
LES COMPOSANTS PASSIFS NON RECIPROQUES

Sommaire

Introduction	43
II.1 Généralités sur les multipôles	44
II.1.1 Définition	44
II.1.2 Paramètres S : Scattering parameters	44
II.1.3 Le quadripôle	45
II.2 Les lignes de transmissions planaires	46
II.2.1 Définition	46
II.2.2 Différents modes de propagation	46
II.2.3 Les technologies planaires	47
II.2.3.1 Ligne microruban (microstrip)	48
II.2.3.2 Ligne coplanaire (coplanar waveguide)	49
II.3 Les dispositifs non-réciproques	51
II.3.1 Définition	51
II.3.2 La non-réciprocité en hyperfréquence	51
II.3.3 Les circulateurs	53
II.3.3.1 Principe et différentes utilisations	53
II.3.3.2 Utilisation d'un circulateur comme isolateur	54
II.3.3.3 Le circulateur en technologie coplanaire	55
II.4 Les isolateurs hyperfréquences	57
II.4.1 Principe de fonctionnement d'un isolateur	57
II.4.2 Matrice de répartition	58
II.4.3 Paramètres d'un isolateur	58
II.4.4 Applications des isolateurs	60
II.4.4.1 Application comme découplage	60

II.4.4.2	Application pour le multiplexage	60
II.4.5	Les différents types d'isolateurs	61
II.4.5.1	Isolateur à déplacement de champ en guide d'onde rectangulaire	61
II.4.5.2	Isolateurs à déplacement de champ sur une ligne microruban	62
II.4.5.3	Isolateur à effet de Faraday	62
II.4.5.4	L'isolateur triplaques à résonance	63
II.4.5.5	Les isolateurs coplanaires à résonance	64
Conclusion		69
Bibliographie		70

Introduction

LES composants planaires passifs non réciproques sont des composants micro-onde utilisés dans le domaine des télécommunications. Parmi ces composants on retrouve les isolateurs et les circulateurs qui sont des dispositifs planaires non réciproques dont l'intérêt est d'assurer le passage du signal dans un sens et de l'isoler dans l'autre. Ils se basent sur les phénomènes magnétiques à hautes fréquences comme le phénomène de gyrorésonance, le déplacement de champ et l'effet Faraday. Ces dispositifs sont constitués de substrats de ferrites sur lesquels sont structurés les motifs du composant.

Dans ce chapitre nous allons présenter les généralités sur les quadripôles passifs non-réciproques. Ensuite viendra une partie sur les différents types de lignes de transmission planaires avec leurs constituants. Et enfin une dernière partie sur les différents types de dispositifs non réciproques existants et plus particulièrement les isolateurs avec leurs applications dans le domaine des hyperfréquences et leurs performances seront présentées.

II.1 Généralités sur les multipôles

II.1.1 Définition

Un multipôle est un circuit constitué de plusieurs ports (lignes) de connexion reliés à un noyau central. Chaque port est parcouru par une onde entrante qui se propage du port vers le noyau et une onde sortante qui se propage du noyau vers l'extérieur.

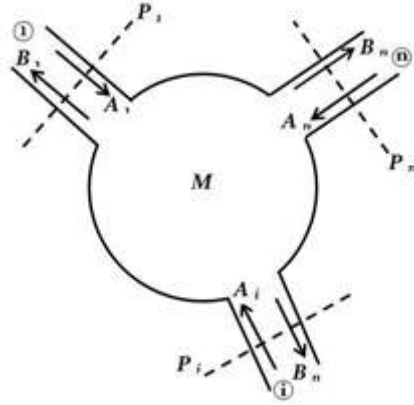


FIGURE II.1 – Un multipôle [1]

Sur la figure (2) on observe plusieurs ports qui vont de P_1 à P_n et les ondes entrantes sont notées A_i et les ondes sortantes sont notées B_i , avec $i=1$ à n , ces grandeurs sont reliées entre elles par les paramètres S_{ij} [1] [2] :

$$B_i = S_{i1}A_1 + \dots + S_{ij}A_j + \dots + S_{in}A_n \quad (\text{II.1})$$

S_{ij} : coefficient de pondération

n : nombre de voies du multipôle.

II.1.2 Paramètres S : Scattering parameters

Les paramètres S sont des coefficients de pondération utilisés dans les domaines des hyperfréquences. Ces paramètres appelés coefficients de diffraction ou de répartition et notés S_{ij} , permettent de déterminer le comportement électromagnétique d'un composant.

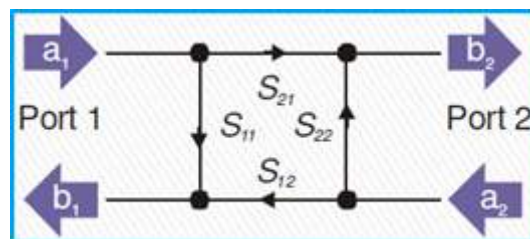


FIGURE II.2 – Paramètres de dispersion d'un composant à deux ports [3]

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$ est la réflexion à l'entrée 1 quand la sortie est adaptée (port 2).

$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$ est la transmission de l'entrée 1 vers la sortie 2 quand l'entrée est adaptée.

$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}$ est la transmission de la sortie 2 vers l'entrée 1 quand la sortie est adaptée.

$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$ est la réflexion à la sortie 2 quand l'entrée 1 est adaptée.

Les paramètres S ont quelques propriétés remarquables selon les types de circuits.

Pour les :

⊗ Circuits symétriques $\Leftrightarrow S_{11} = S_{22}$

⊗ Circuits réciproques $\Leftrightarrow S_{21} = S_{12}$

⊗ Circuits non réciproques $\Leftrightarrow S_{21} \neq S_{12}$ et $S_{11} \neq S_{22}$

II.1.3 Le quadripôle

Un quadripôle est un système de transmission linéaire qui comporte deux ports (P_1 et P_2) d'entrée/sortie, servant de plans de référence. Les isolateurs coplanaires peuvent être considérés comme des quadripôles.

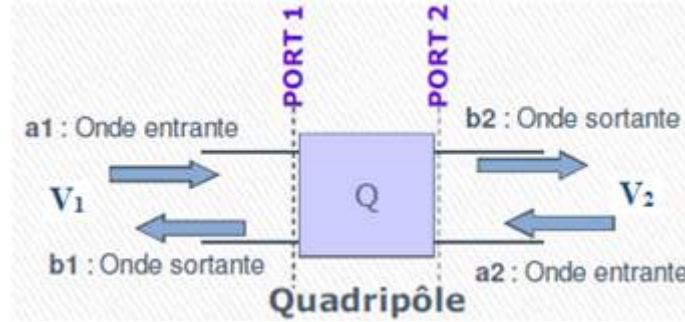


FIGURE II.3 – Schématisation d'un quadripôle

Avec :

$$\begin{cases} V_1 = a_1 + b_1 \\ V_2 = a_1 + b_2 \\ \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.2 Les lignes de transmissions planaires

II.2.1 Définition

Une ligne de transmission ou un guide est un ensemble d'un ou de plusieurs conducteurs qui permet de transporter un signal électrique d'un émetteur (source) vers un récepteur (charge) [1].

Il existe différents types de lignes de transmission, et celles qui sont utilisées dans les technologies planaires sont les lignes microrubans, les lignes à fentes et les lignes coplanaires. On retrouve aussi les guides d'onde métalliques (rectangulaire et circulaire) qui sont utilisés comme des lignes de transmission.

Ces lignes sont caractérisées par des paramètres principaux. Ces paramètres sont l'impédance caractéristique Z_C , une vitesse de propagation $V\varphi$, une constante d'affaiblissement α et une fréquence de coupure f_c .

II.2.2 Différents modes de propagation

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage, il existe trois différents modes possible de transmissions de l'onde dans le composant micro-onde suivant l'axe de propagation (axe z) : mode Transverse Electromagnétique (TEM), mode Transverse Electrique (TE) et mode Transverse Magnétique (TM).

