chercheurs de renom au cours des dernières années [24].

Les guides d'ondes intégrés dans un substrat (SIW) offrent de nombreux bénéfices, notamment l'amélioration du facteur Q comparativement aux lignes microruban, ainsi que leur petite taille et légèreté qui facilite leur intégration par rapport aux guides métalliques standards. Depuis la proposition du manuel SIW, une multitude d'applications dans divers circuits hyperfréquences ont été observées. De nombreuses réalisations de composants passifs traditionnels à micro-ondes et d'appareils ont été effectuées avec SIW, y compris : les antennes, les coupleurs directionnels, les duplexeurs et les déphaseurs. De nombreux chercheurs ont examiné les filtres basés sur cette méthode, certains d'entre eux utilisent la cavité en mode de résonance SIW [25].

II.9.1 Filtre SIW monté en série avec antenne de correction

L'intégration du filtre SIW rectangulaire et de l'antenne patch peut être conçue sous forme de structure en cascade. Cette structure permet d'obtenir une fréquence de coupure maximale, d'améliorer la perte de retour du filtre et de réduire le volume physique global. Une ligne de transmission de 50Ω est utilisée pour assurer l'intégration entre le filtre et l'antenne. La Figure II.6 illustre la structure en cascade entre le filtre SIW et l'antenne patch [26].

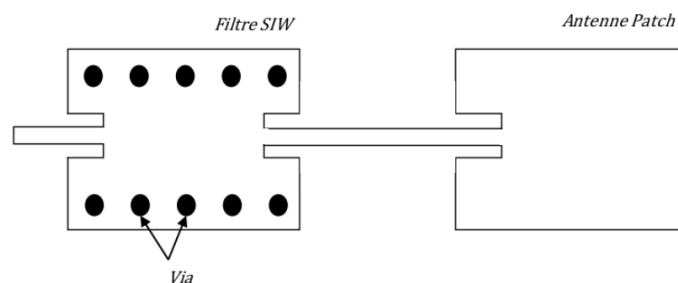


Figure II.6 : Filtre SIW associé en cascade avec une antenne patch.

II.9.2 Nouvelle topologie d'un filtre passe-bande SIW bi-mode

La figure 7 illustre une nouvelle technique de filtre passe-bande à partir d'une cavité SIW [27]. Cette technique se concentre sur les filtres passe-bande SIW compacts à double mode, caractérisés par leur haute sélectivité. Il s'agit d'une technique pour créer et mettre en œuvre un filtre passe-bande SIW compact, dans lequel une ouverture sur la surface supérieure du filtre SIW métallique est utilisée pour contrôler le mode. Deux filtres passe-bande SIW à 5.8 GHz avec une bande passante fractionnelle [27].



Figure II.7: Disposition (lay-out) d'un filtre SIW passe bande

II.9.3 Filtre SIW à cavité circulaire en bi-mode

Dans [18], ils ont proposé un nouveau filtre SIW à cavité carrée en double mode. En employant une entrée et sortie de ligne d'alimentation orthogonale ainsi que deux vias métalliques pour la gestion de deux modes dégénérés préoccupants. Le filtre bi-mode SIW présente une fréquence centrale de 14.7GHz avec une largeur de bande fractionnaire de 3.8% [28].

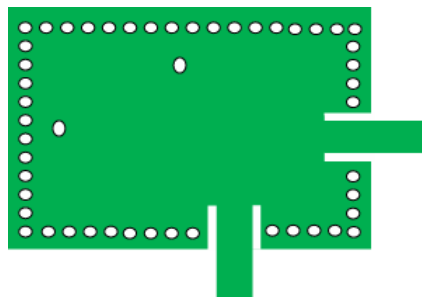


Figure II.8: Filtre SIW bi-mode à cavité circulaire

II.9.4 Filtre SIW complémentaire à anneau

La figure II.9 illustre le filtre de départ qui comprend deux cavités à mode dominant dépourvues de résonateurs à anneau séparés complémentaires (CSRR) ainsi que des cavités SIW à double mode. Le prototype de filtre à bande d'arrêt présenté par [29] fonctionne en bande Ka et repose sur le principe du filtre résonnant à cavité SIW.

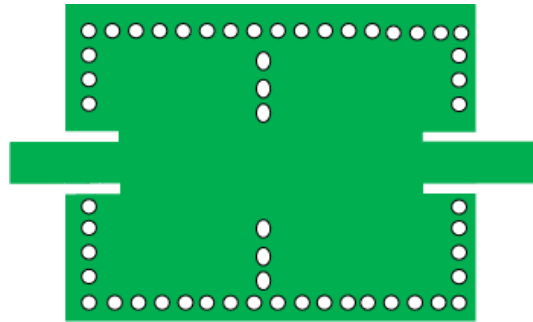


Figure II.9: Filtre SIW à deux résonateurs

II.10 Conclusion

Avec l'évolution de la technologie SIW, en particulier les théories liées aux filtres, et compte tenu des nouvelles topologies adoptées pour développer des applications pertinentes et captivantes en télécommunication, ce chapitre présente quelques concepts liés au Guide d'onde intégré au substrat (SIW).

Ce chapitre a également dédié une section à l'exposé de certaines notions de filtrage hyperfréquence et leurs caractéristiques. Dans la section finale du chapitre, nous avons mentionné plusieurs utilisations des filtres SIW. Le chapitre suivant est dédié à la présentation des résultats de notre travail.

Chapitre III

Conception et simulation des filtres à guide d'onde SIW

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats de simulation du filtre micro-onde basé sur la technologie SIW. Cette technologie innovante permet d'intégrer des structures de type guide d'onde directement dans des circuits imprimés, offrant ainsi une solution compacte, à faible coût et compatible avec les procédés de fabrication en microélectronique.

La conception du filtre a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), qui repose sur la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel. Ce logiciel est particulièrement adapté à la simulation des structures guidées complexes telles que les guides d'ondes intégrés au substrat, et permet d'analyser avec précision leur comportement électromagnétique.

Dans un premier temps, les paramètres géométriques et technologiques du filtre (dimensions, type de substrat, trous métallisés, cavités résonantes, etc.) sont rappelés. Ensuite, les résultats de simulation, notamment les paramètres S (S_{11} et S_{21}), la fréquence de résonance, la bande passante et la répartition des champs électromagnétiques, sont présentés et analysés. Ces résultats permettent d'évaluer les performances du filtre en termes de pertes d'insertion, de réflexion et de sélectivité.

III.2 Présentation du logiciel HFSS

HFSS est un logiciel de simulation électromagnétique tridimensionnelle développé par Ansys. Il est largement utilisé dans le domaine des hautes fréquences pour la conception et l'analyse de dispositifs tels que les antennes, les filtres, les lignes de transmission, les guides d'ondes, et plus généralement, toute structure soumise à des ondes électromagnétiques.

Basé sur la méthode des éléments finis (FEM – Finite Element Method), HFSS permet de résoudre les équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel avec une grande précision. Il prend en compte la géométrie complexe des structures, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, ainsi que les excitations appliquées [30].

Parmi les principales fonctionnalités du logiciel, on peut citer :

- La modélisation 3D précise de structures électromagnétiques.
- L'analyse des paramètres S (S_{11} , S_{21} , etc.), qui permet de caractériser le comportement en fréquence des dispositifs.

- La visualisation de la distribution des champs électromagnétiques (électriques et magnétiques) à l'intérieur des structures.
- L'estimation des pertes (d'insertion, de réflexion, diélectriques, métalliques).
- L'optimisation automatique des dimensions géométriques en fonction de critères de performance.

Dans le cadre de ce travail, HFSS a été utilisé pour simuler un filtre micro-onde basé sur la technologie SIW. Ce logiciel s'est révélé particulièrement adapté à ce type de structure, en raison de sa capacité à modéliser finement les interactions entre les guides d'ondes intégrés au substrat et les champs électromagnétiques qui les traversent.

III.3 Fenêtre HFSS

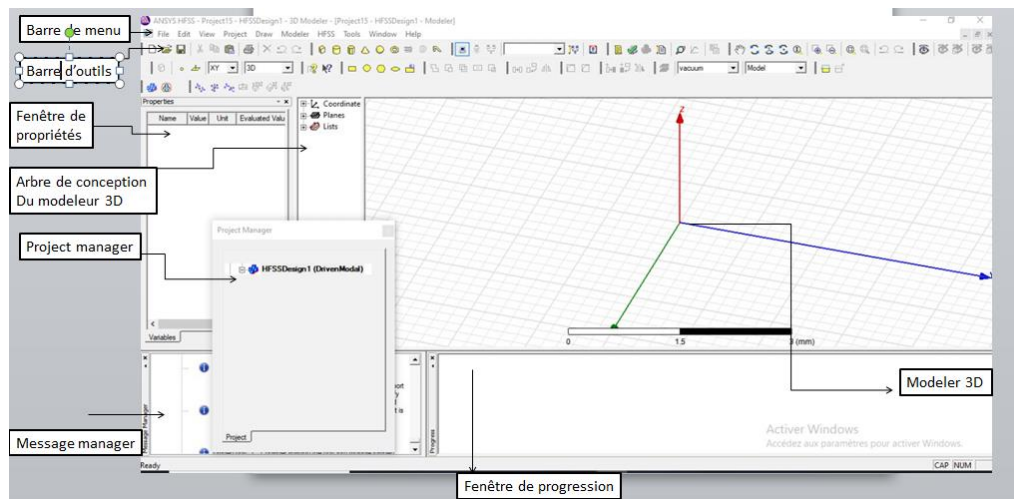


Figure III.1 : Interface principale d'ANSYS HFSS

La fenêtre principale du logiciel HFSS est structurée de manière à offrir une interface intuitive facilitant la modélisation, la simulation et l'analyse des structures électromagnétiques. Elle se compose généralement des éléments suivants [31] :

- **Project Manager:** situé à gauche de l'écran, il permet de gérer les différents fichiers, modèles, paramètres, excitations et résultats liés à un projet HFSS. On y trouve également la hiérarchie des objets (modèle 3D, matériaux, ports, etc.).
- **Modéliseur 3D (3D Modeler) :** c'est l'espace central où l'utilisateur construit la géométrie de la structure. Il permet de visualiser le modèle sous plusieurs angles et d'effectuer des opérations de dessin, d'extrusion, de duplication, etc.
- **Fenêtre des propriétés:** cette zone affiche les propriétés détaillées de chaque élément sélectionné (dimensions, matériaux, paramètres, etc.), et permet leur modification.

