

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

TITRE DU MÉMOIRE

Conception et Optimisation d'un Réseau d'Antenne Yagi Alimentée par un Guide d'Ondes GIS en Mode TE50 pour une Fréquence de 5,8 GHz.

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

PAR

Ridha Omrani

Octobre 2024

Jury d'évaluation

Président du Jury : Pr. Michael Korwin-Pawlowski

Membre du Jury : Pr. Eftimov Tinko

Membre du Jury : Pr. Mourad Nedil

Directeur de recherche : Pr. Halim Boutayeb

Mémoire accepté le :

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. En premier lieu, je remercie sincèrement mon directeur de mémoire, le professeur Halim Boutayeb, pour son encadrement éclairé, ses précieux conseils et sa disponibilité sans faille tout au long de ce projet. Ses connaissances approfondies en domaine des antennes, composants et systèmes radiofréquences pour les réseaux de communications émergents et futurs (5G et 6G) ont été d'une aide inestimable pour mener à bien mes recherches. Je souhaite également remercier Madame Siwar Louati, pour son soutien technique. Ses connaissances approfondies en simulation électromagnétique, notamment sur HFSS, m'ont permis de mener à bien ce projet. Ses conseils avisés ont grandement contribué à la qualité de ce travail. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants-chercheurs du département d'informatique et ingénierie pour la richesse de leurs enseignements et la stimulation intellectuelle qu'ils m'ont apportée. Enfin, je voudrais remercier chaleureusement ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours.

Table des matières :

Remerciements	2
Liste des figures :	5
Liste des tableaux	6
Résumé	7
Abstract	8
Chapitre 1 : Introduction	9
1.1 Contexte de la recherche	9
1.2 Problématique	9
1.3 Objectifs de la recherche	10
Les objectifs spécifiques :	10
1.4 Justification de la recherche	10
1.5 Structure du mémoire	11
Chapitre 2 : Revue de littérature	12
2.1.1 Introduction	12
2.1.2 Caractéristiques modales	13
2.1.3 Paramètres des guides d'ondes intégrés au substrat	14
2.1.4 Applications des guides d'ondes intégrés au substrat :	17
2.1.5 Transition ligne micro-ruban guide d'ondes intégré au substrat	19
2.2 Antennes Yagi et ces applications :	19
2.7 Conclusion :	20
Chapitre 3 : Conception et simulation	21
3.1 Conception et simulation de l'antenne Yagi-Uda élémentaire :	22
3.1.1 Optimisation d'Antenne Yagi-Uda :	24
3.1.2 Étude paramétrique :	26
3.2 Conception et simulation de diviseur de puissance GIS en mode TE₅₀ :	29
3.2.1. Conception et simulation du diviseur de puissance type T :	30
3.2.2. Conception et simulation du diviseur de puissance GIS en mode TE₅₀	33
3.2.3 Etude paramétrique	36
3.2.3.1. Influence de la largeur d_vias sur les performances du GIS	36

3.2.3.2. Effet de la largeur de la ligne de transmission (W_{siv}) sur les caractéristiques du GIS.....	37
3.2.3.3. Impact de la longueur de la fente (L_s) sur la fréquence de résonance	38
3.2.3.4. Influence de la largeur de la fente (W_{fs}) sur les performances du GIS	39
3.2.3.5. Étude paramétrique globale : influence des dimensions géométriques sur le comportement du GIS	40
3.3. Conception et simulation du réseau d'antenne Yagi Uda a 5 éléments :	41
3.3.1. Comparaison	45
3.3.2 Prochaines étapes :.....	45
Chapitre 4 : Conclusion.....	46
Bibliographies.....	47

Liste des figures :

Figure 1 : guide d'onde GIS (SIW) et son équivalent classique [8].	14
Figure 2: les Régions (pertes, d'intérêt, irréalisable) dans le plan $d/\lambda c$ et $p/\lambda c$ [2].	16
Figure 3: Pertes de fuites si $P > 2d$ [2].	16
Figure 4: Exemples de structures GIS présentées dans la littérature : a) duplexeur [7], b) circulateur [6], c) déphaseur [8], d) diviseur de puissance [9], e) oscillateur [10], f) amplificateur [11].	18
Figure 5: (a) Transition GIS utilisant un transformateur $\lambda g / 4$ étagé (b) Ligne de transmission équivalente.	19
Figure 6 : structure géométrique de réseau d'antenne.	21
Figure 7 : Représentation de l'antenne Yagi avec HFSS.	22
Figure 8 : Les dimensions de la structure d'antenne initiale : (a) top, (b) bas.	23
Figure 9 : (a) Coefficient de réflexion S_{11} optimisé (b) Coefficient de réflexion S_{11} simulé.	25
Figure 10 : Gain de la structure initiale (a) en 2D, (b) en 3D.	26
Figure 11 : effet de longueur de réflecteur sur la fréquence de résonance.	27
Figure 12: effet de la variation de longueur du plan de masse sur le coefficient de réflexion S_{11} .	27
Figure 13: effet de la variation de la longueur de plan de masse sur le Gain.	28
Figure 14 : Valeurs S_{11} obtenues pour la structure avec différents diélectriques (a) FR4_epoxy $\epsilon_r = 4.4$ (b) Rogers RO3003 (tm) $\epsilon_r = 3$ (c) Rogers RT/duroid 5870 (tm) $\epsilon_r = 2.33$ (d) Rogers RT/duroid 5880 (tm) $\epsilon_r = 2.2$.	29
Figure 15: Structure de transition de mode.	30
Figure 16 : structure diviseur de puissance type T.	31
Figure 17 : effet de la variation de largeur w_2 sur le coefficient de réflexion S_{11} .	31
Figure 18 : effet de la variation de largeur w_1 sur le coefficient de réflexion S_{11} .	32
Figure 19 : Coefficient de réflexion S_{11} , S_{31} , S_{21} diviseur type T.	33
Figure 20 : la radiation sur le diviseur type T.	33
Figure 21 : structure de diviseur de puissance GIS en mode TE50 alimenter par le diviseur en T.	34
Figure 22 : (a) Coefficient de réflexion optimisé (b) Coefficient de réflexion simulé du diviseur GIS TE50.	35
Figure 23: (a) Distribution électromagnétique (b) Distribution du vecteur électrique du mode TE50 dans la structure d'excitation.	36
Figure 24: effet de la variation de largeur d_{vias} sur le coefficient de réflexion S_{11} .	37
Figure 25 : effet de la variation de largeur W_{siw} sur le coefficient de réflexion S_{11} .	38
Figure 26: effet de la variation de longueur de fente L_s sur le coefficient de réflexion S_{11} .	39
Figure 27 : effet de la variation de largeur de fente W_f sur le coefficient de réflexion S_{11} .	40
Figure 28: l'influence des paramètres géométriques h , d_{vias} , L_s et w_{siw} sur le coefficient de réflexion S_{11} du GIS.	41
Figure 29: Coefficient de réflexion optimisé du réseau d'antennes.	43
Figure 30: structure Réseau d'antenne Yagi Uda alimenter par GIS en mode TE 50.	43
Figure 31: Gain simulé du réseau d'antennes (a) le Gain et la Radiation en 2D, (b) le Gain en 3D.	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : les dimensions optimisées pour une seul antenne Yagi.	24
Tableau 2 : dimensions optimisées de diviseur en T.....	32
Tableau 3 : les dimensions optimisées pour GIS.	36
Tableau 4 : les dimensions initiales pour le réseau d'antenne Yagi 5 éléments.	42
Tableau 5: les dimensions optimisées pour le réseau d'antenne Yagi 5 éléments.	42
Tableau 6 : Synthèse des résultats : comparaison avec l'état de l'art.	45

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie de la conception, de l'optimisation et de la caractérisation d'une antenne Yagi innovante, alimentée par un guide d'ondes intégré au substrat (GIS) opérant dans le mode TE₅₀. Cette configuration, spécifiquement adaptée pour une fréquence de 5,8 GHz, offre des performances améliorées par rapport aux antennes Yagi conventionnelles.

L'originalité de cette étude réside dans l'utilisation du mode TE₅₀ du SIW, qui permet de simplifier la structure de l'antenne, de réduire les coûts de fabrication et d'améliorer la robustesse face aux variations des paramètres de fabrication. Le diviseur de puissance microstrip en T et les fentes positionnées stratégiquement assurent une excitation efficace du mode TE₅₀, optimisant ainsi le transfert d'énergie vers les éléments rayonnants de l'antenne Yagi.

Les simulations électromagnétiques ont permis de démontrer les performances remarquables de cette nouvelle antenne, notamment une large bande passante et un gain supérieur à 10 dBi. Ces résultats prometteurs ont été publiés dans notre récente publication (annexe B), et ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation de cette technologie dans les systèmes de communication sans fil à haut débit, tels que les réseaux Wi-Fi et les systèmes de télécommunication mobile.

Dans le cadre de ce mémoire, une analyse détaillée des paramètres de conception a été réalisée afin de déterminer l'influence de chaque élément sur les performances globales de l'antenne.

En conclusion, ce mémoire apporte une contribution significative au domaine des antennes micro-ondes en proposant une nouvelle architecture d'antenne Yagi basée sur la technologie GIS. Les résultats obtenus démontrent le potentiel de cette approche pour le développement de systèmes de communication sans fil performants et compacts.

Abstract

This master's thesis presents an in-depth study on the design, optimization, and characterization of an innovative Yagi antenna fed by a Substrate-Integrated Waveguide (SIW) operating in TE₅₀ mode. Specifically tailored for a frequency of 5.8 GHz, this configuration offers enhanced performance compared to conventional Yagi antennas.

The novelty of this study lies in the utilization of the TE₅₀ mode of the SIW, which simplifies the antenna structure, reduces manufacturing costs, and improves robustness to variations in fabrication parameters. A T-type microstrip power divider and strategically placed slots ensure efficient excitation of the TE₅₀ mode, optimizing power transfer to the radiating elements of the Yagi antenna.

Electromagnetic simulations have demonstrated the remarkable performance of this new antenna, including a wide bandwidth and a gain exceeding 10 dBi. These promising results have been published in our recent paper (annexe B) and open new avenues for the application of this technology in high-speed wireless communication systems such as Wi-Fi and mobile telecommunication systems.

As part of this thesis, a detailed analysis of the design parameters was conducted to determine the influence of each element on the overall antenna performance.

In conclusion, this thesis makes a significant contribution to the field of microwave antennas by proposing a new Yagi antenna architecture based on SIW technology. The results obtained demonstrate the potential of this approach for the development of high-performance and compact wireless communication systems.

Chapitre 1 : Introduction

Ce chapitre présente le contexte de notre recherche, qui vise à explorer le potentiel des guides d'ondes intégrés au substrat (GIS) en mode TE₅₀ pour l'amélioration des performances des antennes Yagi-Uda. En exploitant les avantages de cette technologie innovante, nous nous proposons d'optimiser les caractéristiques radiatives de ces antennes, notamment le gain et la bande passante. Les objectifs spécifiques, la méthodologie employée et la structure du mémoire sont détaillés dans les sections suivantes.

1.1 Contexte de la recherche

La technologie de guide d'ondes intégré au substrat GIS (SIW, pour Substrate Integrated Waveguide en anglais) est une nouvelle technologie d'antenne offrant des avantages tels qu'une large bande passante, intégration au substrat ce qui réduit la complexité et le coût, conservent certaines des caractéristiques des guides d'ondes classiques, Faible perte d'insertion. La structure de guide d'ondes planaire présente des propriétés similaires à celles des guides d'ondes métalliques grâce au poinçonnage de réseaux de trous métalliques traversants sur la surface du substrat diélectrique métallique. La technologie GIS est utilisée dans une large gamme d'applications, notamment les distributeurs de puissance, les coupleurs, les filtres et les antennes en raison de ses avantages [12][14][15].

1.2 Problématique

Ce travail de recherche porte sur l'étude et l'optimisation des réseaux d'antennes Yagi-Uda alimentés par des guides d'ondes intégrés au substrat (GIS) en mode TE₅₀. Plus spécifiquement, nous nous intéressons à déterminer les paramètres clés influençant les performances de ces réseaux, à comparer leur efficacité avec les méthodes d'alimentation traditionnelles et à identifier les pistes d'amélioration pour obtenir des antennes à haut gain, à large bande passante et à haute directivité. Les enjeux de cette étude résident dans la conception de systèmes de communication sans fil plus performants et plus flexibles.

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir et de construire un réseau d'antennes Yagi-Uda alimentée par GIS guides d'ondes imprimés à substrat intégré en mode TE₅₀. Cette configuration maximisera la directivité et la bande passante tout en réduisant les pertes et en améliorant les performances générales de l'antenne.

Les objectifs spécifiques :

Les antennes Yagi-Uda sont courantes et ont une directivité élevée. En utilisant des guides d'ondes imprimés à substrat intégré en mode TE₅₀, concevoir et simuler le réseau d'antennes Yagi-Uda à l'aide de logiciels de simulation spécialisés HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Optimisez le gain, la directivité et la bande passante de notre réseau en optimisant les paramètres de conception essentiels, tels que la longueur des éléments de rayonnement, l'espacement entre les éléments et les dimensions du guide d'ondes.

Étudier comment les impédances de chargement et les réflexions d'ondes affectent les performances d'une antenne et proposer des solutions pour les réduire.

Comparez les performances de l'antenne Yagi-Uda alimentée par GIS en mode TE₅₀ avec celles d'autres configurations d'antennes Yagi-Uda existantes pour déterminer son efficacité et sa supériorité potentielle.

L'objectif final de ce mémoire est de contribuer à l'avancement des technologies d'antennes à haut débit en créant un nouveau réseau d'antenne Yagi-Uda alimentée par GIS en mode TE₅₀, offrant des performances améliorées par rapport aux solutions existantes.

1.4 Justification de la recherche

La recherche sur la réalisation de réseaux d'antennes Yagi-Uda alimentés par GIS en mode TE₅₀ est justifiée par les avantages potentiels en termes de performances améliorées, de miniaturisation, de facilité de fabrication et d'intégration, ainsi que d'adaptabilité aux différentes fréquences. Cette recherche peut aider au développement de systèmes de communication sans fil plus efficaces, plus petits et plus abordables.

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche scientifique rigoureuse. Après avoir formulé une problématique précise et défini des objectifs clairs, nous avons mené une revue approfondie de la littérature existante. S'en est suivie une phase de conception et de simulation numérique, complétée par une analyse critique des résultats obtenus. Cette démarche méthodique a permis d'évaluer la pertinence de notre approche et d'apporter une contribution significative au domaine étudié.

Chapitre 2 : Revue de littérature

Ce chapitre a pour objectif de présenter les fondements théoriques nécessaires à la compréhension des guides d'ondes intégrés au substrat (GIS) et des antennes Yagi, deux technologies clés qui seront exploitées dans les chapitres suivants.

2.1 Technologie guide d'onde intégré au substrat (GIS)

2.1.1 Introduction

Les guides d'ondes intégrés au substrat GIS, également connus sous le nom de SIW pour "Substrate Integrated Waveguide" en anglais, sont une avancée significative dans l'ingénierie des micro-ondes et des hyperfréquences. Cette technologie offre une solution innovante pour la manipulation et le guidage des ondes électromagnétiques tout en offrant des avantages importants en termes de compacité, de faibles pertes et de large bande passante.

La technologie SIG a déjà suscité un grand intérêt dans le développement de nombreux circuits intégrés micro-ondes. La synthèse du guide GIS consiste à insérer deux rangées de vias métalliques dans un substrat. Le GIS présente une distribution du champ similaire à celle d'un guide d'ondes rectangulaire traditionnel. En conséquence, il présente les avantages d'être peu coûteux et d'avoir un facteur de qualité élevé, et il peut être facilement intégré dans les circuits d'ondes millimétriques et micro-ondes intégrés [5].

L'intérêt pour les techniques GIS dans les systèmes de communication a augmenté ces dernières années, tout comme le développement de circuits microondes actifs et passifs utilisant ces techniques [5].