• Mode TEM

Le mode Transverse Electromagnétique (TEM) est un mode de propagation où les champs électriques et magnétiques suivant la direction de propagation z sont tous nuls ($E_z = 0$ et $H_z = 0$). Dans le mode TEM ni le champ électrique ni le champ magnétique ne sont orientés dans la direction de propagation.

• Mode TE

Le mode Transverse Electrique (TE) est un mode de propagation où le champ électrique est nul suivant z ($E_z = 0$) alors que le champ magnétique normal au champ électrique n'est pas nul suivant z ($H_z \neq 0$). C'est-à-dire que le champ E est perpendiculaire à la direction de propagation. Dans ce mode il n'existe pas de champ électrique dans la direction de la propagation. Ce mode s'appelle parfois mode H parce qu'il y a seulement un champ magnétique le long de la direction de la propagation.

• Mode TM

Le mode Transverse Magnétique (TM) est un mode de propagation où le champ magnétique est nul suivant z ($H_z = 0$) alors que le champ électrique normal au champ magnétique ne l'est pas ($E_z \neq 0$). C'est-à-dire que le champ H est perpendiculaire à la direction de propagation. Dans

ce mode il n'existe pas de champ magnétique dans la direction de la propagation. Ce mode s'appelle parfois mode E parce qu'il y a seulement un champ électrique le long de la direction de la propagation.

• Mode Hybride

Le Mode hybride est un mode où les champs électriques et magnétiques sont différents de zéro dans la direction de la propagation ($E_z \neq 0$ et $H_z \neq 0$). Le tableau ci-dessous résume les différents modes en fonction des polarisations des champs E_z et H_z .

E_z	H_z	Nom	Sigle
$= 0$	$\neq 0$	Transverse Electrique	TE
$\neq 0$	$= 0$	Transverse Magnétique	TM
$= 0$	$= 0$	Transverse Electromagnétique	TEM
$\neq 0$	$\neq 0$	Hybride Electromagnétique	HEM

TABLE II.1 – Différents types de modes de propagation pour les ondes électromagnétiques dans les guides.

II.2.3 Les technologies planaires

Les technologies planaires sont des technologies modernes de circuits micro-électroniques imprimés, utilisés dans le domaine des télécommunications, conçus pour le passage de faibles puissances. L'avantage de ces technologies est de diminuer le volume du composant par rapport aux guides creux, afin de résoudre le problème d'encombrement du circuit.

Cette miniaturisation est l'objectif principal de la technologie planaire afin d'obtenir un composant qui répond aux critères suivant [4] :

- Avoir une dimension et un poids faibles
- Une compatibilité avec des circuits intégrés
- Des performances intéressantes
- Une fiabilité meilleure
- Une reproductibilité des performances
- Un coût faible

Dans cette partie une étude sera faite sur les lignes de transmission planaires que sont la ligne microruban et la ligne coplanaire avec leurs modes de propagation.

II.2.3.1 Ligne microruban (microstrip)

La ligne microruban est une ligne de transmission très utilisée pour la fabrication des circuits à micro-ondes. Cette ligne est constituée d'une ligne conductrice de largeur W déposée sur un substrat de diélectrique de permittivité relative ϵ_r et d'épaisseur h sous lequel une couche de métal est déposée sur toute la surface pour constituer le plan de masse. [5]

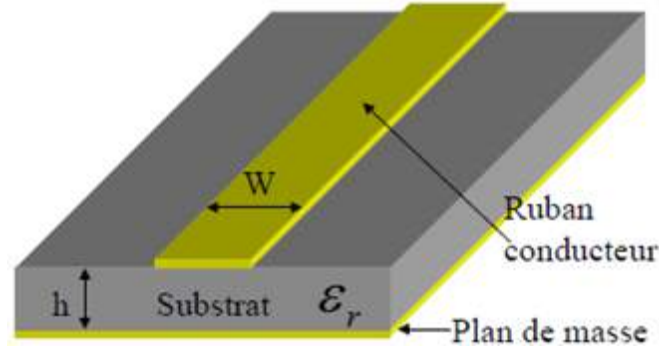


FIGURE II.4 – Ligne microruban (microstrip)

La ligne microruban possède un substrat qui est un support mécanique. Ce support influe sur les propriétés de la ligne via ses paramètres constitutifs que sont la permittivité ϵ_r et la perméabilité μ_r . Ce substrat présente des pertes diélectriques représentées par $tg\delta$.

En prenant un exemple d'une ligne microstrip adaptée, son impédance caractéristique est $Z_0 = 50\Omega$.

Les paramètres électriques de la ligne microstrip dépendent de la permittivité relative du substrat, de son épaisseur h et de la largeur du ruban W .

En faisant une simulation avec le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulation), qui est un logiciel de simulation de structures en 3D, les résultats de propagation des champs électriques et magnétiques sont présentés sur la figure ci-dessous.

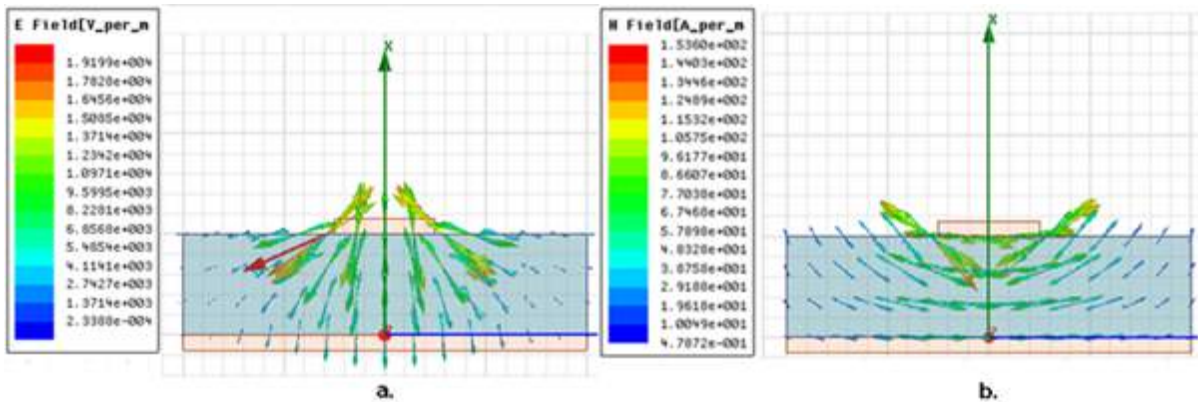


FIGURE II.5 – Configuration des champs électriques (a) et magnétiques (b)

Dans cette structure le signal hyperfréquence se propage entre le plan de masse et le ruban conducteur. Son mode de propagation n'est pas le mode TEM à cause des champs électro-

magnétiques qui ne se propagent pas dans l'air mais dans le substrat. Le mode peut être approximativement un mode quasi-TEM où les champs correspondent au cas statique, car ses composantes longitudinales sont quasiment nulles c'est à dire que les champs électriques et magnétiques sont orthogonaux à l'axe de la ligne de propagation [6]. Dans la structure microruban la propagation des ondes n'est pas homogène à cause du ruban conducteur dont une partie de ces lignes de champ se trouve dans l'air et une autre dans le substrat.

Comme la ligne est constituée d'un substrat diélectrique, les paramètres de la ligne, avec ϵ_e la permittivité effective, peuvent être calculés de la manière suivante :

$$\begin{cases} Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \\ v_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_e}} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 10 \frac{h}{W}}} \quad (\text{II.5})$$

II.2.3.2 Ligne coplanaire (coplanar waveguide)

Une ligne coplanaire est une ligne de transmission planaire composée de deux plans de masse latéraux et d'un conducteur central de largeur W qui permet de faire passer le signal micro-onde. Ils sont constitués de rubans métalliques déposés sur la partie supérieure du substrat de diélectrique de permittivité relative ϵ_r et d'épaisseur h . Entre la ligne centrale et les plans de masse latéraux se situe une fente de largeur S (gap) et la distance d (voir figure 6) est la somme de deux largeurs de fentes plus la largeur du conducteur W (signal). Cette ligne nommée CPW (Coplanar Waveguide) a été proposée principalement par Wen en 1969 qui la présente comme une alternative au microstrip [7].