- **barre d'outils**: comme dans de nombreux logiciels modernes, la partie supérieure de la fenêtre comporte un ruban contenant les outils principaux, classés par onglets : modélisation, assignation des matériaux, définition des ports et des conditions aux limites, exécution de la simulation, visualisation des résultats.
- **Barre de menu** : Contient toutes les fonctionnalités principales, telles que la création, l'ouverture, l'enregistrement de projets, ainsi que l'accès aux outils de simulation et d'analyse.
- **Arbre de conception du modelleur 3D** : Structure hiérarchique de l'ensemble des objets modélisés dans le projet ; il facilite la gestion et l'organisation des entités (solides, plans, ports, limites...).
- **Fenêtre de progression** : Affiche en temps réel l'avancement des tâches de simulation, d'analyse et de génération de maillage.
- **Message Manager** : Regroupe les messages d'état, avertissements, et erreurs rencontrés durant la configuration ou la simulation du projet.

III.4 Processus de fonctionnement HFSS

Le schéma suivant représente le processus HFSS

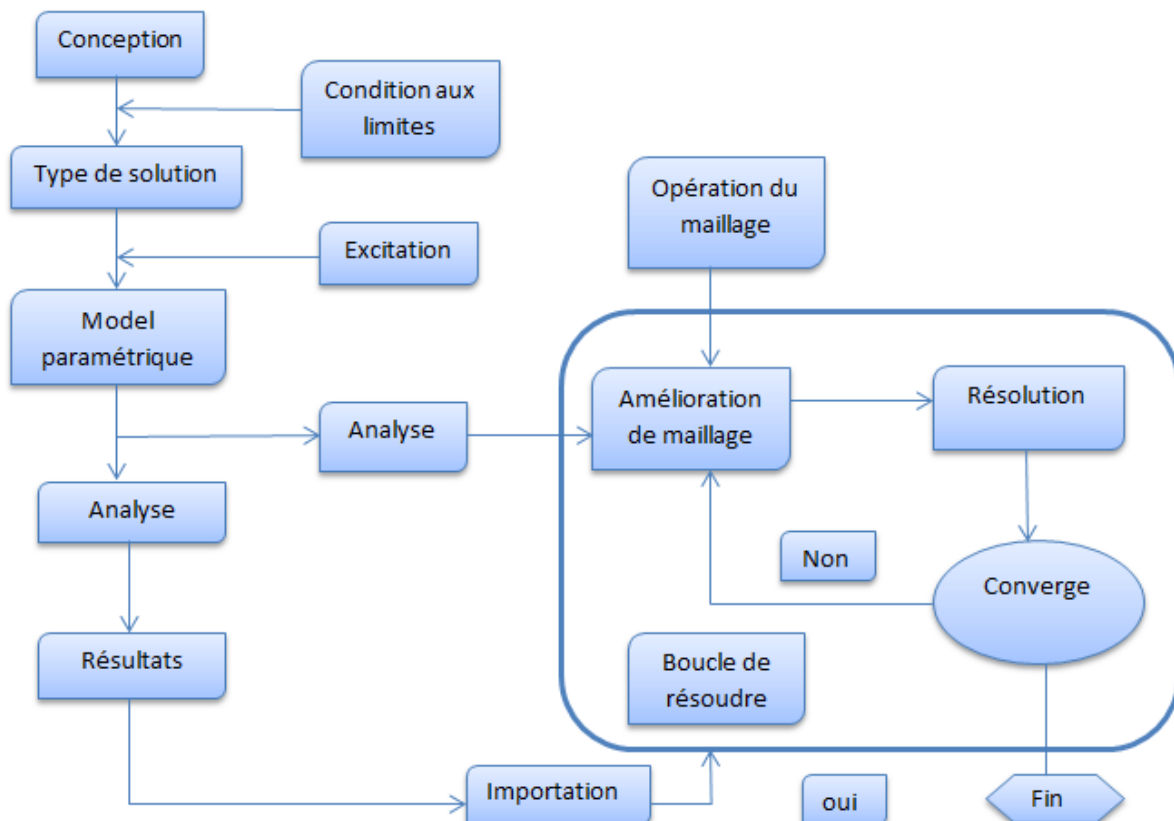


Figure III.2:Processus de création et de simulation d'un projet dans HFSS [32].

III.5 Avantage de HFSS

- **Haute précision électromagnétique :**

HFSS utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour résoudre les équations de Maxwell, offrant des résultats très précis pour la modélisation d'antennes, de guides d'ondes, de SIW, etc.

- **Simulation 3D complète**

Il permet de modéliser des structures électromagnétiques complexes en 3D, prenant en compte toutes les interactions réalistes des champs.

- **Analyse paramétrique facile**

HFSS permet d'automatiser des analyses paramétriques (variation de dimensions, matériaux...) pour optimiser rapidement un design sans repartir de zéro.

- **Large bibliothèque de matériaux et de ports**

Le logiciel propose une vaste base de matériaux (FR4, cuivre, etc.) et plusieurs types d'excitations (wave ports, lumped ports...) adaptées aux besoins spécifiques.

- **Intégration avec d'autres outils**

HFSS s'intègre facilement avec d'autres logiciels d'Ansys (comme Ansys Mechanical ou Circuit Designer) pour des analyses multi-physiques (électromagnétique + thermique, par exemple) [33].

III.6 Simulation d'un guide d'ondes SIW

La simulation d'un guide d'ondes intégré au substrat (SIW) a été réalisée à l'aide du logiciel HFSS, afin d'analyser le comportement du champ électromagnétique à l'intérieur de la structure. Le guide est formé par deux rangées de vias métalliques insérées dans un substrat diélectrique, assurant le confinement du champ comme dans un guide d'ondes métallique classique.

Ces paramètres ont été définis de manière à garantir une propagation efficace du mode fondamental dans la bande visée.

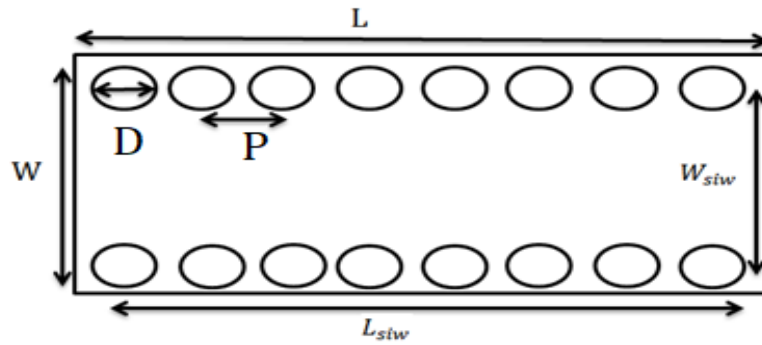


Figure III.3 : guide d'onde SIW

La figure ci-dessus montre la distribution simulée du champ électrique E_y dans la cavité SIW. Le champ est bien confiné entre les deux rangées de vias, ce qui valide la capacité de la structure à guider les ondes électromagnétiques de manière efficace. La variation d'intensité du champ, représentée en dégradé de couleurs, confirme que la propagation s'effectue selon le mode fondamental avec une bonne continuité entre l'entrée et la sortie.

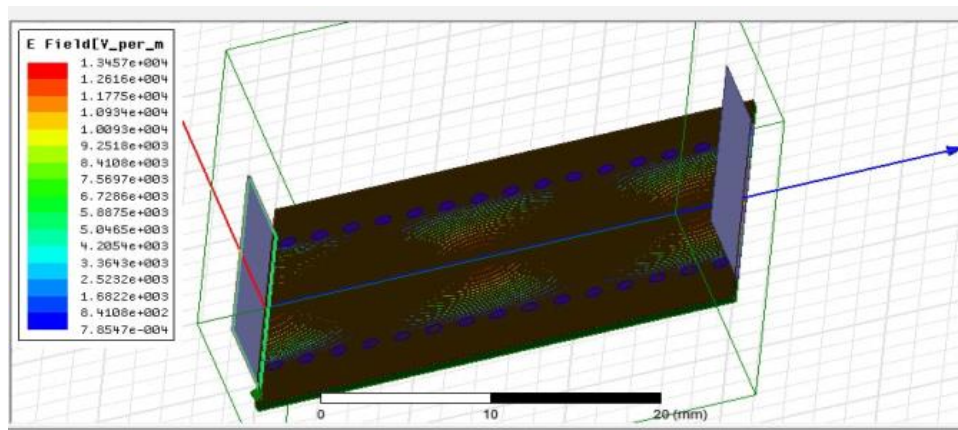


Figure III.4 : Structure du guide d'onde SIW.