Dans ce chapitre, nous aborderons les caractéristiques électromagnétiques des GIS, a les modes de propagation qu'ils prennent en charge, les configurations possibles et comment ils peuvent être adaptés pour répondre aux besoins spécifiques de diverses applications. La flexibilité de la conception des GIS les rend adaptables à une variété de solutions.

2.1.2 Caractéristiques modales

Selon Pozar [1] On peut s'attendre à voir les mêmes modes de propagation dans les guides GIS car leur géométrie est similaire à celle d'un guide métallique rectangulaire. Il est connu que les modes TM_{mn} et TE_{mn} sont supportés dans un guide d'onde rectangulaire. Et les courants électriques sont sans limites car les surfaces du guide métallique rectangulaire sont métalliques pour la propagation des modes TM_{mn} et TE_{mn} .

L'expression des courants surfaciques :

$$\vec{J}_s = \hat{n} \cdot \vec{H}_s \quad (1.1)$$

H_s est le champ magnétique à la surface du guide et n un vecteur unitaire normal à la Surface. Cependant, les rangées de trous GIS ne peuvent pas supporter des courants électriques dans le sens de propagation (en z) sur toute la longueur du guide car le milieu entre les trous métallisés d'une même rangée est un diélectrique et donc non conducteur. Ainsi, seuls les modes qui sont liés à ces courants J_y sur les côtés du guide peuvent être facilement diffusés dans le GIS. En utilisant l'équation (1.1), on obtient :

$$\vec{J}_x = 0 \Rightarrow \vec{H}_{s,x} = 0$$

$$\vec{J}_z = 0 \Rightarrow \vec{H}_{s,z} = 0$$

$$\vec{J}_y = 0 \Rightarrow \vec{H}_{s,y} \neq 0 \Rightarrow \vec{H}_s = \vec{H}_z \quad (1.2)$$

On constate à partir de ces expressions que seuls les modes TE_{m0} sont présents dans le GIS [1]. Par conséquent, en utilisant les équations de Maxwell dans un guide d'onde standard, nous obtenons pour les champs électriques E et Magnétiques H :

$$E_x = \frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.3)$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu m\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.4)$$

$$E_z = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.5)$$

$$H_y = \frac{-j\beta n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.6)$$

A_{mn} : l'amplitude du mode TE_{mn}

a : la largeur du guide b : l'épaisseur du guide k_c : le nombre d'onde de coupure

ω : la vitesse angulaire β : la constante de propagation

μ : la perméabilité magnétique du vide.

Il est possible d'utiliser l'épaisseur b du guide GIS pendant la phase de conception des différents composants à réaliser, selon les équations de (3.2) à (3.6), car il est important de se rappeler que seuls les modes TEM₀ se propagent dans le guide Gis [2].

2.1.3 Paramètres des guides d'ondes intégrés au substrat

Pour comprendre et concevoir ces structures planaires, les paramètres des guides *GIS* sont essentiels. Les caractéristiques électromagnétiques des GIS sont définies par ces paramètres, ce qui permet de les adapter à des applications particulières.

En technologie GIS (SIW en anglais), la taille et la longueur du guide d'onde rectangulaire dépendent de la taille et de la longueur du guide d'onde classique avec la même hauteur et longueur électrique [8].

$$W_{siw} = W_{eq} + \frac{d^2}{0.95p} \quad (1.1)$$

$$L_{siw} = L_{eq} + \frac{d^2}{0.95p} \quad (1.2)$$

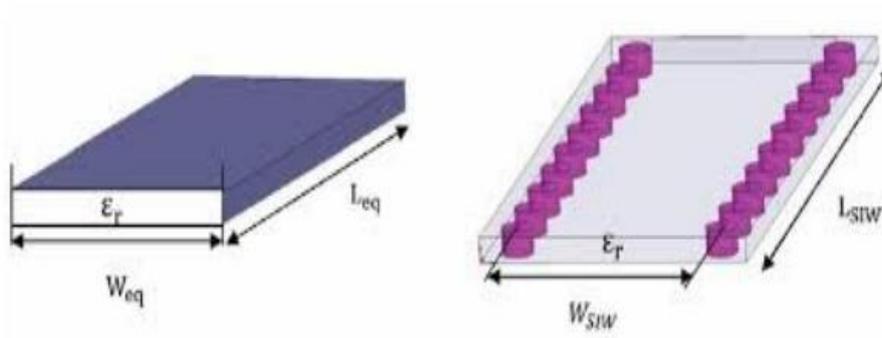


Figure 1 : guide d'onde GIS (SIW) et son équivalent classique [8].

Où :

L_{siw} , Leq , W_{sim} , Weq L_{siw} , Leq , W_{sim} , Weq sont respectivement les longueurs et les largeurs du guide d'onde rectangulaire en technologie SIW et de son équivalent classique.

d : est le diamètre du vais métallique.

p : est la distance entre deux vais adjacents.

$$\text{Avec : } p < \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.4)$$

$$p \leq 2d \quad (1.5)$$

$$\lambda_0 < \frac{c}{f} \quad (1.6)$$

Où : ϵ_r , c et f représentent respectivement le constant diélectrique du substrat, la vitesse de la lumière et la fréquence.

λ_0 est la longueur d'onde.

Les règles de conception d'un guide GIS ont été établies pour une région d'intérêt dans le plan par

d/λ_c et p/λ_c avec λ_c la longueur d'onde de coupure comme indiqué dans la figure 2, elles sont utilisées pour éviter les pertes par rayonnement. Elles sont données par [4][2][3] :

$$d \leq \frac{\lambda_g}{5} \quad (1.7)$$

$$p \leq 2d \quad (1.8)$$

$$\frac{d}{a} \leq 0.4 \quad (1.9)$$

λ_g Longueur d'onde guidée, sa formule est :

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{(2\pi fc)^2}{c^2} - \left(\frac{\pi}{W_{siw}}\right)^2}} \quad (1.10)$$

La figure 3 montre le champ électrique du mode dominant et les pertes de fuites qui s'en suivent lorsque les règles de conception ne sont pas respectées [2].

La fréquence de coupure [2] (mode fondamental T E10) est donnée par :

$$f_{c10} = \frac{c}{2w_{eq}\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2(W_{siw} - \frac{d^2}{0.95p})\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.11)$$

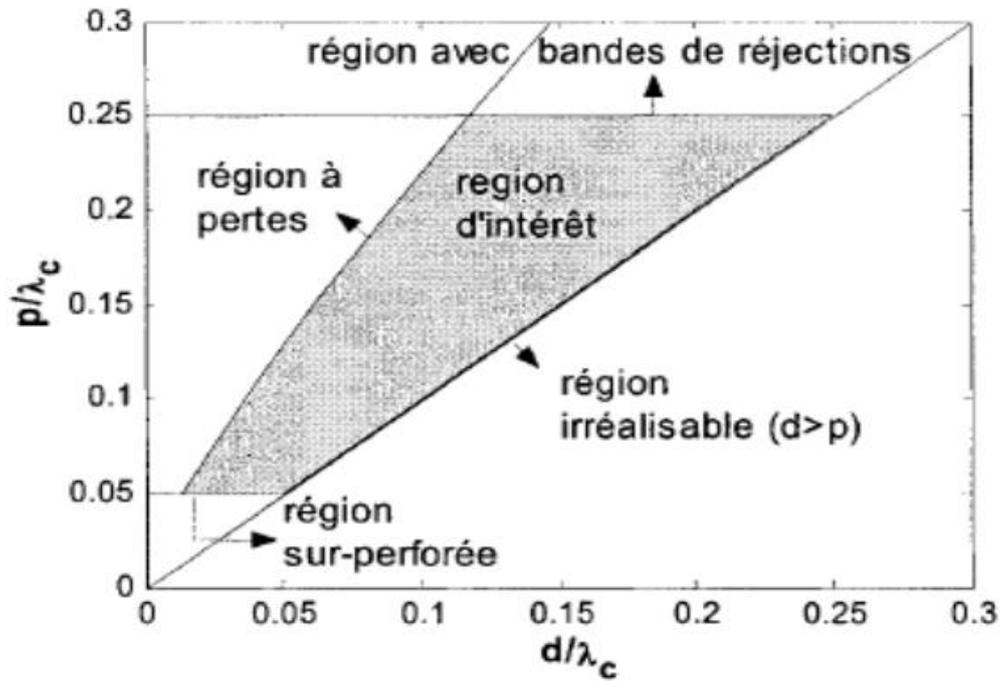


Figure 2: les Régions (pertes, d'intérêt, irréalizable) dans le plan d/λ_c et p/λ_c [2].

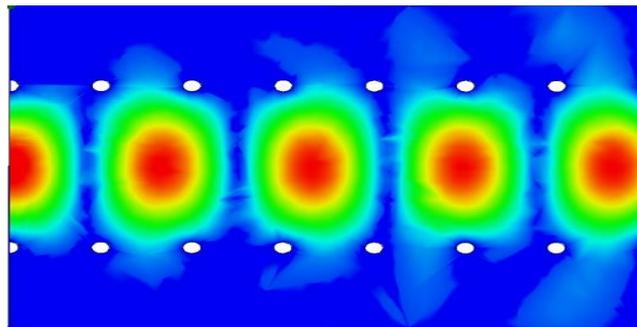


Figure 3: Pertes de fuites si $P > 2d$ [2].

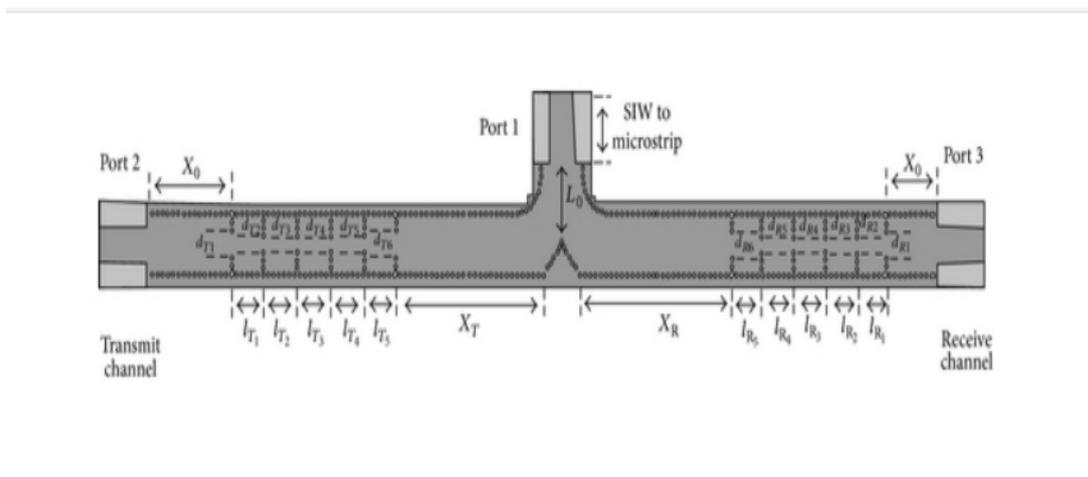
La fréquence de coupure pour le TE_{mn} , TM_{mn} , TE_{mn} , TM_m

Les modes d'un guide d'ondes sont donnés par [3] :

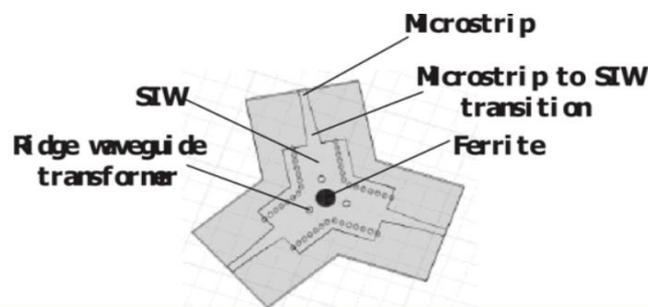
$$f_{c_{nm}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.12)$$

2.1.4 Applications des guides d'ondes intégrés au substrat :

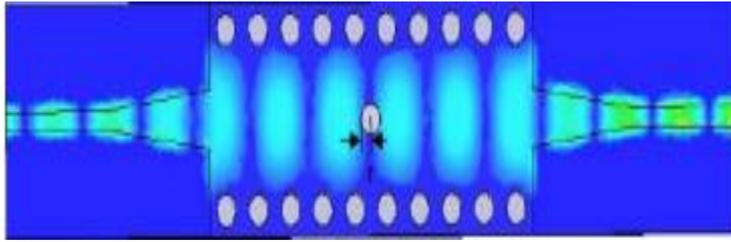
Les guides d'ondes sont employés dans divers domaines et utilisations [5]. Les composants GIS passifs et actifs peuvent être utilisés dans de nombreux circuits micro-ondes et à ondes millimétriques. Les composants GIS pour les applications micro-ondes et millimétriques ont récemment été développés. Les composants et les antennes passifs et actifs peuvent tous être utilisés. Les résonateurs à ondes millimétriques, les oscillateurs, les diviseurs de puissance, les déphaseurs, les circulateurs, les duplexeurs, les coupleurs directionnels et le mélangeur RF. Par rapport aux amplificateurs conventionnels, l'amplificateur utilisant la technologie GIS c'est avéré efficace, petit et bon marché figure 4.



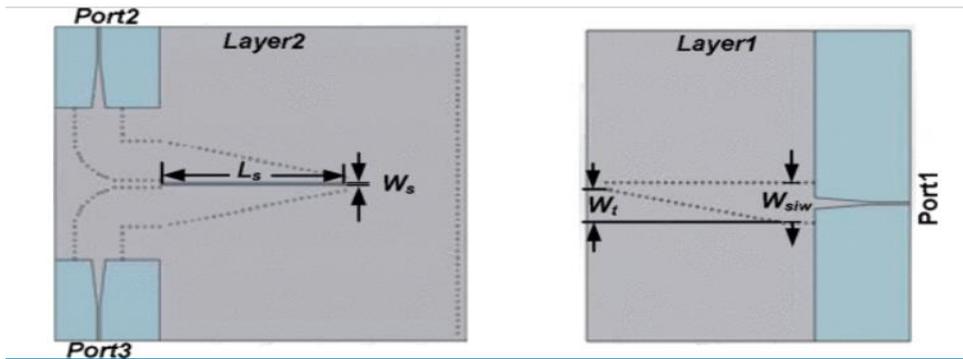
(a)



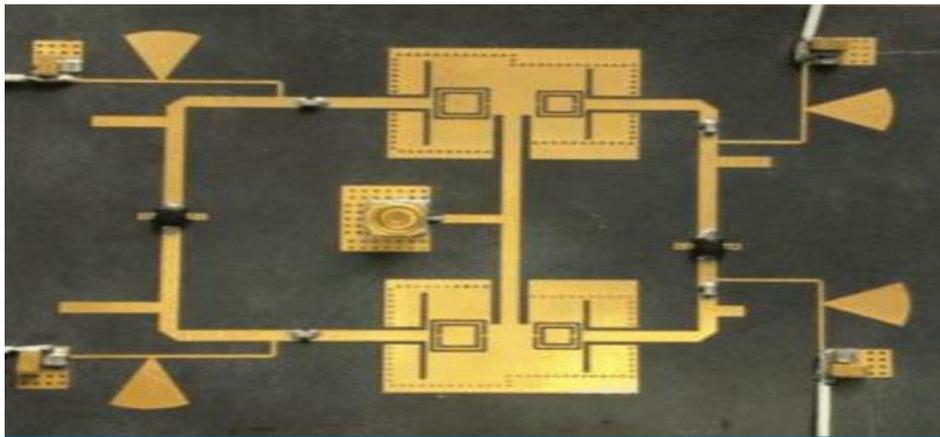
(b)



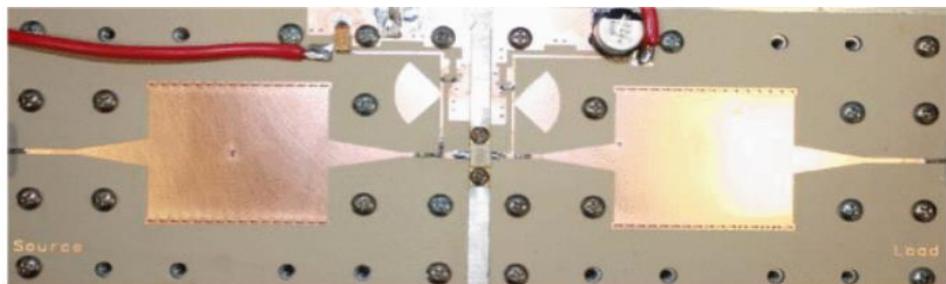
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 4: Exemples de structures GIS présentées dans la littérature : a) duplexeur [7], b) circulateur [6], c) déphaseur [8], d) diviseur de puissance [9], e) oscillateur [10], f) amplificateur [11].