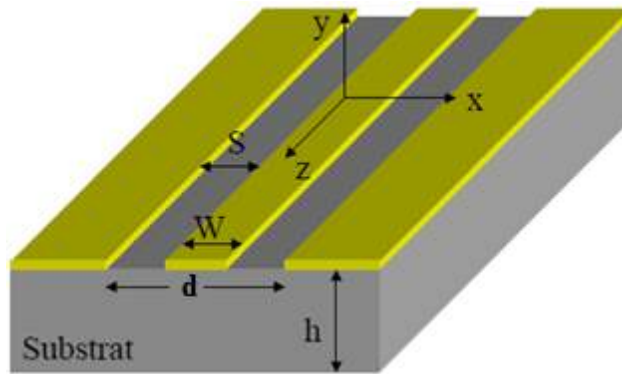


FIGURE II.6 – Structure d'une ligne coplanaire

La ligne coplanaire possède beaucoup d'avantages par rapport à la ligne microruban. En termes de coût de réalisation, la ligne coplanaire est plus intéressante que la ligne microruban, car elle possède une réalisation en face avant du substrat seulement, contrairement au microruban qui en possède sur les deux faces du substrat. Ces paramètres caractéristiques peuvent

être écrits :

$$\begin{cases} Z_c = \frac{Z_0}{4\sqrt{\epsilon_e}} \cdot \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \\ \epsilon_e = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k_2) \cdot K'(k_1)}{K'(k_2) \cdot K(k_1)} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$K(k_1)$ et $K(k_2)$ l'intégrale elliptique du premier ordre.

$K'(k_1)$ et $K'(k_2)$ l'intégrale elliptique du second ordre.

En prenant l'exemple d'une ligne coplanaire adaptée, son impédance caractéristique est $Z_0 = 50\Omega$ (ligne et plan de masse en cuivre et le substrat en alumine).

Cette ligne est simulée dans le logiciel HFSS, les résultats de propagation des champs électriques et magnétiques sont présentés sur la figure ci-dessous.

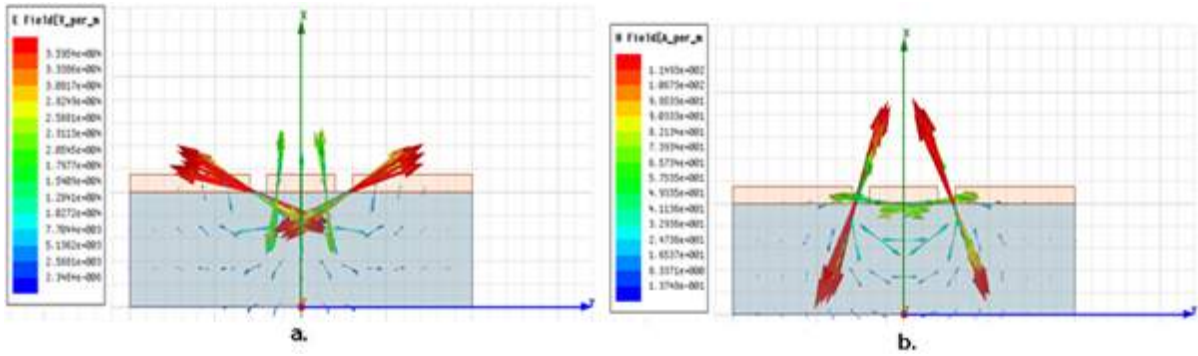


FIGURE II.7 – Configuration des champs électriques (a), magnétiques (b) dans une ligne coplanaire simulée sous HFSS

Dans la ligne coplanaire, le mode propagation n'est pas le mode TEM, car les champs électriques et magnétiques ne se propagent pas selon la composante longitudinale ($E_z = 0$ et $H_z = 0$). On retrouve initialement dans une ligne coplanaire, deux modes de propagations fondamentaux :

- Le mode de propagation pair ($E(x,y) = E(-x,y)$), c'est le mode où la ligne se comporte avec un mode de propagation Transverse Electromagnétique (TE) où la propagation du champ se fait dans la fente. Ce mode n'est pas souhaité et est à éviter.
- Le mode observé dans la figure 7 est le mode impair ($E(x,y) = -E(-x,y)$), c'est le mode coplanaire où la ligne se comporte avec un mode quasi-TEM, la propagation des champs se fait entre le ruban conducteur et les plans de masse latéraux [9] [10].

II.3 Les dispositifs non-réciproques

II.3.1 Définition

Un composant est dit réciproque si les coefficients de transmission de l'entrée du quadripôle ou du multipôle sont égaux aux coefficients de transmission de sortie : $S_{ij} = S_{ji}$ [11], [12].

A l'inverse, si les coefficients de transmission ne sont pas égaux le composant est dit non-réciproque.

$$S_{ij} \neq S_{ji} \quad (\text{II.7})$$

II.3.2 La non-réciprocité en hyperfréquence

Le phénomène de la non-réciprocité des composants planaires dans le domaine des micro-ondes est généralement basé sur les propriétés électromagnétiques des ferrites.

Le phénomène de la non-réciprocité peut se manifester de différentes manières :

- Le phénomène de gyrorésonance qui est un phénomène lié à la précession de Larmor, qui se produit lorsque le ferrite est aimanté. L'onde électromagnétique interagit avec le mouvement de précession de Larmor suivant la polarisation de l'onde. Lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique est proche de la fréquence de gyrorésonance, l'onde qui se propage est absorbée par le matériau ce qui entraîne l'effet non-réciproque [14].
- Le déplacement de champ est un phénomène qui peut se produire lorsqu'un matériau magnétique (ferrite) est polarisé. Le phénomène fait déplacer le champ sur un côté, à gauche ou à droite de la structure guidée, selon le sens de propagation. Il est produit par l'anisotropie magnétique lorsque le ferrite est aimanté, la propagation de l'onde électromagnétique ne se faisant pas d'une manière uniforme dans des structures planaires guidées [15].

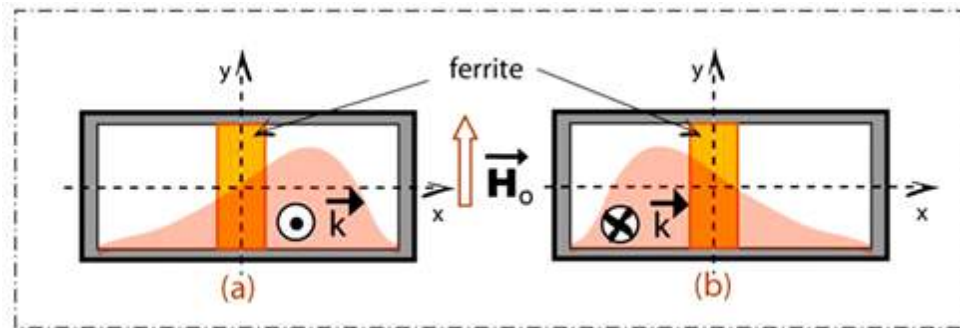


FIGURE II.8 – *Propagation non réciproque et déplacement de champ dans un guide rectangulaire chargé. (a) propagation selon $z > 0$. (b) propagation selon $z < 0$. Déplacement de champ à droite ou à gauche [29]*

- L'effet Faraday est phénomène qui se produit lorsqu'une onde polarisée linéairement se propage parallèlement au champ de polarisation H_0 . Cette onde peut se décomposer en deux ondes d'égales amplitudes polarisées respectivement circulaire droite et circulaire gauche ayant pour constantes de phase β^- et β^+ . Au bout d'un parcours d'une longueur d'onde λ , ces deux ondes (β^- et β^+) se retrouvent en une onde polarisée linéairement mais inclinées d'un angle de rotation θ [16].

