
ETUDE PARAMETRIQUE DE L'ISOLATEUR COPLANAIRE SOUS HFSS

Sommaire

Introduction	74
III.1 Le logiciel de simulation HFSS	75
III.2 Processus de simulation sous HFSS	76
III.3 Présentation du design de l'isolateur coplanaire	77
III.4 Résultats de simulation	78
III.4.1 Résultats de simulation d'un isolateur 1 fente	79
III.4.1.1 Résultat de simulation pour longueur fente 8-6mm largeur 1mm	79
III.4.1.2 Variation de la longueur de fente	82
III.4.1.3 Synthèse de variation de la longueur fente 8-6-4mm .	84
III.4.1.4 Variation de la largeur de fente	84
III.4.2 Simulation d'un isolateur à deux fentes	89
Conclusion	90
Bibliographie	91

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire une étude paramétrique sur la structure à une fente de l'isolateur coplanaire asymétrique issu des travaux de thèse de S. Kirouane. L'objectif est d'une part de déterminer si il existe des dimensions permettant d'optimiser les performances du dispositif en vue d'en faire une fonction réellement utilisable dans une chaîne de transmission en télécommunications, et d'autre part de mieux comprendre les phénomènes physiques qui entrent en jeu dans cette structure atypique, qui mêle une géométrie originale aux propriétés particulières des ferrites dans le domaine fréquentiel d'apparition des ondes magnétostatiques. Cette étude paramétrique du design du composant se fera par la simulation de la structure à l'aide du logiciel de simulation HFSS (High Frequency Structure Simulation), qui permet de structurer ainsi que de simuler ou de modéliser les composants à hautes fréquences, l'objectif étant d'avoir un effet non réciproque très grand avec une grande isolation et des pertes d'insertion très faibles.

Le cahier des charges, qui consiste à dépasser les performances obtenues avec le circulateur d'O. Zahwe et celle obtenues par S. Kirouane, est d'obtenir un isolateur coplanaire présentant un effet non réciproque $ENR \geq 20\text{dB}$ avec une isolation comprise entre 20dB et 30dB, et des pertes d'insertion comprises entre 0,1 à 1dB, pour viser une application transférable. Pour se rapprocher de ce cahier des charges, nous allons faire varier les différentes dimensions de l'isolateur pour en déterminer l'effet sur ses propriétés, effet non réciproque (ENR) et pertes d'insertion (PI).

Cette étude paramétrique de l'isolateur coplanaire, va consister à faire varier les dimensions de la fente asymétrique à l'aide du logiciel HFSS, et devrait nous permettre d'observer l'évolution des phénomènes physiques dans le composant.

III.1 Le logiciel de simulation HFSS

Le logiciel HFSS est un logiciel de simulation qui utilise des structures en 2D ou 3D. Il utilise plusieurs techniques pour résoudre un large éventail d'applications micro-ondes, radiofréquences ou hautes fréquences.

Il permet de numériser les modèles géométriques en utilisant la méthode des éléments finis, faisant le maillage de toute forme géométrique de surface en les assemblant à partir d'une analyse adaptative, afin de résoudre les équations de Maxwell et de calculer la propagation des champs EM dans une structure soumise à une excitation donnée, à différentes fréquences. Cette méthode permet d'avoir une solution numérique vraisemblable.

Les résultats de simulation obtenus sont restitués sous forme des paramètres S, Y et Z du dispositif modélisé ou de champs à l'intérieur et autour de la structure. Ces grandeurs lient les paramètres admittances Y avec les impédances Z et les ondes entrantes avec les ondes sortantes. Il permet de faire une étude paramétrique du composant afin d'optimiser ses performances.

Généralement il est difficile d'obtenir une solution exacte avec les résultats de simulation, car la solution donnée par les logiciels est une solution approchée. L'évaluation de la qualité ou la fiabilité des solutions numériques se fait par la comparaison avec les mesures.

Une première comparaison simulation / mesure permet de valider la fiabilité des résultats d'HFSS sur la problématique donnée (ici la simulation des résonances de la structure et de la couche de matériau magnétique), pour pouvoir ensuite se servir du logiciel pour l'optimisation du design des composants.

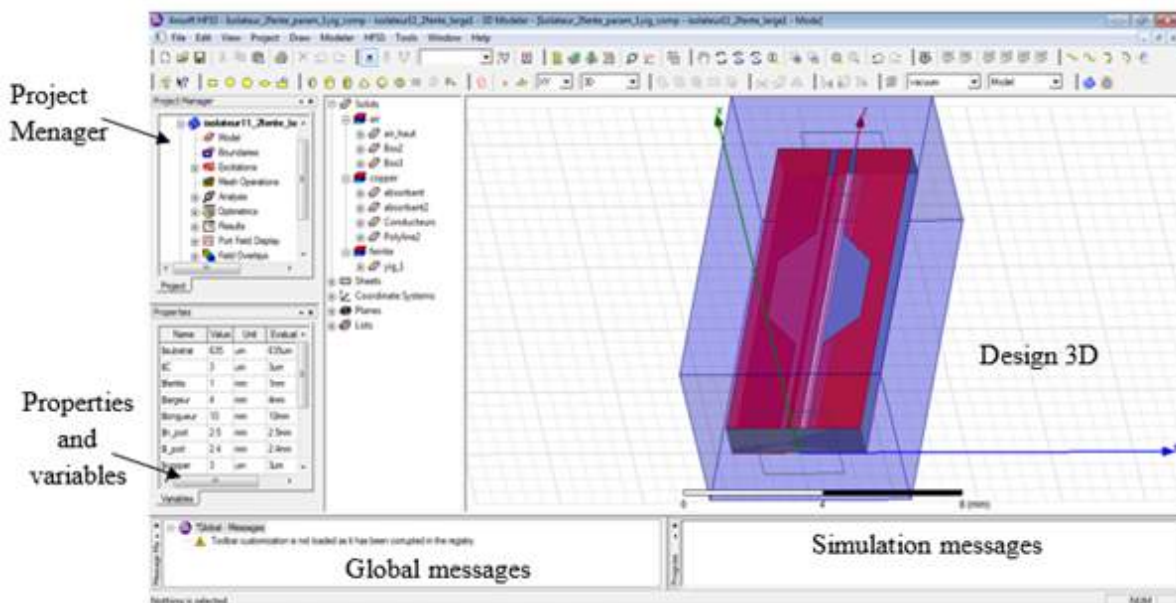


FIGURE III.1 – Principales fenêtre de l'environnement d'HFSS

Les images des différentes étapes de simulation d'un dispositif avec ce logiciel sont présentées sur la figure 2.

III.2 Processus de simulation sous HFSS

Pour simuler il faut d'abord créer un projet HFSS puis dessiner la géométrie de la structure à simuler. L'attribution des matériaux utilisés et les paramètres de configuration et leurs ports d'excitation doivent faire l'objet d'une définition attentive. Dans notre cas les matériaux utilisés sont le ferrite (YIG) et le cuivre. Après avoir défini le design du dispositif, on doit réaliser le maillage ainsi que paramétrer les fréquences de balayage.