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

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

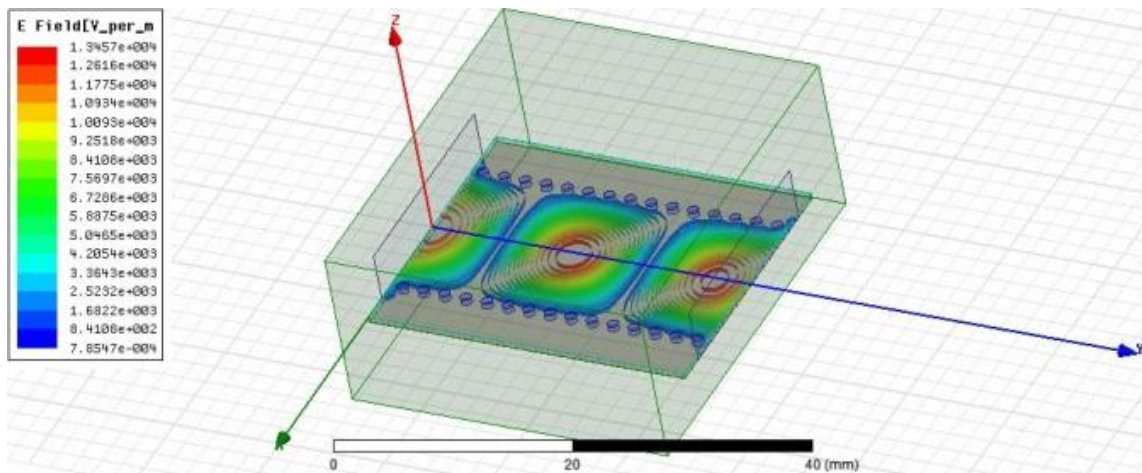


Figure III.5 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW

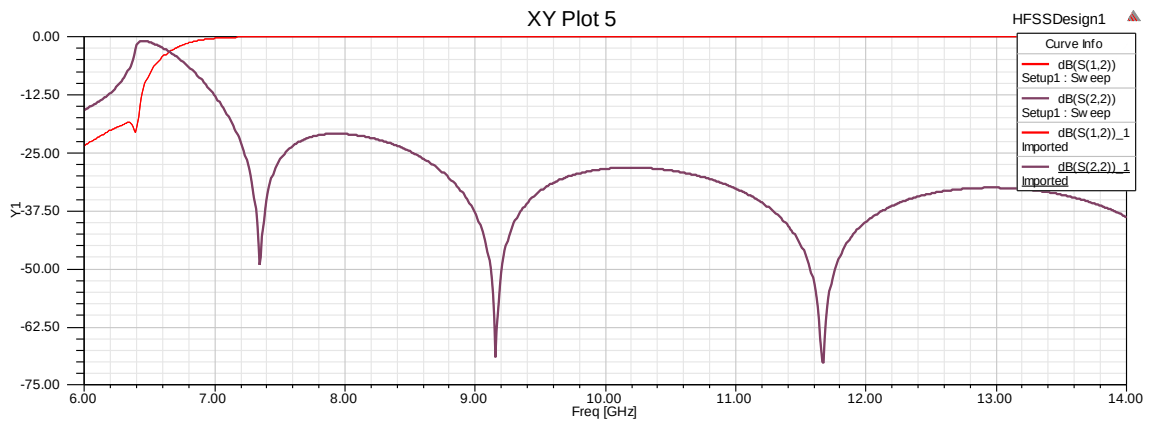


Figure III.6 : Résultats simulation d'un guide d'ondes

III.7 Conception d'un filtre à base d'un guide d'ondes SIW

Cette section traite de la conception d'un filtre basé sur un guide d'onde intégré au substrat (SIW) à deux ports, modélisé de manière équivalente à un guide d'onde rectangulaire classique. Elle met en évidence les dimensions géométriques clés nécessaires à la conception et à l'optimisation de la structure.

Le dispositif est construit sur un substrat diélectrique de hauteur **$h=1.6\text{mm}$** , avec une permittivité relative **$\epsilon_r=4.4$** (matériau de type FR4). Les couches conductrices supérieure (patch) et inférieure (plan de masse) sont en cuivre, avec une épaisseur de **0.017mm** .

La cavité SIW est formée par deux rangées de vias métallisés de diamètre D , espacés d'un pas P . Ces vias assurent une continuité électrique sur les bords latéraux du guide, permettant le confinement du champ électromagnétique et reproduisant le comportement d'un guide d'onde métallique.

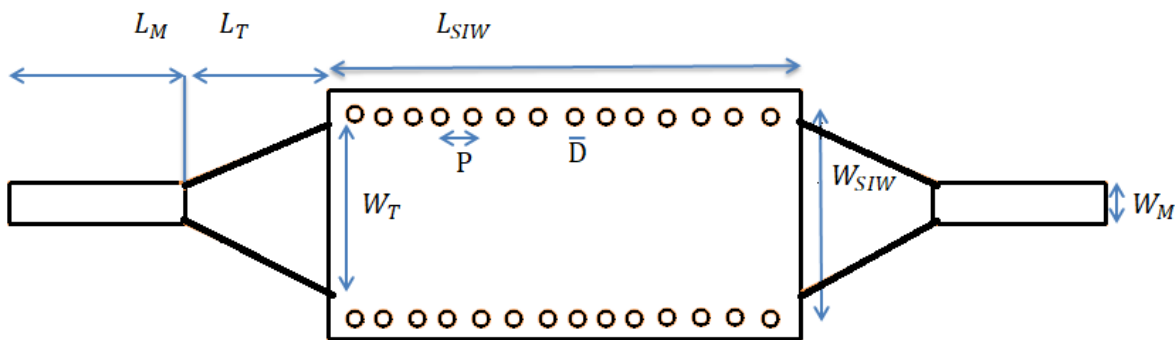


Figure III.7 : Guide d'ondes SIW avec les paramètres

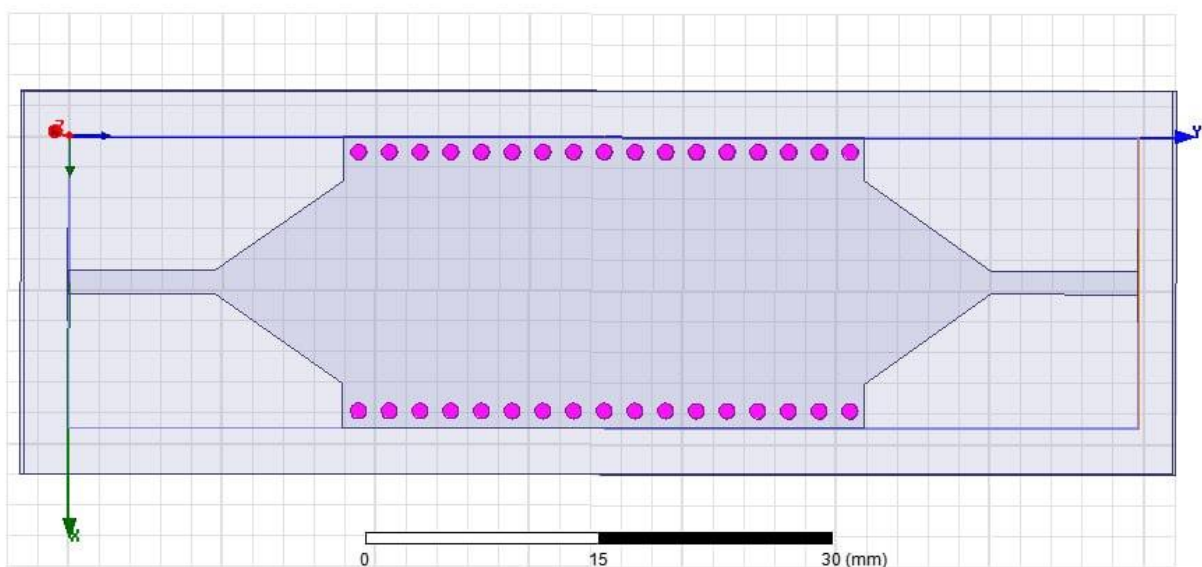


Figure III.8 : structure1 d'un Guide d'ondes SIW

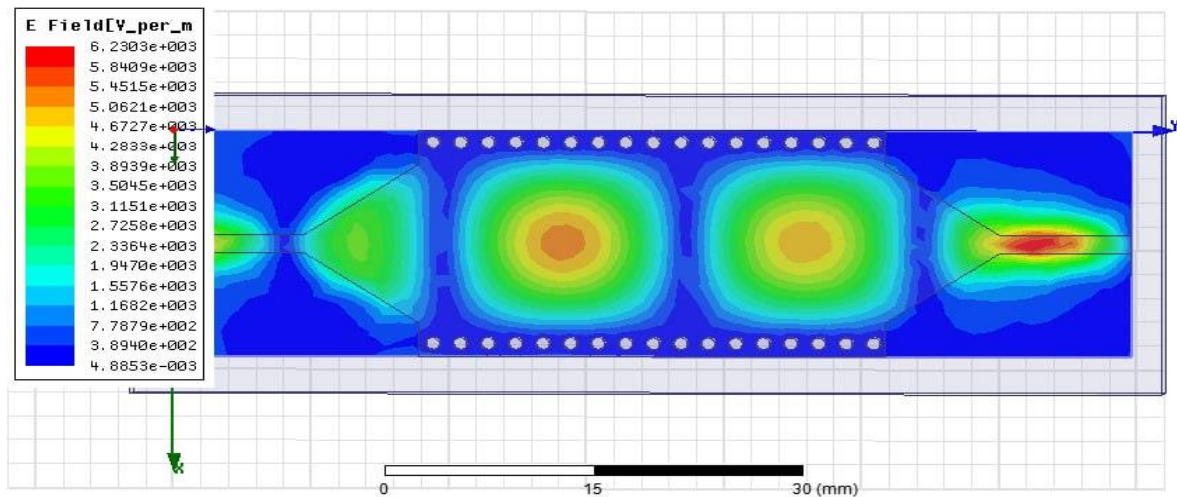


Figure III.9 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW

Tableau III.2 : Paramètres du guide d'onde SIW

paramètres	L	W	W_{SIW}	L_{SIW}	L_T	L_M	W_T	W_M	D	P
Valeur [mm]	69.64	18.96	16.96	33.92	8.31	9.55	13.22	1.53	1	2