Différents circuits utilisent les propriétés électromagnétiques des ferrites (matériaux magnétiques) pour leur fonctionnement et leurs phénomènes de non-réciprocités basés sur les propriétés de la gyrorésonance, ou l'effet de Faraday ou le phénomène de déplacement de champ. Parmi ces dispositifs on peut citer les déphaseurs, les circulateurs, les isolateurs. On peut distinguer les dispositifs non réciproques des autres dispositifs comme illustrés sur la figure 9.

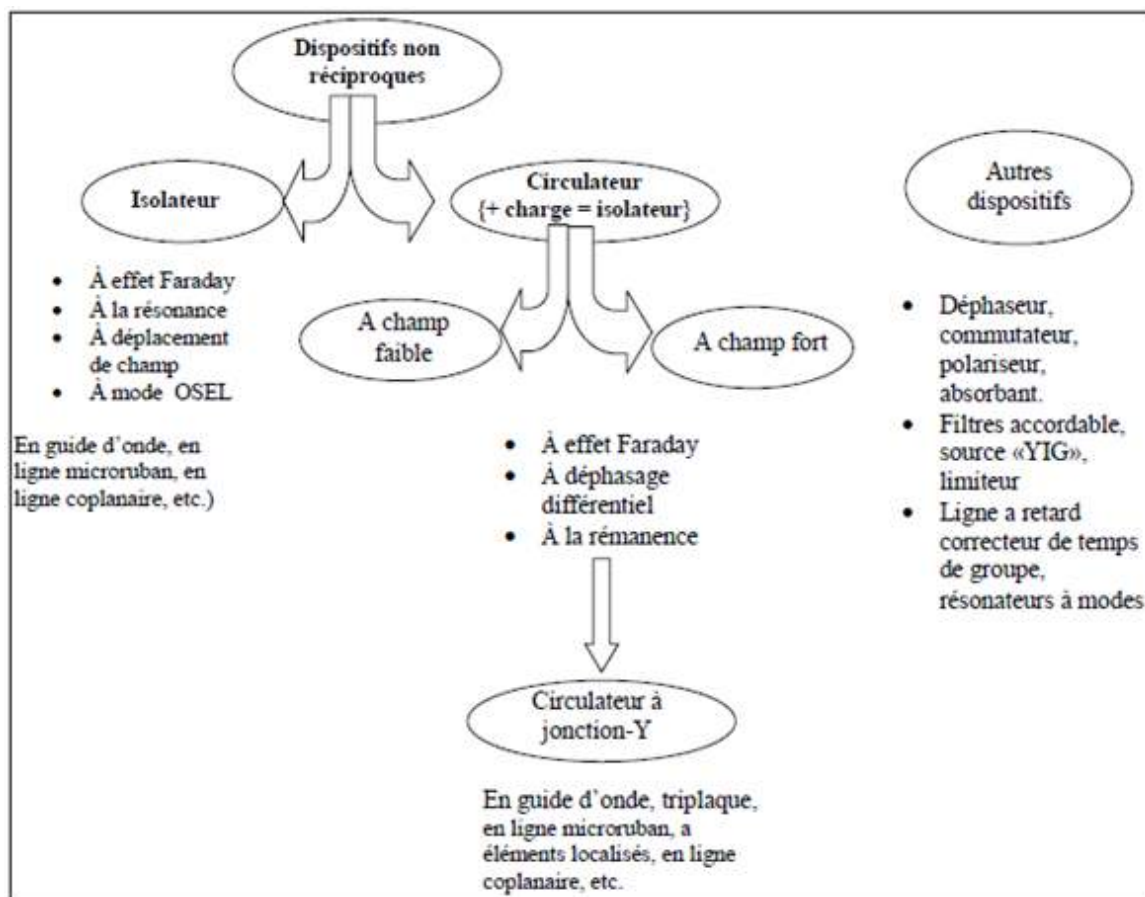


FIGURE II.9 – Principaux dispositifs hyperfréquence à ferrites

Notre objectif de travail est basé sur les isolateurs coplanaires mais tout d'abord on peut citer quelques travaux effectués sur les circulateurs coplanaires qui peuvent aussi jouer le même rôle que les isolateurs dans certaines applications, notamment en adaptant un des ports avec une charge de 50Ω .

II.3.3 Les circulateurs

II.3.3.1 Principe et différentes utilisations

Un circulateur coplanaire est un composant passif micro-onde non réciproque, constitué généralement de trois ports d'accès [20] orientés de 120° les uns des autres en forme de Y autour d'un noyau central, où se trouvent les éléments qui donnent au circulateur sa non-réciprocité [18]. Le circulateur est utilisé dans le domaine micro-onde pour la liaison permanente entre les voies afin d'assurer la séparation ou l'aiguillage des signaux émis et reçus. C'est-à-dire si un signal ou une énergie entre par le port 1, 2 ou 3 elle ne peut sortir que par le port 2, 3 ou 1 respectivement. Le but d'un circulateur est de transmettre des signaux avec certaines valeurs pour les paramètres de transmission que sont l'isolation et les pertes d'insertion. Le but est d'obtenir une bonne isolation ($> 20\text{dB}$), une bonne adaptation entre les ports (Réflexion $< -20\text{dB}$) et d'avoir des pertes d'insertion les plus faibles possibles sur le 3e port ($< 1\text{dB}$).

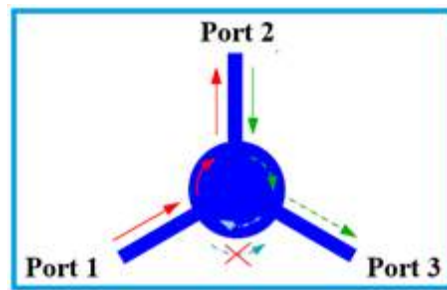


FIGURE II.10 – *Le circulateur trois ports*

Généralement tous les circulateurs sont conçus à partir de ferrites, qui ont des propriétés permettant de les utiliser dans plusieurs fonctions.

Les circulateurs coplanaires sont utilisés dans les systèmes de télécommunications pour deux objectifs essentiels :

- Le premier objectif est d'assurer la séparation du signal de transmission dans les voies d'émission et de réception, c'est-à-dire de faire l'aiguillage du signal radiofréquence dans les systèmes (radars, transmissions par satellite, téléphonie mobile par exemple sur le dispositif de la figure 11, ...). Lors de l'émission, le signal doit être orienté totalement de l'émetteur vers l'antenne sans passer par le récepteur et lors de la réception, le signal doit passer totalement de l'antenne vers le récepteur sans passer par l'émetteur.
- Le second objectif des circulateurs est qu'ils peuvent être utilisés comme un isolateur, qui a pour but d'absorber l'énergie réfléchie. Pour cela, l'un des ports du circulateur doit être désactivé c'est-à-dire relié à une charge adaptée.

