

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار تليجي بالأغواط



UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOVAT
كلية التكنولوجيا
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
قسم الإلكترونيك
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique
Filière : TELECOMMUNICATIONS
Option : Réseaux de Télécommunications
THÈME

Modélisation Numérique d'un Composant Micro-Onde en Hyperfréquences

Présenté par
DOUA Nada

Proposé et dirigé par
SEGHER Abdelkrim

Soutenu le : 04 / 06 / 2023

Devant le Jury composé de :

Président	Prof ABD ELWAHAB HAMDI	Université de AMAR TELIDJI
Examineur	Prof MORAD REGUIGUE	Université de AMAR TELIDJI
Encadreur	Prof. S. Abdelkrim	Université de AMAR TELIDJI

Année universitaire 2022 / 2023

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant et miséricordieux, de m'avoir donné la capacité d'écrire, de réfléchir. De nous avoir donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Je veux remercier **nos parents** pour leurs encouragements, leurs prières qui nous ont poussés à dépasser les obstacles.

Mes chaleureux remerciements vont particulièrement à mon directeur de travail :

M. SEGHIER Abdelkrim pour son encadrement, son aide, ses commentaires et ses remarques pertinentes et surtout son encouragement.

Je tiens à remercier **les membres de jury** qui m'ont fait l'honneur de m'avoir accepté de corriger et juger mon modeste travail.

Nos profonds remerciements, grâces et respectueuses reconnaissances à tous **les enseignants** qui m'ont enseigné durant mes périodes de scolarisation du primaire à l'université.

Enfin, mon pensée tourne à l'ensemble de **mes camarades** et à tous les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.

DEDICACES

Avec un énorme plaisir je dédie mon travail à mes chers magnifiques parents que j'adore, à qui m'ont soutenu durant toute ma vie, que Dieu les garde et les protège.

Je dédie ce travail à :

Celle qui m'a donné la vie, au symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite..... **Ma mère Hadja Aicha.**

Celui qui a été mon ombre durant toute la période de scolarisation, qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger..... **Mon père Hadj Slimane.**

A mes adorables sœurs, que j'aime de mes profonds.

A mon cher frère à qui j'ai tant aimé **Khelifi Ahmed.**

A ma 2ème famille dans laquelle j'ai trouvé l'amour et l'affection : la famille de **saoudi.**

A mes amies avec lesquelles je partage les bons souvenirs,

A tous ceux qui me sont chères, à tous ceux qui m'aiment, à tous ceux que j'aime, je dédie ce modeste travail.

Nada

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VII
Liste des Symboles.....	VIII
Liste d'abréviations.....	IX
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Théorie des circulateurs

1. Introduction.....	4
2. Historique.....	5
3. Les Circulateurs.....	6
3.1 Définition.....	6
3.2 Principe et différentes utilisations	7
3.3 Les différents types des circulateurs	8
3.3.1 Les circulateurs à éléments distribués.....	8
3.3.2 Circulateur à guide d'onde.....	8
3.3.3 Circulateur à déplacement de champ.....	9
3.3.4 Circulateur à effet Faraday	9
3.3.5 Circulateur à éléments localisés.....	10
3.3.6 Circulateurs à jonction.....	11
3.3.7 Circulateur à jonction Y en triplaque	11
3.3.8 Circulateur à jonction Y en micro ruban	11
3.3.9 Circulateur à jonction Y en coplanaire	13
4. Les lignes de transmissions planaires.....	15
4.1 Définition... ..	15
4.2 Les avantages des lignes de transmission planaires.....	15
4.3 Structure des lignes de transmissions planaires.....	15
5. Conclusion.....	17

Chapitre II : Les ferrites à l'origine de la non-réciprocité

1. Introduction.....	19
2. Historique.....	20

3. Les ferrites.....	21
3.1 Définition et structure.....	21
3.2 Approche du phénomène de non-réciprocité.....	21
3.3 Applications micro-ondes des dispositifs non-réciproques à ferrite.....	22
4. Les différentes catégories de ferrites.....	22
4.1 Spinelles.....	23
4.2 Hexa-ferrites.....	23
4.3 Grenats.....	23
5. Technologies de ferrite poly cristalline	23
5.1 La synthèse d'une poudre magnétique.....	23
5.2 La mise en forme.....	24
5.3 Le frittage	24
6. Les caractéristiques générales des ferrites.....	25
7. Propriétés des ferrites dans le domaine des micro-ondes.....	25
7.1 Phénomène d'hystérésis.....	25
7.2 Domaines de Weiss et parois de Bloch.....	26
8. Etude du YIG massif.....	26
8.1 Processus de dépôt.....	27
8.2 La couche mince.....	27
9. Conclusion.....	28

Chapitre III : Simulation du circulateur à jonction Y avec Simulateur 3D

1 . Introduction.....	30
2. Présentation.....	31
3. Modélisation numérique.....	32
3.1 Introduction de logiciel HFSS.....	38
3.2 Description générale des outils HFSS.....	39
4. Conception d'un Composant Micro-Onde.....	39
4.1 Ferrite sous forme d'une couche mince.....	41
4.2 Ferrite sous forme de disque	41
4.3 Variation du rayon du disque de ferrite.....	42

4.4 Variation de l'épaisseur du disque de ferrite.....	42
4.5 Variation de la fente circulaire.....	43
5. Discussions et interprétations	43
6. Conclusion.....	44
Conclusion Générale.....	45
Références bibliographiques.....	46
Annexes A.....	47
Annexes B.....	50
Annexes C.....	51
RÉSUMÉ.....	52

<u>Liste des Figures</u>		
Figure 1.0	Circulateur utilisé pour la séparation des signaux émis et reçus	05
Figure 1.1	symbole du circulateur à trois ports	06
Figure 1.2	circulateur à 4 ports	06
Figure 1.3	Schéma de principe d'un circulateur à 3-ports	07
Figure 1.4	Circulateur à guide d'ondes	08
Figure 1.5	Différentes configuration de Circulateur à guide d'ondes	08
Figure 1.6	Circulateur en Y utilisant le phénomène de déplacement de champ	09
Figure 1.7	configuration d'un circulateur à rotation Faraday	09
Figure 1.8	Configuration du circulateur micro ruban en Y	11
Figure 1.9	Configuration du circulateur proposé par Yalaoui et les résultats obtenus	13
Figure 1.10	Circulateurs à éléments localisés	13
Figure 1.11	structure du circulateur à jonction Y en triplaque	15
Figure 1.12	structure d'un circulateur à jonction Y en micro ruban	16
Figure 1.13	structure d'un circulateur micro trip à sphère de ferrite	16
Figure 1.14	structures de circulateurs coplanaires testées par N. Ogasawara et M. Kaji	17
Figure 1.15	configuration des conducteurs du circulateur coplanaire proposé par K. Koshiji et E. Shu	17

Figure 1.16	deux variantes pour la structure du circulateur coplanaire de K. Koshiji et E. Shu	18
Figure 1.17	structure d'un circulateur en guide d'onde coplanair	18
Figure 1.18	Lignes de transmissions planaires	21
Figure 2.1	Mouvement d'électron	25
Figure2.2	Structure cristalline des ferrites	26
Figure2.3	Interaction entre la polarisation du champ interne et du moment magnétique	27
Figure 2.4	cycles d'hystérésis de matériau doux et dur avec la courbe de 1 ^{ère} aimantation	30
Figure 3.1	Configuration électromagnétique de champ H	36
Figure 3.2	les Etapes de travail	37
Figure 3.3	Design du circulateur coplanaire avec les dimensions Géométrie	43
Figure 3.4	Circulateur coplanaire avec une couche mince de ferrite	44
Figure 3.5	Paramètres S du circulateur coplanaire avec une couche mince de ferrite	44
Figure 3.6	Circulateur coplanaire avec un disque de ferrite	45
Figure 3.7	Paramètres S du circulateur coplanaire avec un disque mince de ferrite	45
Figure 3.8	Paramètres S en fonction du rayon du disque de ferrite	46
Figure 3.9	Paramètres S en fonction de l'épaisseur du ferrite	47
Figure 3.10	Paramètres S en fonction de la largeur de la fente circulaire	48

Listes des Tableaux

Tableau 2.1	Facteurs de démagnétisation pour les formes simples-----	19
Tableau 2.2	Matériaux constitutifs des ferrites-----	21
Tableau 2.3	Caractéristiques des spinelles et des grenats-----	33
Tableau 3.1	Les dimensions du circulateur utilisées-----	25
Tableau 3.2	Influence du rayon du disque de ferrite sur les performances du circulateur-----	41
Tableau 3.3	Influence de l'épaisseur du disque de ferrite sur les performances du circulateur -----	44
Tableau 3.4	Influence de la largeur de la fente circulaire sur les performances du circulateur-----	45

Liste des Symboles

H	Indicée de champ magnétique.
H_i	Indicée de champ magnétique interne haut fréquence.
H_a	Indicée de champ magnétique interne continu appliqué.
H_e	Indicée de champ magnétique externe haut fréquence.
ϵ_r	Indicée de permittivité diélectrique relative.
ϵ_{rs}	Indicée de permittivité diélectrique relative du substrat.
ϵ_{rf}	Indicée de permittivité diélectrique relative du ferrite.
F	Indicée de fréquence.
R	Indicée de rayon de l'orbite électromagnétique supposé circulaire.
M	Indicée de masse d'électron.
λ	Indicée de longueur d'onde dans l'espace libre.
T^+	Indicée de coefficient de transmission en entrée.
T^-	Indicée de coefficient de transmission en sortie.
Γ^+	Indicée de coefficient de réflexion en entrée.
Γ^-	Indicée de coefficient de réflexion en sortie.
μ_0	Indicée de perméabilité magnétique du vide.
μ_r	Indicée de perméabilité magnétique relative.

Liste d'abréviations

YIG	Yttrium Iron. Granet.
HF	Haut fréquence.
UHF	Ultra High Frequency
SHE	Super High Frequency
EHE	Extremely High Frequency
VSM	Vibrating Sample Magnetometer.
HFSS	High Frequency Structure Simulator.
EM	Electromagnétique.
TM	Transverse Magnétique.

Introduction Générale

Dans ces dernières années, le développement des systèmes des télécommunications a connu un important décollage aux niveaux des technologies des composants utilisés et ces fabrications. La demande pour ces nouvelles applications est toujours croissante pour la recherche de meilleures performances et respectée le coût. Dans le domaine des hyperfréquences, les composants passifs actuellement de types circulateurs, isolateurs...etc., sont fabriqués de façon unitaire à partir des substrats de ferrite et avec des structures microruban ou triplaque. La miniaturisation et l'intégration de ces circulateurs nécessitent d'avoir une couche mince magnétique qui possède des propriétés magnétiques proches du matériau massif. Un travail sur le design de ces composants peut également permettre une miniaturisation. Ce travail s'intéresse donc à ce point particulier pour la conception de circulateurs : miniaturisation et intégration.

L'objectif du travail présenté est d'exploiter nos connaissances dans la modélisation de circulateur sous HFSS à couche magnétique de ferrite pour le design et l'optimisation des performances de ces composants en changeant l'épaisseur de cette couche magnétique et étudier l'effet de ces variations.

Au départ le premier chapitre est consacré au théorie des circulateurs ; historique, définition, principe de fonctionnement et différent types. Afin de comprendre l'utilisation des circulateurs dans le domaine des hyperfréquences.

Ensuite dans le Deuxième chapitre un aperçu général des ferrites et de leurs propriétés, une brève présentation des techniques de fabrication de ferrite. Les différentes techniques de ferrite mince sont ensuite présentées les différentes propriétés magnétiques. Afin de comprendre le phénomène de la non-réciprocité du dispositif.

Dans Le troisième chapitre, on donne une présentation du logiciel Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator) utilisé pour la modélisation numérique et leurs différentes étapes du design et construction de notre circulateur, ensuite nous avons fait une étude à l'aide de ce logiciel afin d'obtenir des résultats numériques à base d'une structure coplanaire par l'optimisation des paramètres adéquates de la dimension de l'épaisseur de la couche de matériau magnétique le ferrite qui est à l'origine de la non réciprocité.

CHAPITRE I

Théorie des circulateurs

1. Introduction :

Le domaine des micro-ondes apparut avec les bases théoriques données par Maxwell, théoricien fondateur de l'électromagnétisme moderne. Il a formulé dans les années 1860 les célèbres équations connues aujourd'hui sous le nom « équations de Maxwell » publiées en 1873 dans son traité sur l'électricité et le magnétisme [1]. Dès lors le domaine ne cesse de se développer. Outre le radar, qui s'est développé rapidement dans les années 1940, les communications par satellite ont été une étape majeure du développement des micro-ondes et techniques associées.

Actuellement la plupart des systèmes de télécommunication opérant à hautes fréquences repose sur la technologie des circuits micro-ondes. Les composants passifs non réciproques sont employés dans les systèmes de télécommunication sans fils tels que les duplexeurs de radar, la téléphonie mobile, les liaisons satellitaires...etc. Ils sont présents dans les applications hyperfréquences où il est nécessaire de découpler l'émission et la réception quand une seule fréquence porteuse est utilisée (cf. Figure 1.0).

Parmi ces composants citons les circulateurs et les isolateurs, qui assurent la circulation entre les différents ports dans un sens et pas dans l'autre. Les isolateurs servent à protéger une source d'énergie contre n'importe quelle énergie réfléchie surtout pour les applications micro-ondes à hautes puissances (circulateur ou isolateur en guide d'onde).

Un circulateur trois ports peut être utilisé comme un isolateur, en reliant son troisième port à une charge adaptée qui absorbe l'énergie réfléchie. Le premier circulateur à jonction Y en technologie guide d'onde a été conçu à la fin des années 1950, alors que le premier circulateur microruban sur un substrat de grenat a été introduit en 1965 [1].

Ces composants passifs non réciproques utilisent des matériaux magnétiques ferrites qui leur confèrent leur non-réciprocité. Les ferrites de structure spinelle ont été les premiers utilisés, puis sont apparus des ferrites à structure de grenat (YIG) et les ferrites à structure hexagonale (baryum, strontium). Ces matériaux sont, en général, polarisés par des aimants externes fournissant un champ externe perpendiculaire ou parallèle au plan de la ferrite selon l'application.

L'amélioration des performances de ces composants sont dues principalement à des progrès scientifiques et technologiques. Pour réduire la taille et l'encombrement de ces composants, la suppression des aimants de polarisation s'avère nécessaire. Cela est possible en intégrant un matériau magnétique dur, par exemple, un hexa ferrite à forte anisotropie magnéto cristalline.

Les propriétés des matériaux magnétiques ainsi que leurs différentes classes seront détaillés par la suite. Autre que la miniaturisation, le coût de ces composants est un élément majeur surtout dans les systèmes en contenant plusieurs milliers, qui nécessite une technologie de fabrication de masse.

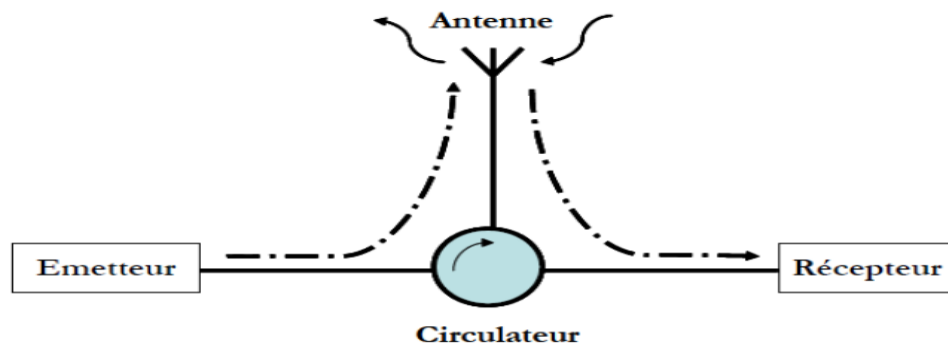


Figure 1.0 : Circulateur utilisé pour la séparation des signaux émis et reçus [1]

2. Historique :

Le premier circulateur à jonction Y en technologie de guide d'onde a été conçu à la fin des années 1950, alors que le premier circulateur micro ruban sur un substrat de grenat a été introduit en 1965. Travaux sur les circulateurs optiques ont été réalisés dans les années 1960. Les anciens chercheurs qui sont intéressés avaient des motivations issues des circulateurs pour radiofréquences, donc ils n'ont pas initialement considéré les problèmes de polarisation. Néanmoins, les premiers prototypes de circulateurs, réalisés par Atsushi Shibukawa à la fin des années 1970, fonctionnaient grâce à des phénomènes de polarisation. Ce circulateur comportait deux cubes à séparation de polarisation orientés à 45 degrés l'un par rapport à l'autre. Entre ces deux cubes, un cristal à haut effet Faraday (initialement du YIG de formule chimique $Y_3Fe_5O_{12}$) permettait de faire tourner la polarisation incidente d'un angle de 45° également. Il n'était valable que pour les lumières polarisées de façon rectiligne. Shibukawa installa des ports sur les sorties complémentaires des cubes à séparation de polarisation. Les cubes séparateurs de polarisation choisis furent des prismes de Glan-Taylor, appréciés pour le grand angle formé par leurs deux sorties, beaucoup plus important que ceux des prismes de Rochon, Wollaston ou Glan-Thompson. D'autre part, ce type de prisme a un bon contraste de polarisation, ce qui est critique pour les performances d'un circulateur optique. Ce choix permit à l'équipe de Shibukawa à réaliser des circulateurs relativement compacts.