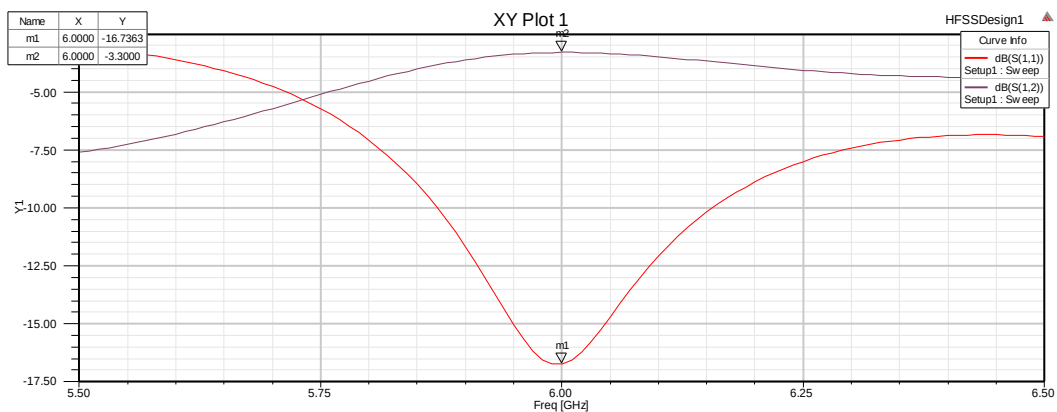


Figure III.10 : Résultats simulation d'un guide d'ondes

Les résultats de simulation présentés dans la figure III.10 montrent une bonne performance du filtre SIW à la fréquence de fonctionnement de 6 GHz. Le coefficient de réflexion S_{11} atteint un minimum de -16.7383 dB, indiquant une faible réflexion de la puissance incidente et donc une bonne adaptation d'impédance à l'entrée du guide. Par ailleurs, le coefficient de transmission S_{21} atteint une valeur maximale de -3.3000 dB, traduisant une transmission relativement efficace de la puissance à travers la structure. Ces résultats confirment que la conception est bien adaptée pour fonctionner autour de 6 GHz.

III.7.1 Topologie 1

Nous allons essayer d'injecter des vias métalliques à l'intérieur du guide dans le but de concevoir des cavités résonantes. L'efficacité de l'utilisation des vias dans la conception de filtres a déjà été démontrée par de nombreuses recherches. Le diamètre de via est 0.66 et la position entre les vias est 1.33. Par ailleurs, la présence de quatre vias internes supplémentaires (en violet) situés à proximité de l'entrée des cavités indique une tentative d'ajustement fin de la réponse fréquentielle du filtre.

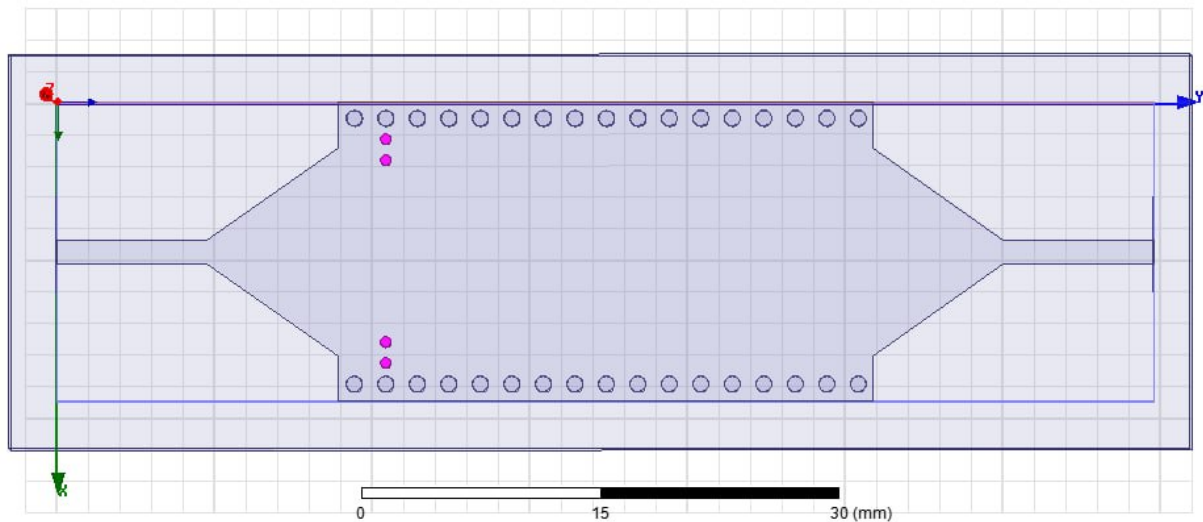


Figure III.11 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 1^{ère} topologie

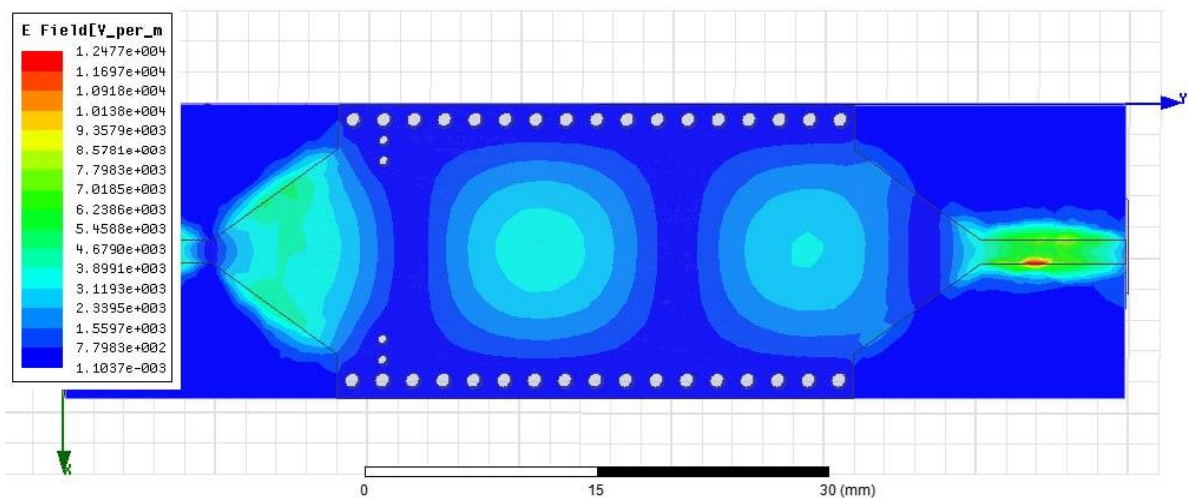


Figure III.12 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 1^{ère} topologie

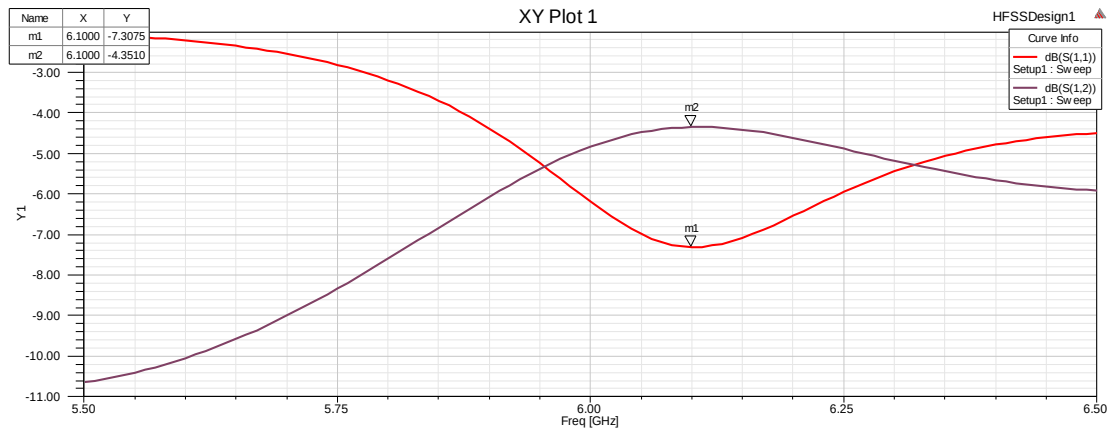


Figure III.13 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 1^{ère} topologie

Les résultats simulés des paramètres S simulés montrent une résonance autour de 6.10 GHz. Le coefficient de réflexion S_{11} , avec un minimum de -7,3075 dB, indique une faible adaptation d'impédance, signifiant qu'une part non négligeable de la puissance est réfléchi. Le coefficient de transmission S_{21} est de -4,3510 dB à la même fréquence, traduisant une transmission modérée avec des pertes dues au substrat, aux conducteurs et à la transition microruban-SIW. Ces résultats montrent que la structure est fonctionnelle, mais nécessite des améliorations pour atteindre des performances optimales.

III.7.2 Topologie 2

Cette figure illustre la structure de la deuxième topologie du filtre à guide d'ondes SIW. En plus des rangées de vias latéraux formant les parois du guide, on observe quatre vias internes répartis symétriquement : deux sont situés à proximité de l'entrée et deux autres près de la sortie de la cavité.

Ces vias internes agissent comme des éléments de réglage fin, modifiant localement la distribution du champ électromagnétique et influençant la sélectivité ou la fréquence de coupure du filtre. Leur position stratégique permet de contrôler l'évolution du champ dans la cavité et d'ajuster la réponse fréquentielle de l'ensemble.