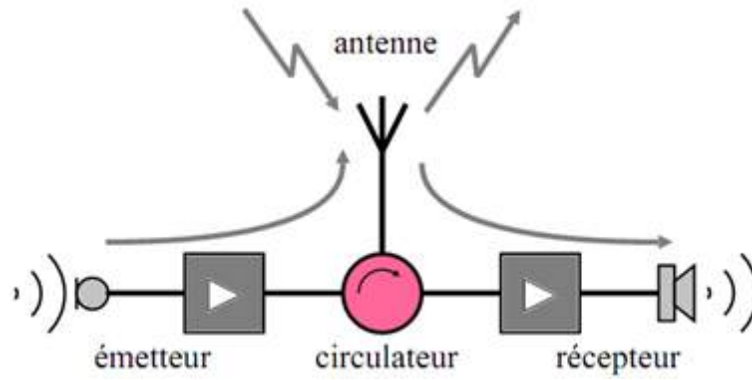


FIGURE II.11 – Principe de fonctionnement d'un circulateur

Les circulateurs en Y sont caractérisés par des paramètres S qui peuvent être écrit sous forme de matrice de dispersion :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- S_{21}, S_{32}, S_{13} sont les paramètres de transmission
- S_{12}, S_{23}, S_{31} sont les paramètres d'isolation
- S_{11}, S_{22}, S_{33} sont les paramètres de réflexion des voies 1, 2 et 3.

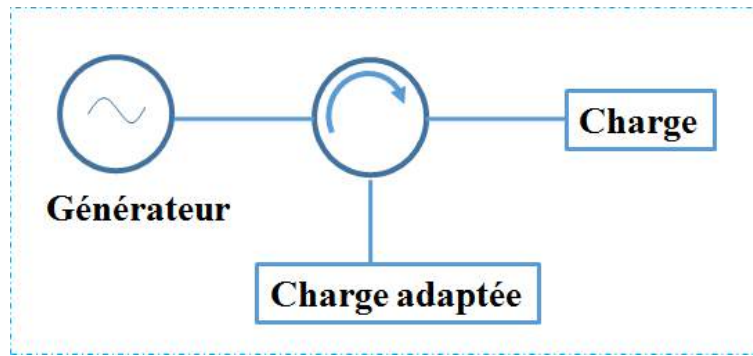
Pour un circulateur idéal, capable d'aiguiller totalement le signal, ses paramètres S ou la matrice S de dispersion s'écrivent [19] :

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Il existe plusieurs types de circulateurs utilisés dans les domaines micro-ondes. Plusieurs travaux ont été menés dans ce domaine et ils se sont multipliés vers la fin des années cinquante, grâce à l'importance des télécommunications et des systèmes microondes qui ont pu favoriser le développement de ces composants.

II.3.3.2 Utilisation d'un circulateur comme isolateur

Le circulateur coplanaire est utilisé comme un isolateur dans le cas où il est nécessaire de protéger des systèmes utilisés en micro-onde contre les sources d'énergies réfléchies où la puissance peut être très élevée. Pour utiliser le circulateur comme un isolateur, on utilise deux ports seulement en envoyant le signal de la voie 1 vers la voie 2, et la troisième voie doit être reliée à une charge adaptée (50Ω) qui permet d'absorber l'énergie réfléchie. Dans ce cas aucune énergie n'ira vers la source (générateur dans la figure 12) pour la détériorer.

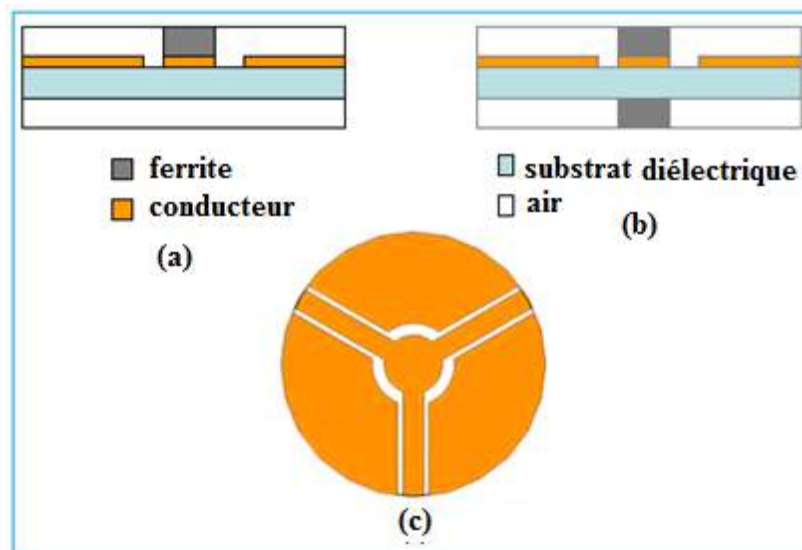
FIGURE II.12 – *Circulateur utilisé en isolateur*

II.3.3.3 Le circulateur en technologie coplanaire

Ce circulateur utilise aussi la technologie coplanaire à jonction Y, utilisant des matériaux magnétiques, plus précisément le ferrite. La technologie de fabrication de ce type de circulateur est très simple avec un coût de fabrication faible.

Plusieurs travaux ont été effectués sur les circulateurs coplanaires avec différentes technologies de fabrication. Dans les années 1971 Ogasawara et Kaji [26] ont proposé des circulateurs coplanaires à plusieurs configurations et des formes de structures réalisées à base de ferrite qui donnent des performances meilleures.

En 1986 K. Koshiji et E. Shu [27] ont aussi proposé une structure de circulateur coplanaire à trois ports orientés de 120° les uns des autres, liés à un conducteur central circulaire entouré de plans de masse latéraux métalliques. Ces circulateurs donnent aussi des résultats meilleurs, avec une isolation maximale de 19dB et des pertes d'insertions faible (0,8dB) à la fréquence centrale de 9,56GHz.

FIGURE II.13 – *Le circulateur coplanaire proposé par Koshiji [27]*

D'autres travaux ont été effectués au laboratoire comme ceux de O. Zahwe qui a étudié

le fonctionnement d'un circulateur coplanaire à base d'une couche de ferrite, plus précisément le grenat de fer d'yttrium (YIG). Il a étudié deux configurations de la même forme que celle de Koshoji, mais la différence se situe sur les dimensions géométriques. Initialement il a utilisé les dimensions des lignes d'accès de $12 \times 12 \text{ mm}^2$ (cf. figure 14 (a)) puis finalement il les a dimensionnées à $6 \times 6 \text{ mm}^2$ (cf. figure 14 (b)) afin de réduire une partie des pertes d'insertion.

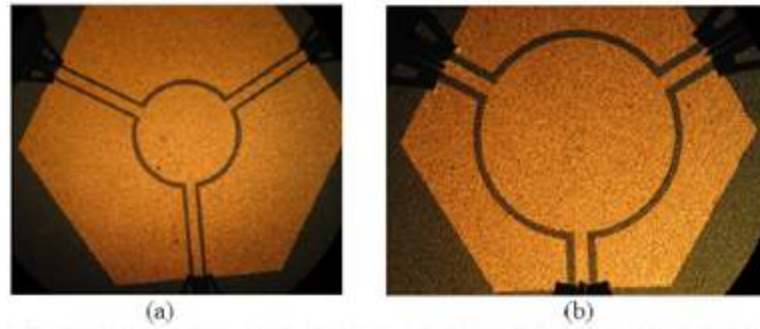


FIGURE II.14 – Les circulateurs de O. Zahwe de dimensions (a) : $12 \times 12 \text{ mm}^2$ et (b) : $6 \times 6 \text{ mm}^2$ [28]

Ces circulateurs fonctionnent autour de 10GHz, avec la structure de dimensions $6 \times 6 \text{ mm}^2$, une isolation de 36dB est retrouvée en mesure avec des pertes d'insertion de 5dB et une réflexion autour de -16dB à la fréquence de 9,2GHz.

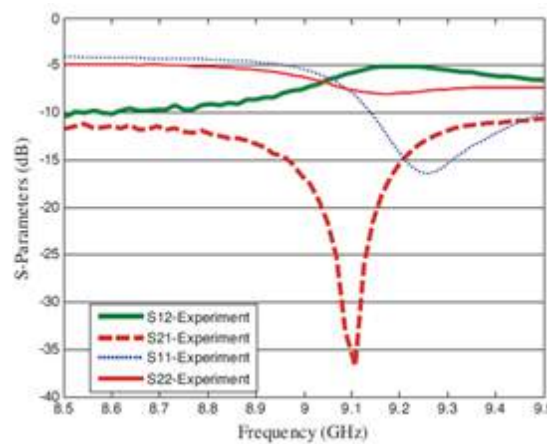


FIGURE II.15 – Performances de mesures du circulateur réalisé par O. Zahwe [28]

Ces performances peuvent servir à définir notre cahier des charges pour l'isolateur coplanaire.