HFSS choisit un maillage 3D du dispositif en découpant son volume en tétraèdres. Le maillage adaptatif est un maillage qui part d'un maillage initial de référence qu'HFSS utilise pour le calcul d'une première solution. Ensuite HFSS densifie le maillage selon les critères définis par l'utilisateur aux endroits où le résultat est le moins interpolable, et donne une deuxième solution. HFSS compare ces deux solutions à partir d'un critère de convergence donné initialement par l'utilisateur pour que la simulation se stabilise. Si la solution n'atteint pas le critère convergence, HFSS commence à nouveau le raffinement du maillage, ensuite il compare les deux dernières solutions par rapport au critère de convergence ainsi de suite jusqu'à ce que la solution atteigne le critère de convergence. [1]

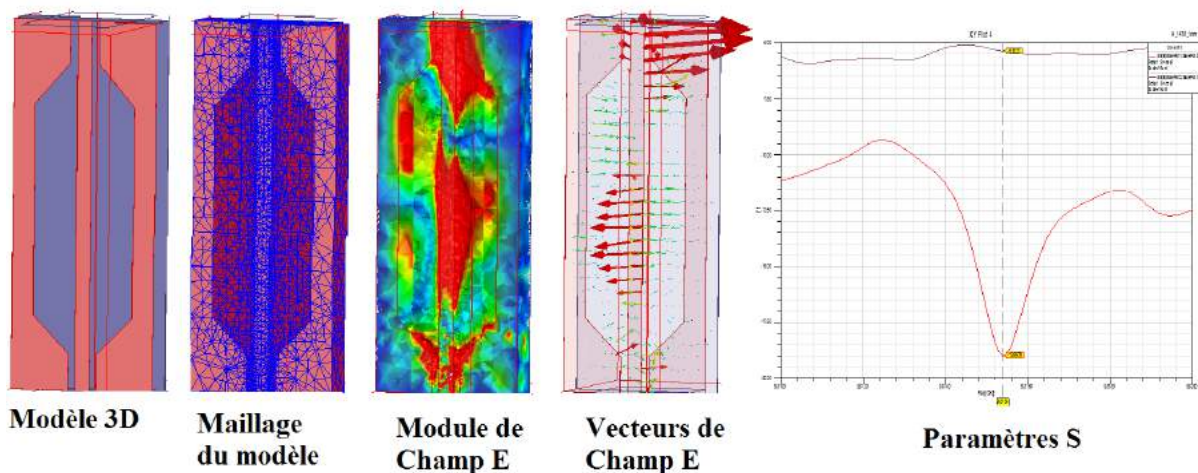


FIGURE III.2 – Différentes étapes d'utilisation de HFSS, conception 3D, maillage, visualisation des champs et paramètres S.

L'analyse électromagnétique et la présentation des résultats de simulation sont les étapes qui viennent après la convergence. Le temps mis pour analyser la structure dépend fortement de la géométrie du modèle, de la fréquence pour laquelle est effectuée le maillage et des ressources informatiques disponibles. Il peut varier de quelques secondes à plusieurs heures.

III.3 Présentation du design de l'isolateur coplanaire

Un isolateur coplanaire asymétrique a été étudié précédemment au laboratoire [2], comme nous l'avons mentionné sur la dernière partie du chapitre précédent et est présenté sur la figure suivante.

C'est un dispositif dont la propagation non réciproque est obtenue par l'excitation d'ondes magnétostatiques et la présence de déplacement de champ, qui permet d'atténuer le signal à la résonance par l'interférence destructive de deux ondes en opposition de phase.

Cette structure est basée sur une ligne coplanaire, mais celle-ci est asymétrique car les deux plans de masse supérieurs n'ont pas la même configuration, un des plans de masse étant réalisé avec une fente pour tirer partie de l'effet de déplacement de champ. La fente asymétrique est précédée d'une zone de taper pour éviter la désadaptation d'impédance.

Cette zone peut éviter les grosses réflexions de l'onde électromagnétique et permet de faire progresser graduellement l'impédance caractéristique du port d'accès de 50Ω jusqu'à l'impédance de la zone asymétrique.

Un plan de masse est ajouté en dessous de la couche magnétique sur le côté asymétrique afin de créer un guide d'onde secondaire, hybride, mélange de type microruban et de type coplanaire.

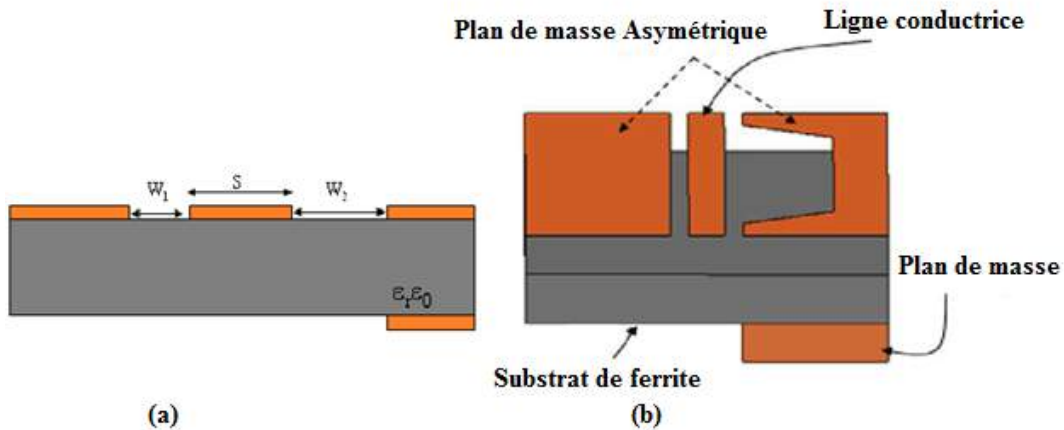
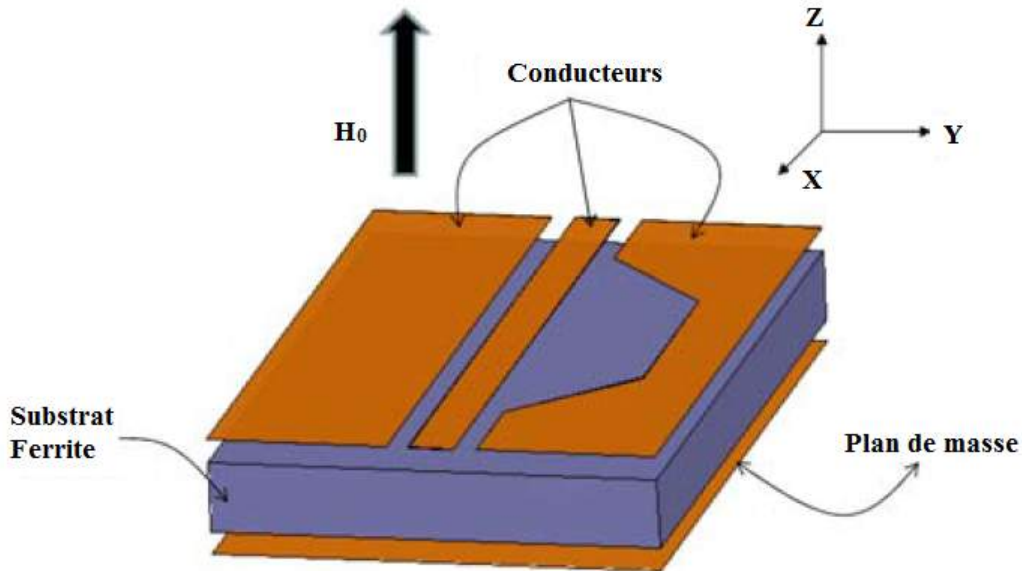


FIGURE III.3 – Isolateur coplanaire asymétrique (a) vue de face, (b) vue de en 3D [2]

Pour notre étude, la même structure est reprise avec la seule différence que le plan de masse inférieur n'est pas mis sur le côté du plan asymétrique mais sur toute la surface du ferrite, cette configuration étant plus facile à réaliser comme le montre la figure suivante, alors que pour la version précédente, le plan de masse nécessitait d'être aligné par rapport au plan de masse supérieur lors de sa réalisation, opération délicate dans le processus de photolithographie.