2.1.5 Transition ligne micro-ruban guide d'ondes intégré au substrat

En 2020 A. Kumar Nayak et A. Patnaik [13] proposent une nouvelle classe de transition à large bande entre micro-ruban et GIS à l'aide de trois transformateurs quarts d'onde étagés figure 5. Cette transition résulte une perte de réflexion fonctionnelle dépasse à 18,23 dB, une faible perte d'insertion moins à 0,76 dB, une bande passante pleine et une adaptation d'impédance améliorée dans toute la bande passante. Cette transition est adaptée à une variété d'applications de circuits micro-ondes dans la plage de fréquences de la bande C, y compris des amplificateurs, des filtres, des résonateurs, des antennes de différentes bandes et d'autres dispositifs micro-ondes.

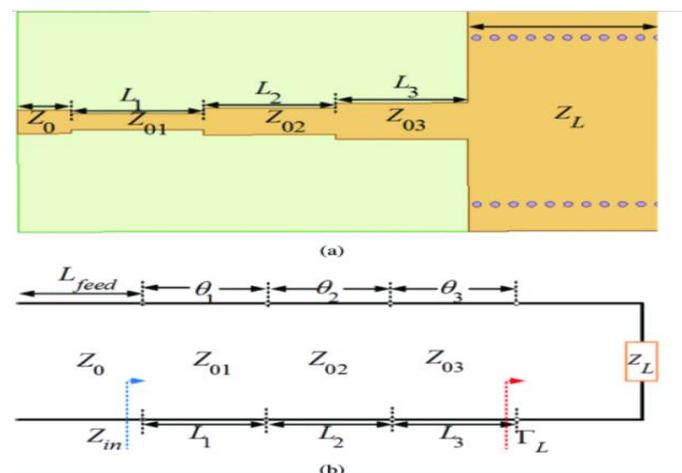


Figure 5: (a) Transition GIS utilisant un transformateur $\lambda g / 4$ étagé (b) Ligne de transmission équivalente.

2.2 Antennes Yagi et ces applications :

En raison de leurs avantages uniques, les antennes Yagi-Uda sont des antennes directionnelles à gain élevé qui ont une large gamme d'applications. Voici quelques applications populaires des antennes Yagi-Uda et leurs avantages pour chacune :

Les applications biomédicale, Bahrouni et al [17] utilisent une méthode simple pour créer une antenne bi-bande miniature à profil bas destinée à être implantée sous la peau du bras humain. La structure présente également davantage d'avantages en termes de simplicité de conception et de facilité de modification indépendante des fréquences de résonance.

Les applications des réseaux locaux sans fil, dans l'article [18] une antenne multi-bande flexible capable de fonctionner dans les bandes ISM, WLAN et X a été présentée par Abdulkawi et al. L'antenne suggérée a été construite sur un substrat flexible en kapton polyimide (valeur de permittivité de 3,5) de 52 mm × 40 mm (0,79 mm × 0,61 mm). Les paramètres S de l'antenne sont inférieurs à -10 dB pour toutes les bandes de fréquences de résonance, ce qui reflète de bonnes caractéristiques d'adaptation de l'impédance. Les bandes de résonance obtiennent des valeurs de gain appropriées avec une efficacité maximale de 83 %.

Les applications radar, P. Cheong et al [19] proposent une antenne Yagi-Uda pour des applications radar multi-bande, Le prototype utilise trois bandes de fréquences : 1,9, 2,5 et 3,5 GHz. Des directeurs et un réflecteur sont utilisés pour maintenir une bonne directivité sur les bandes de fréquences d'intérêt. Le prototype démontre les excellentes performances de l'antenne multi-bande Yagi-Uda conçue à partir des mesures et montre un bon accord entre les mesures et les simulations. Les fréquences de fonctionnement ont été mesurées à 1,89, 2,54 et 3,51 GHz, et les gains d'antenne ont été mesurés à respectivement.

Les applications d'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR) à ondes millimétriques, une antenne planaire Yagi-Uda a été proposée par Y. Gao et al [20], avec un gain d'environ 7 dB et un HPBW d'environ 90°, l'antenne conçue fonctionne dans la plage de fréquences d'environ 55 à 65 GHz. Les effets du rayonnement de chaque section de l'antenne ont été exposés. Une expérience d'imagerie SAR a finalement démontré les excellentes performances d'imagerie de l'antenne conçue.

2.7 Conclusion :

Ce chapitre traite des hyperfréquences, en particulier de la nouvelle technologie appelée guides d'ondes intégrés au substrat (SIW). Grâce à son faible coût de production et à sa grande densité d'intégration, cette nouvelle technologie est très prometteuse. En effet, l'utilisation de guides d'ondes est désormais possible sans même sortir du substrat. Lorsqu'on parle de miniaturisation des circuits et de réduction des coûts, cette technologie est très intéressante.

Chapitre 3 : Conception et simulation

Dans ce chapitre, nous présentons en détail la conception et la simulation (HFSS) de notre système, qui contient des deux parties principales le réseau de cinq antennes Yagi Uda, et le structure d'excitation en mode d'ordre élevé TE50, qui produit principalement cinq signaux avec la même valeur de puissance.

La figure 9 présente la structure géométrique de réseaux d'antenne Yagi Uda réseau suggérée. Le corps principal de l'antenne et une structure d'excitation en mode TE50.

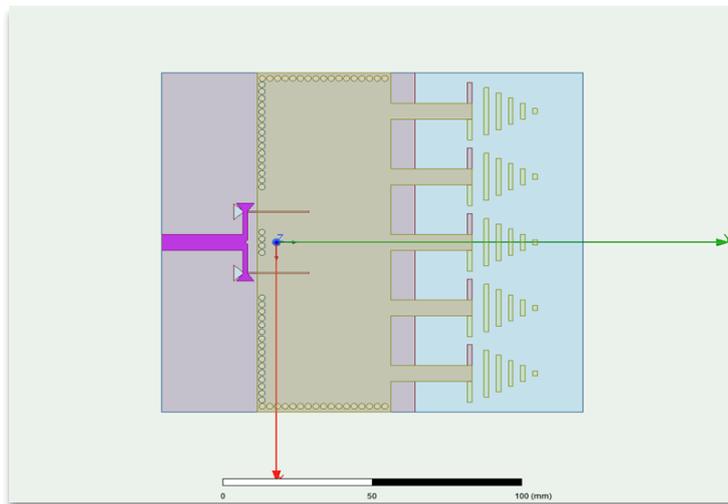


Figure 6 : structure géométrique de réseau d'antenne.

En 2022, Soleil lubrifiant et al. [12] proposent une technique d'alimentation directe en mode TE30, afin de l'appliquée à un réseau d'antenne Yagi-Uda, le mode TE30 est alimenté par un diviseur de puissance micro-ruban, dans cet article les chercheurs utilisent le substrat diélectrique Rogers 5880 a une constante diélectrique de 2,2 et une hauteur 1,016 mm. Après la simulation le $|S_{11}|$ est inférieure à -10 dB dans l'intervalle 7,7 à 12,5 GHz avec un gain maximum de 8,4 dBi, et une bande passante relative de 48 %.

Dans cette section a l'aide de logiciel Ansys HFSS (high frequency structure simulator), chaque composante sera conçue et optimisée séparément afin de l'intégrer dans un seul système qui sera optimisé.

3.1 Conception et simulation de l'antenne Yagi-Uda élémentaire :

Dans cette section, nous introduisons en détail la procédure de simulation et de dimensionnement d'antenne proposée. Les résultats de simulation et l'effet des paramètres physiques sur les caractéristiques des antennes seront analysés par la suite. La structure se compose d'une antenne Yagi-Uda à conçues pour opérer dans une fréquence 5.8 GHz figure 10.

La structure de l'antenne est basée sur des recherches antérieures publiées par les auteurs dans [4]. Le substrat époxy FR4 utilisé pour construire l'antenne avec une permittivité relative de 4,4 et une épaisseur de 1,51 mm. Les cinq directeurs sont situés d'un côté du diélectrique et le réflecteur est situé de l'autre. La distance entre le premier directeur et le dipôle d'alimentation est de 5,5 mm, tandis que la distance entre les directeurs est maintenue constante à 3,5 mm.

Pour notre structure figure 10 a été conçu sur un substrat diélectrique avec les paramètres suivants : Le substrat en Rogers RT/duroid 5880 (tm) : $\epsilon_r = 2.2$, La hauteur de substrat : $h = 1.575\text{mm}$, Pertes tangentielles : $\tan \delta = 0,0018$ Conducteur : cuivre, épaisseur de métallisation : $\text{thikness} = 18\mu\text{m}$ figure 11. Le premier directeur situer à distance de $Dy1 = 4\text{ mm}$ du dipôle d'alimentation, tandis qu'un espacement constant de 2,5 mm sépare chaque directeur.

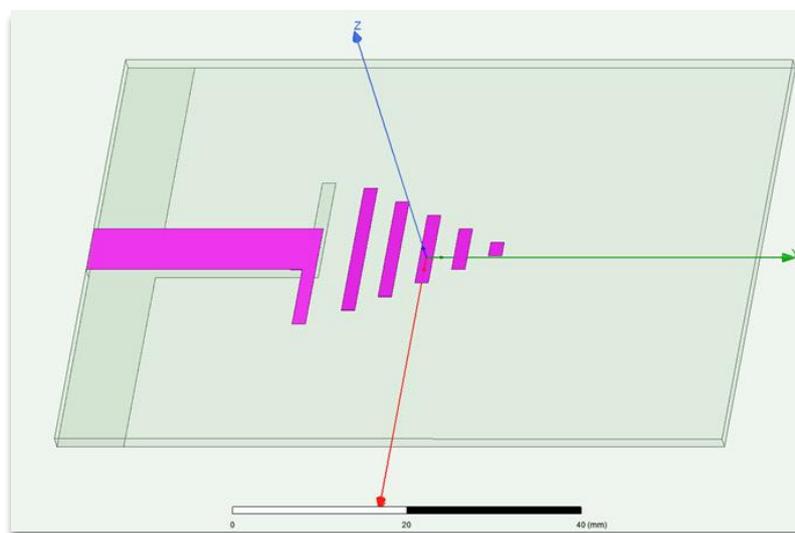
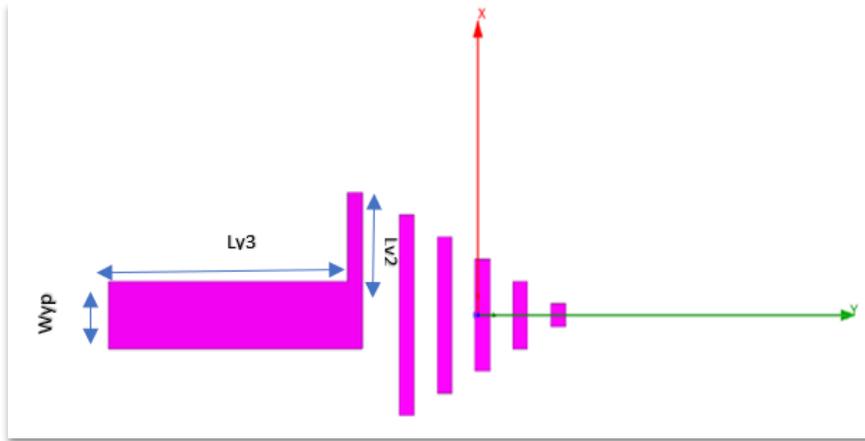
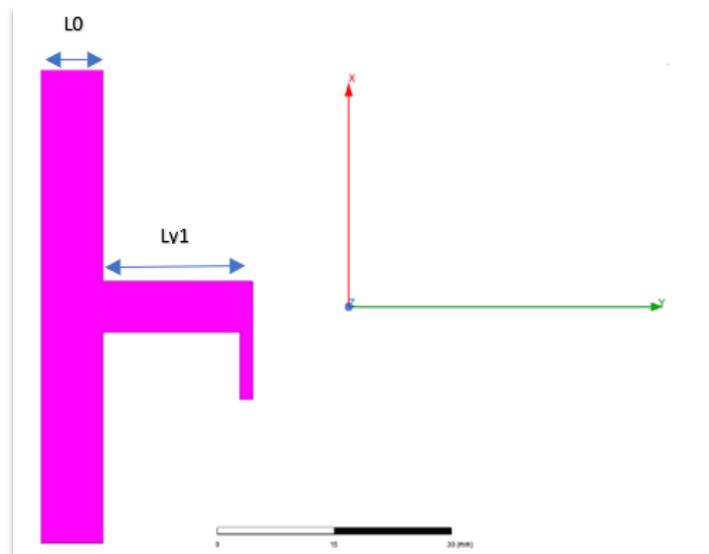


Figure 7 : Représentation de l'antenne Yagi avec HFSS.



(a)



(b)

Figure 8 : Les dimensions de la structure d'antenne initiale : (a) top, (b) bas.

Le tableau 1 présente les dimensions optimisées de l'antenne proposer. Ly_4 , Ly_5 , Ly_6 , Ly_7 et Ly_8 sont respectivement les longueurs des directeurs, tandis que Wy est leur largeur correspondante. Dy_2 est l'espacement entre les directeurs. L_0 représente la largeur du plan de masse.

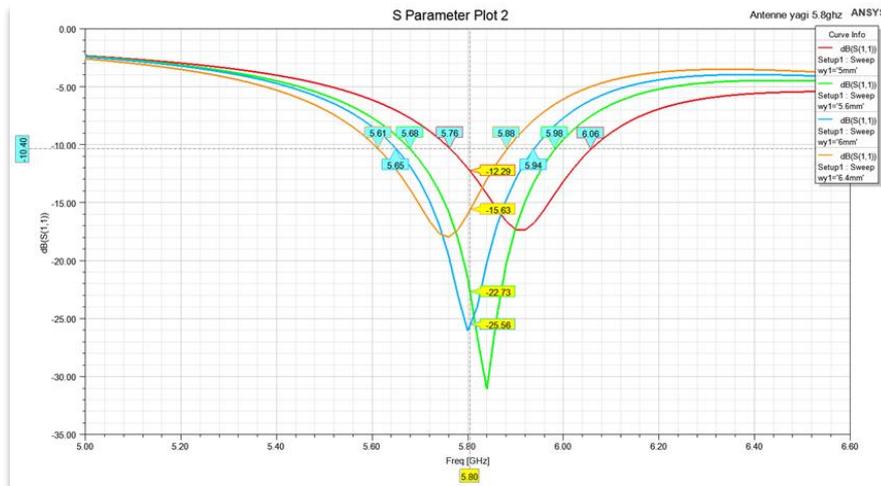
Tableau 1 : les dimensions optimisées pour une seul antenne Yagi.

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
Ly3	27.5	Ly5	14	Wy	1.6
Ly1	19.5	Ly6	10	L0	8
Ly2	8	Ly7	6	Wyp	6
Ly4	18	Ly8	2	Dy2	2.5

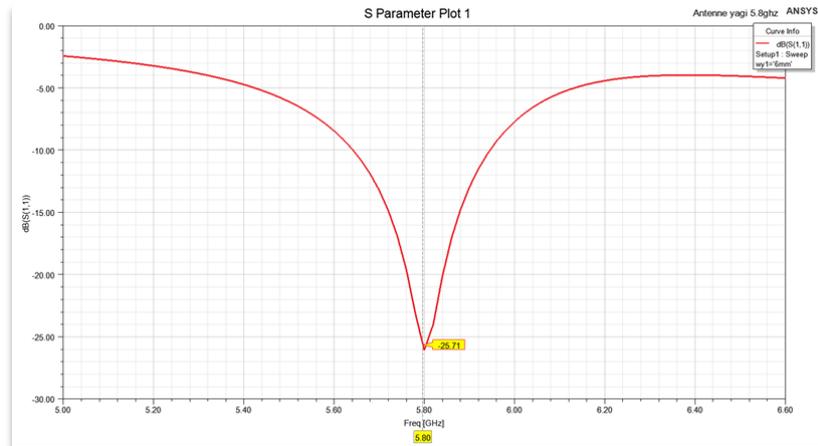
3.1.1 Optimisation d'Antenne Yagi-Uda :

Dans la section conception, les diverses dimensions de l'antenne Yagi ont été présentées. Donc à l'aide du logiciel HFSS on a fait l'analyse d'une seule antenne Yagi.