En parallèle, les recherches sur les fibres optiques ont mené vers la fin des années 1970 à la constatation que les fibres monomodes n'étaient pas à maintien de polarisation. Cela a imposé le développement de circulateurs indépendants de la polarisation. Cela a donc nécessité l'amélioration des cubes séparateurs de polarisation. Les premiers circulateurs indépendants de la polarisation étaient pour la plupart à quatre ports [2].

À cette époque, les performances des circulateurs laissaient à désirer, en particulier à cause des pertes dues aux traitements anti-reflets, au cristal de YIG et au mauvais couplage dans les fibres. Les pertes d'insertion atteignaient 2 dB, et l'isolement variait entre 13 et 28 dB en fonction de la combinaison des ports. Les performances dépendaient également de la longueur d'onde. Ce premier circulateur n'était pas très pratique à mettre en place puisque les deux cubes séparateurs de polarisations devaient être positionnés à 45° l'un par rapport à l'autre. Pour éviter ce problème, un élément réciproque (une lame demi-onde) fut ajouté. Grâce à cette lame, la polarisation entrante est identique à la polarisation sortante et donc les deux cubes sont alignés. Cependant, une lame demi-onde n'étant réellement demi-onde qu'à une longueur d'onde donnée, cela limite la tolérance du composant aux variations de longueur d'onde. Ainsi, un autre montage consiste à utiliser deux cristaux à effet Faraday et à intercaler un prisme de Rochon entre les deux.

Dans ce second cas, les polarisations entrantes et sortantes sont orthogonales. De plus, le composant devient plus tolérant aux variations de longueur d'onde et son isolation est doublée du fait de la présence de deux cristaux à effet Faraday.

3. Les Circulateurs :

Les composants non-réciproques occupent une place importante dans le domaine des radars et des télécommunications. Les matériaux magnétiques de type ferrite permettent d'apporter une fonction de non-réciprocité dans ces composants. Il existe plusieurs types de circulateurs et après avoir décrit leur fonctionnement, nous analyserons leurs applications et les différentes technologies (trip laque, micro ruban et coplanaire) auxquelles ils sont associés.

3.1 Définition :

Le circulateur passif est un composant non réciproque à trois ports d'accès ou plus, Son rôle consiste à transmettre des signaux dans un sens, le sens de circulation est à bloquer les signaux en sens inverse. Ainsi, une onde entrant sur le port 1 est transmise au port 2, alors que le troisième port est isolé. Une onde entrant sur le port 2 est transmise au port 3 et le premier port est isolé. Enfin, une onde entrant sur le troisième port est transmise au premier port, et le port 2 est isolé. Le symbole du circulateur passif à trois ports est donné ci-dessous (Figure 1.1) [3].

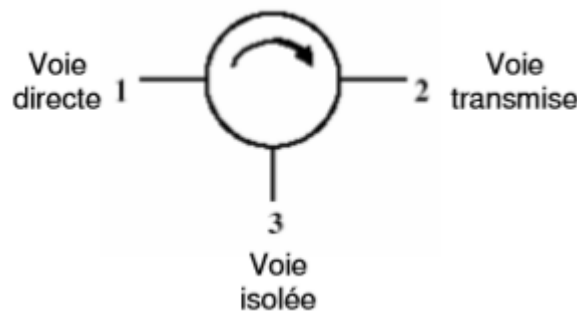


Figure 1.1 : symbole du circulateur à trois ports [3].

Pour réaliser un circulateur avec plus de trois ports d'accès, une première solution (1.1) consiste à en associer plusieurs comme ceci est proposé (Figure 1.2).

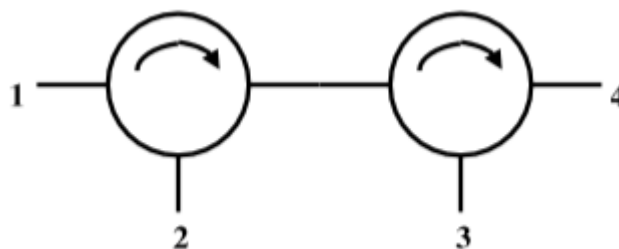


Figure 1.2 : circulateur à 4 ports [4].

3.2 Principe et différentes utilisations :

La Figure 1.3 donne la représentation d'un circulateur (en Y) à trois voies. Un circulateur est donc un hexapôle, il comporte trois voies à 120° les unes des autres autour d'un corps central où se trouvent les éléments qui confèrent au circulateur sa non-réciprocité. Les circulateurs réalisent une transmission des ondes par substitution cyclique. En effet, quand un champ magnétique transversal lui est appliqué, il se crée dans la partie centrale un champ interne qui est tel qu'une onde entrant par les voies 1, 2 ou 3 ne peut ressortir respectivement que par les voies 2, 3 ou 1 [4].

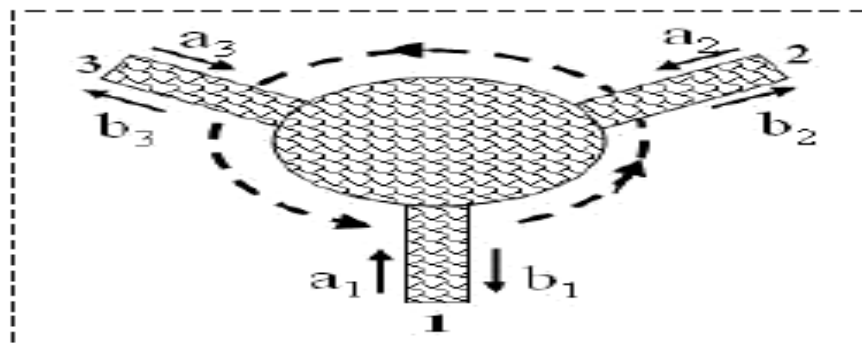


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un circulateur à 3-ports [4].

Où : a_1 , a_2 , et a_3 , sont les amplitudes des ondes incidentes dans le circulateur Y à trois voies et b_1 , b_2 , et b_3 , sont les amplitudes des ondes réfléchies au niveau des trois ports. Un tel dispositif est utilisé pour deux fonctions essentielles au sein des systèmes de télécommunications :

- Il permet d'assurer une fonction d'aiguillage du signal radiofréquence dans tous les systèmes où la séparation des voies d'émission et de réception est utile (radars, transmissions par satellite, téléphonie mobile, ...).
- La deuxième fonction est la fonction d'isolation inter-étages pour masquer une désadaptation entre deux éléments successifs dans une chaîne d'émission. Pour réaliser cette fonction, il suffit d'isoler un des ports en le reliant à une charge adaptée. Le circulateur idéal est donc un hexapôle adapté qui serait capable d'aiguiller toute l'énergie vers l'accès suivant, le troisième étant isolé. Sa matrice de dispersion serait donc la suivante [5] :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

3.3 Les différents types de circulateur :

3.3.1 Les circulateurs à éléments distribués :

Le circulateur à éléments distribués est développé à partir de la fin des années 50. Son importance dans les systèmes radars et dans les circuits RF a favorisé l'essor de ce type de composants hyperfréquences. Les circulateurs à jonction Y, à élément distribués, sont les plus couramment utilisés car leur processus de fabrication, relativement simple, est bien contrôlé, ce qui permet de les réaliser à moindre coût.

A l'origine, ces circulateurs ont été réalisés dans les années 60 en technologie trip laque par H. Bosma, qui est le premier scientifique à publier une théorie complète décrivant le fonctionnement de ce type de dispositif. Les circulateurs à jonction Y peuvent être réalisés selon différentes technologies. A titre d'exemple, on trouvera les guides d'onde, à déplacement de champ, à effet Faraday, les guides trip laque, micro ruban, et coplanaire [4].

3.3.2 Circulateur à guide d'onde :

Le circulateur à jonction Y en guide d'ondes comporte trois voies à 120° les unes des autres autour d'un corps central où se trouve l'élément en ferrite qui confère au circulateur sa non-réciprocité (Figure 1.4). Les dimensions de l'élément de ferrite et du guide ainsi que la valeur du champ magnétique polarisant extérieur sont telles qu'une onde entrant sur la voie 1 est reçue sur la voie 2, qu'une onde présente en voie 2 est transmise à la voie 3 et qu'une onde entrant sur la voie 3 est transmise sur la voie 1.

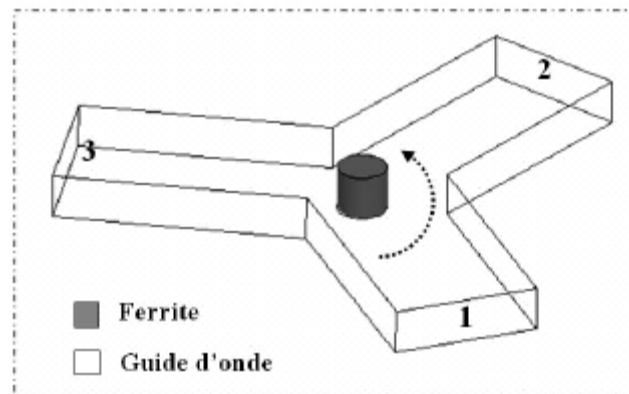


Figure 1.4 : Circulateur à guide d'ondes [4].

Plusieurs configurations ont été réalisées ; à titre d'exemple la plus simple est celle de E. YUNG [6] dont l'épaisseur de ferrite est égale à la hauteur du guide d'ondes (Figure 1.4 (a)). Sur d'autres structures, des plaques de conducteur ont été ajoutées afin d'améliorer l'adaptation d'impédance (Figure 1.5 (b)). Enfin, d'autres versions ont choisi de réduire l'épaisseur de ferrite et de remplacer les zones libérées par des diélectriques afin de minimiser les pertes dues aux matériaux et d'avoir ainsi de meilleures performances (Figure 1.5 (c)).

Les guides d'ondes doivent respecter des cotes bien spécifiques en fonction de la fréquence. Ainsi, ce type de circulateur va rencontrer des difficultés aux longueurs d'ondes millimétriques. En effet, il devient difficile de fabriquer avec précision les éléments en ferrite car ceux-ci doivent alors avoir des diamètres inférieurs au millimètre.

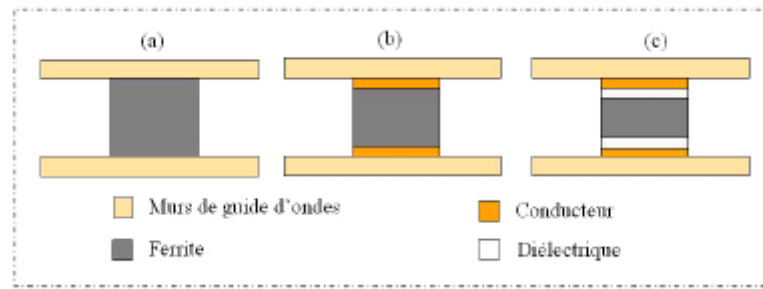


Figure 1.5 : Différentes configuration de Circulateur à guide d'ondes [6].

3.3.3 Circulateur à déplacement de champ :

Le circulateur Y à déplacement de champ en guide d'onde (Figure 1.6) comporte lui aussi trois voies à 120° les unes des autres. Au centre du Y, se trouve le corps central avec les éléments qui confèrent au circulateur sa non réciprocity. Ces éléments comprennent un prisme de ferrite triangulaire, auquel est appliqué un champ magnétique continu vertical. Sur chacune des faces du prisme sont apposées des plaquettes résistives capables d'absorber un champ électromagnétique qui les traverse [7]

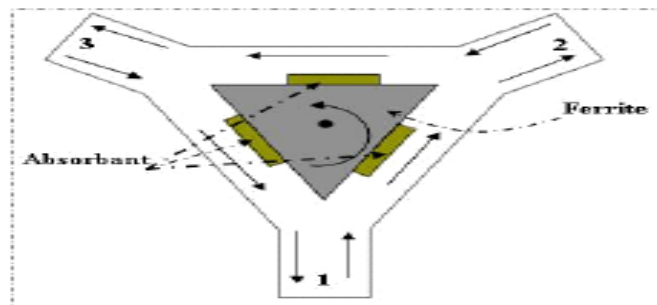


Figure 1.6 : Circulateur en Y utilisant le phénomène de déplacement de champ [7].

Le fonctionnement de ce type de circulateur est basé sur le phénomène de déplacement de champ qui se manifeste dans chacune des jonctions correspondant aux trois faces du prisme. Dans un sens de propagation (par exemple de l'accès 1 vers l'accès 2), le champ électromagnétique circule dans la zone libre du guide. Dans le sens inverse (de l'accès 2 vers l'accès 1) la propagation se trouve déplacée vers le noyau central et l'onde va traverser le matériau à pertes où elle va être absorbée ne pouvant ainsi ressortir par l'accès 1. Ce phénomène existe entre les différents accès et dépend des dimensions des éléments et du champ magnétique appliqué. Finalement, une onde entrant dans la voie 1, 2 ou 3 ne peut donc sortir respectivement que par la voie 2, 3 ou 1 [4].

3.3.4 Circulateur à effet Faraday :

Comme son nom l'indique, ce circulateur utilise l'effet Faraday afin d'assurer son fonctionnement. Le circulateur à rotation Faraday (Figure 1.7) est constitué de passages de guides d'ondes circulaires et rectangulaires [7]. Un cylindre de ferrite est positionné à l'intérieur du guide d'onde circulaire central.

Le ferrite est polarisée selon l'axe du cylindre. La longueur du cylindre de ferrite et le champ magnétique de polarisation sont dimensionnés de telle sorte que l'onde subisse (par effet Faraday) une rotation de 45° .

Une onde entrant sur le port 1 est transmise au port 2, une onde entrant au niveau du port 2 ressort sur le port 3 et ainsi de suite. Il s'agit alors d'un circulateur à quatre voies.

Ce circulateur permet d'obtenir des pertes d'insertions inférieures à 0.5 dB et une faible bande passante. Ces circulateurs sont utilisés dans les domaines des fréquences très élevées, lorsque l'on se rapproche du domaine optique.

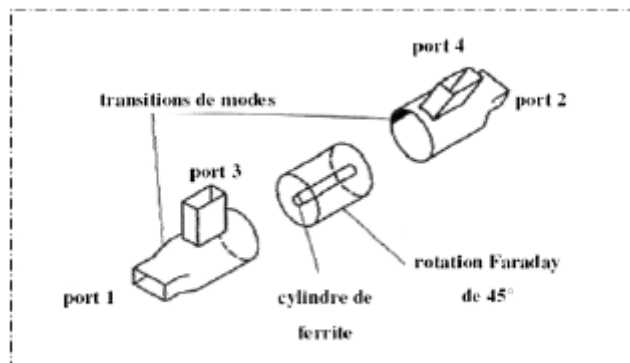


Figure 1.7 : configuration d'un circulateur à rotation Faraday [7].

3.3.5 Circulateur à éléments localisés :

Les circulateurs à éléments distribués fonctionnant en basses fréquences ont des grandes dimensions. La miniaturisation étant un défi, les circulateurs à éléments localisés s'avèrent intéressants. En effet, la taille de ces dispositifs est réduite car la taille du disque de ferrite est indépendante de la fréquence de travail.

Le circulateur à éléments localisés a été proposé par Kionishi [8] - [9]. Il est constitué d'un disque de ferrite avec trois paires de conducteurs centraux entrecroisés. Les bras de ces conducteurs successifs forment un angle de 120° (cf. Figure 1.15).

Le diamètre du disque de ferrite est inférieur à la longueur d'onde. L'épaisseur de la ferrite équivaut au dixième de son diamètre.

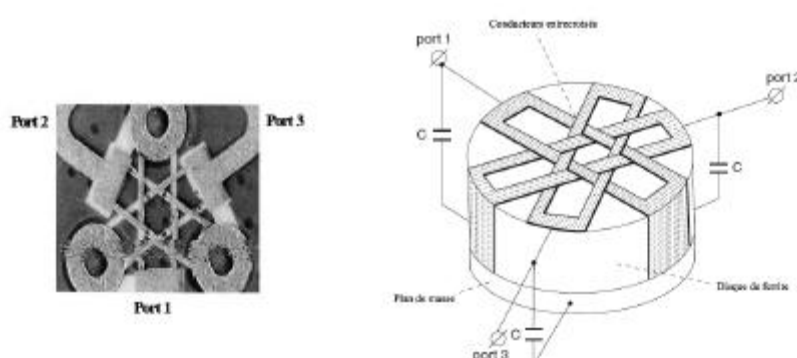


Figure 1.8: Circulateurs à éléments localisés [2]

Les circuits à éléments localisés assurent une réduction de taille et de coût des isolateurs et circulateurs basses fréquences RF (téléphonie mobile). Le cœur de ce type de circulateur est composé d'un réseau d'inductances entrelacées, implantées sur un substrat de ferrite. Pour assurer la symétrie électrique et l'isolation du dispositif, des inductances sont intégrées séparées d'un angle de 120° chacune. La circulation du signal apparaît lorsque le matériau ferrite est aimanté.

Ce circulateur à trois ports agit donc principalement avec le couplage non-réciproque d'un accès à l'autre par l'intermédiaire des éléments inductifs. Notons que la réalisation de circulateur à éléments localisés est délicate et des technologies de fabrication à moindre coût sont exigées.