FIGURE III.4 – *Isolateur coplanaire asymétrique avec plan de masse sous toute la surface du ferrite*

III.4 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous avons fait une première étude paramétrique en faisant varier la largeur de la fente du plan de masse asymétrique tout en fixant sa longueur. Ensuite nous avons fait varier un second paramètre en fixant la largeur de fente et en faisant varier la longueur de fente. Cette étude doit nous permettre de mieux comprendre la physique du composant, et présenter des nouvelles fonctionnalités par rapport à la structure précédente.

Les paramètres initiaux sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Epaisseur conducteur / plan de masse	$3\mu\text{m}$
Epaisseur YIG	1mm
Largeur du composant	4mm
Longueur	10mm
Largeur ligne centrale CPW (S)	$400\mu\text{m}$
Gap des fentes CPW (W_1)	$200\mu\text{m}$
Largeur box	6mm
Grande longueur fente plan de masse supérieur	8mm
Petite longueur fente plan de masse supérieur	6mm
Largeur fente plan de masse supérieur (W_2)	1mm

TABLE III.1 – *Paramètres géométriques de l'isolateur coplanaire asymétrique*

III.4.1 Résultats de simulation d'un isolateur 1 fente

Des simulations sont faites avec les mêmes paramètres de simulation que la structure précédente [4], dont les paramètres sont les suivants :

- Le champ d'excitation du matériau magnétique, qui simule du YIG est fixé à 160kA/m.
- Le champ de saturation est de 1840 Gauss.
- Une Permittivité de 15,3 et une Perméabilité de 1.
- Une Tangente diélectrique de 2.10^{-4} .
- Le Delta H est de 50 A/m.

La structure avec un plan de masse sur toute la surface du YIG basée sur la structure asymétrique [2], est simulée afin de comprendre les phénomènes physiques du composant et de vérifier que ce nouveau design n'en impacte pas le fonctionnement.

III.4.1.1 Résultat de simulation pour longueur fente 8-6mm largeur 1mm

Dans cette partie la largeur est fixée à 1mm et la grande longueur de fente est de 8mm et la petite longueur est 6mm sous forme d'un trapèze.

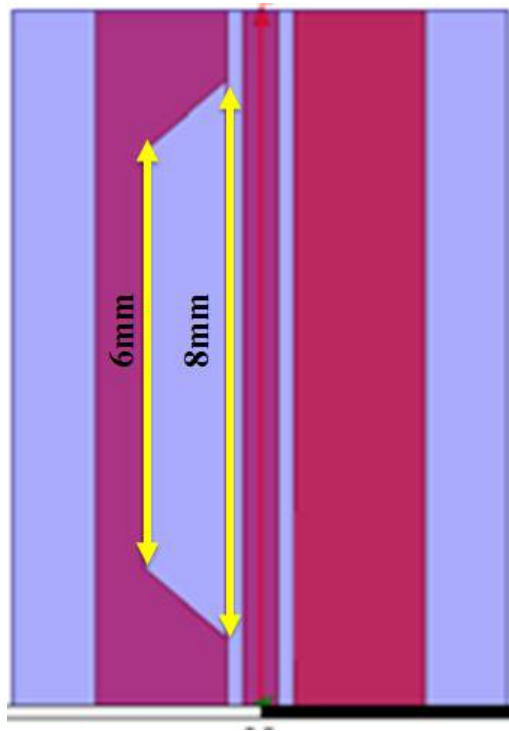


FIGURE III.5 – Longueur fente 8-6mm largeur $W_2 = 1\text{mm}$

Le résultat est présenté sur la figure suivante.

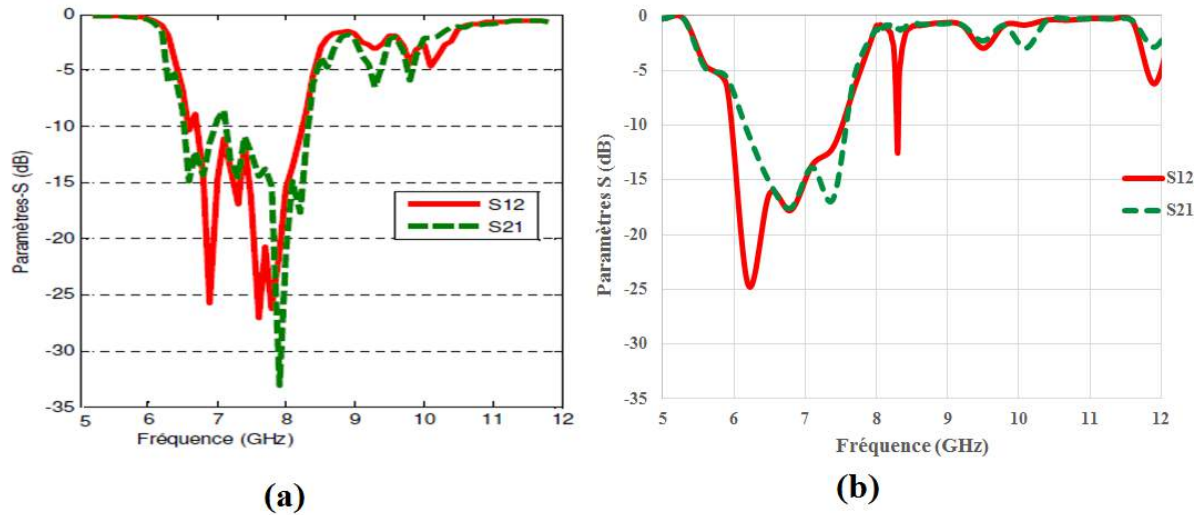


FIGURE III.6 – *Isolateur longueur fente 8-6mm largeur 1mm, avec plan de masse inférieur, (a) : sur un côté du YIG, (b) : sur toute la surface du YIG*

Dans cette partie, on compare le résultat de simulation d'un isolateur asymétrique avec un plan de masse sur toute la surface du YIG, avec celui n'ayant un plan de masse que sur un côté du YIG. C'est-à-dire notre résultat à celui trouvé par S. Kirouane. On observe une forte atténuation dans la bande de gyrorésonance sur les deux courbes. Les deux bandes ont presque la même bande de fréquence, celle pour le plan de masse sur un côté (figure III.6 (a)) se situe de 6GHz à 8,5GHz et celle que nous avons trouvé (figure III.6 (a)) est un peu avant, allant de 5,5GHz à 8GHz. On travaille près de la zone de résonance gyromagnétique pour bénéficier de la perméabilité μ_r qui est élevée et dans la bande d'apparition des ondes magnétostatiques qui est dans une bande de 8 à 9GHz environ.