On lance la simulation dans la fréquence [5GHz-6GHz] avec un pas de 0.0145GHz, On obtient la courbe suivante pour le paramètre (S11) en dB figure 12.



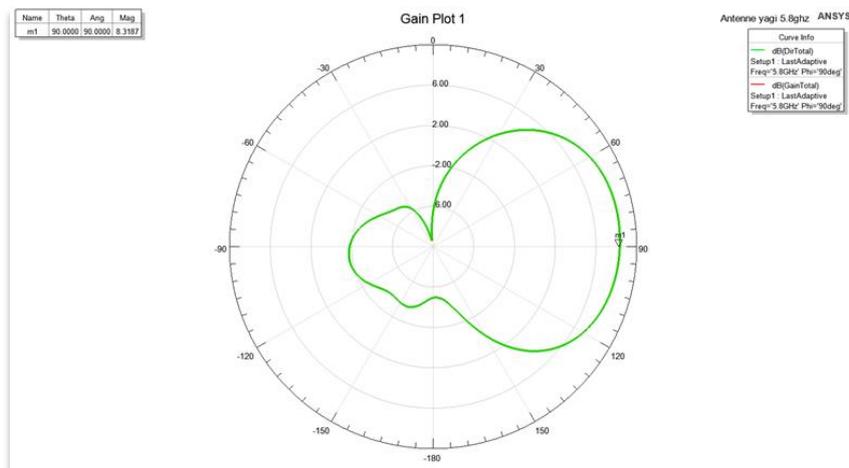
(a)



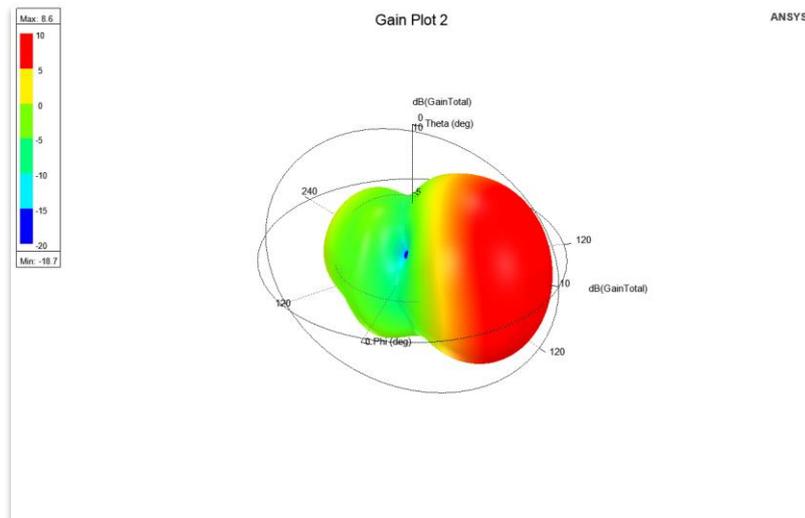
(b)

Figure 9 : (a) Coefficient de réflexion S_{11} optimisé (b) Coefficient de réflexion S_{11} simulé.

Sur la figure 13, le gain de l'antenne est présenté, et la valeur maximale obtenue à partir de la simulation de cette structure est de 8,3187 dB. L'antenne est polarisée linéairement.



(a)



(b)

Figure 10 : Gain de la structure initiale (a) en 2D, (b) en 3D.

Après la simulation on remarque que notre antenne résonne dans la fréquence 5.8 GHz, on constate que la bande passante est large BP=8.5 GHz. Le coefficient de réflexion à la fréquence de résonance est à (-25.75dB).

3.1.2 Étude paramétrique :

Les résultats présentés à la Figure 14 mettent en évidence l'influence critique de la longueur du réflecteur sur la fréquence de résonance d'une antenne Yagi-Uda. Cette relation linéaire permet un réglage précis de la fréquence de fonctionnement de l'antenne, comme le montre l'exemple d'un centrage à 5.8 GHz obtenu pour une longueur de dipole de 8 mm. Cette flexibilité est particulièrement intéressante pour les applications nécessitant une adaptation fréquentielle rapide.

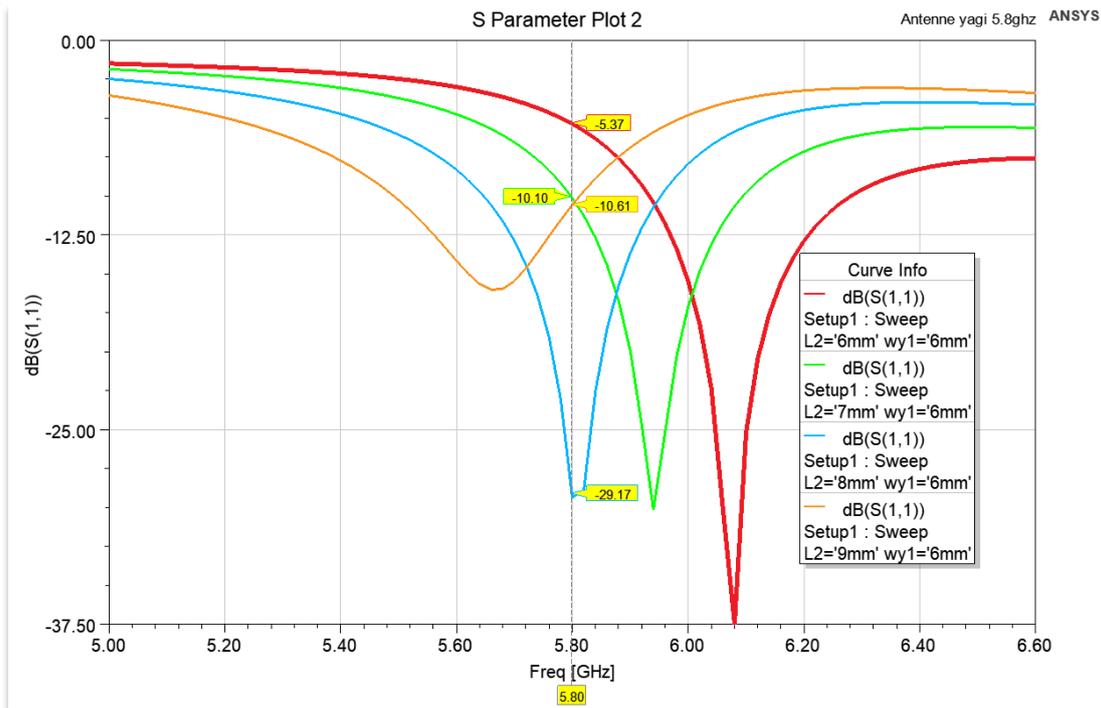


Figure 11 : effet de longueur de réflecteur sur la fréquence de résonance.

L'analyse paramétrique présentée à la Figure 15 révèle une corrélation directe entre la longueur du plan de masse et le coefficient de réflexion S11 d'une antenne Yagi. Une longueur de 8 mm permet d'obtenir une adaptation d'impédance optimale à 5,8 GHz, soulignant ainsi l'importance de ce paramètre dans la conception d'antennes.

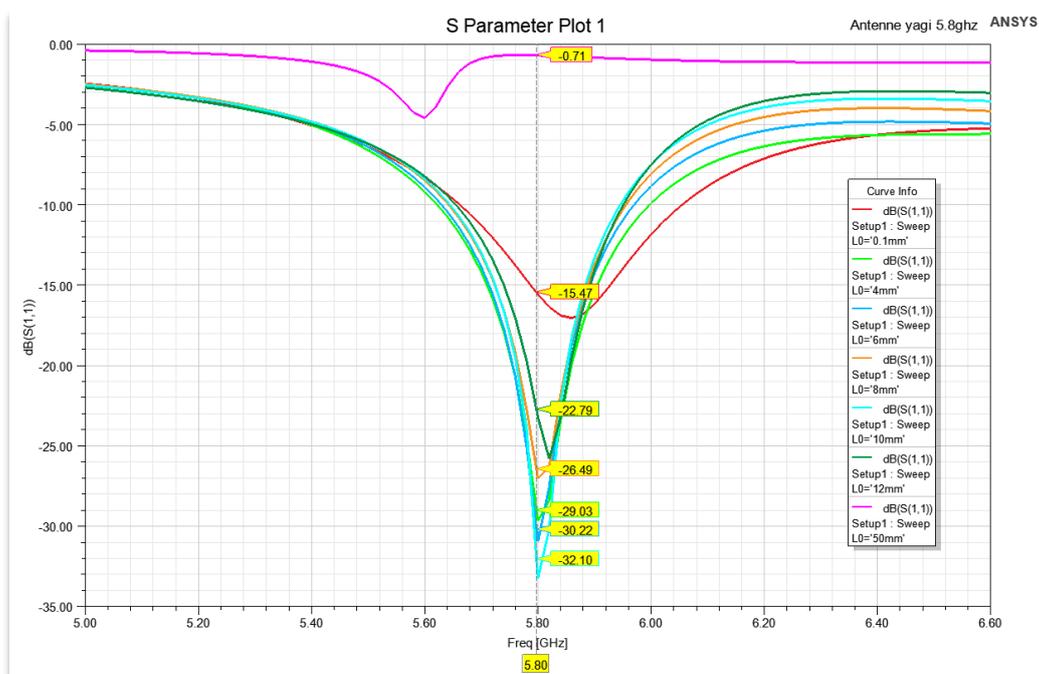


Figure 12: effet de la variation de longueur du plan de masse sur le coefficient de réflexion S11.

L'optimisation des performances d'une antenne Yagi passe par un réglage précis de ses dimensions. La figure 16 illustre l'impact de la longueur du plan de masse sur le gain de l'antenne à 5.8 GHz. Les résultats montrent clairement qu'une longueur de 8 mm permet d'obtenir le gain maximal, soulignant ainsi l'importance de ce paramètre dans la conception d'antennes.

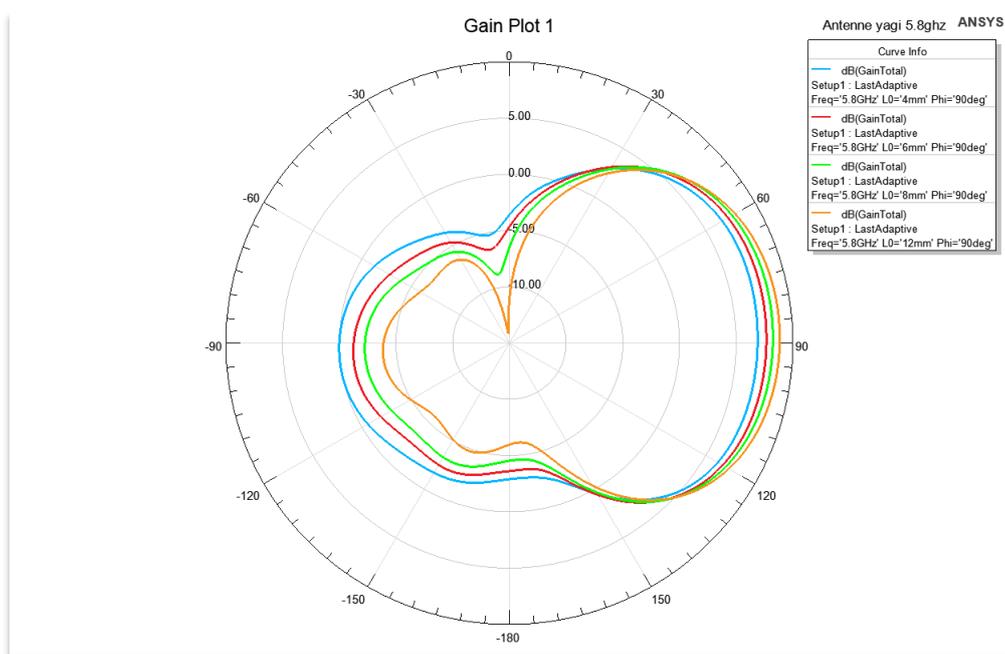
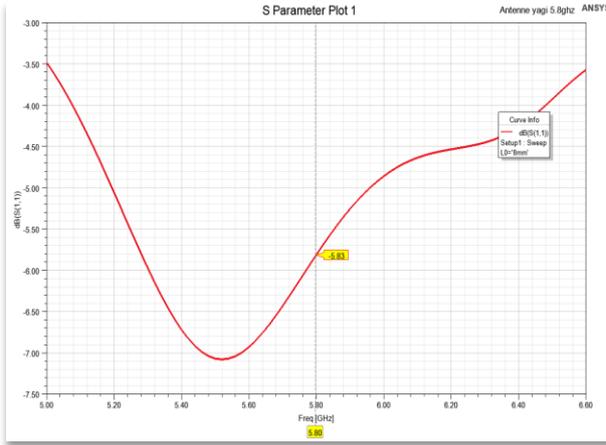
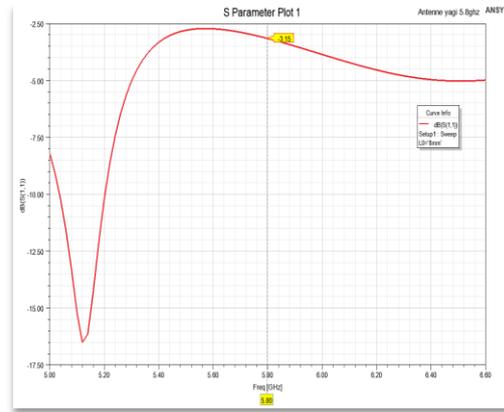


Figure 13: effet de la variation de la longueur de plan de masse sur le Gain.

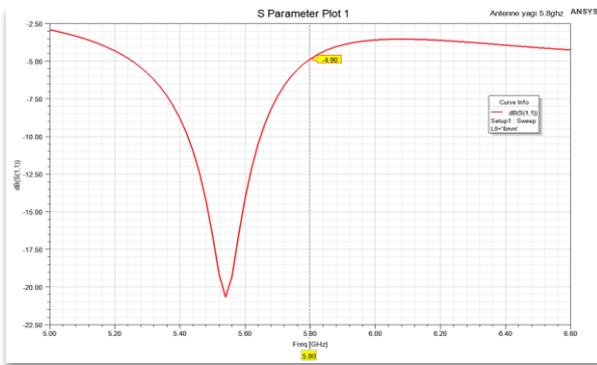
L'étude comparative des différents substrats (FR4_epoxy $\epsilon_r = 4.4$, Rogers RO3003 (tm) $\epsilon_r = 3$, Rogers RT/duroid 5870 (tm) $\epsilon_r = 2.33$ et Rogers RT/duroid 5880 (tm) $\epsilon_r = 2.2$.), présentée à la Figure 17, révèle que le choix du substrat a un impact significatif sur les performances de l'antenne. On peut affirmer que les valeurs S11 les plus élevées sont présentes pour les structures avec le diélectrique Rogers RT/duroid 5880 (tm). De plus, l'antenne raisonne dans la fréquence 5.8 GHz.



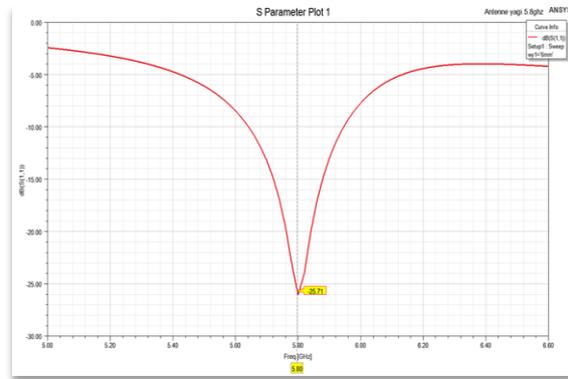
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 14 : Valeurs S_{11} obtenues pour la structure avec différents diélectriques (a) FR4_epoxy $\epsilon_r = 4.4$ (b) Rogers RO3003 (tm) $\epsilon_r = 3$ (c) Rogers RT/duroid 5870 (tm) $\epsilon_r = 2.33$ (d) Rogers RT/duroid 5880 (tm) $\epsilon_r = 2.2$.