3.3.6 Circulateurs à jonction :

Les circulateurs à ferrite à jonction Y sont très employés dans les dispositifs micro-ondes tant à cause de leur simplicité de mise en œuvre que de leur faible encombrement et de leur prix de revient modéré. Les circulateurs à jonction en guide d'ondes ont évidemment une tenue en puissance supérieure aux circulateurs à jonction en triplaque, en micro ruban et en coplanaire. La pièce de ferrite peut être de différentes formes pourvu qu'il y ait une symétrie ternaire ; les formes les plus couramment rencontrées sont les configurations circulaire et triangulaire. Les circulateurs à jonction Y avec un élément de ferrite de forme triangulaire présentent des pertes d'insertion légèrement inférieures à celles d'un circulateur avec un élément de ferrite circulaire, les autres performances étant sensiblement similaires [10]

3.3.7 Circulateur à jonction Y en trip laque :

Le circulateur à jonction Y en technologie trip laque se compose d'un conducteur central (de diverses formes) d'où partent trois lignes d'accès orientées à 120° les unes des autres (cf. Figure 1.19). De part et d'autre du conducteur central sont positionnés deux éléments de ferrite (de forme identique à celle du conducteur central) polarisés par un champ magnétique statique perpendiculaire au conducteur. Deux plans de masse ferment la structure triplaque. L'espace entre les plans de masse est rempli par un matériau diélectrique [4].

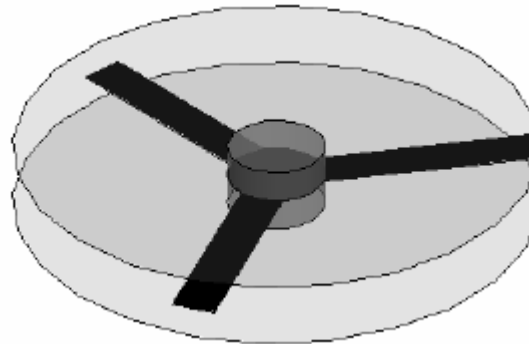


Figure 1.9 : structure du circulateur à jonction Y en trip laque [4].

Les circulateurs à jonction Y en trip laque ont des fréquences de fonctionnement inférieures à celles des circulateurs à jonction Y en guide d'ondes. L'obtention du phénomène de circulation nécessite un ajustement de la fréquence de fonctionnement, du champ magnétique de polarisation, des dimensions des éléments en ferrite et des caractéristiques du matériau ferrimagnétique utilisé. De nombreuses publications traitent du circulateur à jonction Y en trip laque. Cependant, la majorité de celles-ci se réfère aux travaux de recherche de H. Bosma [11]

3.3.8 Circulateur à jonction Y en micro ruban :

Un circulateur à jonction Y en technologie micro ruban se compose d'un substrat métallisé sur lequel est déposé un conducteur central associé à trois lignes d'accès (cf. Figure

1.20). Un disque de ferrite est placé sur le conducteur central et est surmonté d'un disque conducteur.

Le disque de ferrite peut également être inséré dans le substrat donc être placé sous le conducteur central.

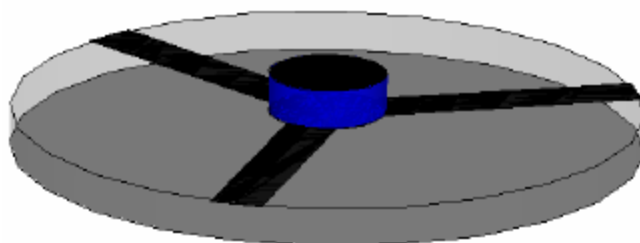


Figure 1.10 : structure d'un circulateur à jonction Y en micro ruban [12].

De même que pour le circulateur à jonction Y en trip laque, le design du circulateur en micro ruban est souvent défini à partir des travaux de H. Bosma [20] et de C.E. Fay & R.L. Comstock [12]. Y.S. Wu et F.J. Rosenbaum [13] ont ensuite montré qu'en choisissant un angle de couplage relativement important et le rayon du conducteur central plus petit que celui calculé initialement, il était possible d'obtenir un circulateur micro ruban à large bande passante. En outre, aux longueurs d'ondes millimétriques, les circulateurs à jonction Y en micro ruban requièrent des disques de ferrite très fins, difficiles à fabriquer. Une sphère de ferrite est alors plus simple à mettre en œuvre. De plus, une sphère de ferrite nécessite un champ de polarisation plus faible de par les propriétés des champs démagnétisants. Enfin, la fréquence de fonctionnement du circulateur peut être modifiée en jouant sur le rayon de la sphère de ferrite. A une fréquence de 37.5 GHz, une isolation de 15 dB a été obtenue pour une bande passante de 1 GHz [14].

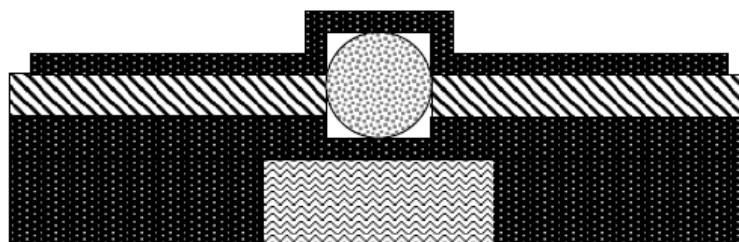


Figure 1.11 : structure d'un circulateur micros trip à sphère de ferrite [14].

De manière à réduire les pertes dites « faible champ » et à diminuer la fréquence à laquelle ces pertes apparaissent, R.E. Blight et E. Schloemann [15] ont proposé d'ajouter autour d'un élément de ferrite présentant une forte magnétisation à saturation un autre élément de magnétisation plus faible. Différentes configurations ont été testées expérimentalement. La fabrication complexe de celles-ci ne semble pas adaptée aux contraintes industrielles.

3.3.9 Circulateur à jonction Y en coplanaire :

Le circulateur à jonction Y peut enfin être réalisé à partir d'une technologie coplanaire. Il s'agit d'une structure peu commune et pour laquelle nous ne disposons que de quelques articles scientifiques. Le circulateur à jonction Y en coplanaire est pourtant bien adapté aux circuits intégrés micro-ondes, son principal avantage étant que le conducteur et les plans de masse soient au même niveau. Dans ce cas, le circulateur coplanaire peut-être fabriqué à moindre coût par un processus éprouvé de photolithographie classique.

N. Ogasawara et M. Kaji [16]. Ont réalisé et testé expérimentalement différentes structures coplanares (cf. Figure 1.22). L'élément de ferrite est polarisé de manière perpendiculaire par rapport à sa surface. Le phénomène de circulation a été observé pour les deux premières structures (cf. Figure 1.22 (a) et (b)) alors que la troisième structure ne fonctionne pas (cf. Figure 1.22 (c)). Le confinement des champs étant plus important pour la deuxième configuration, de meilleures performances sont obtenues.

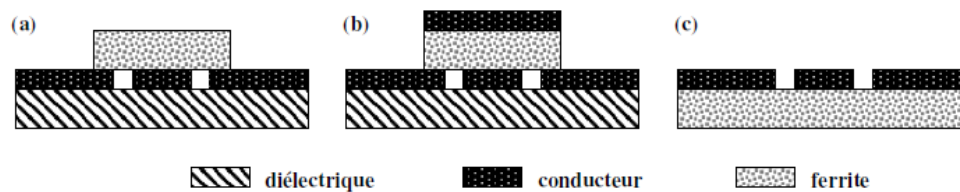


Figure 1.12 : structures de circulateurs coplanares testées par N. Ogasawara et M. Kaji [16].

Une autre structure a ensuite été proposée par K. Koshiji et E. Shu [17]. La configuration des conducteurs est la suivante (cf. Figure 1.23) : trois lignes d'accès orientées à 120° partent d'un conducteur circulaire central et sont entourées par trois plans de masse latéraux.

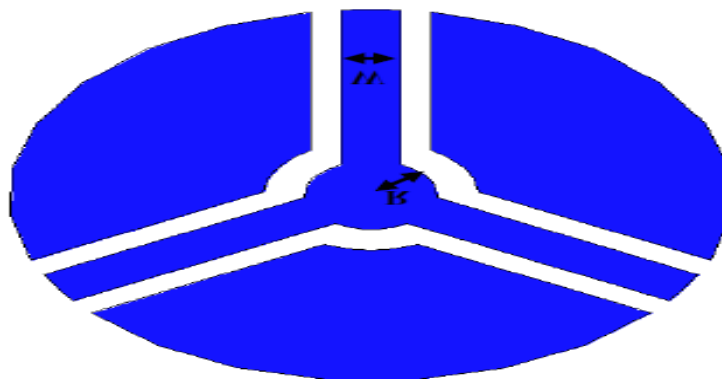


Figure 1.13 : configuration des conducteurs du circulateur coplanaire proposé par K. Koshiji et E. Shu [16].

Deux déclinaisons sont présentées : une première structure avec un disque de ferrite positionné sur le conducteur central (cf. Figure 1.24 (a)) et une deuxième structure avec deux disques magnétiques placés de part et d'autre du conducteur central (cf. Figure 1.24 (b)). Le circulateur coplanaire est dimensionné après une adaptation des résultats obtenus par H. Bosma à partir d'une structure trip laque. Les meilleures performances obtenues en expérimentation le sont à partir de la deuxième configuration. L'isolation est de 19.1 dB, les

pertes d'insertion sont égales à 0.8 dB, le taux d'ondes stationnaires vaut 1.3 et la bande passante atteint 4.8 % pour une fréquence de circulation de 9.56 GHz.

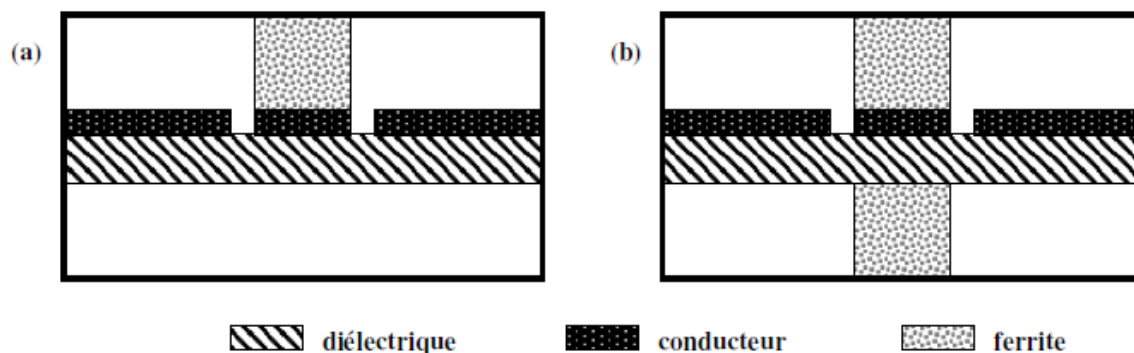


Figure 1.14 : deux variantes pour la structure du circulateur coplanaire de K. Koshiji et E. Shu [18].

Ces performances ont été améliorées par E. Schloemann [18] qui a proposé un circulateur coplanaire avec un seul disque de ferrite métallisé sur sa face supérieure et polarisé par un aimant externe. Des pertes d'insertion de 0.8 dB et une isolation supérieure à 20 dB sont observées sur une bande passante de 12 % centrée sur 12.5 GHz.

Des travaux très récents ont été menés au Japon concernant un circulateur à structure coplanaire [19]. Le dispositif fabriqué a été modélisé à partir de la méthode des éléments finis. La configuration du conducteur central et des plans de masse est identique à celle de K. Koshiji et E. Shu (cf. Figure 1.23), excepté que des adaptateurs d'impédance ont été ajoutés pour obtenir des accès 50 W. La structure expérimentale du circulateur est présentée avec une vue en coupe (cf. Figure 1.25). Le conducteur central et les plans de masse sont réalisés en cuivre (de 10 μm d'épaisseur) et insérés entre deux substrats carrés de YIG de 500 μm d'épaisseur et de 10 mm de côté. L'espace d'air fait également 500 μm d'épaisseur.

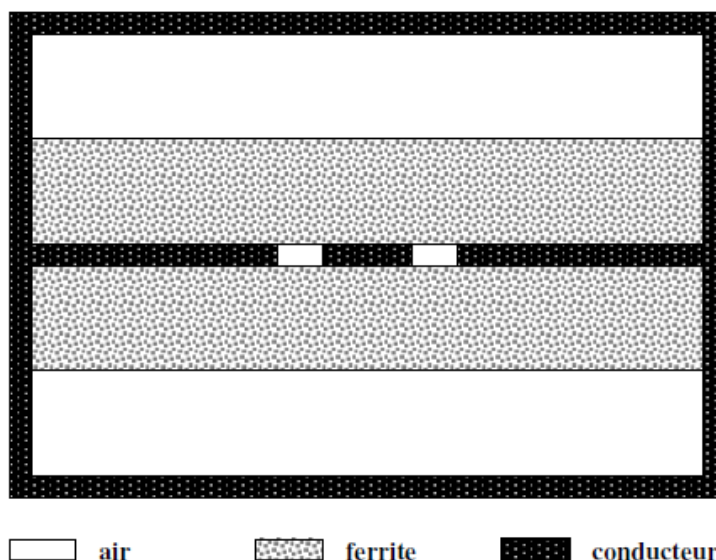


Figure 1.15 : structure d'un circulateur en guide d'onde coplanaire [19].

En expérimentation, lorsqu'un champ magnétique de polarisation de 112 kA/m est appliqué au circulateur, des pertes d'insertion de 4.9 dB et une isolation de 28 dB sont observées à une fréquence de 8GHz.

4. Les lignes de transmissions planaires :

4.1 Définition :

Une ligne de transmission [20], est un ensemble d'un (en réalité deux si l'on considère la masse), ou de plusieurs conducteurs acheminant un signal électrique (souvent haute fréquence). Le milieu diélectrique qui sépare les conducteurs (air, céramique, téflon,) joue un rôle important dans la vitesse de propagation du signal. Les lignes de transmission les plus courantes sont les câbles coaxiaux et les lignes bifilaires. Sur les circuits imprimés et les circuits intégrés, on trouve couramment des lignes micro-rubans et des lignes coplanaires.

4.2 Les avantages des lignes de transmission planaires :

L'intégration dans un circuit électronique des structures planaires s'est avérée très pratique, car il y a possibilité d'adjoindre sur leur surface des composants actifs ou passifs. Cependant, l'intégration de composants passifs reste nécessaire pour la réalisation des systèmes de télécommunication. Dans ces conditions, la miniaturisation de ces composants constitue un objectif majeur pour les générations futures de composants et systèmes. Les lignes de transmission possèdent certaines propriétés telles que [21], [22] :

- faible coût, faible poids, faibles dimensions et légèreté,
- compatibilité avec les circuits intégrés,
- performances intéressantes,
- meilleures fiabilité,
- reproductibilité.

4.3 Structure des lignes de transmissions planaires :

Les principaux types de lignes sont [23], :

- La ligne micro ruban (micros trip) comporte un substrat diélectrique métallisé sur sa face arrière (le plan de masse) et un circuit de métallisation sur la face avant.
- La ligne à fente (slot line) où deux conducteurs formant la ligne de transmission sont déposés sur la même face du substrat diélectrique.
- La ligne coplanaire (coplanaire waveguide) est une extension de la ligne précédente, avec trois bandes métalliques et deux fentes.
- La ligne bande ou ligne trip laque (stripline) est une des différents types de lignes micro ruban, elle est assez volumineuse puisqu'elle fait intervenir un second plan de masse.

Bien entendu, toutes ces lignes ont une configuration plane et leurs caractéristiques sont en fonction de leurs dimensions à savoir l'épaisseur du substrat, sa constante diélectrique et la largeur du ruban.

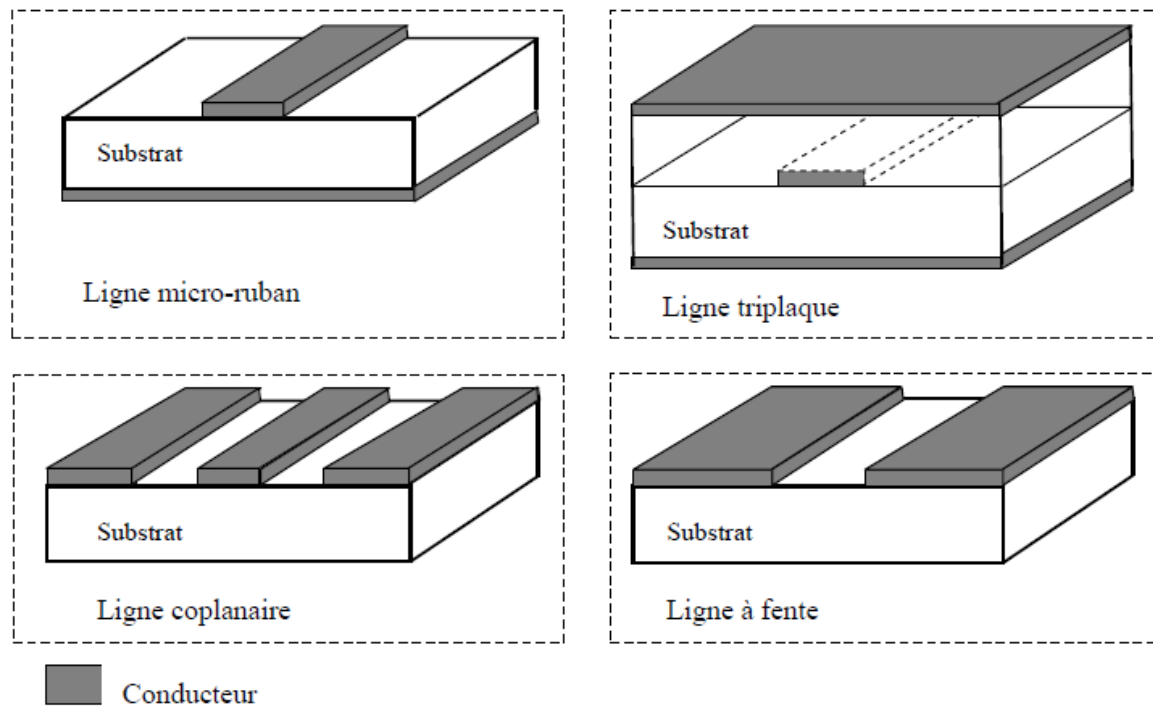


Figure 1.16 : Lignes de transmissions planaires [20].