On observe dans la figure III.6 (a), trois pics de résonances dont le premier pic est noyé dans la bande gyrorésonance (8,3GHz) et les deux autres pics sont situés un peu plus haut entre 9GHz et 11GHz avec une faible isolation de l'ordre de 7dB. De même sur la figure III.6 (b), on observe trois pics de résonance, dont les deux premiers pics sont situés aux mêmes fréquences que celle d'avant (figure III.6 (a)) avec une isolation importante de 12,5dB pour le 1^{er} pic. On peut dire que nos paramètres de couches magnétiques sont légèrement différents, la structure reproduit bien ses résultats. Notre résultat est exploitable mais pas suffisant, il reste à vérifier avec le résultat de mesure.

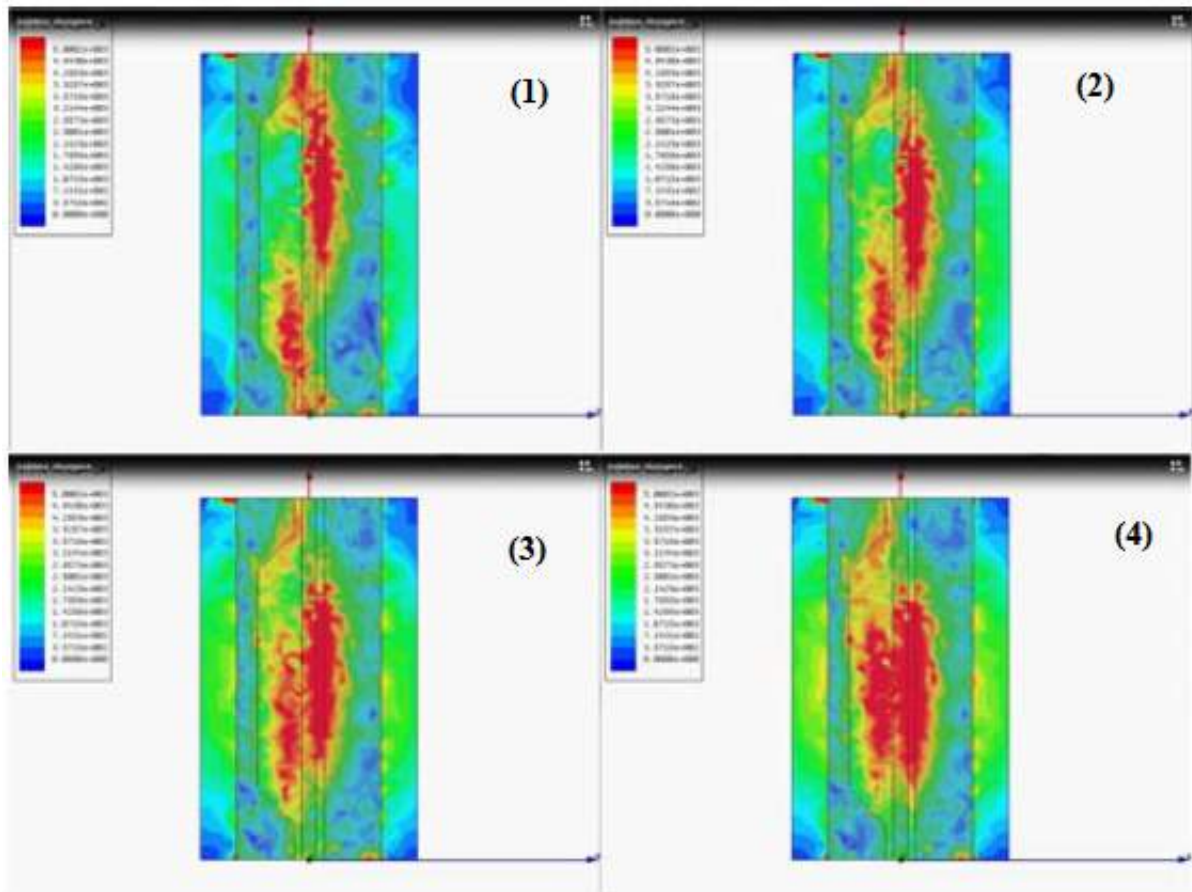


FIGURE III.7 – Evolution en fonction du temps (de gauche à droite et de haut en bas) du maximum du module du champ électrique, colocalisé avec le maximum du module de Poynting à 8,3GHz

Dans cette configuration, les simulations montrent que les vitesses de phase dans chacune des branches du guide sont de signe opposé, quand les vitesses de groupes sont de même signe (le vecteur de Poynting pointe dans la même direction dans les deux branches), il y a une apparition de propagation Main-Gauche à la fréquence de résonance, qui apparaît à une fréquence supérieure à la gyrorésonance, dans la bande des ondes magnétostatiques.

La propagation rétrograde, ou main-gauche, est un mode qui apparaît dans les couches de ferrite sous certaines conditions et dans lequel la vitesse de groupe et la vitesse de phase de l'onde ont des signes opposés. C'est-à-dire que l'énergie se propage toujours dans le même sens qu'hors résonance, mais que la phase de l'onde « remonte » en sens contraire de la structure. La propagation main-gauche n'intervenant que dans une moitié de la structure, la seconde moitié, où il n'y a pas déplacement de champ, continue à guider l'onde sur un mode main-droite, et les deux ondes se propagent dans les deux branches de la structure avec des vitesses de phase de signes opposés. Au niveau du port de sortie les deux ondes sont en opposition de phase et se recombinaient destructivement pour donner l'effet d'isolation.

III.4.1.2 Variation de la longueur de fente

Après avoir retrouvé par nous-même les résultats de S. Kirouane, une étude est faite sur la variation de la longueur de fente afin de voir le résultat sur l'effet non réciproque. Dans cette partie nous fixons la largeur de fente à 1mm et nous faisons varier la longueur de fente.

– Longueur fente 6-4mm largeur 1mm

La même configuration est faite avec une grande longueur de fente réduite à 6mm et la petite à 4mm.