II.4 Les isolateurs hyperfréquences

Les isolateurs hyperfréquences sont des composants passifs non-réciproques comme les circulateurs mais pour que ces derniers fonctionnent en isolateur, il faut que le troisième port soit désactivé, c'est ce qui est encombrant. Pour pallier à cet encombrement, un composant constitué uniquement de deux ports est développé à partir d'une ligne de transmission à laquelle il faut conférer la fonction d'isolation.

Les premiers isolateurs historiquement développés sont les isolateurs à rotation de Faraday qui sont difficiles à fabriquer et également limités en termes de puissance. Ensuite on retrouve les isolateurs en guide d'onde rectangulaire bande X, qui utilisent le phénomène d'effet non-réciproque basé sur l'absorption d'énergie dans la zone de résonance gyromagnétique lorsqu'un matériau ferrite massif est aimanté [30] [31].

II.4.1 Principe de fonctionnement d'un isolateur

L'objectif de fonctionnement d'un isolateur est de transmettre le signal dans un sens et le bloquer dans l'autre, c'est-à-dire de faire propager l'onde électromagnétique dans le sens passant et de l'absorber dans le sens inverse.

Ces isolateurs sont conçus pour pallier à l'encombrement des circulateurs qui utilisent trois ports à 120° sur un desquels est mis une charge adaptée (50Ω) pour réaliser la fonction d'isolation.

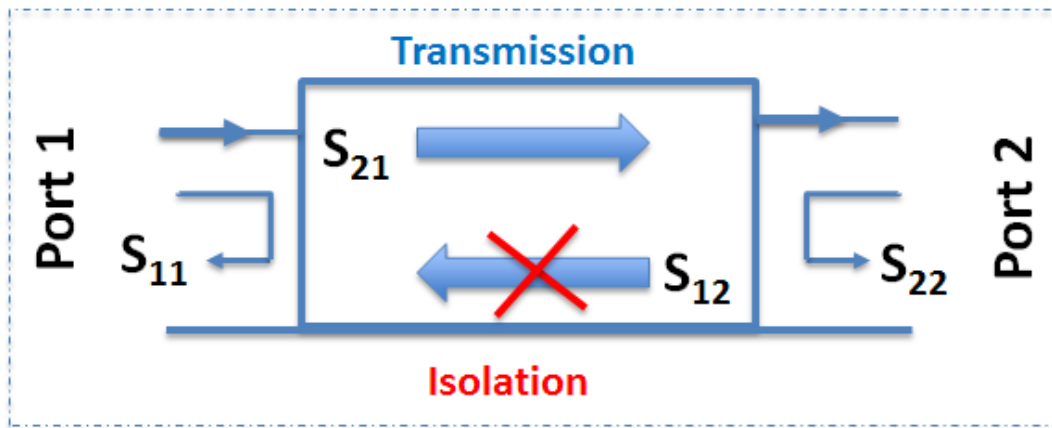


FIGURE II.16 – Schéma de principe d'un isolateur

II.4.2 Matrice de répartition

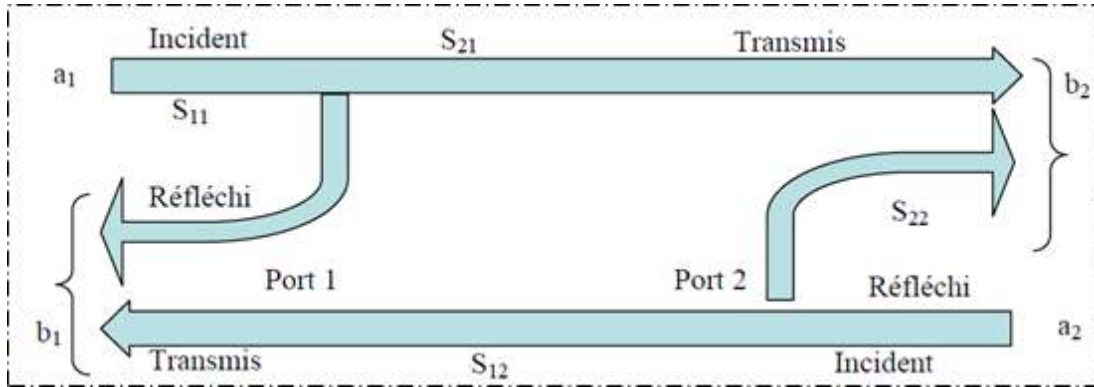


FIGURE II.17 – Matrice de répartition

Les isolateurs planaires sont des composants à deux ports considérés comme des quadripôles caractérisés par les paramètres de dispersion ou la matrice de répartition S_{ij} :

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas d'un isolateur idéal, le paramètre de transmission S_{21} est égal à 1 et le coefficient d'isolation S_{12} et les paramètres de réflexions S_{11} et S_{22} sont tous nuls :

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Ce quadripôle est totalement différent dans le cas d'un isolateur coplanaire réel, qui certainement présente des pertes d'insertions lors de la transmission, une adaptation d'impédance imparfaite ainsi qu'une isolation non infinie.

II.4.3 Paramètres d'un isolateur

• Paramètres de transmission et pertes d'insertions

Dans la matrice de répartition de l'isolateur S_{ij} , le paramètre de transmission est S_{21} . Dans le cas idéal, il est égal 1 ce qui veut dire il n'y a aucune perte d'insertion (PI), alors qu'en réalité des pertes d'insertion existent mais elles doivent être les plus faibles possible afin d'obtenir une bonne qualité de transmission pour se rapprocher du cas idéal.

Les pertes d'insertion peuvent provenir des :

- Pertes dans les matériaux magnétiques : elles sont très importantes car dans notre cas l'isolateur utilise des matériaux magnétiques qui fonctionnent avec le phénomène de déplacement de champ ;

- Pertes dans les matériaux diélectriques (elles sont prises en compte en utilisant la permittivité ϵ complexe) ;
- Pertes conducteur et l'influence de l'effet de peau (elles ne seront pas prises en compte à cause de la profondeur de peau qui diminue avec l'augmentation en fréquence).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (\text{II.12})$$

δ : épaisseur de peau [m]

ω : pulsation [rad/s]

μ : perméabilité magnétique [H/m]

σ : conductivité électrique en Siemens par mètre [S/m]

- Pertes par rayonnement (elles sont négligées dans ce composant car la superficie des composants est petite, donc elles sont très petites devant les autres pertes).

Si le composant est parfaitement adapté (c'est-à-dire que les réflexions éventuelles sont nulles), les pertes d'insertion dans ce cas sont données par le rapport de la puissance d'entrée du port 1 sur la puissance de sortie du port 2. Elles peuvent être décrite par :

$$PI = 20 \log \left| \frac{a_1}{b_2} \right| = -20 \log |S_{21}| \quad (\text{II.13})$$

Pour que l'isolateur coplanaire soit parfaitement utilisable, les valeurs typiques des pertes d'insertions doivent être comprises entre 0,1dB et 1dB afin que le signal d'entrée transmis en sortie soit le plus grand possible.

• Paramètres d'isolation

C'est l'atténuation de l'onde inverse c'est-à-dire de la sortie vers l'entrée, c'est aussi le rapport de la puissance de la sortie (port 2) sur la puissance de l'entrée (port 1). Elle est la fonction principale de l'isolateur et est exprimée par le paramètre S_{21} .