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur le circulateur, son principe de fonctionnement, les différents modèles, les lignes de transmission planes, et les avantages de certains d'entre eux, comme la facilité de fabrication (les conducteurs et les plans de production de masse peuvent être créés en une seule étape technologique) et facilité d'interconnexion des composants.

Les principales caractéristiques des circulateurs sont leurs pertes de transmission, qui sont représentées par leur matrice S de paramètres ou matrice de distribution. Les deux principales caractéristiques les plus cruciales pour le circulateur sont :

- Dans le sens passant, les pertes d'insertion qui doivent être les plus faibles possibles (de l'ordre de 1 dB).
- Dans l'isolation, le niveau qui est sensiblement égal au niveau de réflexion et doit atteindre -20 dB.

Nous avons également présenté les diverses technologies des circulateurs. Les classes de circulateurs étudiées sont les circulateurs passifs.

Chapitre II

Les ferrites à l'origine de la non-réciprocité

1. Introduction :

Les propriétés des ferrites, qui sont à la base du fonctionnement des circulateurs et autres dispositifs à micro-ondes, constituent la base du fonctionnement des dispositifs passifs non réciproques. L'objectif principal de ce chapitre est d'introduire les concepts fondamentaux du ferrimagnétisme qui ont été utilisés pour créer des circulateurs magnétiques YIG (Yttrium, Fer et Gaz) YIG (Grenat de Fer et Yttrium) magnétiques YIG (Yttrium, Fer et Gaz) fonctionnant à 10 GHz (en HFSS). Tout d'abord, un bref aperçu du magnétisme est donné, suivi d'une introduction aux différents types de matériaux magnétiques. [24].

Le champ électromagnétique qui se propage dans ces dispositifs à une structure qui peut fortement réagir dans un sens de propagation avec la ferrite et non dans le sens opposé (S_{12} : transmission S_{21} : isolement). Typiquement, les ferrites sont intégrées dans des circulateurs de 1 à 10 GHz. Les hexa ferrites permettent d'atteindre des fréquences de résonance gyromagnétiques élevées pour ces ferrites à base de grenades et de spinelles, qui nécessitent l'application d'un champ magnétique externe pour assurer la saturation et le bon fonctionnement. Il est possible de décrire le comportement du matériau magnétique en hyperfréquence à l'aide des différents modèles actuellement disponibles. Selon les utilisations, le matériau magnétique peut être utilisé sous sa forme massive ou composite. [25].

2. Historique :

L'histoire des matériaux ferrite a commencé avec la magnétite, Fe_3O_4 , qui fut le premier matériau à être connu par l'homme, aussi appelée ferrite ferreux. La première mesure de son aimantation à saturation a été faite par Du Bois (1890), et par la suite, d'autres propriétés magnétiques comme la température de Curie et l'orientation des cristaux ont été examinées par de nombreux scientifiques : Weiss (1896), Beck (1908) ...etc. Le phénomène de résonance de spin ferromagnétique a été décrit par Landau et Lifshitz (1935) [25] dans leur théorie de la dispersion de la perméabilité magnétique dans les métaux ferromagnétiques [25].

On considère, à l'intérieur d'un atome, un électron qui tourne autour du noyau (Figure 2.1).

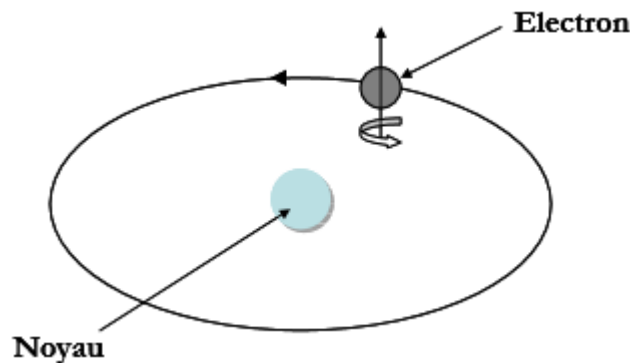


Figure 2.1: Mouvement d'électron [25].

Depuis 1940 Louis Néel a commencé à élaborer sa théorie du ferrimagnétisme et sa appliquée à l'ensemble des ferrites avec succès. Cette théorie décrit essentiellement les propriétés magnétiques statiques de ces matériaux : aimantation à saturation et températures de transition. Les ferrites possèdent des propriétés magnétiques similaires à celles des ferromagnétiques mais s'en distinguent doublement par le fait que [26] :

- Ils ne sont pas conducteurs.
- Ils présentent une aimantation bien plus faible.

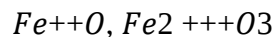
On appelle ferrite « dur » un ferrite « difficile » à aimanter présentant des champs coercitif et d'anisotropie élevés ($H_c > 100 \text{ kA/m}$). Un « ferrite doux » est un ferrite « facile » à aimanter présentant des champs coercitif et d'anisotropie faibles ($H_c < 10 \text{ kA/m}$) [26].

[Oussama Zahwe] dans son recherche a intéressés aux ferrites doux pour les hyperfréquences utilisés dans des dispositifs fonctionnant de 0,1 à 100 GHz. Ces ferrites sont du type grenat comme le grenat de fer et d'yttrium (YIG) de formule $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [4].

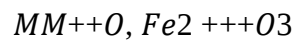
3. Les ferrites :

3.1 Définition et structure :

Nous utilisons les définitions des matériaux contenant de la ferrite de L. Thourel [27], [6]. L'atome de fer divalent dans la magnétite est remplacé par un atome d'un autre métal pour créer des ferrites, qui sont des oxydes métalliques complexes. La formule de la magnétite est :



La formule générale d'une ferrite sera donc :



Les métaux de remplacement utilisables sont, bien sûr, les métaux bivalents comme le manganèse, le magnésium, le nickel, le cuivre, le cobalt, le zinc et le cadmium. Cependant, les caractéristiques du matériau obtenu dépendent du type de métal de remplacement et de ses ratios.

Il est également possible de créer des ferrites complexes en remplaçant les atomes de fer par deux atomes de métal divalent en même temps. Il en résulte des ferrites de manganèse et de magnésium, de nickel et de zinc, de nickel et de cobalt, etc. L'équation chimique devient donc, dans le cas d'une ferrite nickel-zinc, par :



La structure cristalline des ferrites est analogue à celle des spinelles de formule générale $MMgAl_2O_4$. La maille cristalline est formée (figure 2.2) [28] :

- des ions oxygène répartis suivant une maille cubique à face centrée,
- des ions métalliques qui se répartissent dans les interstices laissés par les ions oxygénés.

Les interstices laissés par les ions O^{2-} , appelées sites, sont de deux sortes :

- sites A tétraédriques : au centre de quatre ions oxygène,
- sites B octaédriques : au centre de six ions oxygène.

Une maille cristalline contient 32 ions oxygène et 24 ions métalliques composent une maille cristalline. 64 sites A et 32 sites B constituent les 96 interstices qui correspondent aux 32 ions de l'oxygène. Aussi, les 24 ions métalliques sont répartis entre les différents sites selon deux schémas de répartition différents, dont l'un correspond à la structure en fuseau et l'autre à la structure en antifuseau ou structure opposée [29].

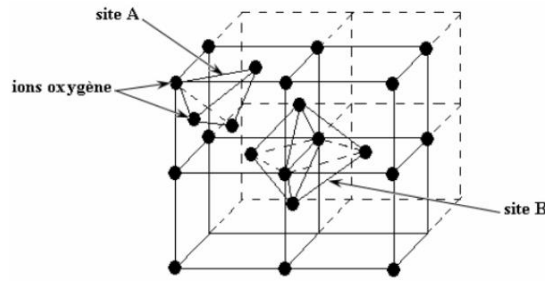


Figure 2.2 : Structure cristalline des ferrites [30].

3.2 Approche du phénomène de non-réciprocité :

La non-réciprocité est un phénomène qui apparaît dans certaines structures hyper-résonnantes et circulateurs à jonction Y, comme une ligne coplanaire sur une couche ferreuse. [4], la (Figure 2.3) explique :

- L'interaction entre la polarisation du champ interne et la polarisation du moment magnétique dans une ligne coplanaire (a)
- Expliquer la configuration électromagnétique sur une surface de ferrite (b).
- Sur le cœur du circulateur (c)

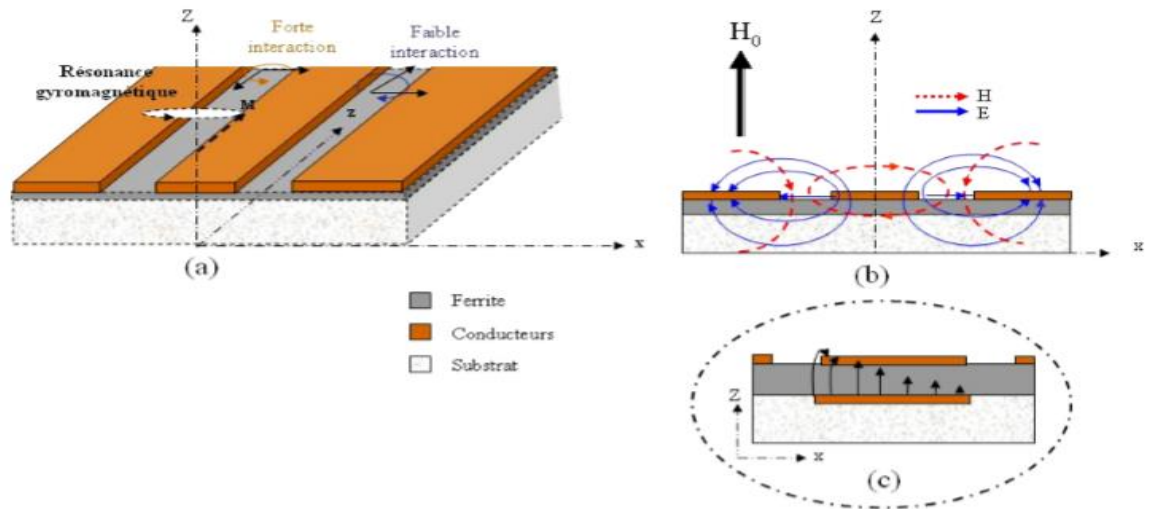


Figure 2.3: Interaction entre la polarisation du champ interne et du moment magnétique [28].

Le champ électromagnétique (RF RF-champ) est polarisé elliptiquement vers la gauche et tourne dans le même sens que la précession gyromagnétique, ce qui entraîne une forte interaction entre le champ électromagnétique et la ferrite dans un environnement de ferrite orienté verticalement.

Lorsque le champ magnétique tourne dans le sens inverse de la précession gyromagnétique, le circulateur n'utilise pas le phénomène de résonance gyromagnétique mais plutôt le phénomène de déplacement du champ, qui se traduit par un faible contact avec le matériau (Figure 2.3(a)). Dans le cas que nous avons étudié, la répartition des masses au

centre du circulateur ainsi que la présence de ferrite provoquent le phénomène de circulation (Figure 2.3(c)).

Une transition magnétique est déclenchée par la présence du conducteur sous la couche de ferrite. La disposition du champ électromagnétique au niveau de l'accès était coplanaire. De plus, le phénomène de déplacement de champ est causé par l'interaction d'un champ électromagnétique avec le matériau cible en fer, qui est liée au phénomène gyromagnétique de précession ou de résonance [28].

3.3 Applications micro-ondes des dispositifs non-réciproques à ferrite :

Nous décrivons dans notre travail les principales applications des ferrites utilisées dans les systèmes haute fréquence, tels que les circulateurs.

4. Les différentes catégories de ferrites :

Tableau 2.1 : matériaux constitutifs des ferrites [4]

Spinelles	(Mg-Zn) Fe_2O_4 , (Mn-Zn) Fe_2O_4 , (Ni-Zn) Fe_2O_4 , $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$
Hexa-ferrites	Type M: $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ et substitués (axe facile) ; type Y, Z (plan facile)
Grenats	YIG : $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YIG substitué (Ga, Al, Cr, In, Sc) et YIG substitué par des terres rares (La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Lu)

4.1 Les spinelles :

Les principales applications des spinelles sont les dispositifs à composants inductifs linéaires [4].

4.2 Les hexa ferrites

La cristallisation hexagonale des hexa ferrites en fait des matériaux magnétiques à forte coercivité, les distinguant des spinelles et des grenades. Ils peuvent être utilisés comme cibles permanentes. En revanche, la taille des résonances à mi-hauteur et leur amortissement sont plus importants que ceux du YIG. Dans une large gamme de températures, l'aimantation saturante du BaM diminue presque linéairement. L'aimantation à saturation à 20°C est égale à 480 mt. Le point de Curie est situé à 450 °C. Le champ anisotrope de l'hexaferrite de baryum est de 135 kA/m. Le BaM peut fonctionner à des fréquences élevées (40–50 GHz) et être

utilisé dans des composants adaptés au rayonnement à ondes millimétriques en raison de sa forte saturation-aimantation et de sa forte anisotropie [30].

4.3 Le grenats :

L'utilisation de spinelles comme matériaux de micro-onde est très répandue, mais dans de nombreuses applications, la préférence va à l'utilisation de grenades en raison de leurs caractéristiques de perte plus faibles. Les grenades sont plus sensibles aux contraintes magnétiques que les épines [30].

Avec les nombreux remplacements, la formule de base $R_3Fe_5O_{12}$ (où R est un élément de terre rare ou yttrium) pour les ferrimagnétiques se traduit par une gamme

De munitions très diversifiée. Le matériau YIG (Yttrium Iron Granet) a joué un rôle prédominant dans la gamme de fréquences 1-10 GHz depuis sa découverte en 1956 en raison de son faible amortissement, ce qui se traduit par des bandes de résonance ferromagnétique extrêmement serrées (H 0,1 Gauss à 10 GHz). En raison de cette caractéristique, le YIG trouve une utilisation dans des dispositifs tels que des oscillateurs et des filtres.

La transmission en puissance des grenats peut être améliorée par l'insertion d'ions de terres rares [31].

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des spinelles et des grenats :

Tableau 2.2 : Caractéristiques des spinelles et des grenats [28].

Caractéristique	Grenat	Spinnelle
Bandes de fréquence	$L \leftarrow \rightarrow X$	$C \leftarrow \rightarrow Ku$
Ions M utilisés	Y, Gd, Al, etc....	Mn, Mg, Ni, Li, etc...
Tc (Celsius)	100-280	175-560
$\mu_0 M_s$ (mT)	29-195	113-500
ϵ_r	13-16	12-16.7
$tg\delta$	$< 2.10^{-4}$	$< (3-5).10^{-4}$
ΔH_{eff} (kA/m)	0,16-11,14	0,318-0,716

5. Technologies de ferrite poly cristalline :

La réalisation d'une pièce d'un tel matériau repose généralement sur une technique céramique classique (métallurgie des poudres) qui implique quatre étapes principales :

- La synthèse d'une poudre magnétique.
- La mise en forme.
- Le frittage.
- L'usinage de l'échantillon

5.1 La synthèse d'une poudre magnétique :

Pour obtenir la qualité de produit de base nécessaire, les oxydes ou carbonates requis doivent d'abord être purifiés à au moins 99 %. Les différents produits sont ensuite mélangés à l'aide de broyeurs à billettes d'acier, généralement dans l'eau, pendant une durée prédéterminée en fonction de l'homogénéité souhaitée du mélange. La poudre résultante est ensuite à nouveau chauffée de la même manière que le premier mélange. Une étape de granulation de la poudre est réalisée avant la formation. A cet effet, un solvant organique en poudre (alcool polyvinylique) est ajouté à l'eau. Et lorsque l'eau s'est évaporée, la poudre broyée est apprivoisée pour assurer la plus grande granulométrie possible [26].

5.2 La mise en forme :

Suite à l'étape de synthèse, le mélange granulaire est compacté dans un moule en aluminium à la forme (tore, plaquette, etc.) et aux dimensions choisies en tenant compte

Des retraits intervenant lors de la phase de frittage et des dimensions ultimes prévues pour l'évaporation [26].

5.3 Le frittage :

Le produit fini est chauffé à haute température (fritté) pour maximiser la densification grâce à la réduction de la porosité inter granulaire. La température pendant le frittage est souvent inférieure de plusieurs dizaines de degrés à la température pendant la fusion chimique. Similaires aux températures de friture du [26] :

- Ferrite de nickel presque 1250 °C, respectivement.
- Ferrite de lithium presque 1000 °C, respectivement.