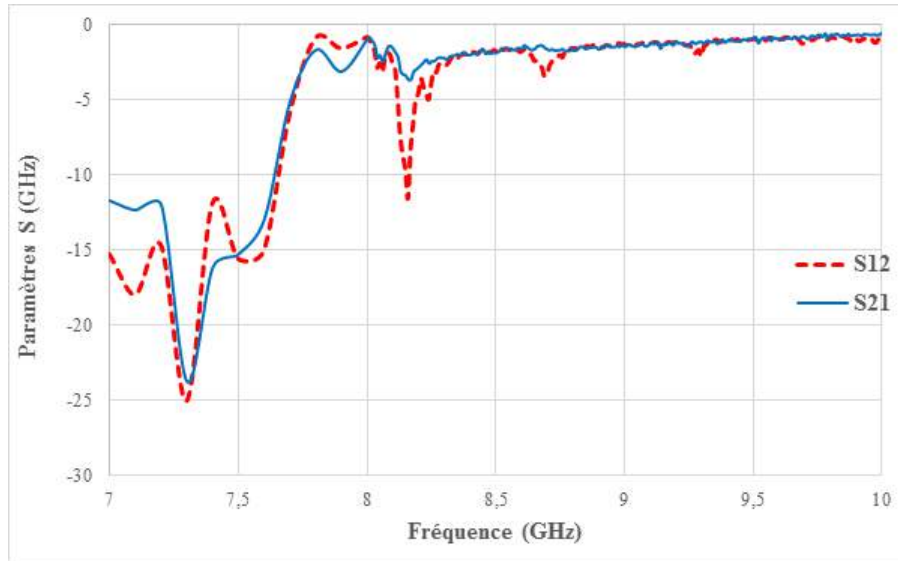


FIGURE III.8 – *Isolateur longueur fente 6-4mm largeur 1mm*

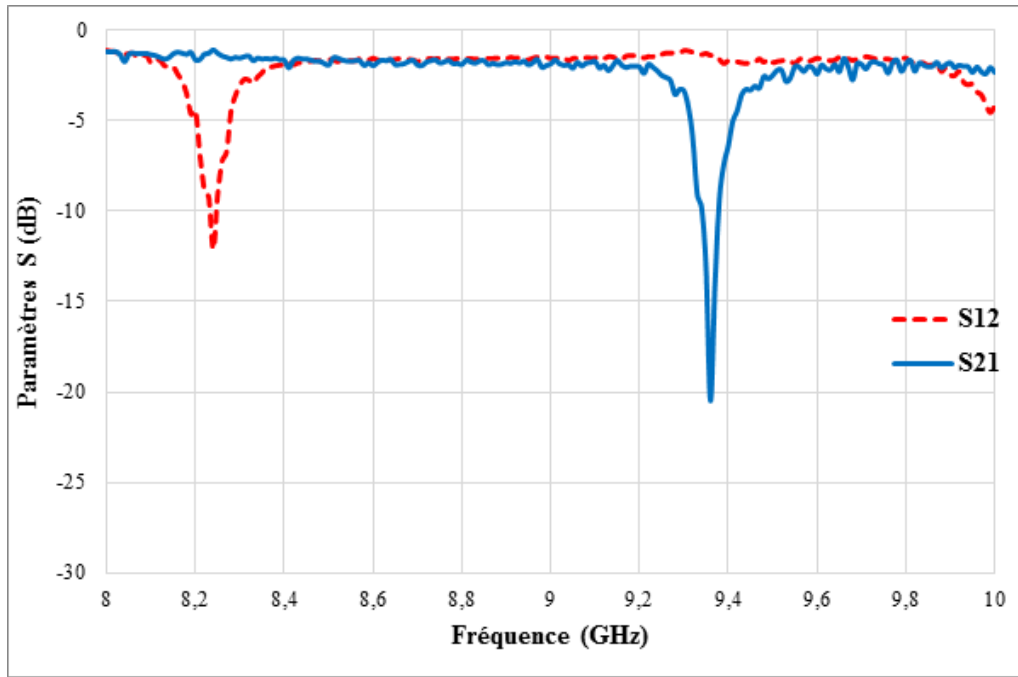
Dans cette figure la résonance gyromagnétique est dans la bande de fréquence entre 7 et 8GHz, et nous retrouvons les pics de résonance aux mêmes fréquences que dans la version précédente.

On observe au 1^{er} pic une isolation de 11,5dB et une perte d'insertion de 3,5dB à 8,2GHz, ce qui nous donne un effet non réciproque faible de 8dB. L'isolation s'est dégradée par rapport à la version de 8-6mm.

On observe qu'un second pic est apparu à la fréquence de 8,7GHz avec une faible isolation. Par rapport à la version précédente, l'isolation est comparable sur le 1^{er} pic, mais l'ENR s'est dégradé à cause des pertes d'insertion.

– Longueur fente 4-2mm largeur 1mm

Pour cette partie la grande longueur est réduite à 4mm et la petite à 2mm.

FIGURE III.9 – *Isolateur longueur fente 4-2mm largeur 1mm*

Dans cette version on retrouve toujours le 1^{er} pic autour de 8,3GHz, avec des caractéristiques sensiblement identiques à la version de 8-6mm. Par contre pour le second pic à 9,3GHz, on observe un effet non réciproque intéressant de l'ordre de 19dB, avec des pertes d'insertion de 1,5dB. L'isolation correspond au cahier des charges définit dans l'introduction ($> 20\text{dB}$). En revanche une inversion du sens de propagation est observée pour ce pic, c'est-à-dire que la transmission au premier pic est devenue absorption sur le 2nd pic. La nature de la 2nde résonance s'est modifiée entre la longueur de 8mm et celle de 4mm, mais pas sa fréquence. Ces résultats restent à vérifier en mesure.

III.4.1.3 Synthèse de variation de la longueur fente 8-6-4mm

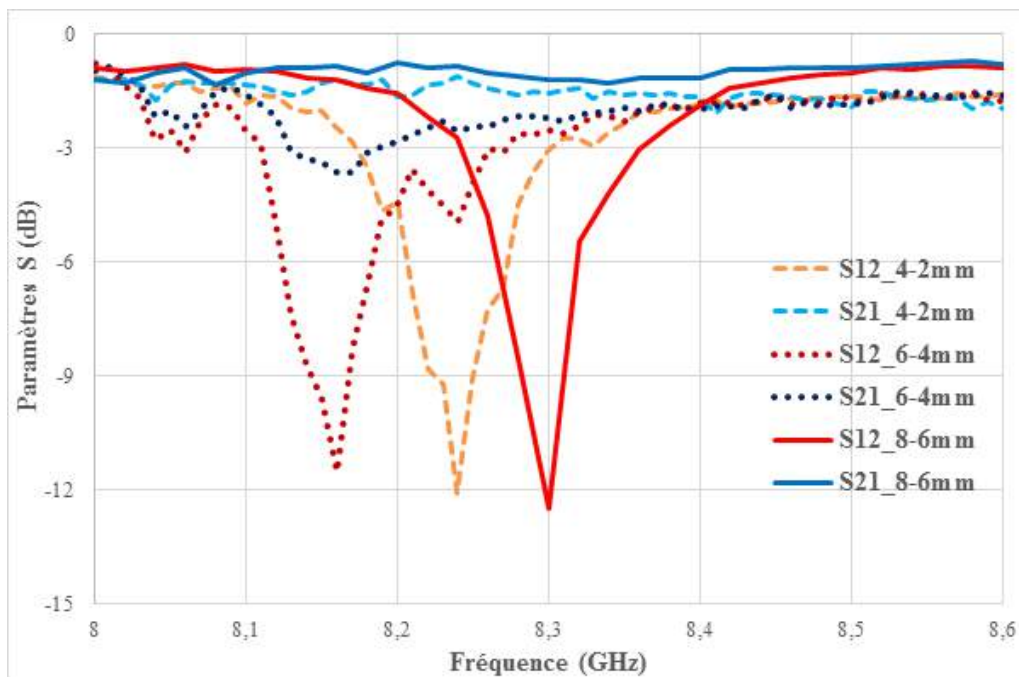


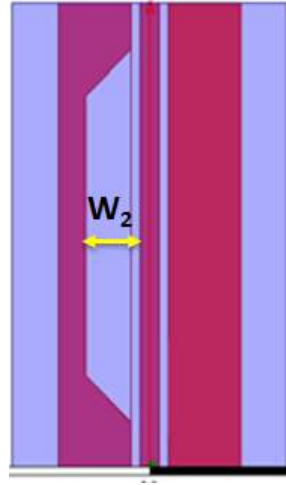
FIGURE III.10 – Synthèse de variation longueur fente 8-6-4mm

Avec la variation de la longueur de fente, on constate que le premier pic d'isolation est situé autour de 8,3GHz. La profondeur varie peu et l'optimum pour les ENR est obtenu avec une longueur de fente de 8-6mm. Dans ce 1^{er} pic le S_{21} est la transmission et le S_{12} est l'isolation. Les pertes d'insertion pour la longueur de 6-4mm ne sont pas très bonnes, mais pour les deux autres longueurs, elles, restent aux alentours de 1,5dB.