3.2 Conception et simulation de diviseur de puissance GIS en mode TE50 :

Le diviseur de puissance GIS contient deux parties, la structure de transition en mode et l'alimentation par un diviseur micro-ruban de puissance type T (figure 18).

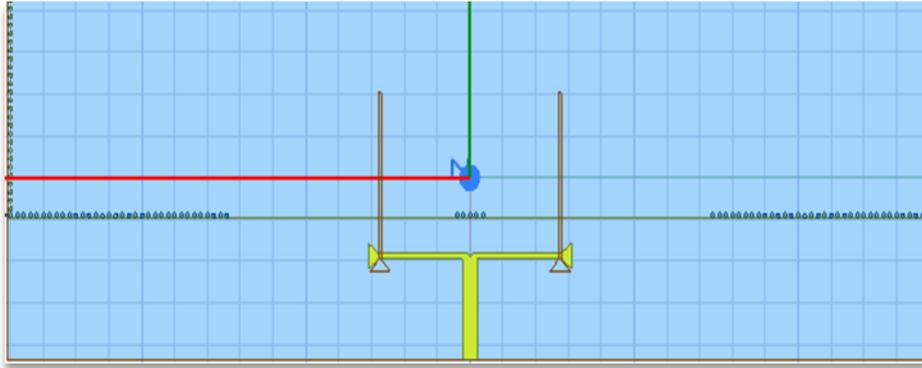


Figure 15: Structure de transition de mode.

3.2.1. Conception et simulation du diviseur de puissance type T :

Le diviseur en T joue un rôle crucial dans notre système en alimentant de manière équilibrée les différentes branches du diviseur haut mode. En assurant une répartition homogène de la puissance et en minimisant les pertes par réflexion, il contribue à optimiser les performances globales du dispositif.

Le diviseur de puissance micro-ruban de type T, ayant une largeur de bande w_1 , alimente la structure de transition de mode figure 19.

La largeur w_1 de la ligne micro-ruban, paramètre critique, a été ajustée pour obtenir une impédance d'entrée de 50Ω , ce qui permet une transmission optimale de la puissance. La longueur égale L_2 des deux branches du diviseur en T garantit une division de puissance équitable entre les deux sorties, avec des signaux de sortie présentant les mêmes caractéristiques.

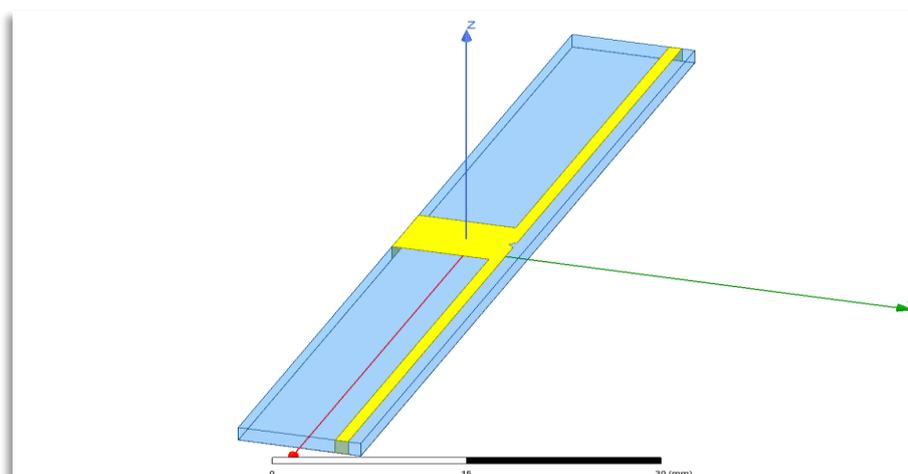


Figure 16 : structure diviseur de puissance type T.

La Figure 20 met en évidence l'influence directe de la largeur w_2 sur la fréquence de résonance de l'antenne. Cette sensibilité permet un réglage précis de la fréquence de fonctionnement du diviseur en T. En effet, en ajustant simplement la valeur de w_2 , il est possible de centrer la réponse du diviseur sur la fréquence désirée, comme illustré par l'exemple d'un centrage à 5,8 GHz obtenu pour $w_2 = 1,05$ mm. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour les applications nécessitant une adaptation fréquentielle dynamique.

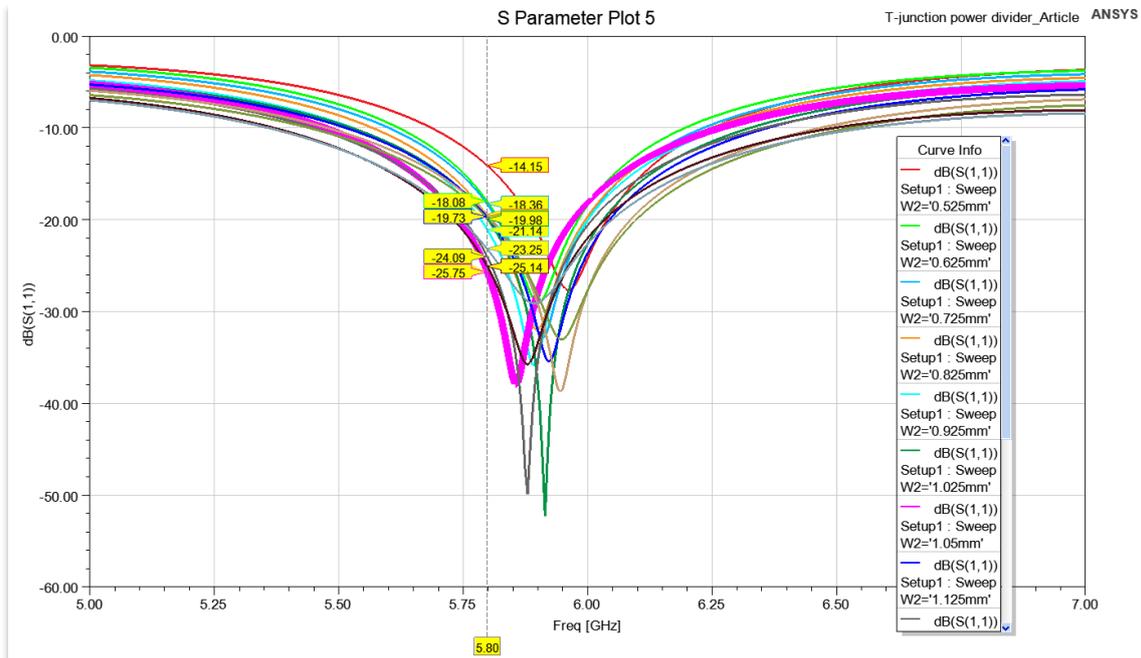


Figure 17 : effet de la variation de largeur w_2 sur le coefficient de réflexion S_{11} .

La Figure 21 révèle que la largeur w_1 est un paramètre clé pour déterminer la fréquence de résonance du diviseur en T. En ajustant cette dimension, il est possible de centrer la réponse du diviseur sur la fréquence souhaitée. Par exemple, pour notre fréquence de fonctionnement de 5,8 GHz, une largeur w_1 de 6,6 mm est nécessaire.

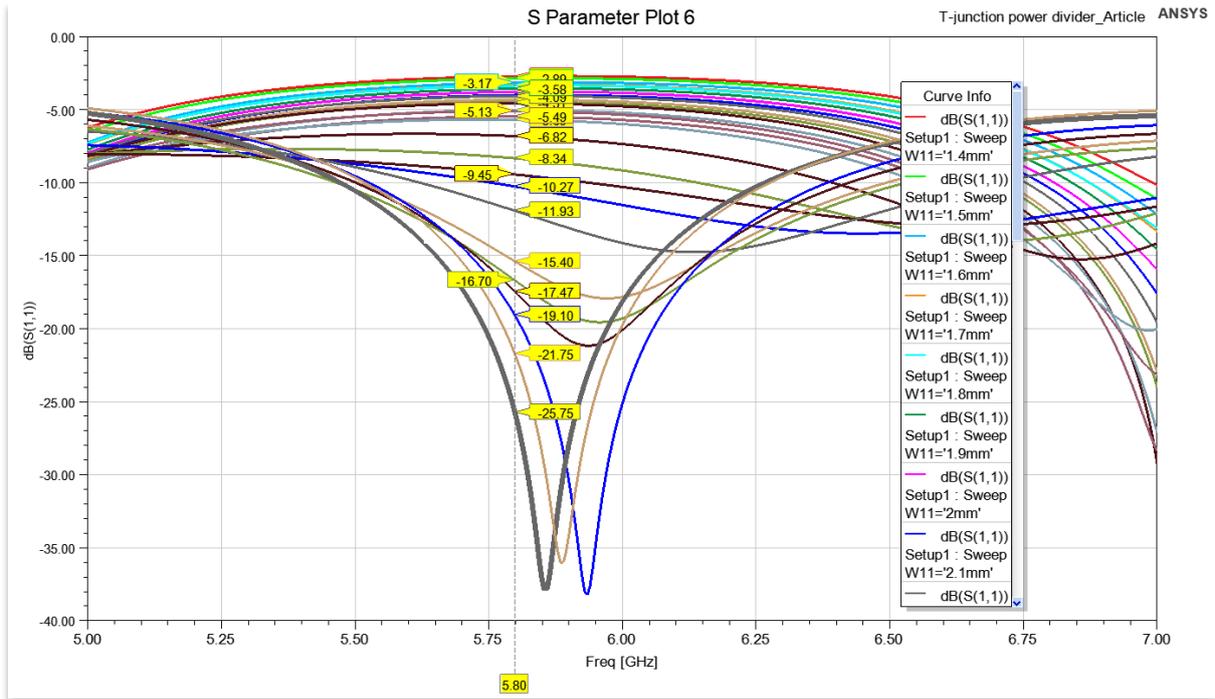


Figure 18 : effet de la variation de largeur $w1$ sur le coefficient de réflexion $S11$.

On lance la simulation dans la fréquence [5GHz-7GHz] avec un pas de 0.0145GHz, et avec les paramètres optimisés de la tableau 1, On obtient la courbe suivante pour le paramètre (S11) en dB figure 22.

Tableau 2 : dimensions optimisées de diviseur en T.

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
L1	8	W1	6.6
L 2	38	W2	1.05

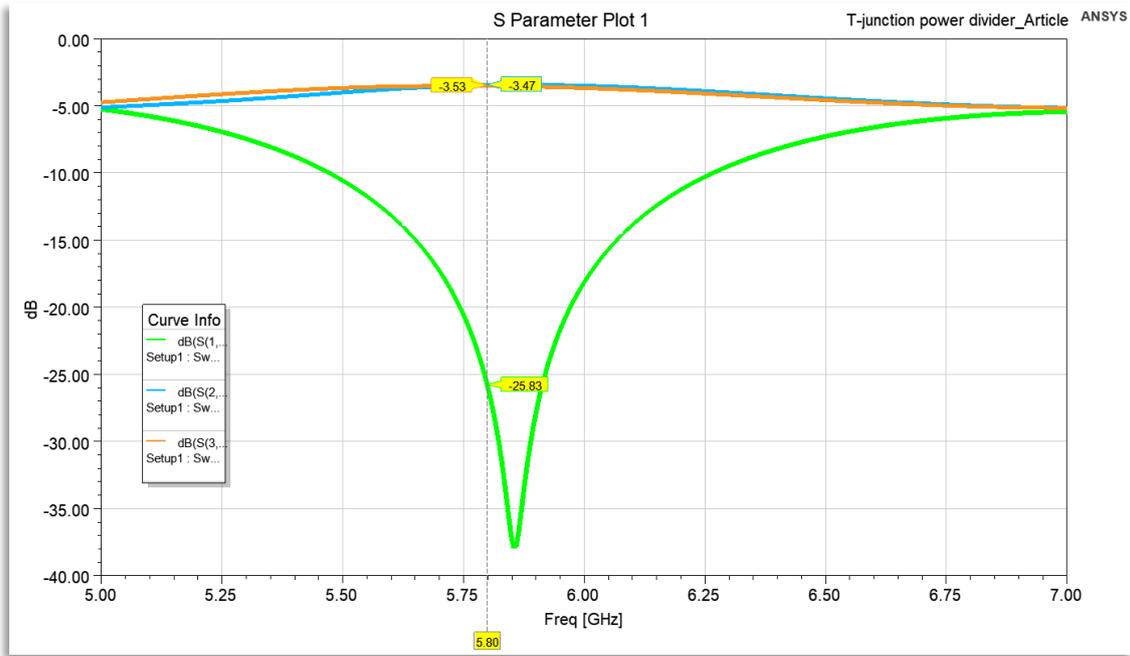


Figure 19 : Coefficient de réflexion S_{11} , S_{31} , S_{21} diviseur type T.

La figure 23 montre la radiation sur le diviseur T

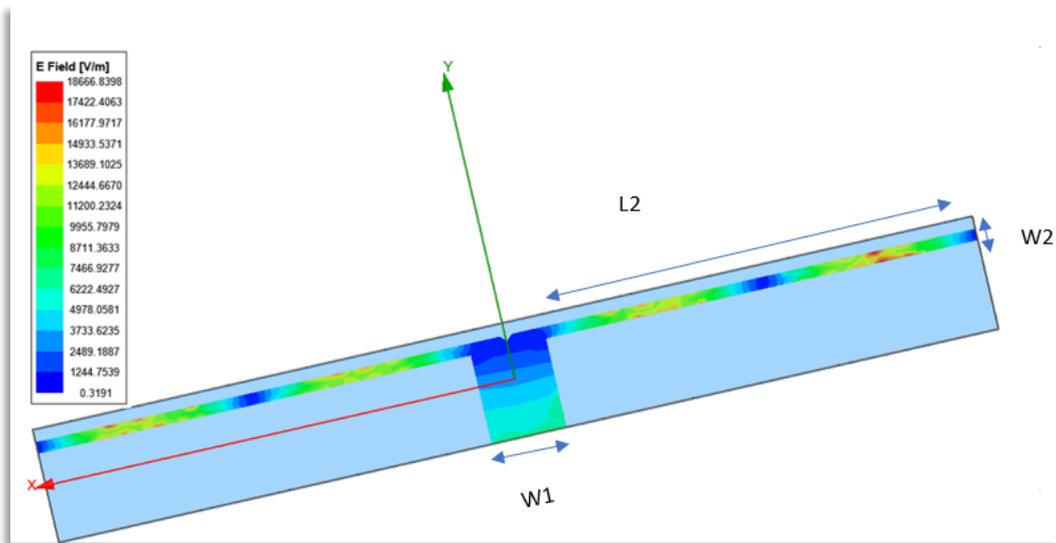


Figure 20 : la radiation sur le diviseur type T.

3.2.2. Conception et simulation du diviseur de puissance GIS en mode TE₅₀

Le diviseur de puissance GIS se compose de deux composants : la structure de transition de mode et l'alimentation électrique via un diviseur de puissance microbande en T, comme illustré à la figure 24.