L'expression de l'isolation peut être décrite de la façon suivante :

$$IS = 20 \log \left| \frac{a_2}{b_1} \right| = -20 \log |S_{12}| \quad (\text{II.14})$$

Pour avoir une bonne isolation ce paramètre doit être élevé (en valeur absolue) et compris entre 20 et 30dB. Ce paramètre rend compte de la propagation non réciproque.

• Effets non-réciproques

L'effet non réciproque (ENR) est un paramètre qui définit la différence entre les pertes d'insertion et d'isolation. C'est un paramètre qui caractérise l'efficacité du dispositif à remplir la fonction d'isolation et s'exprime par :

$$ENR(dB) = |S_{21}(dB) - S_{12}(dB)| \quad (\text{II.15})$$

• Pertes de réflexion

Ces pertes sont liées à la quantité d'énergie qui revient à la source (entrée), elle est définie par la puissance de sortie sur la puissance d'entrée. Elle est notée R et peut être définie sur les deux ports [36] :

$$R = 20 \log \left| \frac{b_i}{a_i} \right| \quad (\text{II.16})$$

Avec $i=1,2$. Sa valeur idéale est égal de 0 ($-\infty$ en dB).

II.4.4 Applications des isolateurs

II.4.4.1 Application comme découplage

Les isolateurs jouent le rôle d'un découplage des énergies ou des signaux dans le cas d'un générateur qui envoie de l'énergie vers la charge. Cette énergie envoyée, peut avoir une partie retournée vers la source (générateur) qui peut provoquer un dysfonctionnement du système ou une instabilité de fréquence. C'est pourquoi l'insertion d'un isolateur entre la source d'énergie ou du signal et la charge (récepteur) afin d'éviter le problème des énergies réfléchies.

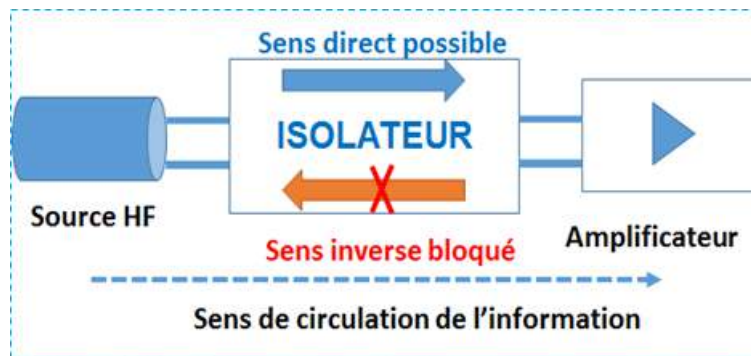


FIGURE II.18 – Découplage entre le générateur et la charge

II.4.4.2 Application pour le multiplexage

Les isolateurs sont utilisés dans une autre application comme dans le cas de l'utilisation de plusieurs émetteurs avec des fréquences de fonctionnement différentes. Ces émetteurs sont combinés afin d'avoir plusieurs fréquences porteuses comme par exemple en téléphonie mobile. L'isolateur est placé entre chaque émetteur et filtre afin de bloquer le retour du signal vers l'émetteur.

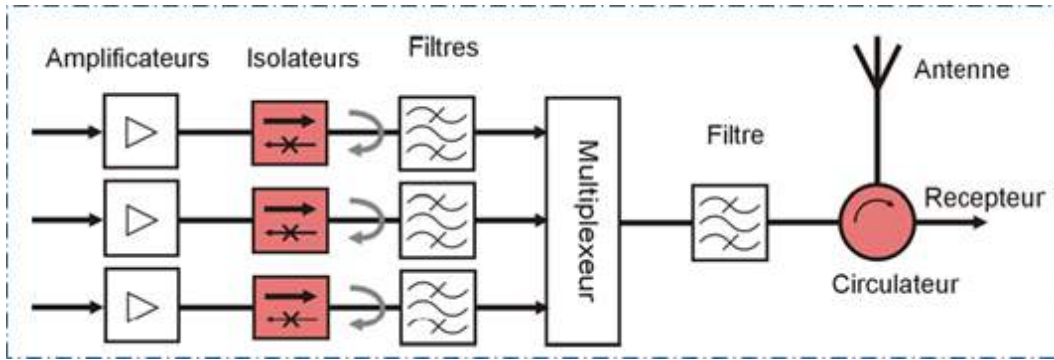


FIGURE II.19 – Combinaison de plusieurs transmetteurs [37]

II.4.5 Les différents types d'isolateurs

On retrouve différents types d'isolateurs dans la littérature. Ces isolateurs sont conçus de différentes manières, soit en technologie planaire soit en guide d'onde selon les domaines d'applications, avec des principes de fonctionnement différents. On peut citer quelques isolateurs comme : isolateurs à déplacement de champ, à rotation de Faraday, à résonance.

II.4.5.1 Isolateur à déplacement de champ en guide d'onde rectangulaire

Une pièce de ferrite est disposée dans un guide rectangulaire, elle est recouverte d'un absorbant comme présenté sur la figure ci-dessous. La plaquette de ferrite n'est pas au centre du guide, elle est positionnée légèrement sur un côté du guide. L'ensemble du système est asymétrique.

En polarisant le matériau, la distribution du champ électrique transversal dans la section xOy n'est pas sinusoïdale, elle dépend du sens de propagation ainsi que de la concentration de l'énergie électromagnétique qui varie à l'intérieur du ferrite à cause de sa permittivité élevée. De même la perméabilité varie suivant le sens de la propagation dans le guide.

Ces types d'isolateurs fonctionnent avec des aimants de faible poids. Ils peuvent être nécessaires en hyperfréquence à cause du champ de polarisation H_0 qui n'a pas besoin d'atteindre le champ de résonance.

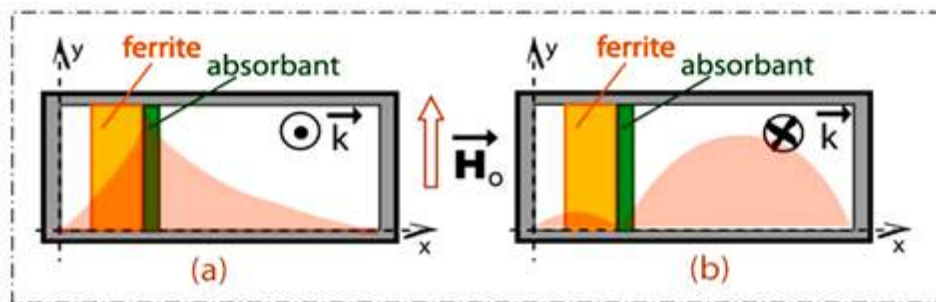


FIGURE II.20 – Isolateur à déplacement de champ en guide d'onde rectangulaire [29]

II.4.5.2 Isolateurs à déplacement de champ sur une ligne microruban

Ces isolateurs sont proposés pour la première fois par Hine (cf. figure 21 (c)) dans les années 1971 [32]. Cet isolateur est constitué d'une ligne microruban placée sur un substrat de ferrite. Si le substrat de ferrite est aimanté verticalement il devient anisotrope et la structure devient asymétrique, ce qui permet d'obtenir le phénomène de déplacement de champ dans la ligne microruban. En inversant le sens de l'aimantation permet d'obtenir un déplacement de champ sur un côté. Cette inversion est faisable si le sens de propagation est inversé.

Un matériau absorbant est mis sur un côté de la ligne microruban pour dissiper l'onde propagée dont les lignes de champ passent dans ce film résistif. La forme du ruban central (conducteur) doit être bien faite de manière large afin de minimiser la désadaptation entre les lignes d'accès 50 Ω et la partie « isolateur » pour obtenir une isolation efficace. Les lignes de champ représentées dans cette figure correspondent au champ électrique vertical.