Figure III.14 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 2^{ème} topologie

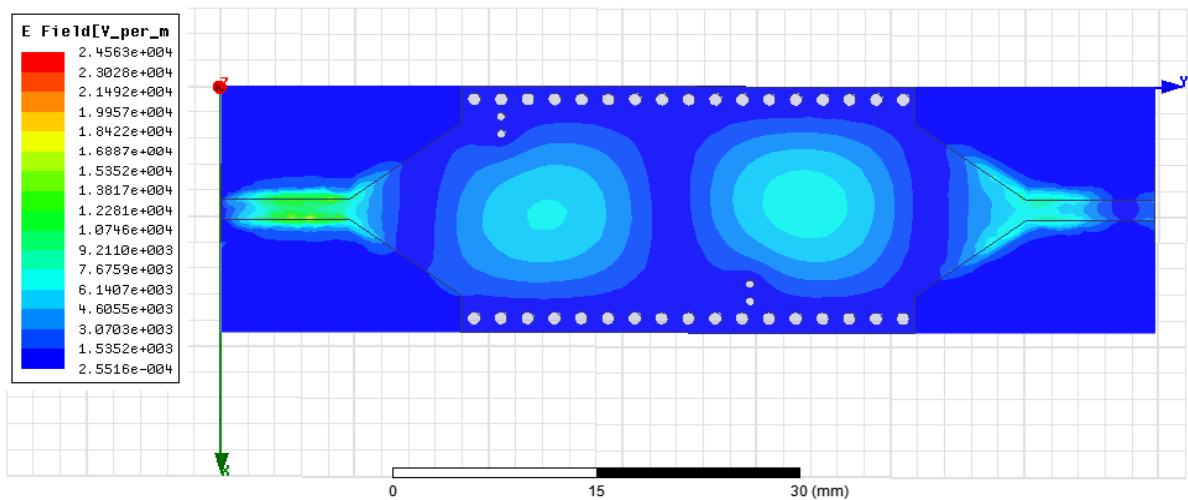


Figure III.15 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 2^{ème} topologie



Figure III.16 : Résultats simulation d'un guide d'ondes SIW pour la 2^{ème} topologie

À une fréquence de 6.12 GHz, les résultats de simulation présentés dans la figure III.16 indiquent une réflexion de puissance modérée, avec un coefficient de réflexion S_{11} atteignant un minimum de -8.6850 dB. Cela traduit une adaptation d'impédance imparfaite, avec une part significative de la puissance incidente réfléchie à l'entrée du filtre.

Le coefficient de transmission S_{21} atteint quant à lui une valeur maximale de -3.8522 dB, ce qui indique une transmission partielle de la puissance. Comparée à des conceptions plus optimisées, cette performance peut être qualifiée de moyenne, suggérant que des pertes subsistent, possiblement dues à une transition mal adaptée ou à l'utilisation d'un substrat à pertes comme le FR4.

III.7.3 Topologie 3

La structure est composée d'une cavité rectangulaire centrale bordée par deux rangées parallèles de vias métalliques qui reproduisent les parois d'un guide d'ondes rectangulaire traditionnel. Ces vias assurent le confinement des ondes dans le plan du substrat, tout en minimisant les pertes latérales

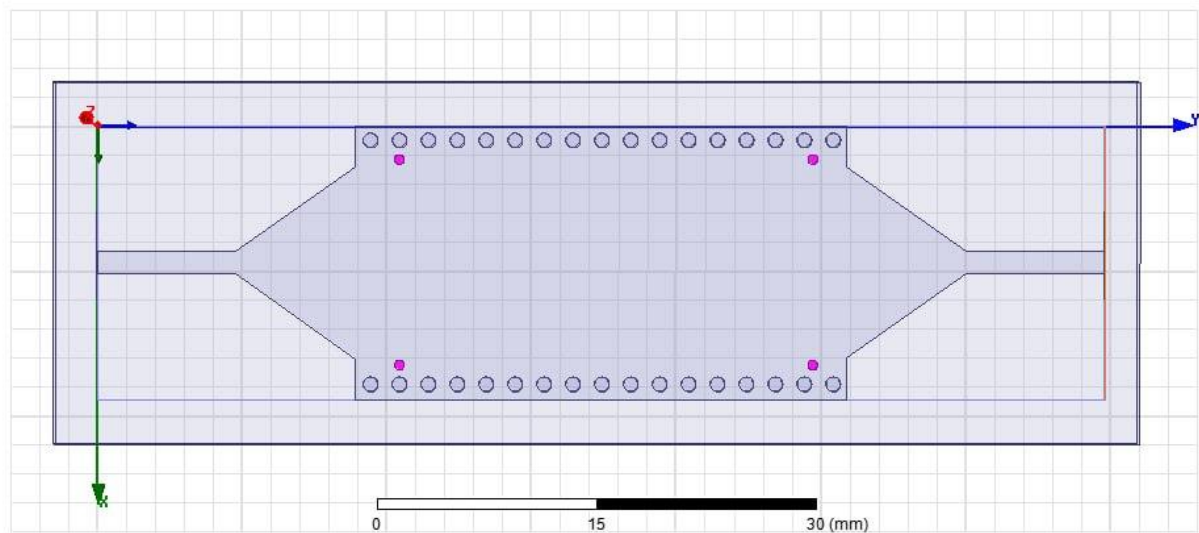


Figure III.17 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 3^{ème} topologie

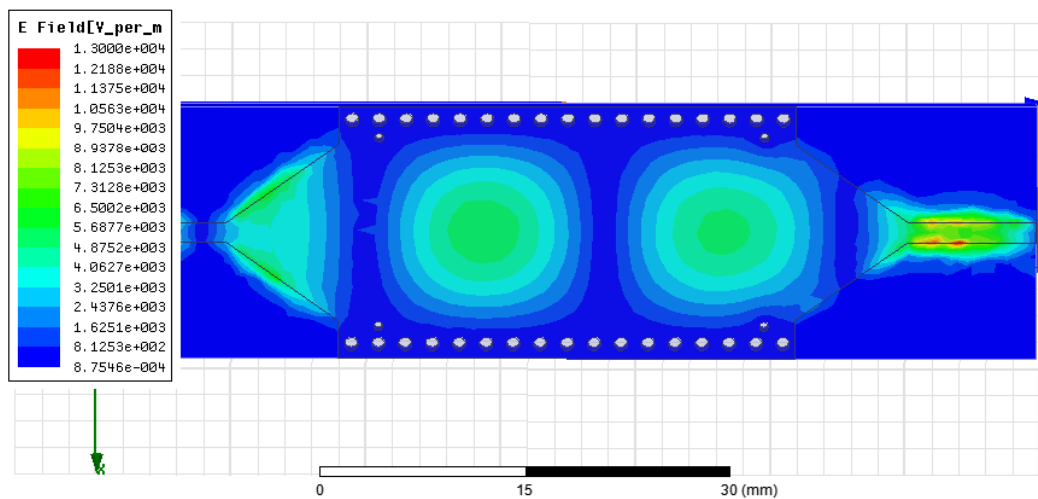


Figure III.18 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 3^{ème} topologie

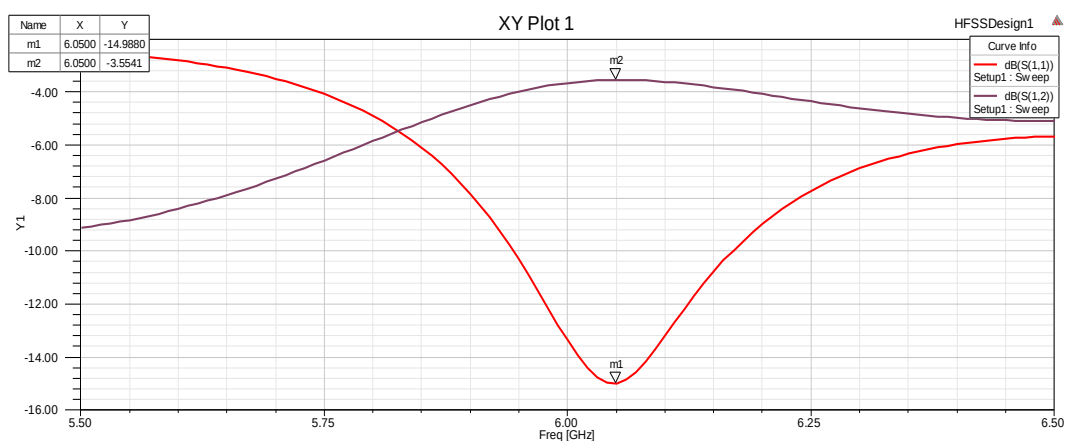


Figure III.19 : Résultats simulation d'un guide d'ondes SIW pour la 3^{ème} topologie

La figure ci-dessus montre les résultats de la simulation électromagnétique du filtre SIW sous HFSS, exprimés en termes de paramètres S sur la bande de fréquence [5.5 GHz – 6.5 GHz]. Deux courbes sont présentées S_{11} coefficient de réflexion à l'entrée, S_{21} coefficient de transmission entre le port 1 et le port 2. À la fréquence centrale de 6 GHz, on observe :

- Un minimum de $S_{11} \approx -14.988$ dB, indiquant une bonne adaptation d'impédance à l'entrée du filtre.
- Un maximum de $S_{21} \approx -3.554$ dB, représentant le niveau de transmission à travers la structure.

Ces valeurs traduisent un bon comportement de filtrage, avec une perte d'insertion relativement faible et une réflexion acceptable. L'atténuation hors bande augmente, ce qui montre une certaine sélectivité du filtre, bien que l'amélioration de la pente ou de la bande d'arrêt puisse encore être envisagée.

III.7.4 Topologie 4

Cette figure présentant quatre vias internes, positionnés en deux paires symétriques au sein de la cavité. Ces vias sont répartis de manière asymétrique, légèrement décalés vers la partie centrale et la sortie du guide. Cette configuration vise à combiner les avantages de la concentration du champ par résonateurs internes tout en perturbant localement la distribution pour ajuster la fréquence de résonance ou la sélectivité du filtre.