6. Les caractéristiques générales des ferrites :

Les caractéristiques générales électriques et magnétiques des ferrites sont [32], [4] [33] :

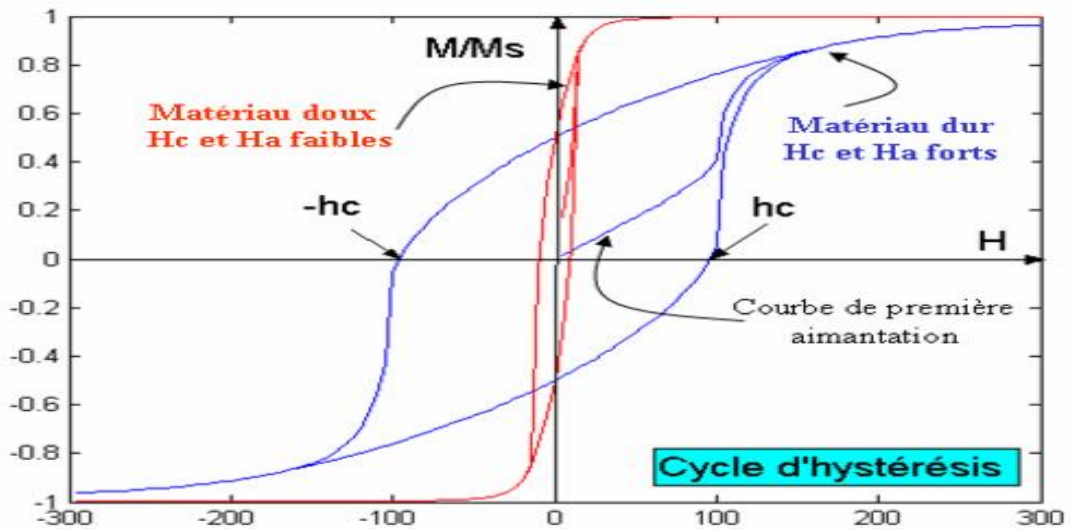
- Une résistivité très élevés (de 10^6 à $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$).
- Une conductivité faible (de 10^{-10} à $10^{-6} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$).
- Un constant diélectrique en hyperfréquence de l'ordre de 10 à 15.
- Des pertes diélectriques très faibles ($\text{tg } \delta$, de l'ordre de 10^{-3}).
- Une perméabilité magnétique de quelques dizaines d'unités.

7. Propriétés des ferrites dans le domaine des micro-ondes :

Dans cette section, nous allons introduire, par une approche simple, le comportement particulier des ferrites en hyperfréquences lorsqu'elles sont polarisées par un champ magnétique statique afin de mieux comprendre les phénomènes physiques qui apparaissent en hyperfréquences. Enfin, diverses formes de tenseur seront également présentées afin d'exploiter au mieux les propriétés des matériaux partiellement recherchés [4].

7.1 Phénomène d'hystérésis :

Une autre caractéristique des matériaux ferrimagnétiques est l'hystérésis, où le grandissement $\vec{M}$ n'est pas uniquement déterminé par la valeur du champ $\vec{H}$ mais dépend plutôt de l'état antérieur du matériau, ou des champs auxquels il a été soumis. Quand on tombe amoureux d'un corps magnétique pour la première fois (Figure 2.4) [28].



7.2 Domaines de Weiss et parois de Bloch :

Un échantillon de matériau incliné ferrimagnétique ment n'est pas toujours naturellement incliné ; il peut avoir un moment zéro magnétique. Le matériau est en fait divisé en domaines magnétiques attirant spontanément appelés domaines de Weiss. La décomposition du cristal en régions où l'orientation des moments est liée à des directions de visée faciles est causée par la condition d'énergie là moins magnétique. L'orientation de l'aimantation spontanée locale varie d'un domaine à l'autre de sorte que le grossissement total de l'intrication est nul. Ces domaines sont divisés par des diviseurs appelés diviseurs de Bloch. Il est possible que la distribution de l'aimantation dans les couches minces diffère de celle dans les massifs par [4] :

- L'effet dimensionnel : les champs démagnétisant, varient fortement avec la géométrie,
- L'effet de structure : différentes anisotropies sont spécifiques aux couches minces.

De ce fait, lorsque la couche est suffisamment mince (moins de 400 d'épaisseur), les champs de magnification dans le plan de la couche sont très faibles, et la division en domaine que l'on retrouve dans les matériaux ferrimagnétiques massifs n'est plus avantageuse d'un point de vue énergétique. Dans ce cas, la couche est unidimensionnelle et l'inversion de l'aimantation est réalisée par une rotation de spin cohérente. D'autre part, à mesure que l'épaisseur augmente, la disposition des domaines devient plus avantageuse d'un point de vue énergétique. La clôture Bloch a toujours une épaisseur très fine par rapport à ses deux autres dimensions. Dans ce cas, l'aimantation est parallèle à la clôture et l'énergie du champ magnétique de la clôture est encore assez faible [33].

8. Etude du YIG massif (Y101) :

8.1 Processus de dépôt :

Le dépôt de couches minces magnétiques peut être réalisé par de nombreuses techniques [4] :

- Dépôt par vapeur chimique.
- Ablation laser.
- Pulvérisation cathodique radiofréquence.

8.2 La couche mince :

La méthode de dépôt décrite précédemment est utilisée pour tester la poudre de grenade de fer et d'yttrium par pulvérisation radiofréquence cathodique. Influence des paramètres de propriété des couches minces $Y_3Fe_5O_{12}$.

La qualité et les propriétés des couches minces de YIG peuvent être influencées par la distance entre la cible et le substrat, la puissance cathodique, la pression d'argon et le traitement thermique post-dépôt. Un bon compromis entre l'homogénéité de l'épaisseur de couche et la vitesse de dépôt est une distance de 4,6 cm entre la cible et le substrat. Pour le substrat sur lequel la couche mince sera déposée, il faut tenir compte d'un certain nombre de spécificités selon les utilisations. La décision a été prise d'utiliser des substrats en aluminium pour les applications hyperfréquences. [2].

Les couches minces obtenues après dépôt nécessitent un traitement thermique pour cristalliser dans la phase souhaitée. La décision a été prise d'utiliser un recuit à 740°C pendant deux heures.

9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la majorité des phénomènes physiques qui peuvent être produits dans un matériau et les différentes catégories et technologies ferrite au cours de la propagation d'une onde électromagnétique hyperfréquence et propriétés des ferrites dans le domaine des micro-ondes et le phénomène du non réciprocity et des propriétés des couches de YIG (Etude de YIG) que nous souhaitons utiliser dans le contexte des connaissances actuelles sur les ferrites. La connaissance de ces phénomènes peut nous aider à la réalisation de plusieurs dispositifs micro-ondes pour accomplir différentes fonctions micro-ondes, tel que les circulateurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons entrer dans le cœur de notre travail en utilisant ces matériaux pour la modélisation numérique de circulateurs coplanaire à jonction Y à partir logiciel HFSS.

Chapitre III

**Simulation du circulateur à jonction Y
avec simulateur3D**

1. Introduction

Dans ce chapitre nous entrons dans le cœur du sujet avec la modélisation numérique du circulateur coplanaire à jonction Y.

Les phénomènes présents dans un circulateur à jonction coplanaire Y, Rappelons que le circulateur a été largement étudié dans sa conception coplanaire par N. Ogasawara et M. Kaji [1] en 1971 et K. Koshiji et E. Shu [1] en 1986. Et encore une fois par K. Oshiro et al. En 2004/2005. Et en nous appuyant sur les idées d'Oussama.ZAHWE, nous avons pu mener à bien ce travail.

L'objectif principal de ce travail est de dimensionner le composant, en particulier le rayon du disque de ferrite et la largeur des lignes d'accès, en décrivant les expressions du champ électromagnétique présentes dans le matériau magnétique. Les performances du circulateur peuvent alors être évaluées en calculant les paramètres S en tenant compte de divers facteurs de perte. Le matériau ferrite orienté et saturé sera examiné dans un seul cas.

Les structures sous-jacentes du modèle analytique seront représentées numériquement par le logiciel An soft HFFS. Ce faisant, il est également possible de définir la structure du circulateur et de prendre en compte l'épaisseur de la ferrite. Ainsi, la modélisation numérique permet :

- Une modélisation 3D complète de la structure ; et
- Maintien de l'épaisseur du matériau magnétique.
- Réaliser une étude paramétrique pour améliorer les performances du composant.

Enfin, afin de maximiser les performances du composant, nous allons simuler numériquement une structure coplanaire et mener une étude paramétrique.

2. Présentation

L'étude paramétrique présentée dans le chapitre précédent a servi de base au concept de circulateurs coplanaires. La modélisation numérique a été réalisée à l'aide d'Ansoft HFSS. C'est un outil de simulation typique pour une simulation électromagnétique tridimensionnelle. Il fournit les champs électriques et magnétiques, les courants et les paramètres. Pour confirmer les résultats des transmissions et des expériences de pensée coplanaire, nous avons simulé le circulateur coplanaire.

Des arrangements électromagnétiques illustrent le phénomène de circulation. La configuration du champ électromagnétique est coplanaire au niveau des lignes d'accès. Tout se déplace par le centre du circulateur grâce au plan de masse inférieur qui se dépose sous la ferrite. Cette opération peut s'expliquer en gardant à l'esprit que le plan d'onde qui se propage dans le milieu ferrimagnétique se scinde en une onde polarisée à droite et à gauche. Le signal est transmis lorsque ces ondes interfèrent de manière constructive avec un chemin vers le circulateur, alors que le signal est isolé lorsqu'elles interfèrent de manière destructive avec le chemin opposé (Figure 3.1).

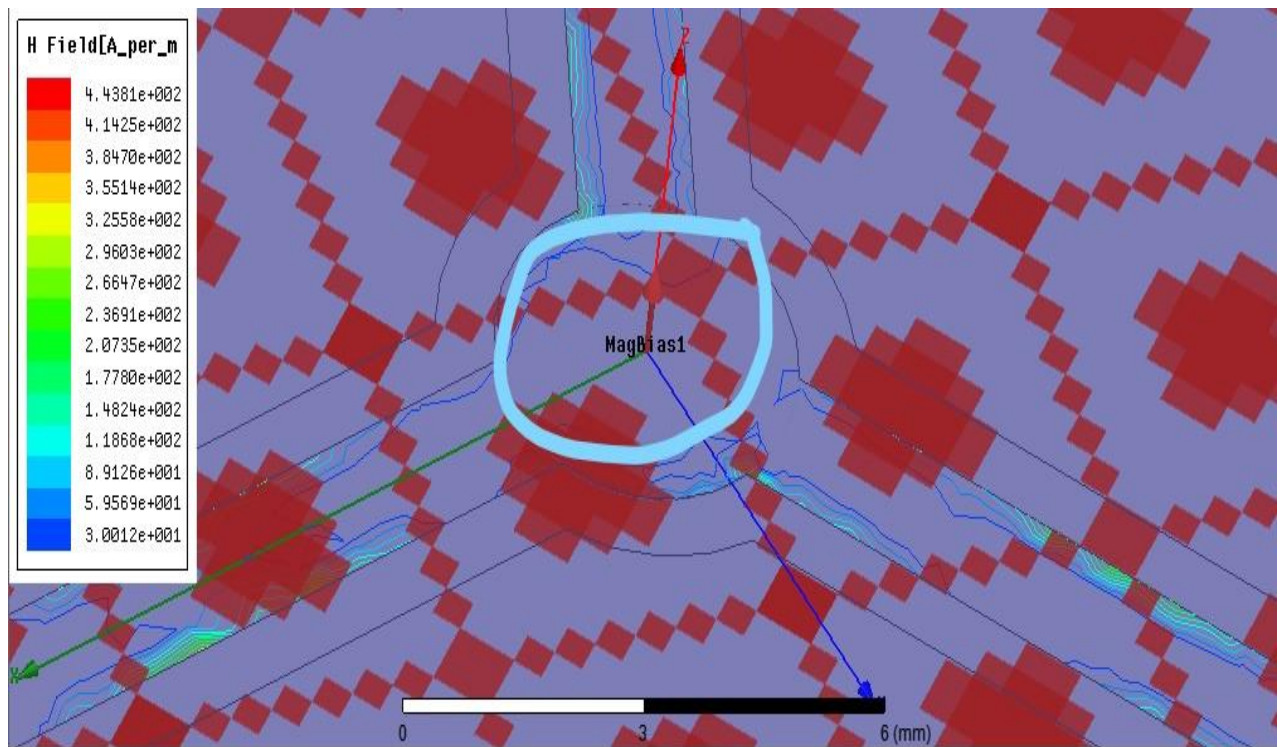


Figure 3.1 : Configuration électromagnétique de champ H

3. Modélisation numérique

Nous avons étudié deux structures de forme et les dimensions du matériau magnétique, et en fixant son épaisseur à 200 μm . Cette épaisseur a été choisie semblable à l'épaisseur du matériau magnétique composite qui sera intégré dans notre circulateur.

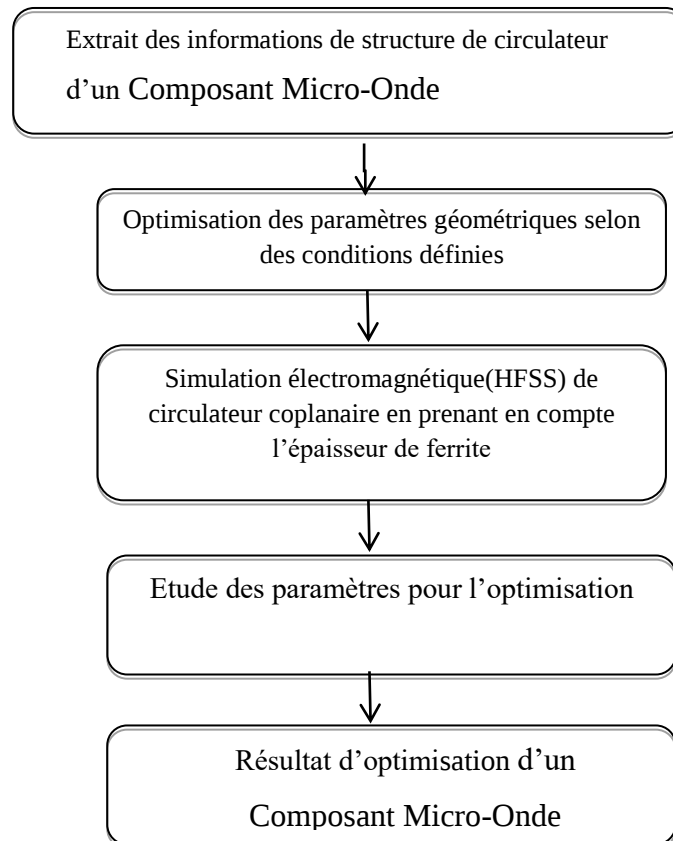


Figure 3.2 : les Etapes de travail

3.1 Introduction de logiciel HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un outil performant à onde électromagnétique (EM) commercial qui fait la simulation du champ d'un model arbitraires en 3D.

Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont Obtenus rapidement et avec précision. HFSS emploie la méthode des éléments finis (FEM) [2], An soft HFSS peuvent être utilisées pour calculer des paramètres tels que Paramètres S, fréquence de résonance, et des champs électriques et magnétiques. Modélisation par paquet :

Silicon / Gasa - Inductances Spiral, Transformers

EMC / EMI - Boîtiers Shield, Attache remorque, rayonnement proche ou en champ lointain.

Antennes / Mobile Communications : Patches, dipôles, corne, antennes de téléphone cellulaire, Hélix quadra filaires, débit d'absorption spécifique (SAR), des ensembles infinis, la surface équivalente radar (RCS), Surfaces sélectives en fréquence (FSS) Connecteurs – câble coaxial, Transitions Guide d'ondes

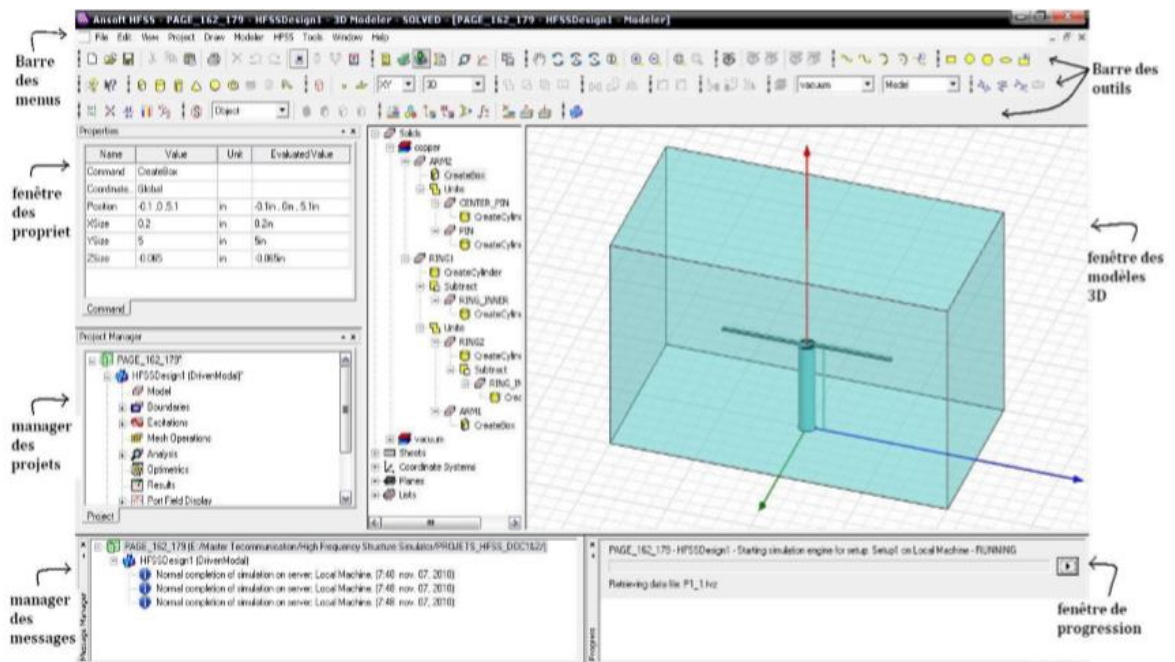
–filtres, résonateurs, Transitions, coupleurs Filtres - Filtres cavité, Micros trip, diélectrique
Qu'est-ce que vous donne HFSS ?