On observe que la fréquence de résonance ne change pas beaucoup en fonction des différentes longueurs de fentes. Leur fréquence de résonance est très proche malgré une petite variation d'un delta d'environ 7%. Ceci semble donc montrer que la longueur des fentes n'influe pas dans la valeur de cette fréquence de résonance.

III.4.1.4 Variation de la largeur de fente

Une étude sur la variation de la largeur de fente est maintenant réalisée afin de déterminer s'il existe une valeur permettant d'optimiser les performances du dispositif.

FIGURE III.11 – Variation de la largeur de fente W_2

– Longueur de fente 4-2mm

Comme nous avons constaté avec la longueur de fente de 4-2mm, que nous avons deux pics d'isolation, dont le premier pic a une isolation moyenne et le second pic est meilleur que le premier pic, nous nous sommes fixé à cette longueur et nous avons fait varier la largeur de fente afin de regarder l'influence de la largeur. La variation de la largeur va de 0,7mm à 1,3mm. En faisant un agrandissement dans la bande de 8,1GHz à 8,4GHz et de 9,2GHz à 9,5GHz, cet agrandissement permet de voir l'existence des effets non réciproques.

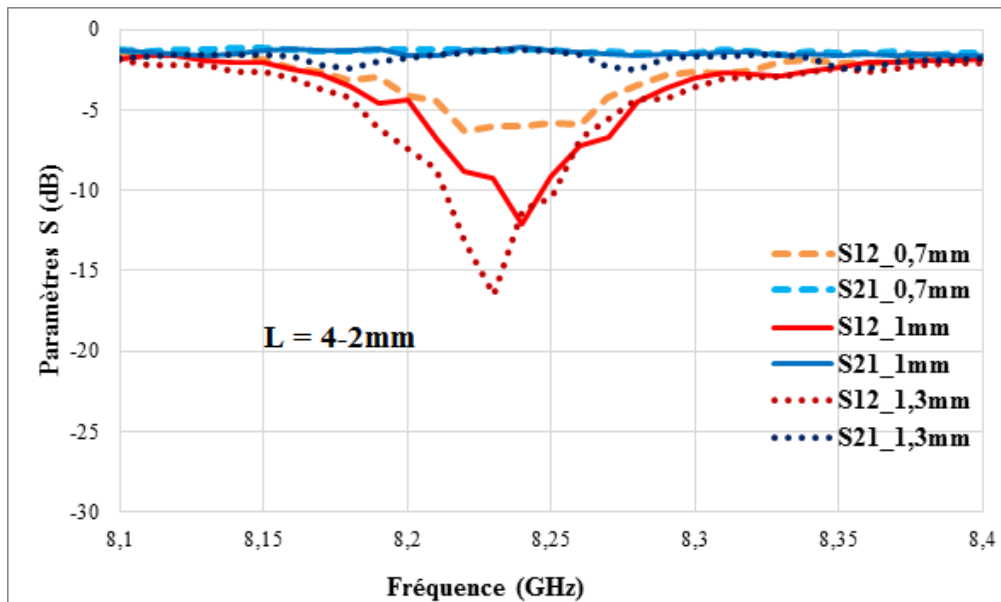


FIGURE III.12 – Isolateur 1 fente largeur varie de 0,7 à 1,3mm entre 8,1 à 8,4GHz

On constate dans ce 1^{er} pic que les pertes d'insertion (S_{21}) restent autour de 1dB. Par contre l'isolation varie en fonction de la largeur de fente. Pour une largeur de 0,7mm l'isolation reste faible avec 6dB mais pour une largeur de 1mm, l'isolation est meilleure, comme vu précédemment, autour de 12dB. Pour la largeur de 1,3mm, l'isolation augmente encore avec une valeur

autour de 17dB. Cette isolation atteint presque l'objectif du cahier des charges.

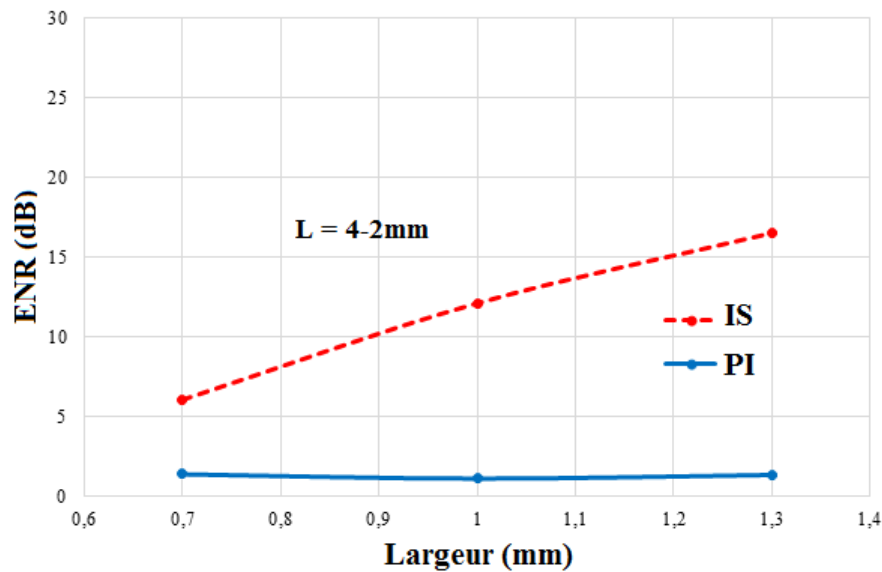


FIGURE III.13 – ENR en fonction de la largeur de fente à 8,24GHz

Dans cette figure on a tracé l'effet non réciproque en fonction de la largeur afin de faire une synthèse sur l'influence de la largeur de fente sur la structure.

On constate que l'isolation augmente avec la largeur de fente, alors que les pertes d'insertion restent constantes quelle que soit la largeur de fente. Cela montre que l'effet non réciproque augmente avec la largeur de fente. Et dans ce résultat l'optimum (maximum) est obtenu à la largeur de 1,3mm. L'isolation ainsi obtenue est d'environ 17dB.