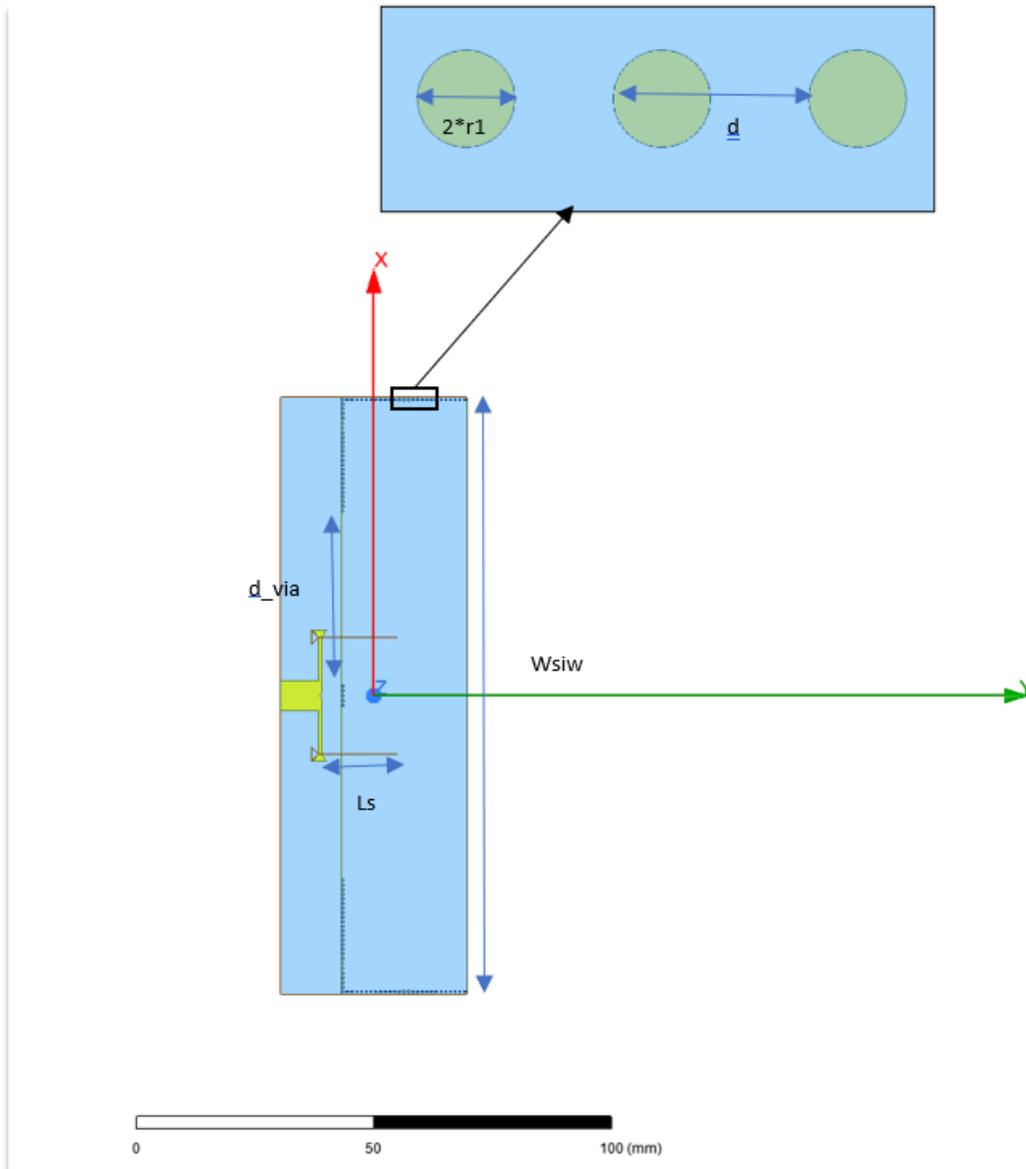
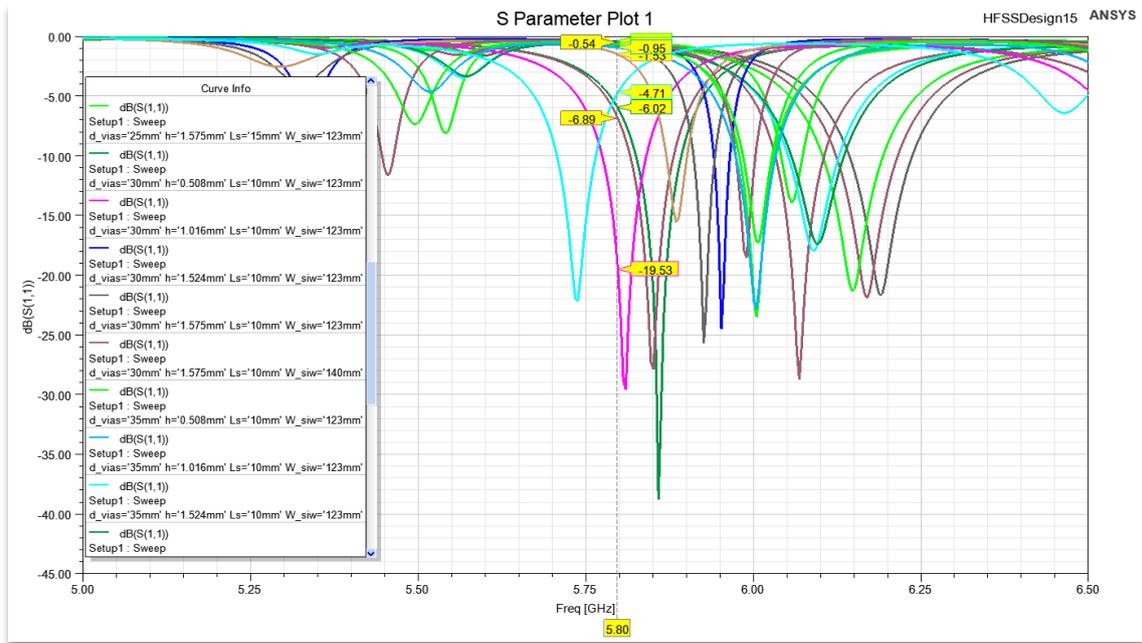
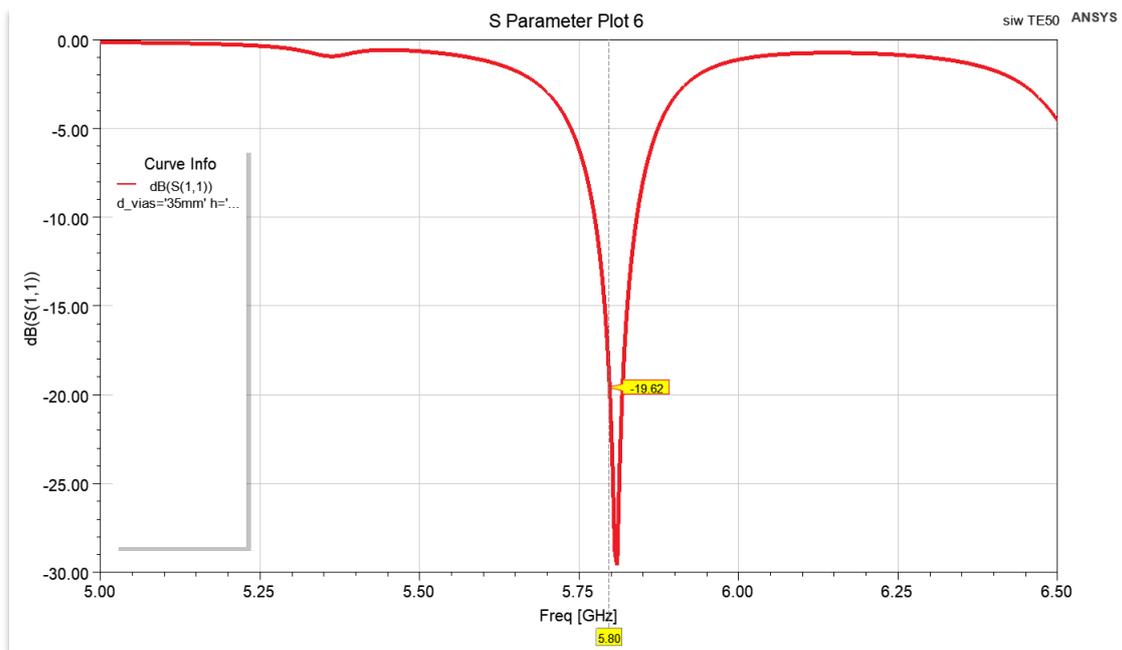


Figure 21 : structure de diviseur de puissance GIS en mode TE50 alimenter par le diviseur en T.

À la figure 25, les paramètres s de la structure d'excitation de mode sont représentés. Les paramètres de réflexion servent d'indicateur intuitif des performances de la structure d'excitation de mode d'ordre supérieur. Étant donné la nécessité d'une excitation directe pour générer le mode TE50 d'ordre supérieur, la minimisation du coefficient de réflexion est cruciale pour atténuer la perte d'énergie. La simulation a été effectuée dans la plage de fréquences [5 GHz - 6 GHz] avec un pas de 0,0145 GHz, ce qui a donné la courbe de paramètre S11 en dB, figure 25.



(a)



(b)

Figure 22 : (a) Coefficient de réflexion optimisé (b) Coefficient de réflexion simulé du diviseur GIS TE50.

L'espacement entre les deux fentes est égal à un cinquième de la largeur du guide d'ondes intégré sur le substrat. Cette configuration garantit une distribution uniforme de la puissance entre les cinq signaux générés dans le mode TE50 d'ordre supérieur (figure 26). L'optimisation de la position et des paramètres de largeur (d_{via}) des vias métalliques appariés en impédance assure les performances maximales du champ électrique dans l'ordre supérieur.

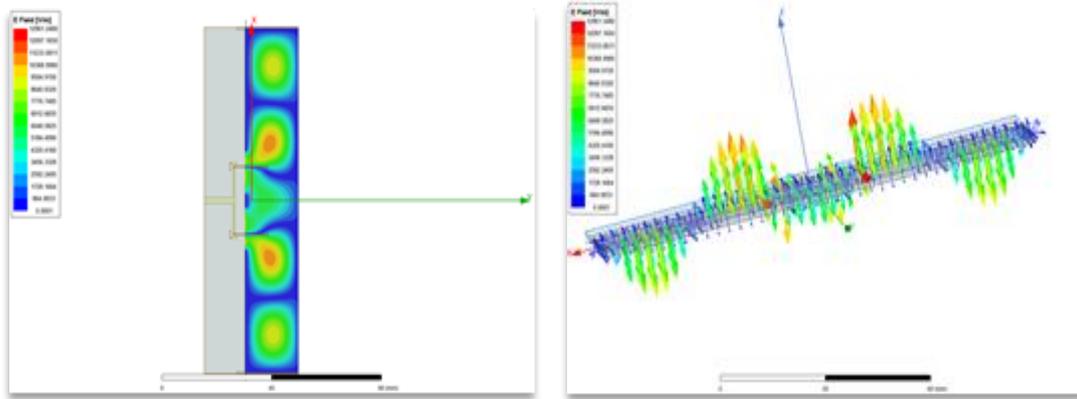


Figure 23: (a) Distribution électromagnétique (b) Distribution du vecteur électrique du mode TE50 dans la structure d'excitation.

Le tableau 3 présente les dimensions optimisées de GIS proposer. L_s , $w_f = 0.4\text{mm}$ est la longueur et largeur des fentes. d est l'espacement entre les Vias, tandis que r_1 est leur diamètre correspondant. W_{siw} représente la largeur du GIS.

Tableau 3 : les dimensions optimisées pour GIS.

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
W_{siw}	127.5	L_s	10
d	1	h	1.575
r_1	0.25	W_1	6
d_{vias}	35	W_2	0.7

3.2.3 Etude paramétrique

3.2.3.1. Influence de la largeur d_{vias} sur les performances du GIS

La Figure 30 présente l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur d_{vias} . On observe que la fréquence de résonance de GIS varie en fonction de cette dimension. La courbe correspondant à $d_{vias} = 35\text{ mm}$ présente la meilleure performance avec une fréquence de résonance centrée à 5.8 GHz et une bande

passante de 70 MHz à -10 dB. Les autres valeurs de d_{vias} entraînent soit un décalage de la fréquence de résonance, soit une diminution de S11, ce qui dégrade les performances de GIS.

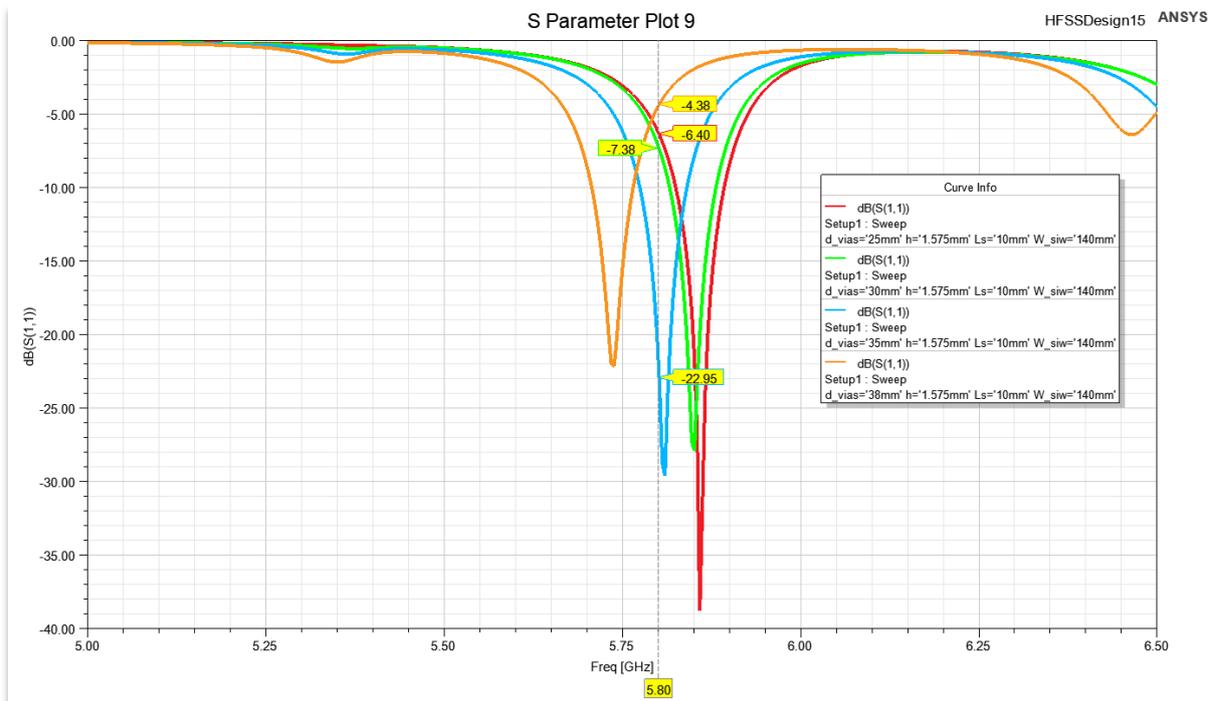


Figure 24: effet de la variation de largeur d_{vias} sur le coefficient de réflexion S11.

3.2.3.2. Effet de la largeur de la ligne de transmission (W_{siw}) sur les caractéristiques du GIS

La figure 31 illustre la sensibilité des performances du GIS aux variations de la largeur de la ligne de transmission W_{siw} . Les résultats montrent que W_{siw} influe significativement sur la fréquence de résonance, la bande passante et le niveau de réflexion S11. Une valeur optimale de W_{siw} de 140 mm permet d'obtenir un compromis optimal entre ces différents paramètres.