- Prototypes virtuel et rapide Structures Arbitraire en 3D Plusieurs ports / Modes multiples
supporte tous les matériaux à micro-ondes

- Calcul

Paramètres S, Y, Z Sous Circuits SPICE Modes à nœuds, Paires différentielles, Modes propres, Les champs électromagnétiques

3.2 Description générale des outils HFSS :



a. Barre des outils : Il englobe tous les outils pour créer un model

- Copier/coller
- Rotation et zoom du model
- Type du matériau utilise
- Le plan ou dans lequel on dessine l'objet
- Raccourci des modèles du carré jusqu'au cône
- Sélectionner une face

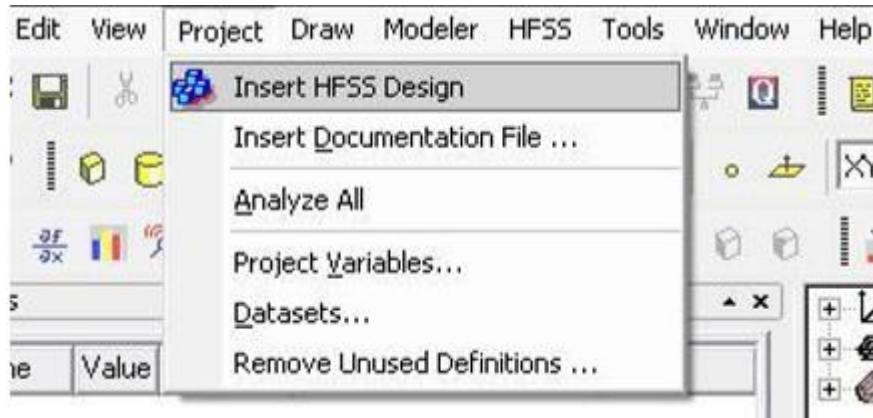
b. Barre des menus: Il contient toutes les options d'HFSS notamment :

HFSS>>Edit [3] :

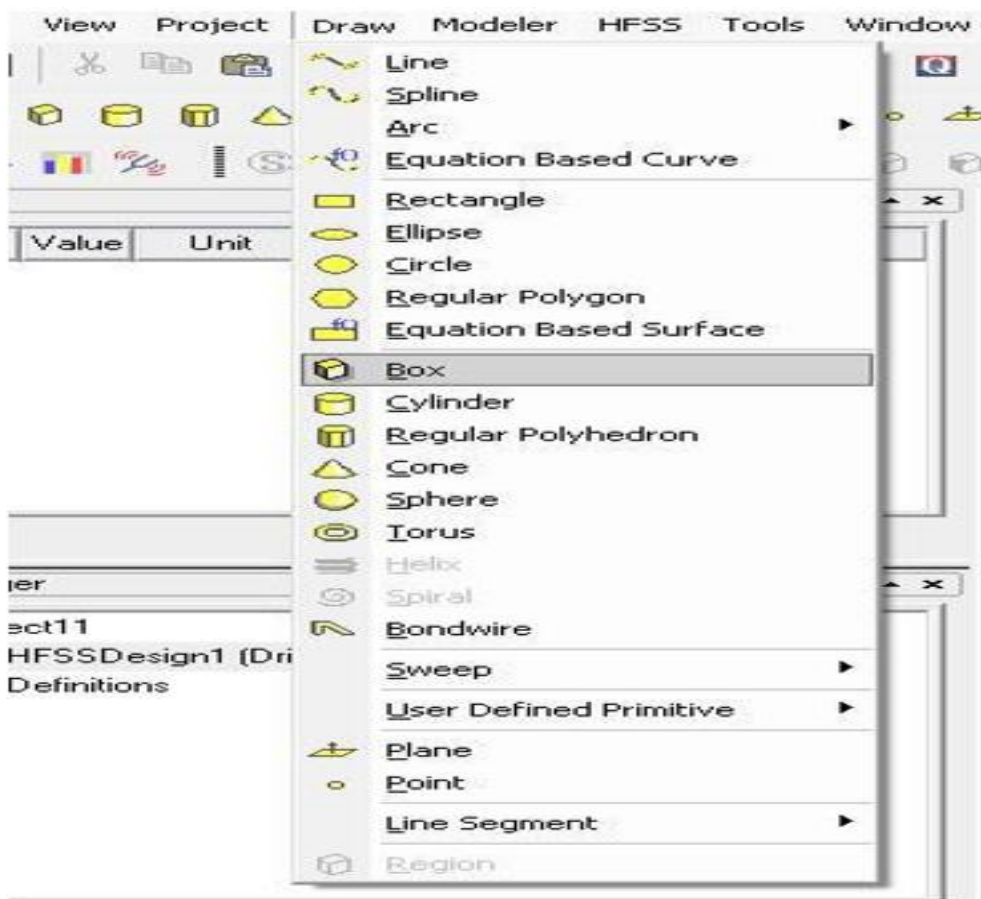
➤ Arrange >

- ❖ Move : translation d'un élément de structure le long d'un vecteur.
- ❖ Rotate : déplacer un élément de la structure par un angle.
- ❖ Mirror : faire traduire un objet choisi autour d'un plan spécifié.
- ❖ Offset : Effectue une échelle uniforme en x, y et z.

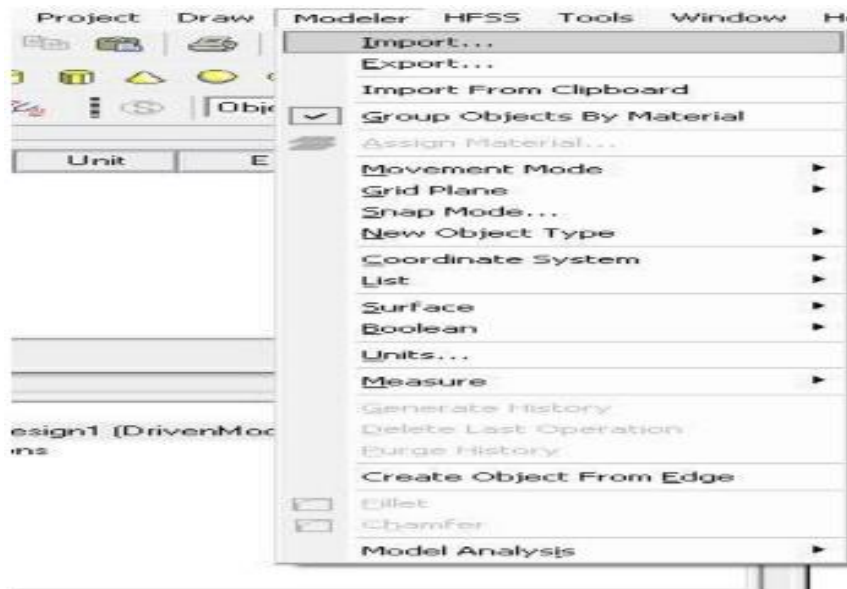
- Duplicate >
- ❖ Along lines : Créer des copies multiples d'un objet le long d'un vecteur.
- ❖ Around axis : créer des copies multiples d'un objet en rotation par un angle fixe autour de x, y ou z.
- ❖ Mirror : Fixer l'image d'un objet autour d'un plan spécifié et crée son double.
- **Project** : Pour insert le désigne HFSS



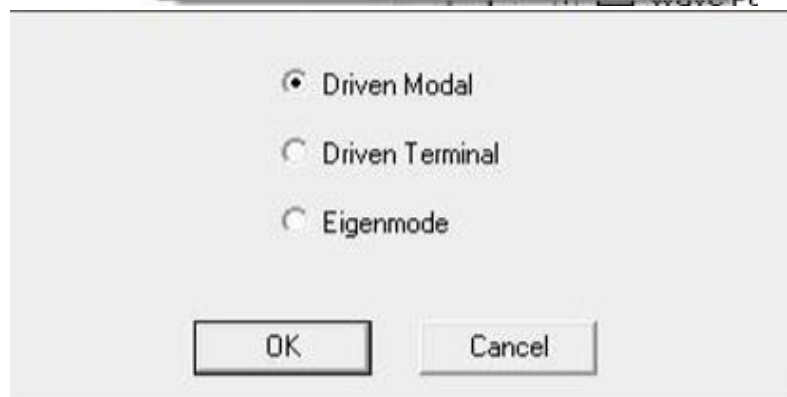
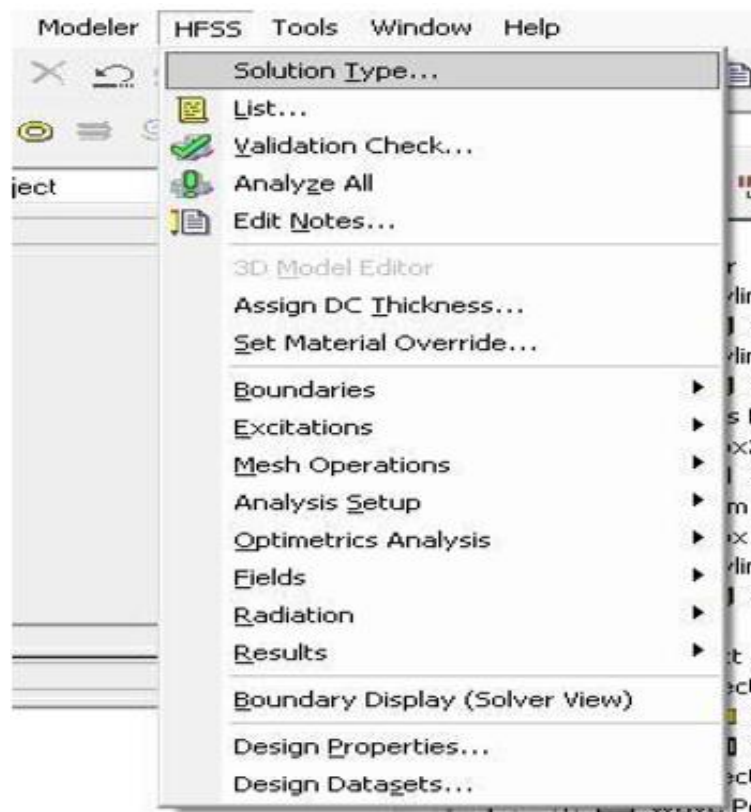
- **Draw** : Regroupe tous les modèles, rectangle, ellipse, cercle, boîte....



- **Modeler/3D Modeler** : On trouve booléen (fusionner deux objets), unité utilisée (mm,cm,km...), mesures(mesurer les distances), coordinat system(les coordonnées utilisé),mode analyses(analyse les propriétés et les performances des objets, des surfaces).



- HFSS :



- Solution Type [2] :

Driven Modal : calcule des paramètres S. les solutions de la matrice S

Seront exprimés en termes de puissance incidente et réfléchi.

Driven Terminal : calcule les paramètres S de ports multiconducteurs ligne de transmission.

Les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de tensions aux bornes et des courants.

Eigenmode : calcule les modes propres, ou de résonances, d'une structure. La solution des Modes propre retourne les fréquences de résonance de la structure et les champs à ces fréquences de résonance.

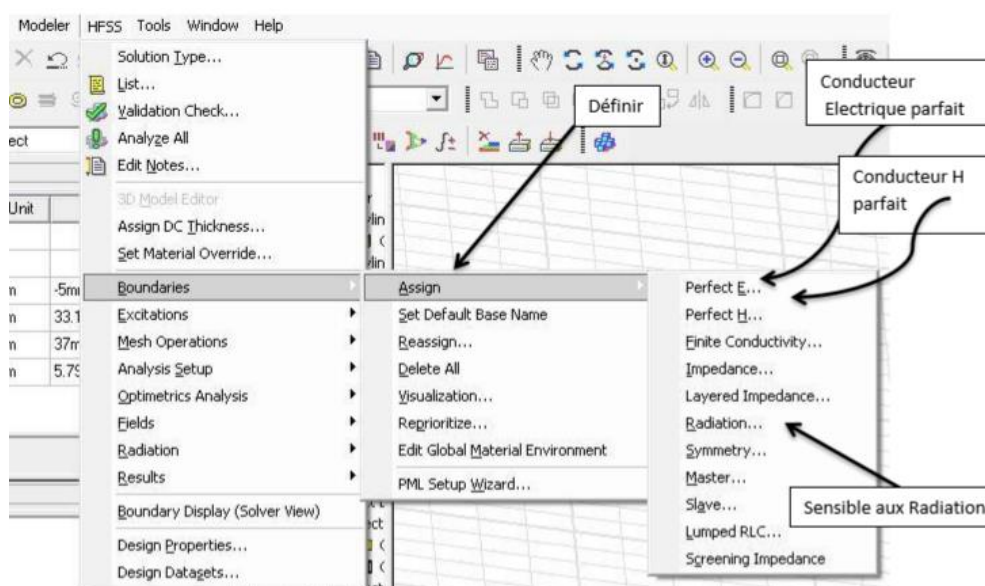
Validate



(compiler le projet), Analyze all

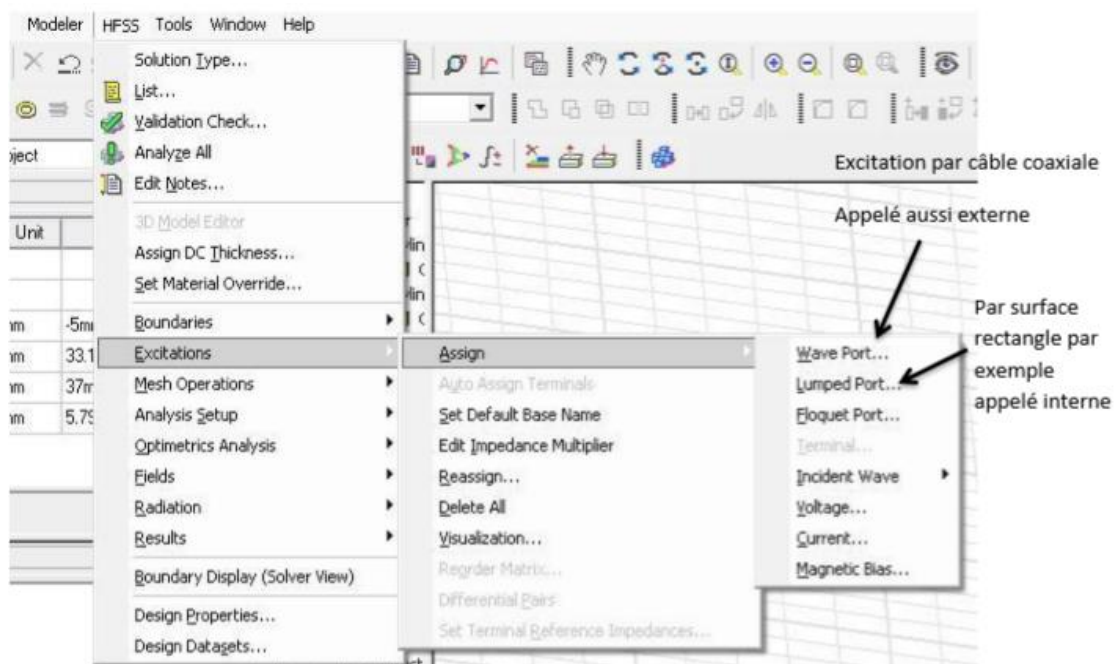


- Boundaries(conditions aux limites)[3],



- ❖ Perfect E : également appelé conducteur parfait ce type de limite forces du champ électrique est perpendiculaire à la surface. Il y a également deux affectations définissant un conducteur automatiquement parfait * Toute surface de l'objet qui touche le fond est automatiquement défini comme un limite parfaitement conducteur et donné le nom de condition au limite extérieure * Toute objet assigné par un matériel PEC (Perfect Electric conductor) il est automatiquement attribué au condition au limite électriquement parfait.
- ❖ Perfect H : est un conducteur magnétiquement parfait, il est tangentiel a la surface du champ E.
- ❖ Finite Conductivity : limite de conductivité finie vous permet de définir la surface d'un objet comme un conducteur avec perte (imparfaite).
- ❖ Impedance : surface résistive qui calcule le comportement des champs et des pertes en utilisant des formules analytiques($R_s + jX_s$). R_s : résistance, X_s : réactance.