Comme dans les topologies précédentes, les vias latéraux assurent le confinement du champ, et les transitions microruban–SIW permettent l'alimentation. L'objectif de cette topologie est d'examiner l'impact du positionnement non centralisé des vias internes sur les performances globales.

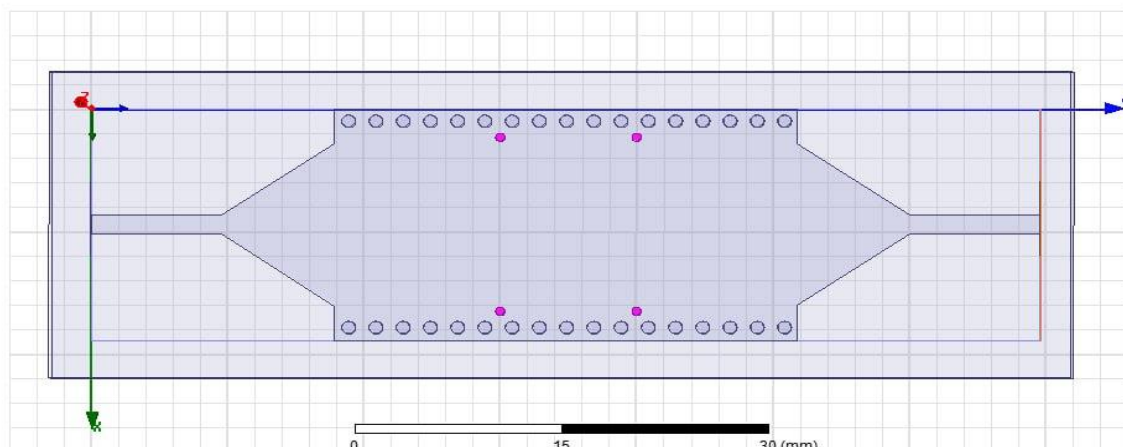


Figure III.20 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 4^{ème} topologie

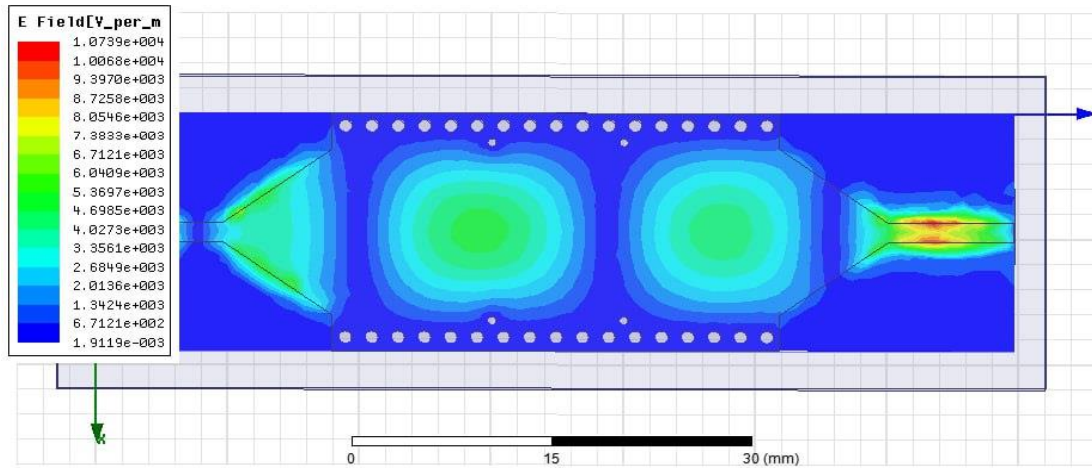


Figure III.21 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 4^{ème} topologie

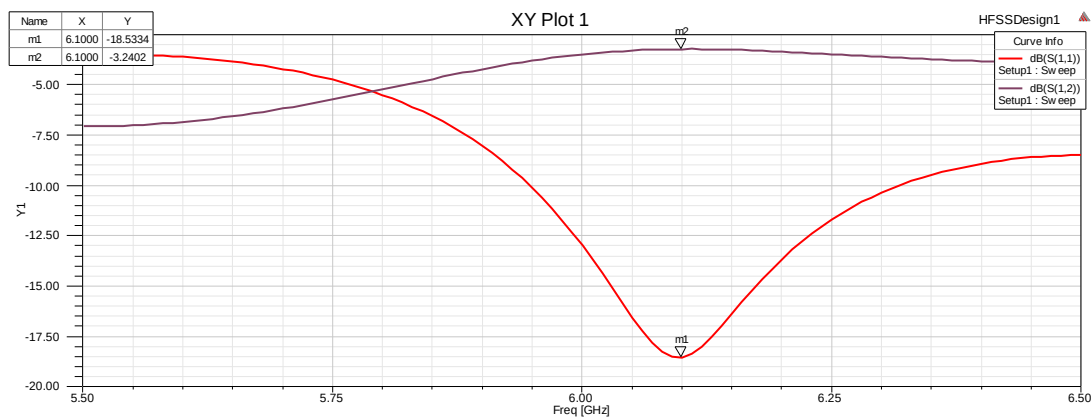


Figure III.22 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 4^{ème} topologie

À la fréquence centrale de 6.10 GHz, les résultats sont nettement améliorés par rapport à la version initiale :

- $S_{11} \approx -18.53$ dB, indiquant une meilleure adaptation d'impédance à l'entrée.
- $S_{21} \approx -3.24$ dB, correspondant à une transmission améliorée.

Cette amélioration peut être attribuée à des ajustements géométriques tels que : La position ou le diamètre du via interne. On observe également une augmentation de la sélectivité, avec un creux plus marqué dans S_{11} et une meilleure stabilité de la courbe S_{21} autour de la fréquence centrale. Cela signifie que le filtre présente une réponse plus nette et mieux adaptée aux applications ciblées.

III.7.5 Topologie 5

Comme dans les cas précédents, les rangées de vias métalliques latéraux assurent le confinement du champ électromagnétique à l'intérieur du guide, imitant le comportement d'un guide d'ondes rectangulaire classique.

Une particularité de cette conception réside dans la présence de quatre vias internes (en violet), cette fois positionnées à proximité de la sortie de la cavité. En effet, ces vias peuvent agir comme des éléments perturbateurs, influençant le profil de champ à la sortie du filtre et ajustant la pente de coupure ou la sélectivité

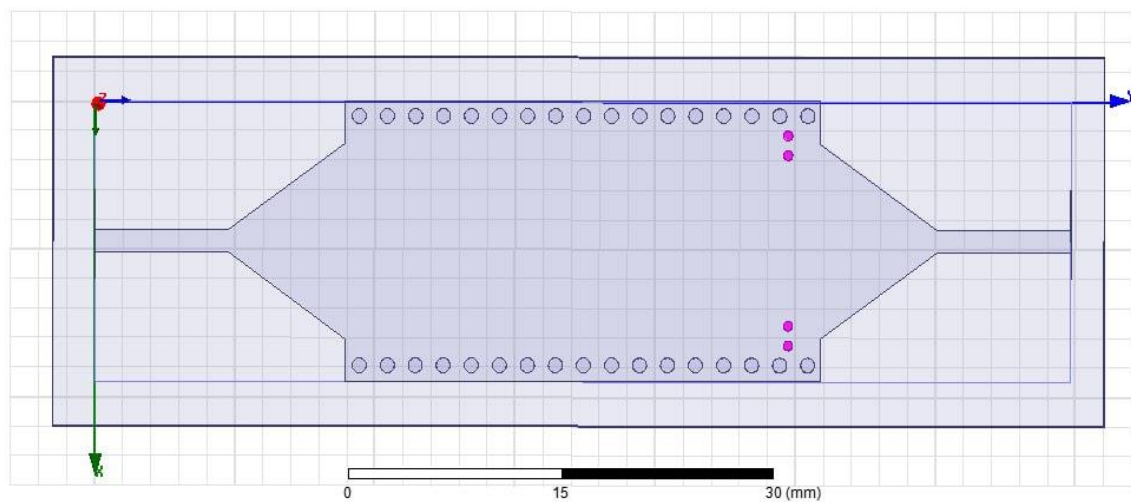


Figure III.23 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 5^{ème} topologie

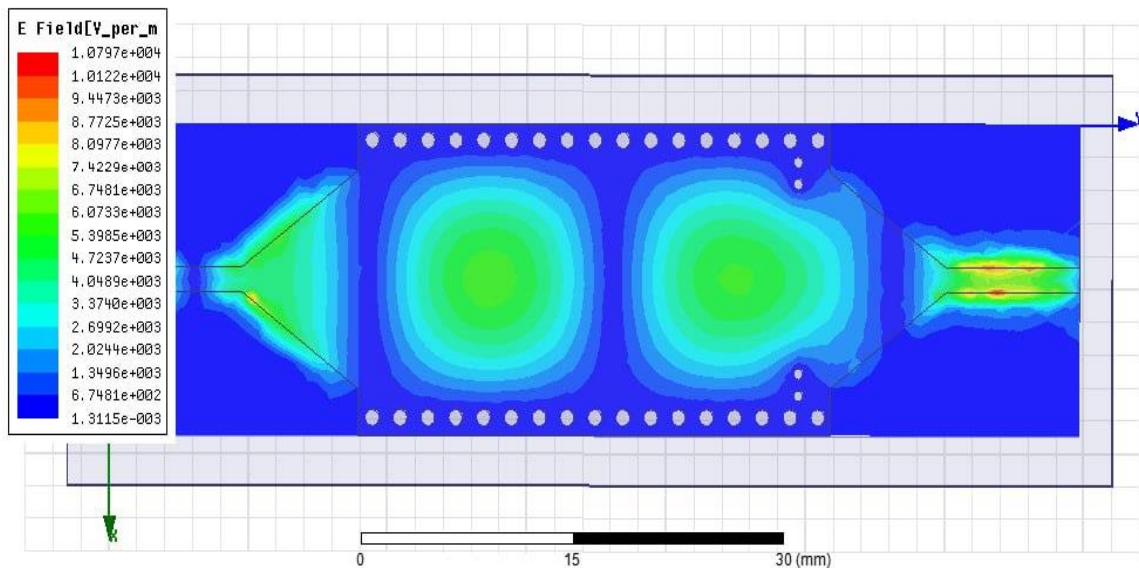


Figure III.24 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 5^{ème} topologie