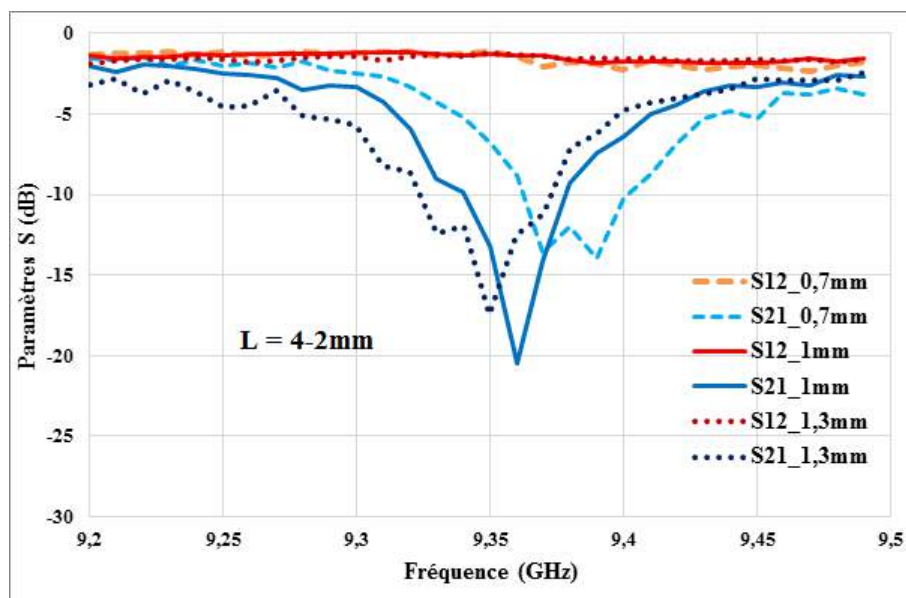


FIGURE III.14 – Isolateur 1 fente largeur varie de 0,7 à 1,3mm entre 9,2 à 9,5GHz

Dans ce résultat du second pic, on observe qu'à cette fréquence, qui est autour de 9,35GHz, l'isolation est meilleure que celle du 1^{er} pic. Pour une largeur de 0,7mm l'isolation est moyenne,

autour de 14dB, elle augmente jusqu'à 20,5dB lorsque la largeur est à 1mm, et retombe à 17,5dB lorsque la largeur est de 1,3mm.

Les pertes d'insertion restent quant à elles presque les mêmes en fonction de chaque largeur à la fréquence de résonance, autour de 1,5dB.

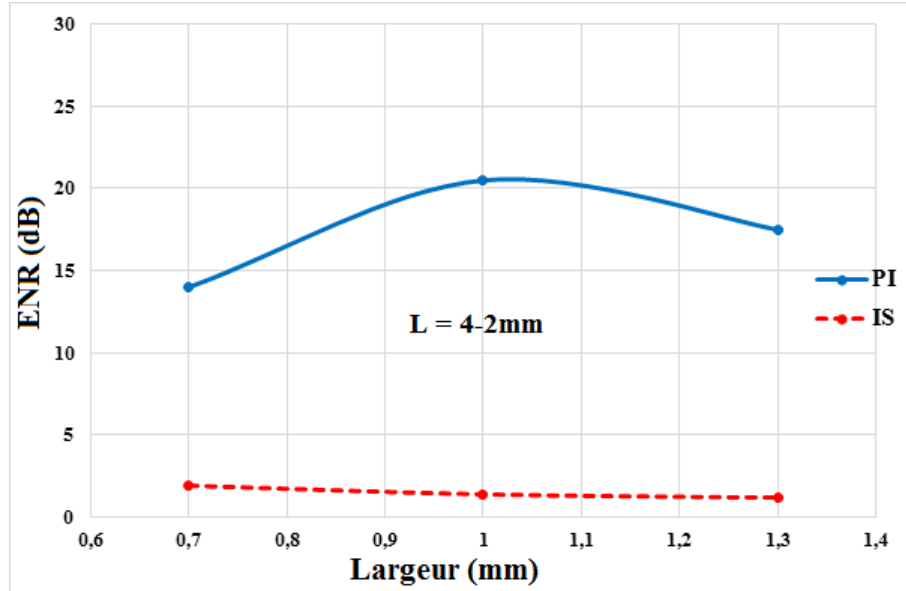


FIGURE III.15 – ENR en fonction de la largeur à 9,4GHz

La synthèse de la variation de largeur de fente pour l'isolateur coplanaire à une fente (4-2mm) indique que les pertes de transmission varient légèrement, elles sont réduites si la largeur de fente est grande. Par contre l'isolation varie en fonction de la largeur et l'optimum est obtenu à une largeur de 1mm avec une isolation de 20,5dB. Ce qui signifie que dans cette configuration le maximum de l'effet non réciproque est obtenu à la largeur de fente de 1mm.

Il reste à vérifier que ce résultat peut être maintenu en réduisant la longueur totale de dispositif à 6mm par exemple pour tenter de diminuer l'encombrement.

– Longueur de fente 8-6mm

Dans cette partie la grande longueur de fente est de 8mm et la petite longueur est 6mm. Une variation de la largeur de fente est faite entre 0,7mm à 1,3mm. Le résultat de simulation montre qu'un effet non réciproque est observé à la fréquence de résonance autour de 8,3GHz.

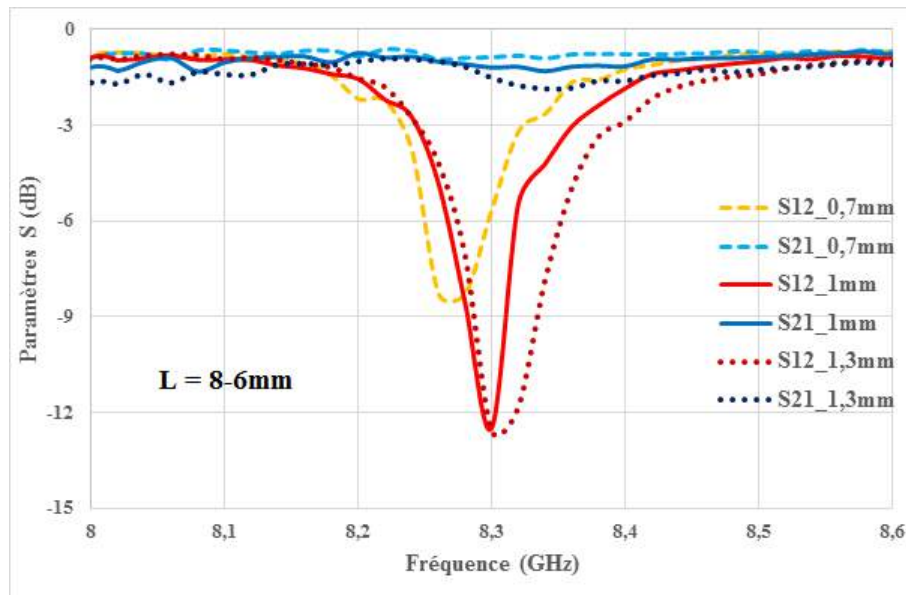


FIGURE III.16 – Variation de la largeur de fentes de 0,7 à 1,3mm.

Ce résultat montre que l'effet non réciproque obtenu est moyen avec 13dB d'isolation autour de 8,3GHz pour les deux largeurs de 1mm et 1,3mm, alors que pour la largeur de 0,7mm l'isolation est faible de l'ordre 8,3dB et sa fréquence de résonance est légèrement inférieure par rapport aux autres largeurs avec différence de quelques dizaines de MHz (8,26GHz).