- ❖ Layered Impedance : plusieurs couches minces dans une structure peuvent être modélisée comme une surface d'impédance.
 - ❖ Lumped RLC : une combinaison en parallèle des résistances localisées, inductance, et / ou de la surface du condensateur, la simulation est similaire à celle d'une impédance (Impedance) aux bornes mais le programme de Calcul en ohms / carré avec l'utilisation des valeurs fournies R, L, C
 - ❖ Radiation : limites de rayonnement, aussi appelé frontières absorbantes, vous permettent de modéliser une surface électriquement ouverte : ondes peuvent alors sortir de la structure et s'arrêter vers la limite de rayonnement
- Excitations



- ❖ Wave Port /Lumped Port : les ports d'ondes ont pour rôle indiquer la zone où l'énergie entre et sort du conducteur comme une alternative à l'utilisation de ports d'onde (wave port) que vous pouvez appliquer ports localisés (Lumped port) à une structure, il applique une excitation interne utile au sein d'une structure.
- ❖ Discrete : effectue une solution complète à toutes les fréquences en utilisant le maillage actuel, le temps requis est la fréquence à résoudre fois le nombre de points de fréquence ainsi que le champ peuvent être affichés à n'importe quelle fréquence dans la plage de balayage.
- ❖ Fast : utiliser un Solver adaptative lanczos-Pade balayage de la base (ALPS) d'extrapoler (déduire) un ensemble d'informations dans une bande passante autour de la fréquence centrale. Le temps et la mémoire nécessaires pour résoudre un balayage de fréquence peut être beaucoup plus grand qu'une seule fréquence à résoudre.
- ❖ Interpolating : effectue une résolution à des points de fréquences discrètes qui sont adaptés par interpolation.

- Frequency Setup :
- ❖ Linear Step (étape linéaire) : spécifier une plage linéaire des valeurs avec un pas constant
- ❖ Linear Count (compter linéaire): spécifier une plage linéaire de valeurs et le nombre ou le compter des points au sein de la gamme de variables
- ❖ Star et Stop : Désigne l'intervalle de fréquence afin de calculer les fréquences de résonance.
- Fields (visualiser le champ E et H le long du dispositifs).

4. Conception d'un Composant Micro-Onde

Les dimensions géométriques de la structure présentée ci-dessus sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1: Les dimensions du circulateur utilisés.

Dimensions	Valeurs
Largeur du conducteur de la ligne d'accès «W »	97 μm
Fente « S »	65 μm
Rayon du conducteur circulaire central « R »	425 μm
Rayon de la masse inférieure « Rg »	490 μm

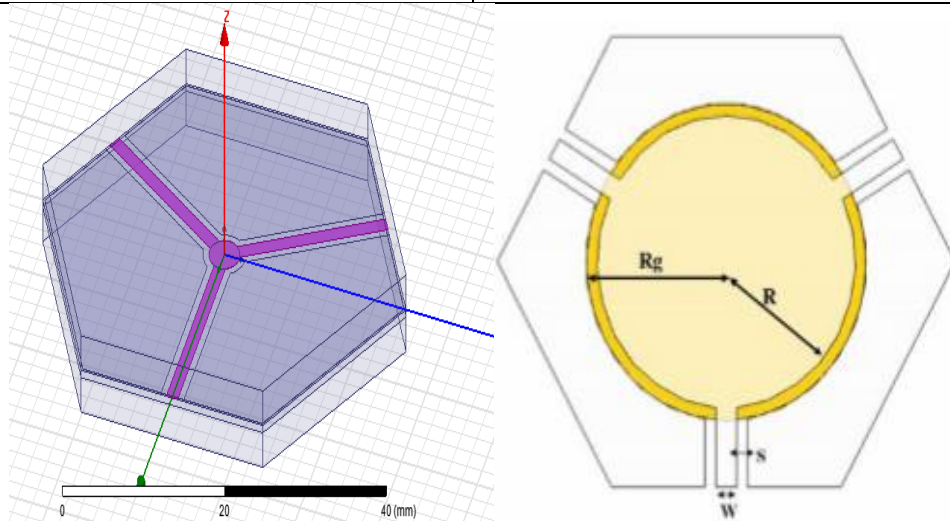


Figure 3.3 : Vue design d'un Composant Micro-Onde et avec des dimensions géométriques

4.1 Ferrite sous forme d'une couche mince :

Il s'agit d'une couche d'hexa ferrite de baryum déposée sur la masse circulaire déposée elle-même sur l'alumine

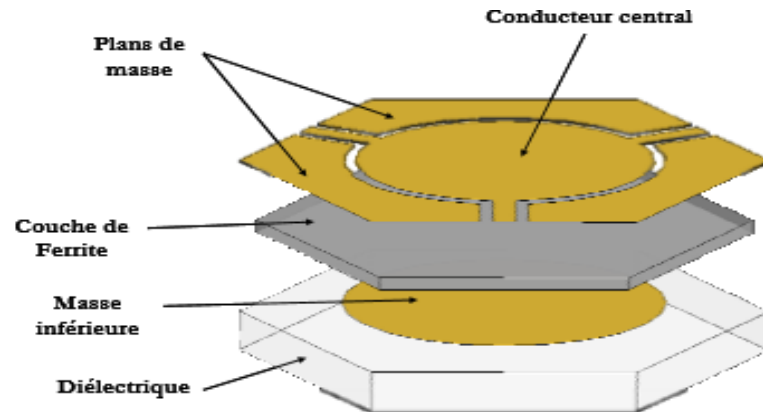


Figure 3.4: Circulateur coplanaire avec une couche mince de ferrite.

Le signal se propage d'un port à l'autre avec des pertes d'insertions de l'ordre de 0.65 dB, dans l'autre sens le signal est bloqué avec un taux d'isolation de -25 dB à la fréquence 10.1 GHz. Les réflexions aux niveaux des ports sont de -38 dB. Notons que ces valeurs sont satisfaisantes et montre le bon fonctionnement du dispositif (Figure 3.5).

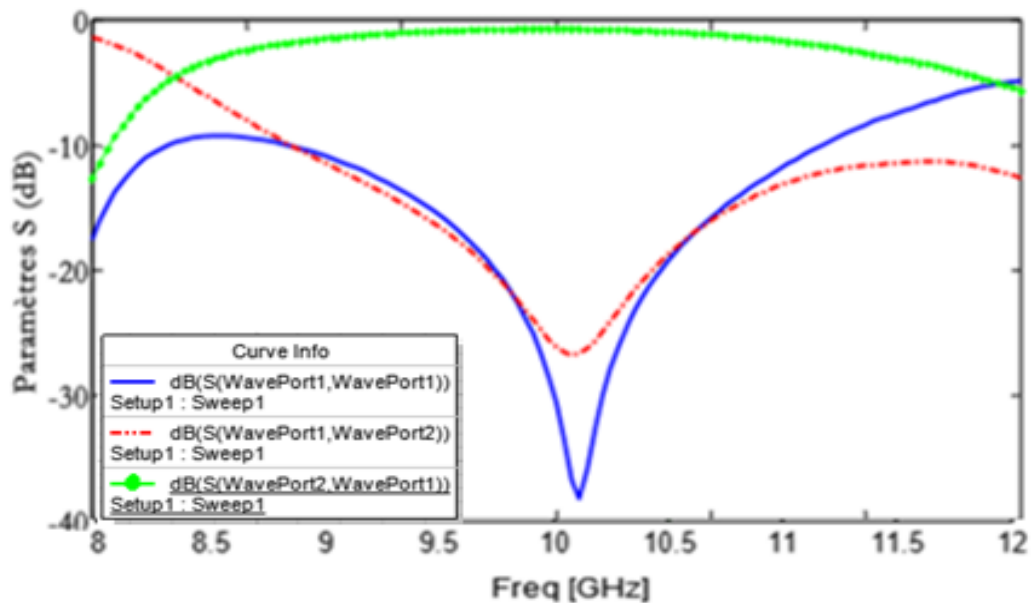


Figure 3.5 : Paramètres S du circulateur coplanaire avec une couche mince de ferrite

4.2 Ferrite sous forme de disque :

La différence dans cette structure réside dans la géométrie de ferrite, il est déposé dans ce cas, juste au centre, donc sous forme de disque de rayon identique au conducteur circulaire central (425 μm). (Figure 3.6).

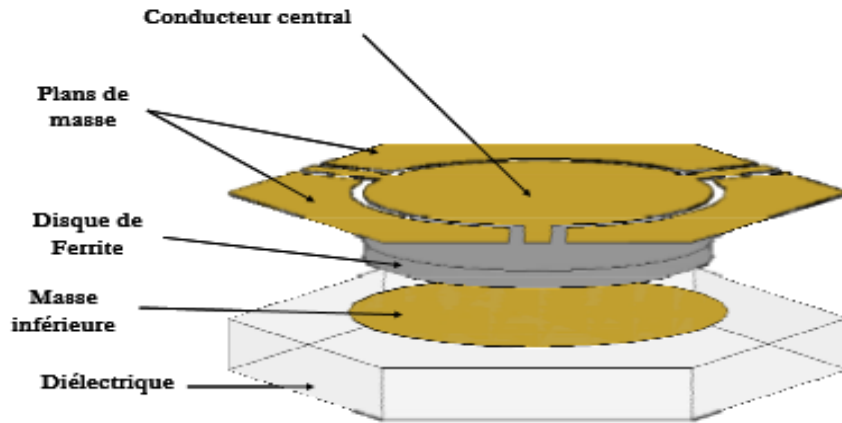


Figure 3.6: Composant Micro-Onde avec un disque de ferrite.

Le signal se propage d'un port à l'autre avec des pertes d'insertions de l'ordre de 0,9 dB, dans l'autre sens le signal est bloqué avec un taux d'isolation de -24 dB à la fréquence 10,3 GHz.

Les réflexions aux niveaux des ports sont de -17 dB. Notons que ces valeurs sont satisfaisantes et montre le bon fonctionnement du dispositif (figure 3.7).

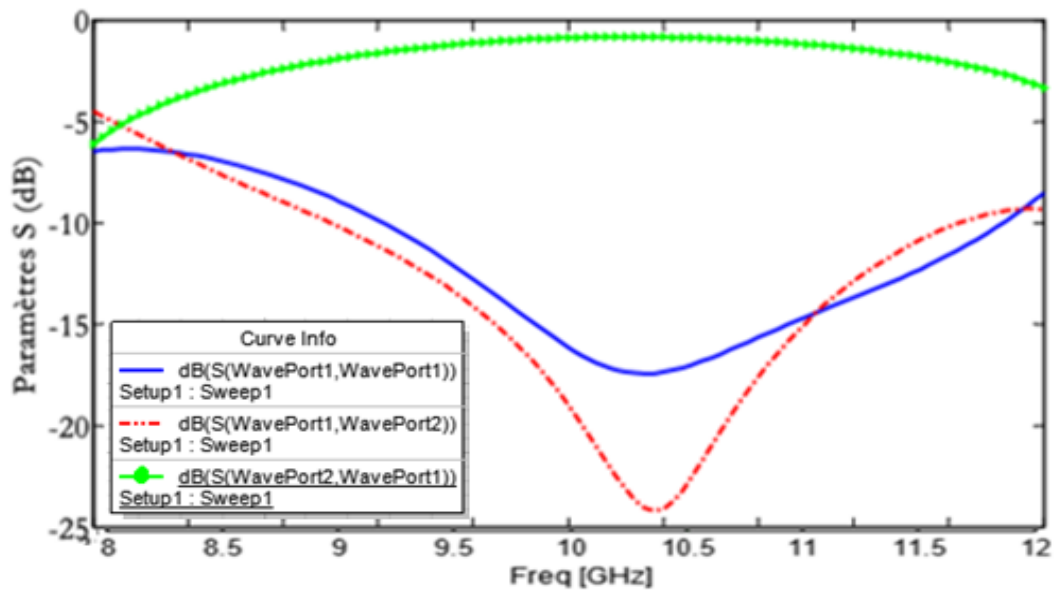


Figure 3.7: Paramètres S d'un Composant Micro-Onde avec un disque mince de ferrite.

4.3 Variation du rayon du disque de ferrite :

Tableau 3.2: Influence du rayon du disque de ferrite sur les performances du circulateur.

Rayon du disque de ferrite (μm)	Les pertes d'insertion (dB)	L'isolation (dB)	La réflexion (dB)	Fréquence (GHz)
350	-0.96	-20.85	-15.85	12.16
395	-0.81	-25.18	-17.44	11.41
425	-0.72	-27.55	-39.34	12.25
490	-0.82	-28.89	-27.76	10.66
560	-0.86	-26.66	-22.27	8.95

Les performances sont meilleures quand on conserve un rayon de 425 μm (Tableau 3.2). Nous obtenons des pertes minimales et des valeurs d'isolation et de réflexion respectant parfaitement les critères de ($>-20\text{dB}$).

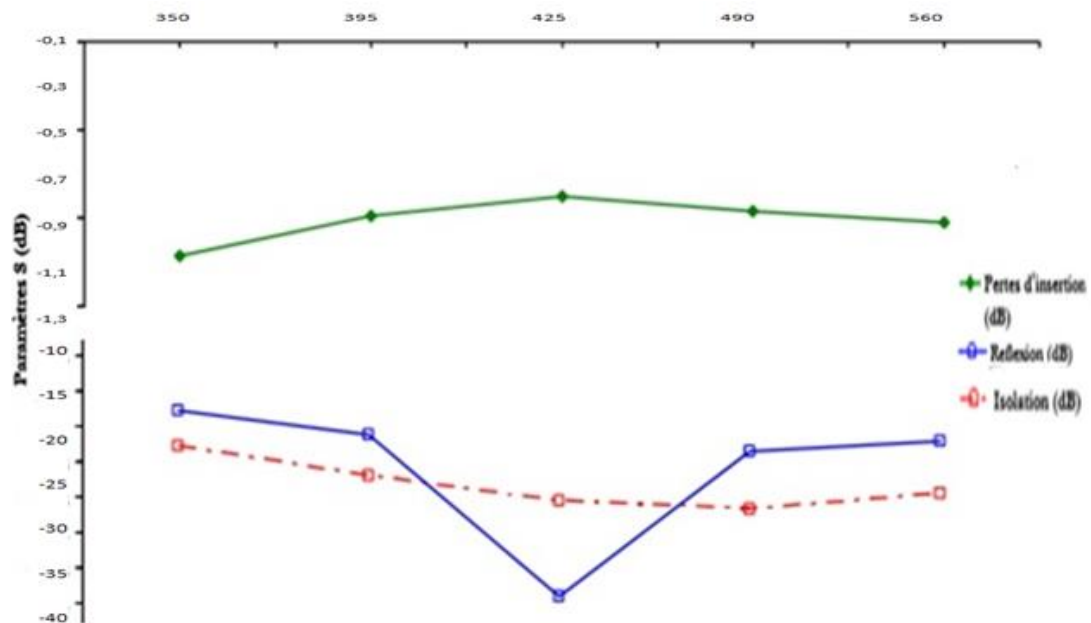


Figure 3.8: Paramètres S en fonction du rayon du disque de ferrite

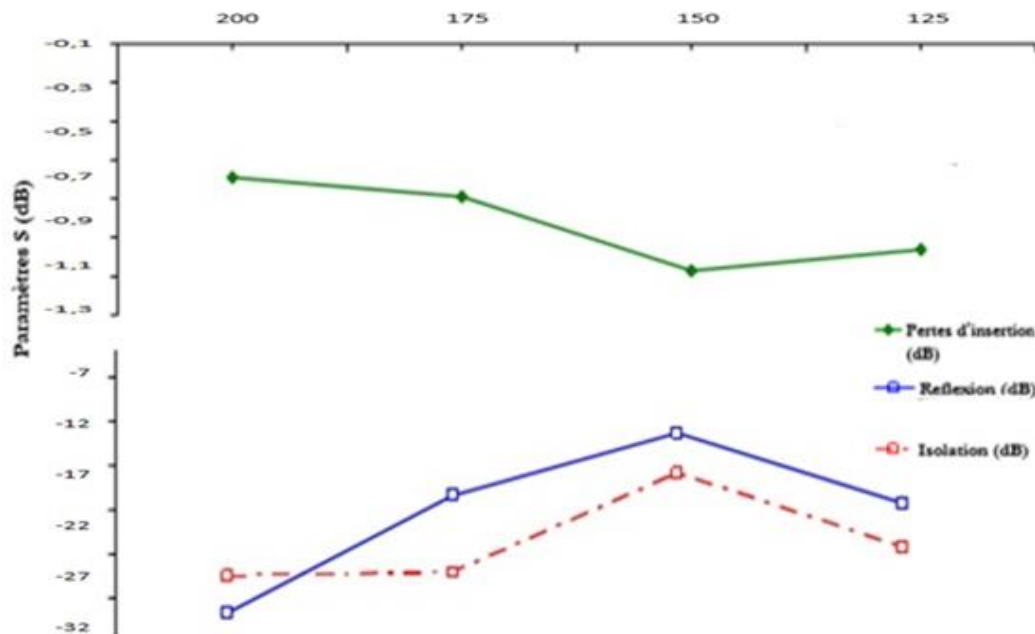
4.4 Variation de l'épaisseur du disque de ferrite :

En diminuant l'épaisseur du disque de ferrite, les performances du circulateur se dégradent (valeur initiale 200 μm).

Tableau 3.3: Influence de l'épaisseur du disque de ferrite sur les performances du circulateur.

Rayon du disque de ferrite (μm)	Les pertes d'insertion (dB)	L'isolation (dB)	La réflexion (dB)	Fréquence (GHz)
200	-0.77	-28.16	-32.50	12.5
175	-0.89	-26.82	-20.54	12
150	-1.10	-18.55	-14.84	12.3
125	-1.05	-24.89	-22.76	9.45

Les pertes d'insertion augmentent quand l'épaisseur de ferrite diminue. Les niveaux de réflexion et d'isolation se dégradent (Tableau 3.3). Nous conserverons l'épaisseur du ferrite fixe à 200 μm . (0.2mm).