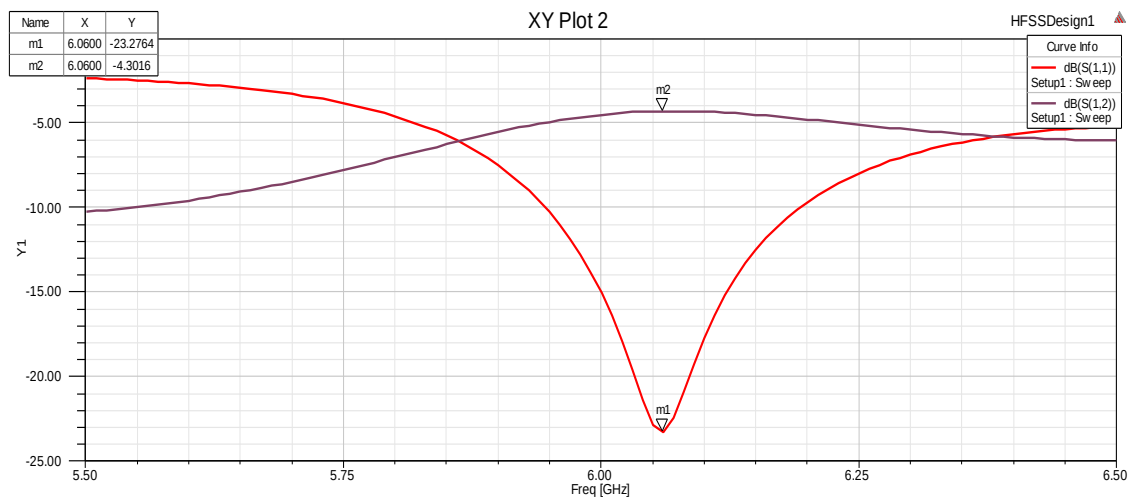


Figure III.25 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 5^{ème} topologie

La figure présentée met en évidence le comportement fréquentiel du filtre à guide SIW en termes de réflexion S_{11} et de transmission S_{21} . À 6,06 GHz, la réponse en réflexion affiche une valeur de -23,2764 dB, ce qui traduit une adaptation correcte de l'impédance d'entrée, bien que légèrement inférieure à celle observée précédemment.

Concernant la transmission, la valeur de S_{21} atteint -4,3016 dB, indiquant que le signal est partiellement atténué lors de son passage à travers le filtre. Cette perte d'insertion reste acceptable dans un premier prototype, mais elle suggère qu'une optimisation de la structure SIW (dimensions, type de transition, placement des via métalliques) pourrait permettre d'améliorer l'efficacité de transmission.

En somme, le filtre reste fonctionnel autour de la fréquence cible de 6 GHz, mais une marge d'amélioration subsiste pour atteindre des performances plus proches des spécifications idéale, notamment en réduisant les pertes d'insertion.

III.7.6 Topologie 6

Dans cette version, on remarque la présence de deux vias internes (représentés en violet) situés de manière symétrique au centre de la cavité. Contrairement à la version précédente, où plusieurs vias supplémentaires étaient placés à l'entrée de la cavité, ici leur positionnement suggère un rôle de résonateur localisé ou de réglage fin de la fréquence centrale du filtre.

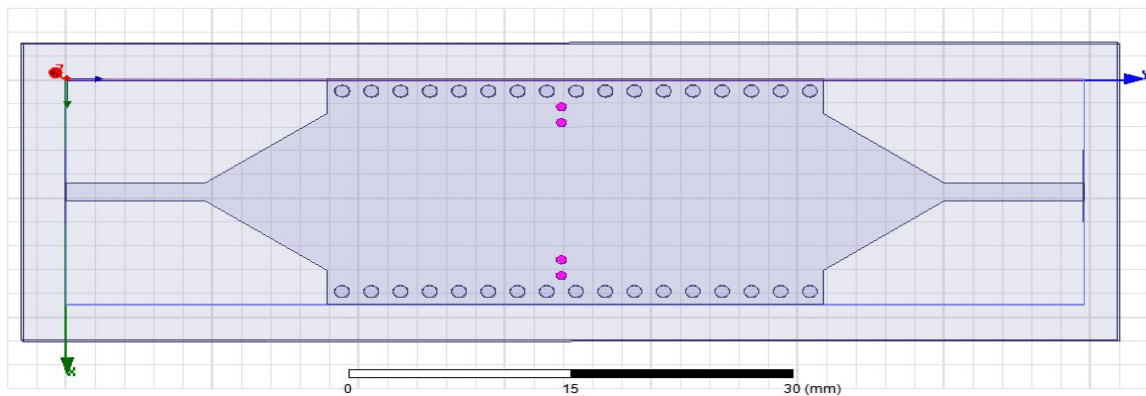


Figure III.26 : structure d'un filtre à Guide d'ondes SIW pour la 6^{ème} topologie

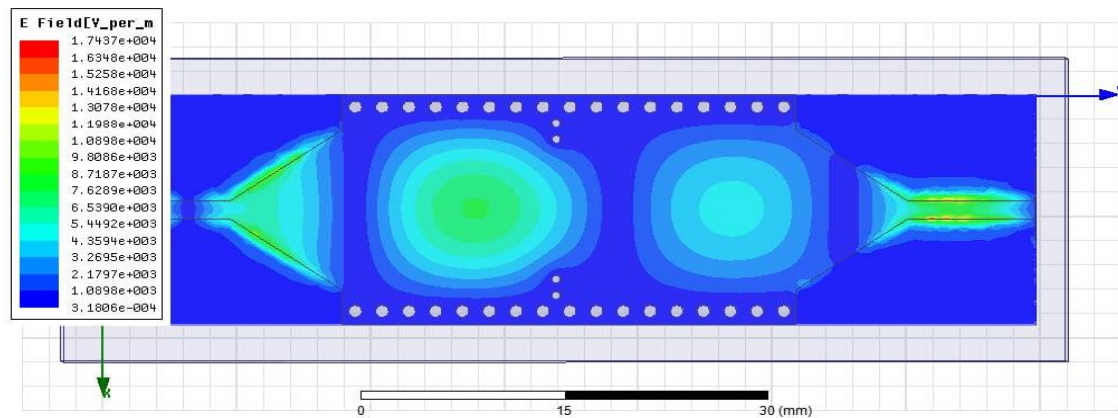


Figure III.27 : Distribution du champ électrique dans le guide SIW pour la 6^{ème} topologie

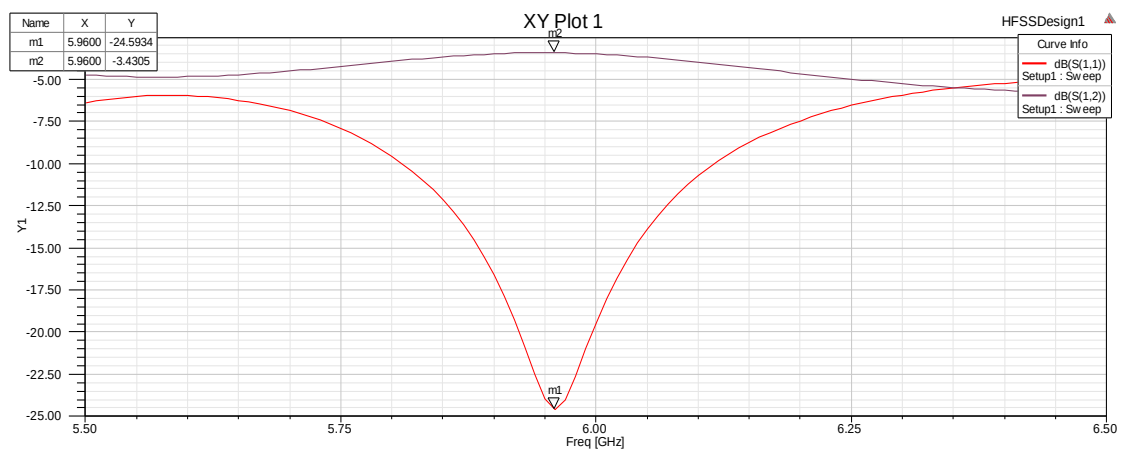


Figure III.28 : Résultats simulation d'un guide d'ondes pour la 6^{ème} topologie

Les résultats de simulation du filtre à guide d'ondes intégré (SIW) montrent une bonne adaptation à la fréquence centrale de 5,960 GHz, avec un coefficient de réflexion S_{11} de -24,5934 dB. Le coefficient de transmission S_{21} atteint -3,4305dB, indiquant une transmission acceptable mais perfectible. Ces performances confirment le bon fonctionnement du filtre en termes d'accord, tout en suggérant des possibilités d'optimisation pour réduire les pertes d'insertion

III.8 Comparaison entre les 6 topologies

Tableau III.3 : Résultats simulation pour les 6 topologies

Topologie	F [GHz]	S_{11} [dB]	S_{21} [dB]
1	6.10	-7,3075	-4,3510
2	6.12	-8.6850	-3.8622
3	6	-14.988	-3.554
4	6.10	-18.5334	-3.2402
5	6.06	-23,2764	-4,3016
6	5.96	-24,5934	-3,4305

S_{11} (réflexion) :

- Une valeur plus faible (négative) signifie moins de signal réfléchi, donc meilleure adaptation.
- Topologie 6 est clairement le meilleur ici (-24.5934 dB), suivie par la 4 et 5.
- Les topologies 1 et 2 présentent une mauvaise adaptation, surtout la 1 (-7.3075 dB).