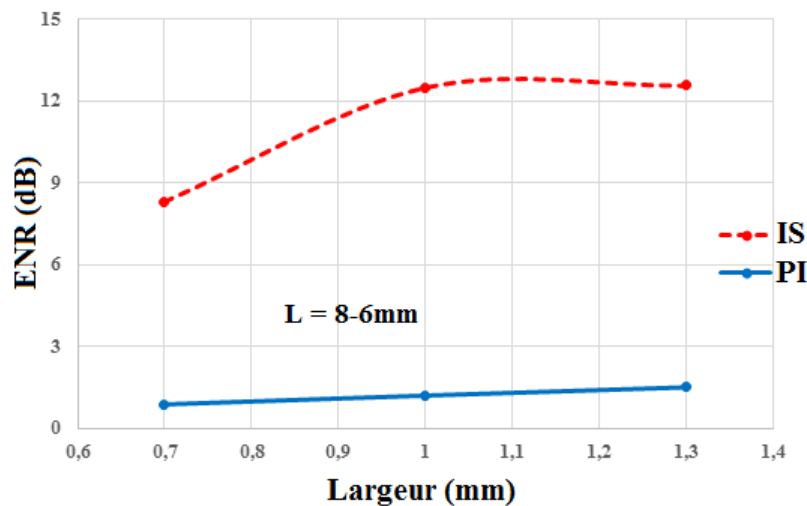


FIGURE III.17 – ENR en fonction de la largeur de fente pour une longueur 8-6mm

Dans la synthèse de la variation de largeur pour l'isolateur à une fente de longueur 8-6mm, le résultat montre qu'à partir de 1mm de largeur l'isolation reste constante même si on augmente la largeur. Pour la plus petite largeur, l'isolation est faible. Par contre les pertes d'insertion sont bonnes pour des petites largeurs et elles augmentent si cette dernière augmente (1,7dB). Dans cette configuration de longueur 8-6mm, l'effet non réciproque reste moyen quelle que soit la variation de la largeur.

III.4.2 Simulation d'un isolateur à deux fentes

Dans cette partie, nous présentons une étude sur l'isolateur coplanaire à deux fentes. Celui-ci a les mêmes caractéristiques que l'isolateur à une fente, à l'exception qu'il possède deux fentes sur le plan de masse supérieur. La structure a été simulée avec les mêmes paramètres de simulation que la structure à une fente (simple fente).

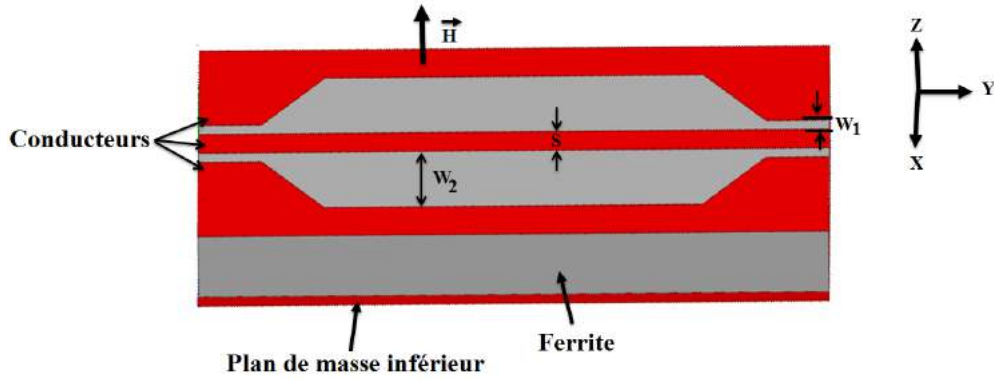


FIGURE III.18 – *Isolateur deux fentes*

Le résultat de simulation est présenté sur la figure ci-dessous.

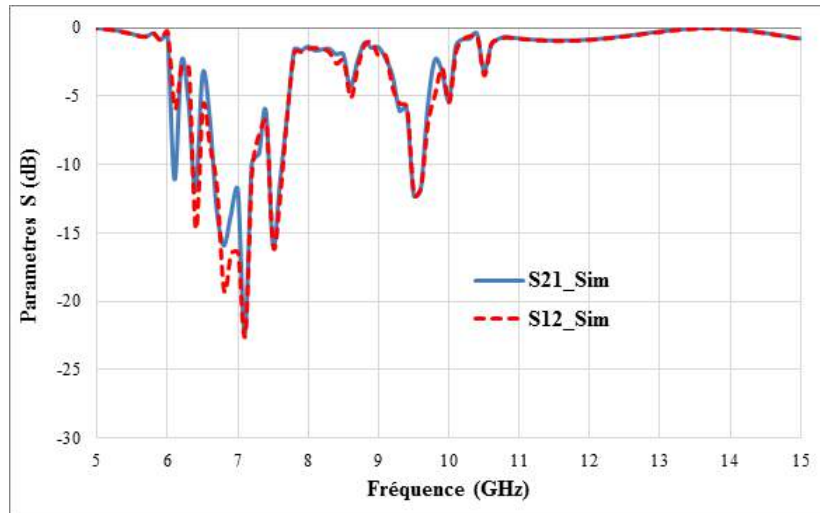


FIGURE III.19 – *Isolateur à deux fentes pour un champ interne $H_i = 160\text{kA/m}$*

Le résultat montre la bande gyromagnétique, située entre 6 à 8GHz, mais aucune isolation n'est observée, cela montre que l'effet non réciproque n'existe pas à cause de la symétrie de la structure et de la polarisation avec un champ statique homogène.

La structure à deux fentes ne marche pas, néanmoins nous avons décidé de la fabriquer. Nous nous sommes alors rendu compte qu'elle isole, et que les résultats sont meilleurs qu'avec la structure à 1 fente.

Nous présentons ces résultats dans le chapitre suivant, et nous en ferons l'analyse.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre que le logiciel de simulation HFSS permet de faire l'étude paramétrique d'un modèle géométrique en utilisant la méthode des éléments finis.

Une étude paramétrique a été faite sur un isolateur coplanaire à une fente, tout d'abord sur la variation de longueur de fente qui va de 8mm à 4mm tout en fixant la largeur de fente à 1mm. Les résultats obtenus montrent que des effets non réciproques sont observés et qu'ils varient selon la longueur de fente, à une fréquence de résonance autour de 8,3GHz et que l'optimum est obtenu à la longueur de 8-6mm avec 12,5dB d'isolation.

Deux pics d'isolation sont observés dans cette étude dont le second pic a une inversion de sens d'isolation, cette dernière étant intéressante (20,5dB) pour la longueur de 4-2mm à 9,4GHz et faible pour les deux autres longueurs.

Une deuxième étude a été réalisée sur la petite longueur de fente 4-2mm en faisant la variation de largeur de 0,7mm à 1,3mm, le résultat a montré deux pics dont pour le 1^{er} l'isolation augmentait avec l'augmentation de la largeur de fente alors que pour le 2nd pic l'optimum était obtenu à la largeur de 1mm.

La dernière étude a été faite sur la longueur de fente 8-6mm en faisant varier sa largeur, le résultat a montré que l'effet non réciproque existait mais d'une valeur moyenne (12dB) et que ses pertes d'insertion augmentent avec la largeur.

Une simulation a aussi été faite sur une structure à double fente dont le résultat ne montre pas d'effet d'isolation.

Ces résultats obtenus grâce au logiciel de simulation HFSS sont intéressants, et il reste à vérifier ces résultats de simulation en les évaluant aux résultats de mesure.

Bibliographie

- [1] : Ansoft, An introduction to HFSS : fundamental principles, concepts and use, Ansoft LCC, 2009.
- [2] S. Kirouane, D. Vincent, E. Verney, O. Zahwe, B. Payet and A. Chaabi, « Design of a new coplanar isolator made from YIG film operating in the X-frequency band », The European Physical Journal Applied Physics, 57, 01, 10602 (2011).