**Figure 3.9:** Paramètres S en fonction de l'épaisseur de la ferrite

4.5 Variation de la fente circulaire :

Dans cette étude nous conservons la valeur de la fente des lignes d'accès à 65 μm et nous faisons varier la partie circulaire de la fente entourant le conducteur circulaire central.

Tableau 3.4: Influence de la largeur de la fente circulaire sur les performances du circulateur

Rayon du disque de ferrite (μm)	Les pertes d'insertion (dB)	L'isolation (dB)	La réflexion (dB)	Fréquence (GHz)
65	-0.79	-29.16	-29.55	12.5
75	-0.85	-23.82	-35.54	12

85	-0.93	-21.55	-28.84	12.3
95	-1.03	-22.89	-28.65	9.45

On constate que nos valeurs initiales correspondaient à une géométrie assurant les meilleures performances du circulateur (Tableau 3.4).

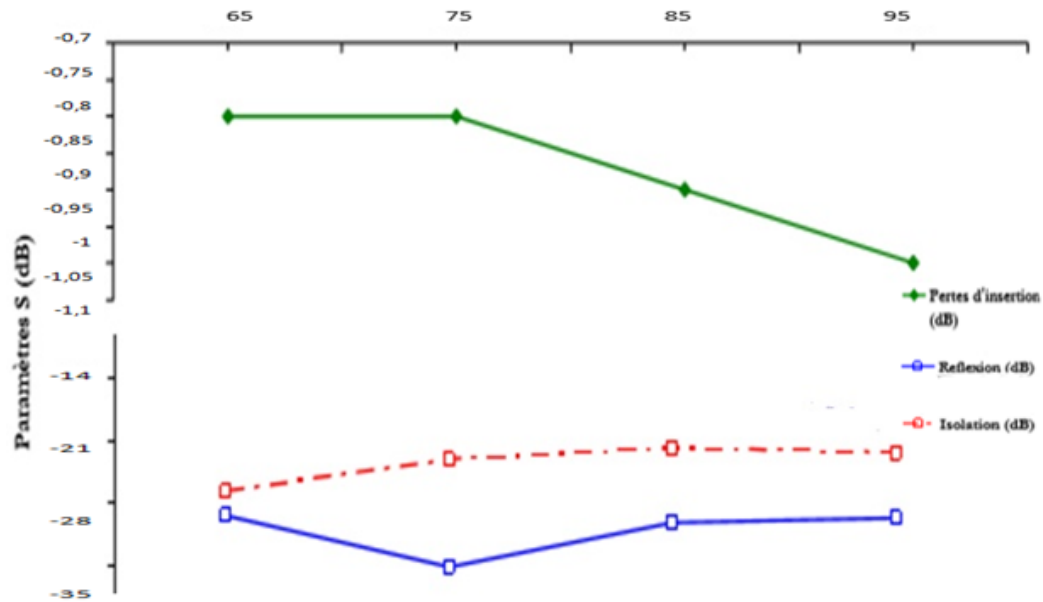


Figure 3.10: Paramètres S en fonction de la largeur de la fente circulaire

5. Discussions et interprétations :

Les principales causes de pertes varient selon la fréquence. Aux circulateurs à jonction Y en dehors de la plage de 10 GHz.

La deuxième structure, qui utilisait un petit disque de ferrite, était plus performante, notamment en termes de pertes d'insertion.

Les deux grandeurs les plus importantes pour un circulateur sont :

- Les pertes d'insertion qui doivent être les plus faibles possibles (< -1 dB),
- Et une bonne isolation (-20 dB).

Les principaux facteurs de pertes sont :

- Les pertes magnétiques ΔH (l'énergie de l'onde hyperfréquence absorbée par la couche de ferrite).
- Les pertes diélectriques.
- Les pertes conductrices, qui augmentent avec la fréquence.
- Les pertes par radiation qui dépendent de la dimension de circuit, mais aussi à la rugosité des couches.

6. Conclusion

Dans le but d'étudier un circulateur magnétique haute fréquence accordé à 10 GHz, nous avons présenté le fonctionnement général et le modèle analytique du circulateur. Nous nous sommes penchés sur l'étude des couches minces magnétiques de YIG. Nous avons présenté le fonctionnement général ainsi que la modélisation numérique de la circulation. Cette modélisation permet d'avoir une évaluation rapide des performances du composant et de son dimensionnement. Avec l'utilisation du logiciel de simulation électromagnétique 3D Ansoft HFSS pour les circulateurs à topologies coplanaires, cette étude simule numériquement. Dans ce chapitre, la modélisation numérique de ce dernier a permis d'appréhender le fonctionnement du circulateur coplanaire. Grâce aux résultats obtenus dans ce cas et à la détermination des paramètres S, il a été possible de dimensionner le circuit et d'estimer ses performances.

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce document est de mener une analyse numérique d'un composant micro-ondes ; circulateur coplanaires constitués d'une couche magnétique de ferrite qui fonctionnent à des fréquences autour de 10 GHz tout en respectant les exigences des applications de télécommunications. Ce travail est basé sur la variation de l'épaisseur du disque de ferrite du dispositif étudié, plusieurs simulations ont montré qu'on peut avoir des meilleurs paramètres du circulateur avec des petites épaisseurs de la ferrite. Les deux paramètres les plus importants pour un circulateur sont une faible perte d'insertion (idéalement inférieure à -1 dB) et une bonne isolation (idéalement inférieure à 20 dB). Le premier chapitre a été concentré sur une étude théorique dans laquelle nous avons identifié les différentes sortes de structures de circulateurs. La structure coplanaire a été choisie en raison de la facilité du processus de fabrication et de la facilité de connexion à des composants haute fréquence.

Notre composant repose sur l'utilisation d'un matériau magnétique dont la fonction est d'assurer la non-réciprocité de la propagation, ce qui confère aux circulateurs leurs caractéristiques de performance uniques. Connaître et sélectionner les matériaux fait l'objet du deuxième chapitre.

A l'aide du logiciel de modélisation électromagnétique 3D Ansoft HFSS, le circulateur a été modélisé numériquement dans le troisième chapitre. Le comportement électromagnétique du circulateur coplanaire est basé sur les pertes magnétiques et électriques ainsi que sur les pertes liées aux conducteurs. Les effets des performances du circulateur sur les paramètres géométriques et les propriétés des matériaux utilisés ont été recherchés. Cette étude a été achevée et le modèle de circulateur coplanaire a été mis à jour pour inclure les effets du disque du circulateur et de l'épaisseur de ferrite grâce à la simulation électromagnétique 3D. On peut généralement dire que celles-ci sont augmentées par la diminution d'épaisseur et que l'on favorise les solutions en couches plus

finies, nous avons obtenu des performances tout à fait acceptables avec notre structure grâce à une étude paramétrique qui a été réalisée.

Enfin, le circulateur que nous avons étudié présente des effets, dont des résultats très intéressants pour des couches de ferrite très fines. Et nous suggérons que les orientations futures de cette étude se concentrent sur le traitement de la variation structurelle, en particulier le déplacement du système circulatoire vers le circulateur elliptique.

Références bibliographiques

- [1] B. Bayard, « Contribution au développement de composants passifs magnétiques pour l'électronique hyperfréquence », thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, pp. 30- 32, octobre 2000.
- [2] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873.
- [3] E. Bénévent, « Contribution à l'étude et à la réalisation d'un circulateur hyperfréquence à couche magnétique dans la bande 40-50 GHz », thèse de doctorat, Université Jean Monnet de St Etienne, 2006
- [4] O. Zahwe, « Conception et réalisation d'un circulateur coplanaire à couche magnétique de YIG en bande X pour des applications en télécommunications », thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Juin 2009.
- [5] D. M. Pozar, « *Microwave Engineering* », 3rd edition, John Wiley & Sons Inc, USA, 2005
- [6] E.K.N. Yung, D.X. Wang, R.S. Chen, "Ferrite circulators", *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, vol.2, pp.1462, 2005.
- [7] P-F. Combes, R. Crampagne, « circuits passifs hyperfréquence: éléments passifs non Réciproques ». *Technique de l'ingénieur, traité Electronique*, E1 404, 2002.
- [8] Y. Konishi, "Lumped Element Y Circulator," *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions, vol. 13, Nov. 1965, p. 852 - 864.
- [9] Y. Konishi, "New theoretical concept for wide band gyromagnetic devices," *Magnetics*, IEEE Transactions, vol. 8, Sep. 1972, p. 505 - 508.
- [10] E.K.N. Yung, D.X. Wang, R.S. Chen, *Ferrite circulators*, *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Vol. 2, Kai Chang Editor, John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 1448-1473.
- [11] H. Bosma, *On stripline Y-circulators at UHF*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Jan. 1964, pp. 61 71.
- [12] C.E. Fay, R.L. Comstock, *Operation of the ferrite junction circulator*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-13, Jan. 1965, pp. 15-27
- [13] Y.S. Wu, F.J. Rosenbaum, *Wide-band operation of microstrip circulators*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-22, N°10, Oct. 1974, pp. 849-856.
- [14] E. K.N. Yung, W.B. Dou, D.G. Zhang, R.S. Chen, *Microstrip circulator made of a magnetized ferrite sphere*, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 28, N°2, 20th Jan. 2001, pp. 130-131.
- [15] R.E. Blight, E. Schloemann, *A compact microstrip circulator for phased array antenna modules*, *IEEE MTT-S Digest*, 1992, pp. 1389-1392.

- [16] N. Ogasawara, M. Kaji, *Coplanar-guide and slot-guide junction circulators*, Electronics Letters, Vol. 7, N°9, 6th May 1971, pp. 220-221.
- [17] K. Koshiji, E. Shu, *Circulators using coplanar waveguide*, Electronics Letters, Vol. 22, N°19, 11th Sep. 1986, pp. 1000-1002.
- [18] E. F. Schloemann, *Circulators for microwave and millimetre-wave integrated circuits*, Proceedings of the IEEE, Vol. 76, N°2, Feb. 1988, pp. 188-200
- [19] K. Oshiro, H. Mikami, S. Fujii, T. Tanaka, H. Fujimori, M. Matsuura, S. Yamamoto, *Fabrication of circulator with coplanar waveguide structure*, IEEE Trans. Magnetics, Vol. 41, N°10, Oct. 2005, pp. 3550-3552.
- [20] P. F. Combes, « Micro-ondes : lignes guides et cavité », Dunod, Paris, 1995.
- [21] L. Benachour, « Modélisation des structures planaires de formes régulières implantées sur substrat d'une anisotropie tensorielle », thèse de magistère, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [22] M. Bihane, « Contribution à l'étude des dispositifs planaires micro-ondes à ferrites pour des applications en télécommunications », thèse de magistère, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [23] Mr. BOUDJERDA Mounir, « Etude d'un isolateur coplanaire en bande X pour des applications télécoms Soutenu », thèse de MAGISTER, Université FERHAT ABBAS - SETIF-UFAS (ALGERIE), Saint-Etienne, Juin 2012.
- [24] T. BOYAJIAN « *Etude et réalisation d'un circulateur hyperfréquence à nano particules magnétiques orientées dans la bande 40-60GHz* », thèse de doctorat, Université Jean Monnet de St Etienne, 2011.
- [25] M. BOUDJERDA « Etude d'un isolateur coplanaire en bande X pour des applications télécoms », Mémoire de mastér, Université Ferhat Abbas -SETIF, 2012.
- [26] A. J. Baden Fuller, « Ferrites at microwave frequencies », Peter peregrines Ltd, London, United Kingdom, 1987.
- [27] P. F. Combes, « Les micro-ondes », Dunod, Paris, 1997.
- [28] P. F. Combes, « Ondes métriques et centimétriques », Dunod, Paris
- [29] C. Kittel, « Physique de l'état solide », Dunod, Paris, 1983.
- [30] E. Bénévent, « Contribution à l'étude et à la réalisation d'un circulateur hyperfréquence à couche magnétique dans la bande 40-50 GHz », thèse de doctorat, Université Jean Monnet de St Etienne, 2006.
- [31] A-S.Dehlinger « développement de circulateur à base d'oxyde magnétique pour application hyperfréquences "l'institut national des science appliquées de lyon 2008. Doctorat
- [32] P. F. Combes, «Circuits passifs hyperfréquences », Paul-sabatier, Toulouse.E 1404

- [33] J.A. Weiss, N.G. Watson, G.F. Dionne, New uniaxial-ferrite millimetre-wave junction circulators, IEEE MTT-S Digest, 1989.

Annexes A**Les unité de symbole.**

Quantité	Symbole	Unité SI
Champ magnétique interne	H_i	A/m
Champ magnétique statique externe appliqué	H₀	A/m
Permittivité	ε	F/m
permittivité relative	ε_r	--
perméabilité magnétique	μ	H/m
Perméabilité magnétique du vide	μ₀	H/m
Perméabilité relative	μ_r	--
Epaisseur de ferrite	h_f	M
Rayon du conducteur central	R	M
Rayon du plan de masse inférieur	R_c	M
Largeur des fentes	G	M
Taux d'Onde Stationnaire	TOS	--
Bande passante	BP	Hz

AnnexesB**Relations entre les systèmes d'unités SI et CGS**

Grandeurs	SI	CGS	Relations
Champ magnétique H	A/m	Oe	$1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$
Aimantation Ms	A/m	uem/cm ³	$1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ uem/cm}^3$
Inductancemagnétique B	Tesla (T)	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$

AnnexesC

Les bandes de fréquence en microondes

Abriviation	Désignation	Limites
UHF	Ultra HighFrequency	300MHzà 3GHz
SHE	Super HighFrequency	3 à 30 GHz
EHE	Extremely High Frequency	30 à 300 GHz

RÉSUMÉ

Ce travail était de démontrer la faisabilité de circulateurs coplanaires hyperfréquence miniaturisés fonctionnant autour de 10 GHz. Les composants passifs hyperfréquences deviennent de plus en plus commercialisés et employés dans les systèmes de télécommunications. Grâce à la croissance technologique et l'augmentation de la demande des nouvelles applications requièrent de meilleures performances et de moindres coûts. Les type circulateurs ou isolateurs, sont fabriqués de façon unitaire à partir des substrats de ferrite et avec des structures microruban ou triplaque. La miniaturisation et l'intégration de ces circulateurs nécessitent de disposer d'une couche mince magnétique qui possède des propriétés magnétiques proche des matériaux massifs. Ce travail s'intéresse donc à la réalisation du circulateur coplanaire en HFSS à couche magnétique de YIG en de fréquence de 10Ghz pour des applications en télécommunications. Après avoir affiné les dimensions de façon numérique, les résultats est optimisé à l'aide d'un simulateur électromagnétique. Les résultats expérimentaux sont présentés tout en dressant une comparaison avec l'logiciel Origine et Excel en deux axes (x, y).

Mots clés : composants passifs, Circulateur coplanaire, ferrite, Réciproque et non réciproque, hyperfréquence, couche mince de ferrite, conception.

Abstract

This work was to demonstrate the feasibility of miniaturized microwave coplanar circulators operating around 10 GHz. Passive microwave components are becoming more and more commercialized and used in telecommunication systems. Due to technological growth and increased demand for new applications require better performance and lower costs. The circulator or insulator types are manufactured unitarily from the ferrite substrates and with microstrip or triplate structures. The miniaturization and the integration of these circulators require the provision of a thin magnetic layer which has magnetic properties close to massive materials. This work is therefore concerned with the realization of the YG magnetic layer HFSS coplanar circulator with a frequency of 10Ghz for telecommunications applications. After digitally refining the dimensions, the results are optimized using a electromagnetic simulator. The experimental results are presented while making a comparison with the Origin and Excel software in two axes (x, y).

Keywords: Modilisation, Coplanar circulator, ferrite, Magnetic layer, Reciprocal and non-reciprocal, microwave, design.

ملخص

كان هذا العمل لإثبات جدوى circulateur ذو الموجات الدقيقة المصغرة والذي يعمل بتردد 10 جيجا هرتز. وأصبحت مكونات الميكروويف الخاملة الأكثر استخدامًا في أنظمة الاتصالات. والتي بسبب النمو التكنولوجي وزيادة الطلب على التطبيقات الجديدة أصبحت تتطلب أداء أفضل وبتكاليف منخفضة.

يتم تصنيع أنواع circulateurs أو المعازل بشكل موحد من ركائز Ferrite وببنية دقيقة أو ثلاثية. يتطلب تصغير وتصنيع circulateur توفير طبقة مغناطيسية رفيعة ذات خصائص مغناطيسية قريبة من المواد الضخمة. لذلك يهتم هذا العمل بتحقيق circulateur متحدة المستوى في برنامج HFSS ذات الطبقة المغناطيسية YIG بتردد 10 جيجا هرتز لتطبيقات الاتصالات. بعد تحسين الأبعاد رقميًا، يتم تحسين النتائج باستخدام جهاز محاكاة كهرومغناطيسي. يتم تقديم النتائج التجريبية أثناء إجراء مقارنة مع برنامج Origin و Excel على المحاورين (x, y).

الكلمات المفتاحية: عنصر خامل، circulateur متحد المستوى، الفيريت، طبقة مغناطيسية، متبادل وغير متبادل، ميكروويف، طبقة رقيقة من الفيريت، تصميم.