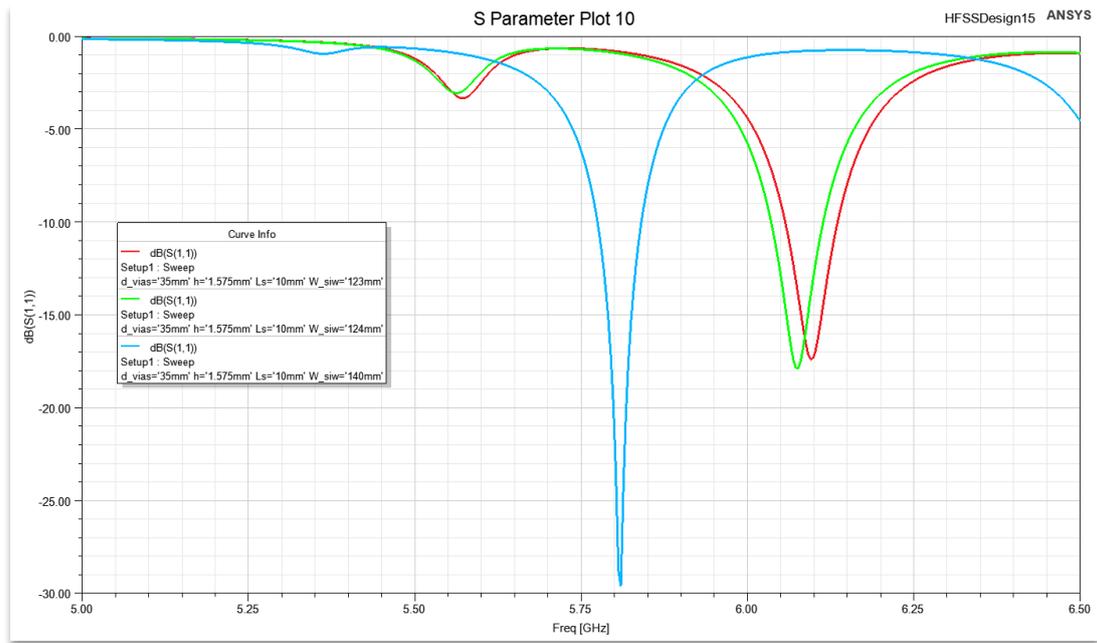


Figure 25 : effet de la variation de largeur W_{siw} sur le coefficient de réflexion S_{11} .

3.2.3.3. Impact de la longueur de la fente (L_s) sur la fréquence de résonance

D'après la figure 32 on constate clairement que la variation de L_s entraîne un décalage significatif de la fréquence de résonance. Plus L_s augmente, plus la fréquence de résonance diminue. Ce phénomène s'explique par la modification de l'impédance caractéristique du guide d'ondes, qui influe directement sur la longueur d'onde de coupure du GIS.

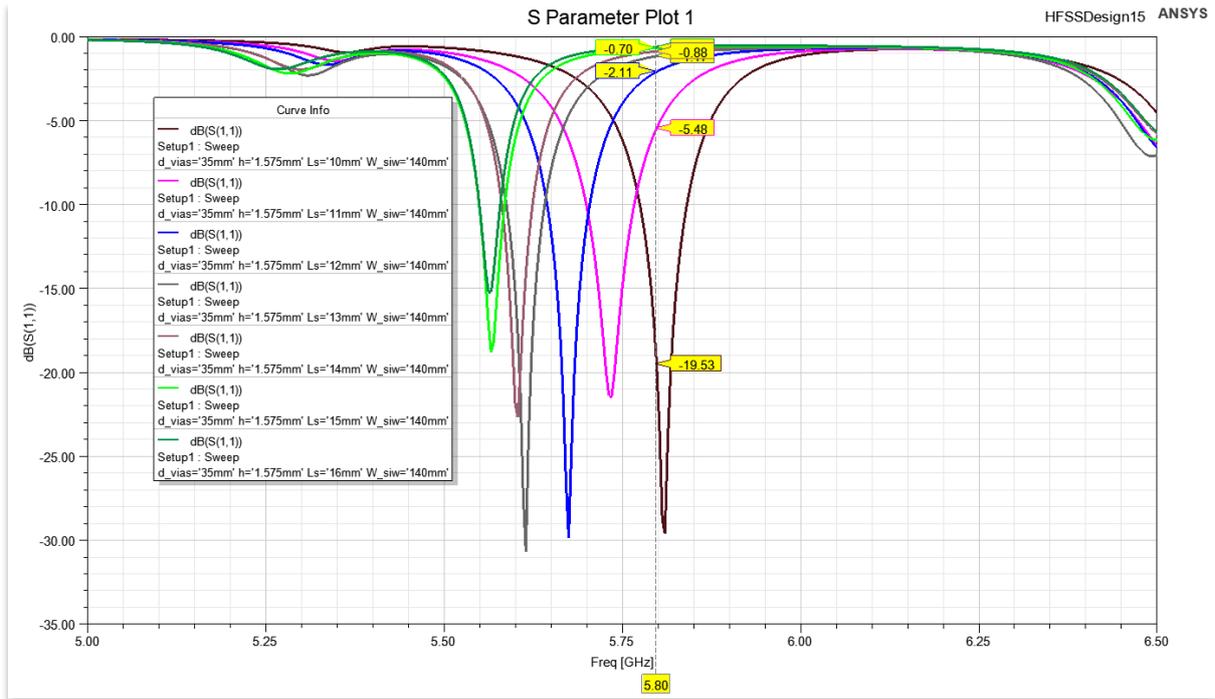


Figure 26: effet de la variation de longueur de fente L_s sur le coefficient de réflexion S_{11} .

3.2.3.4. Influence de la largeur de la fente (W_f) sur les performances du GIS

La figure 33 représente l'effet de la variation de largeur W_f sur le coefficient de réflexion. On observe clairement que la variation de W_f entraîne un décalage de la fréquence de résonance. Plus W_f augmente, plus la fréquence de résonance augmente. Ce phénomène s'explique par la modification de la capacité équivalente de la fente, qui influe directement sur la fréquence de résonance de la structure résonnante.

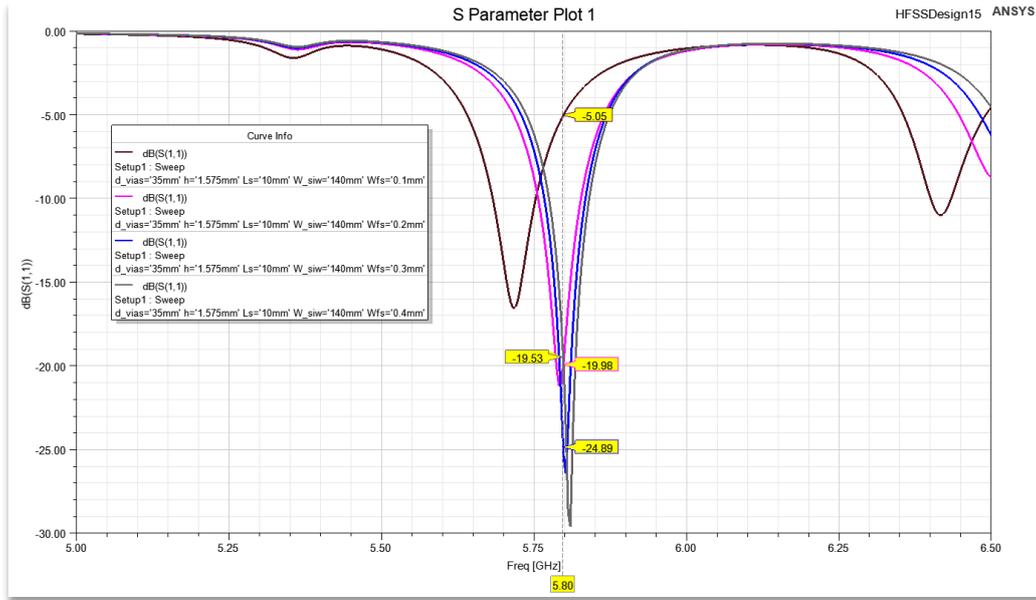


Figure 27 : effet de la variation de largeur de fente W_{fs} sur le coefficient de réflexion S_{11} .

3.2.3.5. Étude paramétrique globale : influence des dimensions géométriques sur le comportement du GIS

La Figure 34 met en évidence l'influence des dimensions géométriques h , d_{vias} , L_s et w_{siw} sur le comportement en fréquence du GIS. Les variations de ces paramètres induisent des modifications notables de la fréquence de résonance et de la bande passante du dispositif. Une analyse approfondie révèle que l'augmentation de la hauteur h tend à abaisser la fréquence de résonance, tandis qu'une augmentation de la largeur w_{siw} élargit généralement la bande passante. Ces résultats, corroborés par les simulations numériques réalisées avec HFSS, permettent d'optimiser la conception du GIS en fonction des spécifications requises.

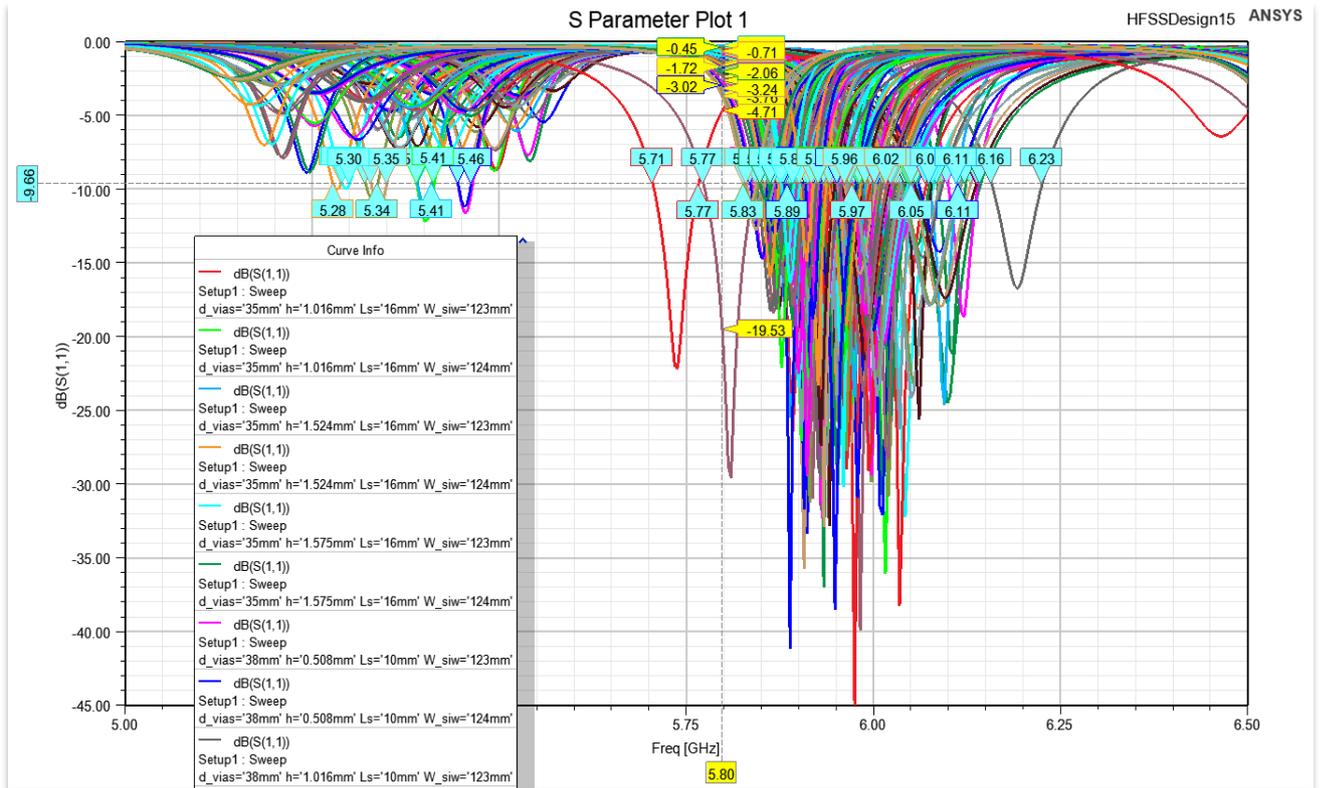


Figure 28: l'influence des paramètres géométriques h , d_{vias} , L_s et w_{siw} sur le coefficient de réflexion S_{11} du GIS.

3.3. Conception et simulation du réseau d'antenne Yagi Uda a 5 éléments :

Le substrat diélectrique choisi pour cette étude est le Rogers 5880, caractérisé par une constante diélectrique de 2,2, une épaisseur de 1,575 mm et une tangente de pertes diélectriques de 0,0009 (Figure 26).

Le Tableau 4 détaille les dimensions optimisées du guide d'ondes intégré au substrat (GIS) que nous proposons. Les paramètres suivants ont été ajustés :

L_s et w_f : Longueur et largeur des fentes, fixées à 0,4 mm

d : Espacement entre les vias.

r_1 : Diamètre des vias.

W_{siw} : Largeur du GIS.

Grâce à une optimisation numérique portant sur chacun de ces paramètres, nous avons ajusté les dimensions de manière à maximiser le gain et la bande passante tout en minimisant les pertes.

Tableau 4 : les dimensions initiales pour le réseau d'antenne Yagi 5 éléments.

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
W_siw	27.5	Ls	10
d	1	H	1.575
r1	0.25	W1	6
d_vias	35	W2	0.7
L1	8	W1	6.6
L 2	38	W2	1.05
Ly3	27.5	Ly5	14
Ly1	19.5	Ly6	10
Ly2	8	Ly7	6
Ly4	18	Ly8	2
Wy	1.6	Wyp	6
L0	8	Dy2	2.5

Les valeurs géométriques optimisées de l'antenne Yagi-Uda à 5 éléments sont résumées dans le tableau 5 ci-dessous. Ces valeurs ont été obtenues à l'issue d'un processus d'optimisation numérique visant à maximiser le gain et la bande passante tout en minimisant les pertes.

Tableau 5: les dimensions optimisées pour le réseau d'antenne Yagi 5 éléments.

Paramètre	Valeur (mm)	Paramètre	Valeur (mm)
W_siw	127	Ls	34
D	2.6	h	1.575
r1	1.075	W1	1.3
d_vias	38	W2	1.05
L1	27.5	Ly5	14
L 2	12.25	Ly6	10
Ly3	27.5	Ly7	6
Ly1	19.5	Ly8	2
Ly2	8	Wyp	6
Ly4	18	Dy2	2.5
Wy	1.6	Dy1	4
L0	8		

Le coefficient de réflexion simulé de l'antenne conçue est illustré à la figure 27. Les résultats de la simulation indiquent que le $|S_{11}|$ reste inférieur à -10 dB dans la plage de fréquences de 5,73 à 5,95 GHz.

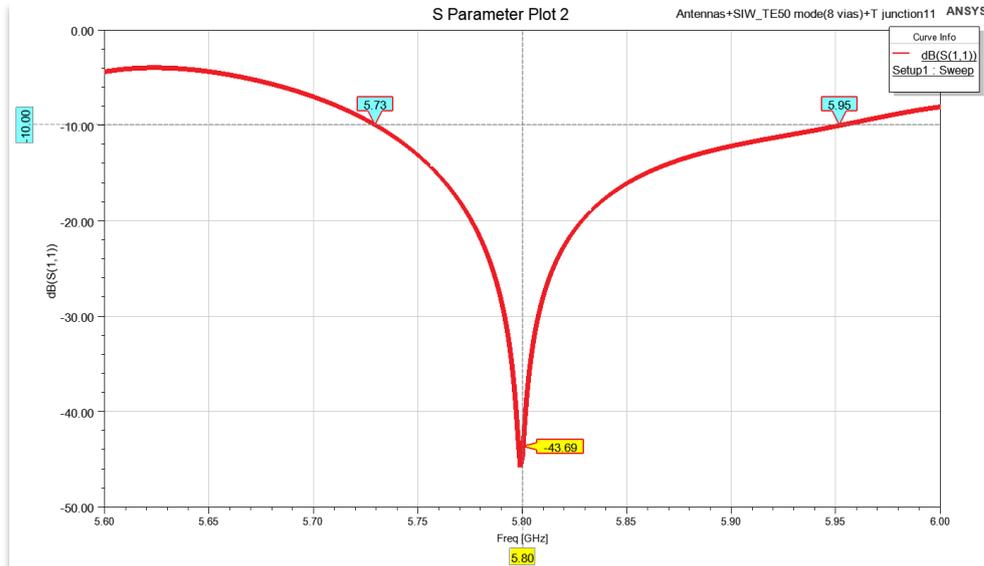


Figure 29: Coefficient de réflexion optimisé du réseau d'antennes.