S_{21} (transmission) :

- Une valeur plus proche de 0 dB indique moins de pertes dans la transmission.
- La topologie 4 a la meilleure transmission (-3.202 dB).
- Les autres sont plus atténuées (pire pour la topologie 1).

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée de la conception, de la modélisation et de la simulation d'un filtre micro-onde basé sur la technologie SIW en utilisant le logiciel HFSS. Cette technologie innovante permet une intégration compacte des guides d'ondes dans des circuits imprimés tout en conservant de bonnes performances électromagnétiques.

Après avoir exposé les fonctionnalités du logiciel HFSS et la méthodologie de simulation, plusieurs topologies de filtres SIW ont été explorées. Les résultats des simulations ont mis en évidence l'influence cruciale de la géométrie, du placement des vias métalliques et des dimensions de la cavité sur les performances du filtre, notamment en termes d'adaptation d'impédance (paramètre S_{11}) et de transmission (paramètre S_{21}).

Parmi les six topologies étudiées, la topologie 6 s'est révélée la plus performante, avec un excellent coefficient de réflexion de -24.5934 dB et une transmission acceptable de -3.44 dB à

6 GHz. Cela démontre que le positionnement judicieux de vias internes peut significativement améliorer les caractéristiques du filtre.

En somme, ces travaux confirment le potentiel des structures SIW pour la réalisation de filtres micro-ondes compacts et performants, tout en soulignant l'importance d'une conception optimisée pour atteindre les performances souhaitées. Des perspectives d'amélioration incluent l'utilisation de substrats à faibles pertes et l'optimisation fine des dimensions géométriques et transitions d'entrée/sortie.

Dans ce mémoire, nous avons étudié la conception de filtres micro-ondes basés sur la technologie du guide d'ondes intégré au substrat (SIW), qui constitue une solution innovante et performante pour les applications en radiofréquence et micro-ondes.

Dans un premier temps, nous avons présenté les concepts fondamentaux relatifs aux filtres, leur rôle essentiel dans les systèmes de communication, ainsi que les différentes classifications et technologies de réalisation. Cette étape nous a permis de mettre en évidence les limites des filtres conventionnels, notamment en termes de compacité, de pertes et d'intégration aux hautes fréquences.

Par la suite, nous avons exploré en détail la technologie SIW, en étudiant sa structure, ses caractéristiques, ainsi que les différents types de filtres pouvant être réalisés à partir de cette technologie. Il a été constaté que la technologie SIW permet de bénéficier des avantages des guides d'ondes métalliques tout en offrant la possibilité d'intégration sur des circuits imprimés standards, réduisant ainsi les coûts de fabrication et l'encombrement.

Enfin, une étude pratique a été menée à travers la conception et la simulation de filtres SIW à l'aide du logiciel HFSS. Cette étape a permis de valider les performances des filtres conçus, en mettant en évidence leur sélectivité, leurs faibles pertes d'insertion et leur adaptabilité aux systèmes modernes de télécommunication.

Ainsi, la technologie SIW s'impose aujourd'hui comme une alternative efficace et prometteuse pour la conception de filtres micro-ondes, notamment dans les domaines spatial, radar, des communications mobiles et des systèmes sans fil

Dans la continuité de ce travail, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés : l'optimisation des filtres SIW pour des bandes de fréquences spécifiques ou pour des applications multi-bandes, l'intégration de structures SIW complexes avec d'autres dispositifs passifs ou actifs (antennes, coupleurs, amplificateurs), l'exploration de nouvelles techniques de miniaturisation et d'amélioration des performances, à travers l'utilisation de matériaux avancés ou de structures à base de méta matériaux.

-
- [1] M. Hadji et B.Naam, « Etude et conception de filtre passe bande ultra large bande pour les systèmes de communication sans fil », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [2] Raghav Kapur, « <https://www.everythingrf.com/community/what-are-waveguides> » Article web, 20 janv 2025
- [3] S. DAMANE « Conception et simulation des Filtres Passe-bande à base de la Technologie SIW Opérant en bandes X, Ku pour des applications satellitaires » mémoire de fin d'étude, TIZI-OUZOU : Université Mouloud Mammeri, 06/2021.
- [4] D. Grenier, « Electromagnétique et transmission des ondes » Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Québec, 2012
- [5] CHENINA Hachemi, « Etude et conception d'un filtre guide d'onde intégré au substrat avec une perturbation via », Mémoire Master de Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022
- [6] P. Matthews, « the-facts-about-microstrip-filters », Knowles Precision Devices, 4 janv . 2023
- [7] M. CHATRAS, « Filtres micro-usinés à bande étroite pour les applications spatiales », Thèse de Docteur de l'Université De Limoges, 15 Décembre 2003
- [8] D.E. Goldberg, « Algorithmes génétiques. Exploration, optimisation et apprentissage automatique », Addison-Wesley. France, 1994
- [9] A. Ibtissem, « Modélisation des filtres à cavité rectangulaire comportant des structures planaires à plusieurs niveaux de métallisation et à substrats multicouches homogènes et inhomogènes », faculté des sciences et de la technologie, univ bba, 2017
- [10] N. Hassine, « Etude de la fiabilité de composante BAW pour des applications RF », université Joseph-Fourier – Grenoble I ,2009
- [11] JJ Delisle, « the Difference between Bulk Acoustic Wave (BAW) & Surface Acoustic Wave (SAW) RF Filters », Article par Mouser Electronics, 20 Avril 2023
- [12] Mr : S.RABAHALLAH, « Identification et filtrage des courants harmoniques générés par une A.S.I », 2013
- [13] C. Bengin (Ed.), « Advances in Multi-Band Microstrip Filters, EuMA High-frequency Technologies Series, Université de Cambridge, 2015
- [14] T. Archambeau , « cours électronique », Articles de elektronique.fr, 2006
- [15] m. bramgui, k. benslaim, « étude, conception et simulation d'un filtre passe bande à base de la technologie siw » université saad dahlab de blida, p 19 p28, septembre 2020
- [16] R. Ghayoula, « Substrate Integrated Waveguide (SIW) Antennas and Components for Wireless Communications », in Recent Advances in Wireless Communications and Networks, InTech, 2011

- [17] S. Doucha et M. Abri, Laboratoire de Télécommunications Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaïd -Tlemcen BP 230, Pôle Chetouane, 13000 Tlemcen- Algérie.
- [18] M .Abr, Laboratoire de Système et Technologie de l'Information et de la Communication (STIC) Université Abou-Bekr Belkaïd –Tlemcen
- [19] Hanane, S.SENHADJI et A .KADROUCI « Nouvelles structures des réseaux d'antennes antipodales de type Vivaldi ULB à rayonnement longitudinal en technologie SIW ». Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2016.
- [20] AI. Alhzzoury, « Contribution à la modélisation des structures SIW et SINRD pour application micro-ondes et télécommunication », Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2013. Français.
- [21] K. Karima D. Meriem, « Etude et conception d'un filtre guide d'onde intégré au substrat avec une perturbation via », Université Kasdi Merbah Ouargla, page 26, juin 2022
- [22] J. Albuquerque, Directeur principal, Ingénierie du spectre, Intelsat, « les opérateurs de satellites contestent l'utilisation de la bande C par le service mobile », Conférence mondiale des Radio communication (CMR), Union Internationale des télécommunications, Avril 2015
- [23] Bozzi, M., et al, « Review of Substrate-Integrated Waveguide Circuits and Antenna » (IET Microwave, Antenna & Propagation), **Livres** Section sur les filtres SIW à cavités couplées, **(2011)**
- [24] K. Wu et al., « Substrate Integrated Waveguide: A New Waveguide Technology for Microwave and Millimeter-Wave Applications », *IEEE MTT*, 2019
- [25] G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, « Microwave Filters, Impedance- Matching Networks, and Coupling Structures », Boston:Artech House, 1980, 1096 p. (ISBN: 0890060991).
- [26] «The Integration of Rectangular SIW Filter and Microstrip Patch Antenna Based On Cascaded Approach » Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012, MUCET 2012 Part 3 - Civil and Chemical Engineering
- [27] H.CHERIFI, L.MIRAUI « Conception des Nouvelles Configurations des filtres Hyperfréquences par Technologie SIW », mémoire de master, université de Tlemcen, juin 2017

-
- [28] M. Le Coq, E. Rius, C. Quendo, B. Potelon, J.-F. Favennec, L. Estagerie, P. Moroni, Y. Clavet, et A. Manchec, « Miniature microstrip filter using high permittivity ceramic substrates ($\epsilon_r = 90$) », IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2011
- [29] P.Y. Qin, C.H. Liang, B. Wu et T. Su, « Novel Dual-Mode Bandpass Filter With Transmission Zeros using Substrate Integrated Waveguide Cavity », Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Taylor & Francis, November 2014.
- [30] Ansys, Inc., Ansys HFSS: 3D High Frequency Electromagnetic Simulation Software, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>, consulté en avril 2025.
- [31] **ANSYS, Inc.**, *ANSYS HFSS User's Guide*, Release 15.0, Canonsburg, PA, USA, 2014.
- [32] Deslandes, D., & Wu, K, « Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form », IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 11(2), 68–70, (2001)
<https://doi.org/10.1109/7260.914305>
- [33] A. Taflov, « High-Frequency Electromagnetic Simulation Using HFSS », Ansys Corporation, 2005.