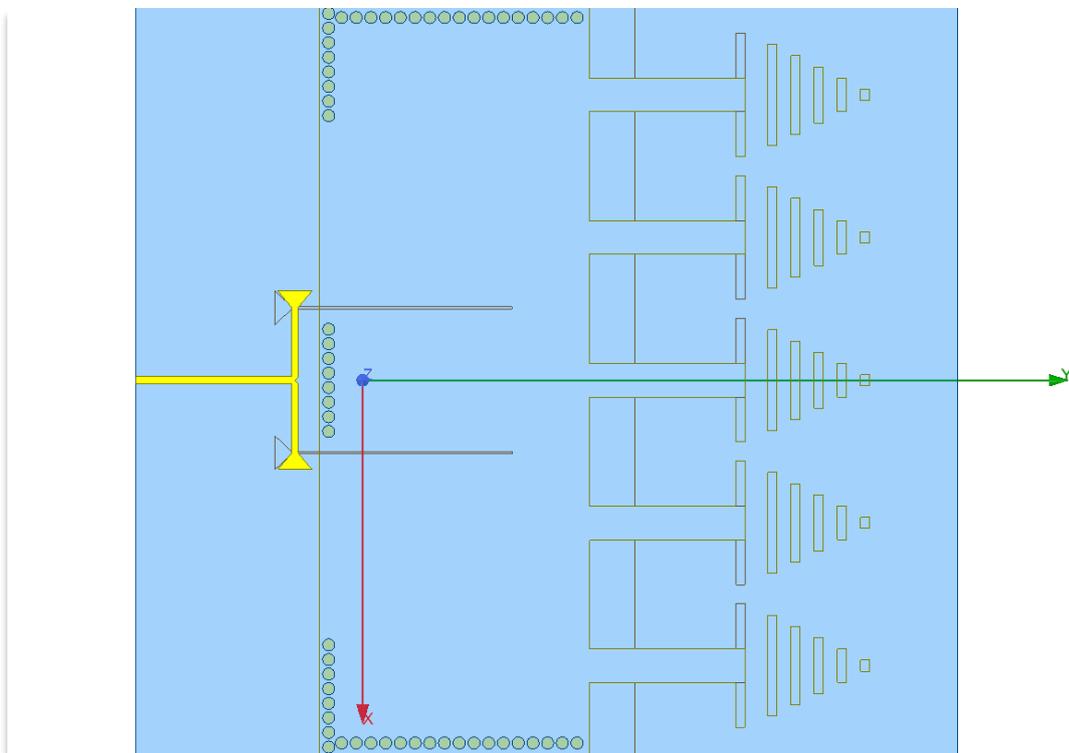
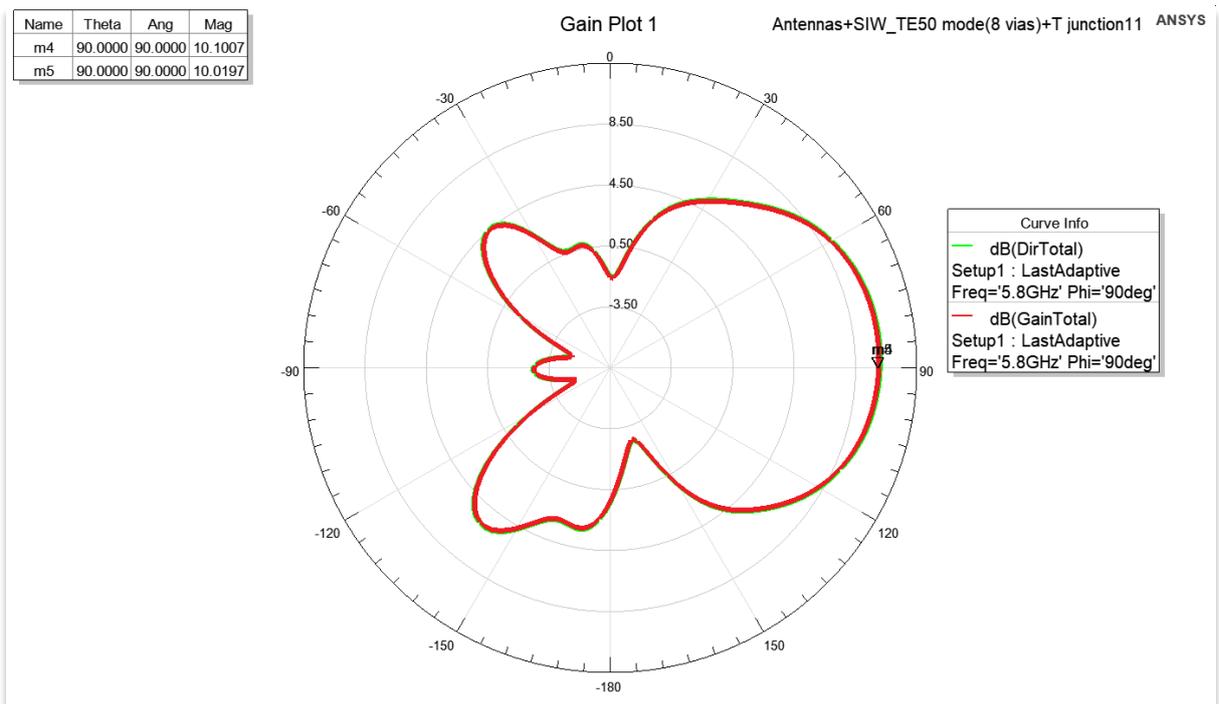
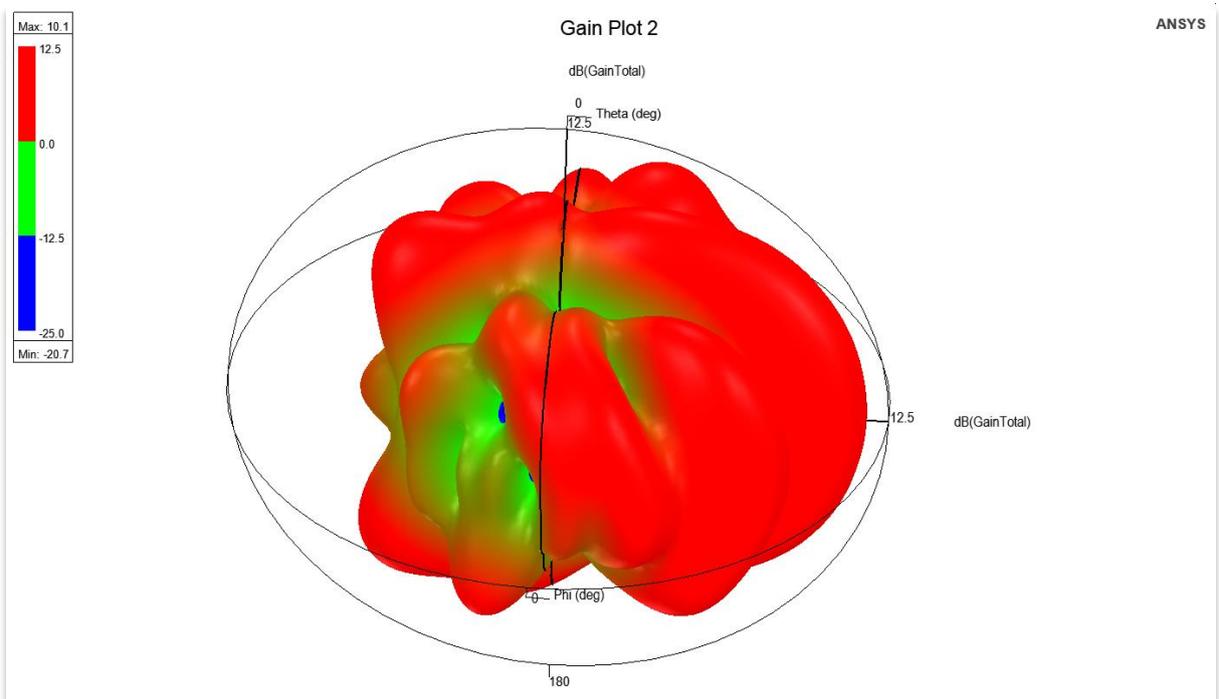


Figure 30: structure Réseau d'antenne Yagi Uda alimenter par GIS en mode TE 50.



(a)



(b)

Figure 31: Gain simulé du réseau d'antennes (a) le Gain et la Radiation en 2D, (b) le Gain en 3D.

La figure 28 présente la structure du réseau d'antenne Yagi-Uda alimenté par un guide d'ondes intégré au substrat (GIS) en mode TE50.

Le gain simulé du réseau d'antennes est présenté à la figure 29, révélant des performances de gain uniformément lisses sur l'ensemble du spectre opérationnel. L'antenne atteint un gain maximal de 10.1 dB figure 29.

3.3.1. Comparaison

Les résultats de notre étude révèlent que la conception d'antenne Yagi proposée présente des caractéristiques distinctives par rapport aux travaux antérieurs ([5], [16], [18]), comme illustré dans le tableau 2. Grâce à une optimisation méticuleuse de la géométrie, notamment en utilisant cinq éléments, notre antenne atteint un gain de 10,1 dBi et une bande passante de 220 MHz. Ces performances améliorées en termes de rayonnement et de largeur de bande en font une solution particulièrement adaptée aux applications 5G. Le choix de centrer la fréquence de résonance sur 5,8 GHz répond spécifiquement aux exigences de ce standard, positionnant ainsi notre conception comme une alternative compétitive sur le marché.

Tableau 6 : Synthèse des résultats : comparaison avec l'état de l'art.

	Notre désigne	[5]	[16]	[18]
Gain (dBi)	10.1	8.4	4.8	7.5
Dimension (mm x mm)	133x133	40x40	56x65	160x200
Fréquence de résonance (GHz)	5.8	7.7 à 12	2.361 à 2,745	5.59 à 5.61
Nombre des éléments	5	3	1	4
Bande passante (MHz)	220	4700	384	19.4

3.3.2 Prochaines étapes :

Les résultats de simulation numérique présentés dans cette étude constituent une base solide pour la poursuite des travaux. Afin de valider expérimentalement ces résultats et d'évaluer l'influence des facteurs de fabrication sur les performances réelles de l'antenne Yagi-Uda, des mesures expérimentales sont prévues. Ces mesures permettront également d'affiner, si nécessaire, les modèles numériques.

Chapitre 4 : Conclusion

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur l'étude et la conception d'une nouvelle architecture d'antenne Yagi basée sur la technologie des guides d'ondes à substrat intégré (GIS). En exploitant le mode TE₅₀, nous avons démontré la faisabilité d'une antenne compacte, à haut gain et à large bande passante, répondant ainsi aux exigences croissantes des systèmes de communication sans fil modernes, notamment dans la fréquence 5.8 GHz

L'originalité de cette étude réside dans l'utilisation innovante du mode TE₅₀ pour l'alimentation de l'antenne Yagi, ce qui permet de simplifier la structure et d'améliorer les performances par rapport aux configurations traditionnelles. Les résultats obtenus démontrent un gain de 10.1 dB et une bande passante de 220 MHz, confirment le potentiel de cette approche pour le développement de systèmes d'antennes plus performants et plus flexibles.

Les perspectives sont nombreuses. Il serait intéressant d'explorer l'optimisation de cette antenne pour différentes bandes de fréquences et d'étudier son intégration dans des systèmes d'antennes intelligentes. De plus, l'extension de cette approche à d'autres types d'antennes pourrait ouvrir de nouvelles voies de recherche dans le domaine des micro-ondes.

Bibliographies

- [1] D. M. POZAR, "Microwave Engineering 2nd Edition," New York: John Wiley & Sons, Inc. 716p, 1998.
- [2] M. Mbaye, "Conception d'un réseau d'antennes multifaisceaux avec la technologie GIS (GUIDE INTEGRE AU SUBSTRAT)", Thèse de doctorat, Université de Québec en 'Outaouais, 2013.
- [3] V. Kumari and S. Srivastava, "Design of H-plane horn antenna using substrate integrated waveguide," *2013 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, Dhanbad, India, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICMAP.2013.6733470.
- [4] S. Ghosh and B. R. Behera, "Rectangular Substrate Integrated Waveguide for 5.6 GHz -design and analysis of RSIW for X-Band applications," *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 2016, pp. 981-984, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566281.
- [5] N. Muchhal, S. Srivastava, and M. Elkhoully, 'Analysis and Design of Miniaturized Substrate Integrated Waveguide CSRR Bandpass Filters for Wireless Communication', *Recent Microwave Technologies*. IntechOpen, Aug. 25, 2022. doi: 10.5772/intechopen.104733.
- [6] Zhongli Shi and Zhenhai Shao, "Design of ka-band substrate integrated waveguide circulator," *International Conference on Computational Problem-Solving*, Li Jiang, China, 2010, pp. 260-262.
- [7] Athanasopoulos, Nikolaos, Dimitrios Makris, and Konstantinos Voudouris. "A 60 GHz planar diplexer based on substrate integrated waveguide technology." *Active and Passive Electronic Components* 2013, no. 1 (2013): 948217.
- [8] Bouchra. Rahali et Mohammed. Feham, " Design of Ku-Band Substrate Integrated Waveguide Phase Shifter ", *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 4, No. 3, pages 225-229, 2014.
- [9] Hattan. Abuzaid, Ali. Doghri et Ke. Wu, "SIW Based Multilayer Transition and Power Divider in LTCC Technology", résumé du Symposium international sur les micro-ondes de l'IEEE MTT-S, juin 2013.
- [10] Ziqiang. Yang, Jun. Dong, Bangyu. Luo, Tao. Yang and Yu. Liu, "Low Phase Noise Concurrent Dual-Band Oscillator Using Compact SIW Diplexer", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 10, October 2015.
- [11] Zhebin. Wang and Chan. -Wang. Park, "Novel substrate integrated waveguide (SIW) type high power amplifier using microstrip-to-SIW transition", *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)* Seoul South Korea.
- [12] L. Sun, X. Wang, S. Zhou, X. Wang, Y. Chen and D. Du, "A Yagi-Uda array antenna fed by SIW TE₃₀ mode," *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AECA)*, Dalian, China, 2022, pp. 1329-1331, doi: 10.1109/AECA55500.2022.9918915.

- [13] A. Kumar Nayak and A. Patnaik, "Design and Testing of a Broadband Microstrip-SIW Transition," 2020 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), Riga, Latvia, 2020, pp. 91-95, doi: 10.1109/MTTW51045.2020.9245062.
- [14] D. -F. Guan, Z. -P. Qian, Y. -S. Zhang and Y. Cai, "A Hybrid SIW and GCPW Guided-Wave Structure Coupler," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 8, pp. 518-520, Aug. 2014, doi: 10.1109/LMWC.2014.2321497.
- [15] P. Wu, J. Liu and Q. Xue, "Wideband Excitation Technology of TE₂₀ Mode Substrate Integrated Waveguide (SIW) and Its Applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 6, pp. 1863-1874, June 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2427808.
- [16] constantine scu, Claudia, Claudia Pacurar, Adina Giurgiuman, Calin Munteanu, Sergiu Andreica et Marian Gliga. 2023. « Antenne Yagi Uda planaire améliorée à gain élevé pour les applications 2,4 GHz et son influence sur les tissus humains » *Sciences appliquées* 13, no. 11 : 6678. <https://doi.org/10.3390/app13116678>.
- [17] Bahrouni, M. ; Houzet, G. ; Vuong, TP ; Mendès, PM ; Dinis, H. ; Silva, R. ; Trabelsi, H. Modélisation d'une antenne bi-bande compacte, implantable pour les applications biomédicales. *Électronique* 202me3 ,12, 1475.
- [18] HYH Al-Zahawi, MS Bayati, S. Sahandabadi et A. Dianat, « Conception et simulation d'une antenne Yagi-Uda à microruban pour la 5G », *30e Conférence internationale IEEE sur l'électronique, les circuits et les systèmes (ICECS) 2023*, Istanbul, Turquie, 2023, pp. 1-4, doi : 10.1109/ICECS58634.2023.10382729.
- [18] Abdulkawi, WM ; Massoud, A. ; Nizam-Uddin, N. ; Alnakhi, M. Une étude de simulation de l'antenne portable tribande à faible SAR. *Micromachines* 2023, 14, 819.
- [19] P. Cheong, K. Wu, W. -W. Choi and K. -W. Tam, "Yagi-Uda Antenna for Multiband Radar Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 1065-1068, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2328991.
- [20] Y. Gao, M. T. Ghasr and R. Zoughi, "Design of a Planar Wideband Yagi-Uda Antenna for Millimeter Wave SAR Imaging Application," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 281-282, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888588.