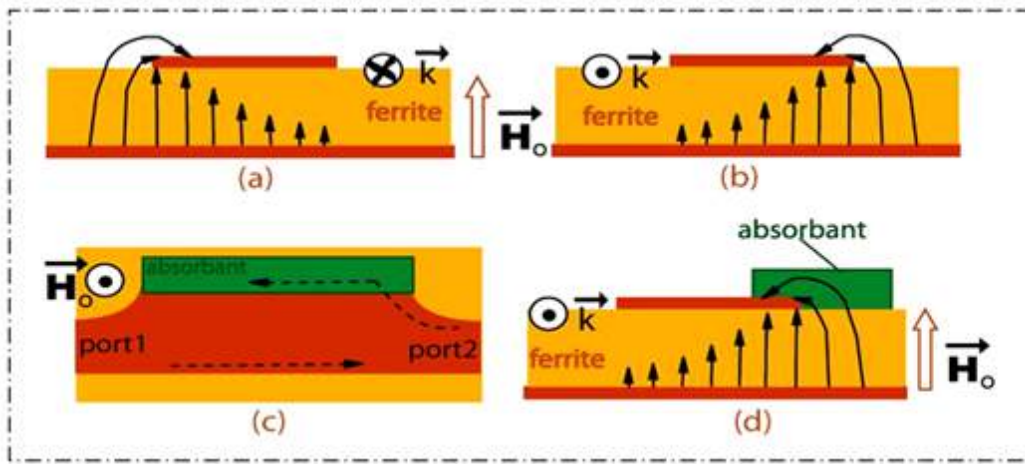


FIGURE II.21 – Isolateur à déplacement de champ en technologie microruban. (a) Propagation selon $z > 0$ pour une ligne microstrip sur substrat ferrite polarisé. (b) Propagation selon $z < 0$ pour une ligne microruban sur substrat ferrite polarisé. (c) Isolateur en vue de dessus. (d) Positionnement de l'absorbant destiné à bloquer la propagation rétrograde [29]

II.4.5.3 Isolateur à effet de Faraday

L'isolateur à effet de Faraday est composé de deux guides d'ondes rectangulaires dont les plans E sont positionnés à 45° entre eux, fonctionnant en mode TE_{10} , et d'un guide d'onde circulaire fonctionnant en mode TE_{11} . Le guide circulaire est chargé axialement par un cylindre de ferrite soumis à un champ magnétique longitudinal H_c . La longueur du ferrite est telle que la rotation de Faraday lors de sa traversée est de 45° selon le sens de rotation. En observant l'évolution de la polarisation du champ dans différentes sections A B C D E de cet isolateur, on regarde, si le champ du mode TE_{10} est vertical en A, le champ du mode TE_{11} est aussi vertical en B. Après la traversée du ferrite, il a subi une rotation de 45° (par exemple, dans le sens des aiguilles d'une montre) en D et se retrouve donc en E, normal aux grands côtés du guide de sortie.

Pour l'autre sens de propagation, la polarisation du champ $\vec{E}$ est la même en E et D. À la traversée du ferrite, il subit toujours une rotation de 45° dans le même sens que précédemment. Il se retrouve donc horizontalement en B, et ne peut pas se propager en A dans le guide rectangulaire puisqu'il est parallèle à ses grands côtés.

Le fait de disposer une plaquette absorbante horizontale dans la transition d'entrée augmente encore l'atténuation de l'onde dans le sens inverse alors qu'elle a très peu d'influence sur elle dans le sens direct.

Un isolateur de ce type permet d'obtenir sur une faible bande de fréquences des pertes d'insertion inférieure à 0,5dB et une isolation de l'ordre d'une quarantaine de décibels.

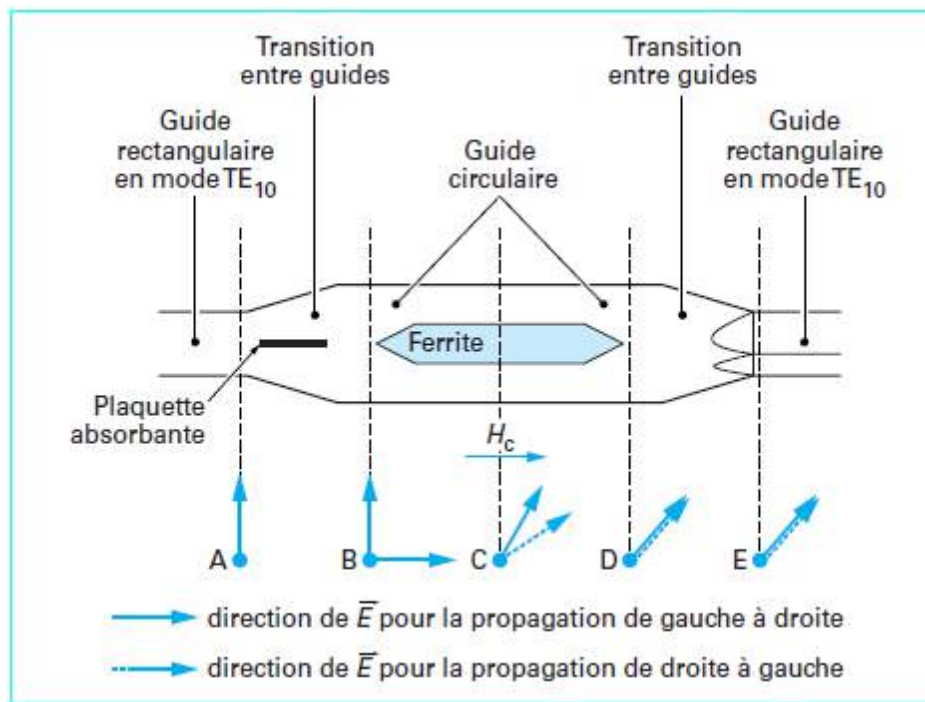
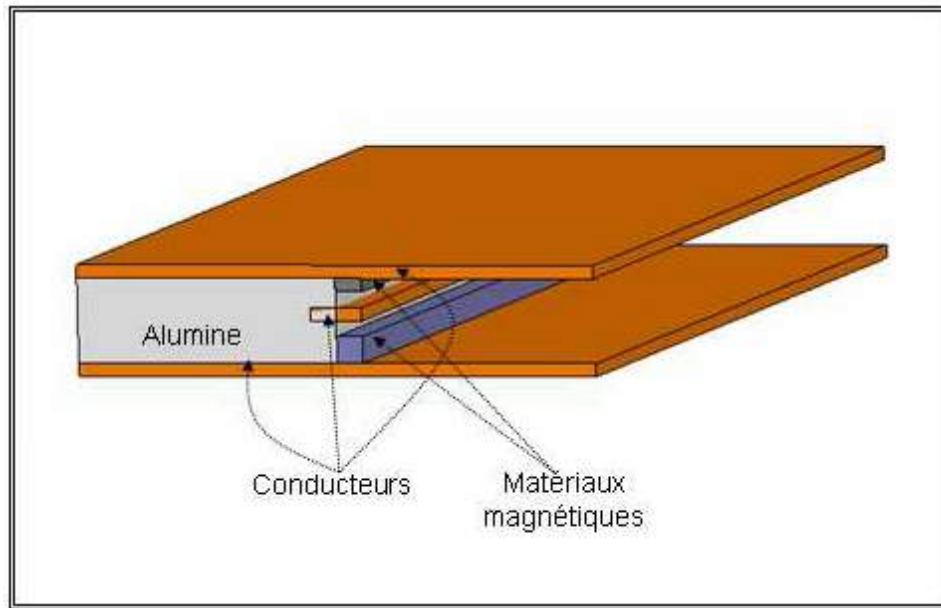


FIGURE II.22 – *Isolateur à rotation de Faraday [22]*

II.4.5.4 L'isolateur triplaques à résonance

L'isolateur triplaques (stripline) est un isolateur constitué de deux plans de masses métalliques en forme de plaque qui sont situés sur les bords du composant. Entre ces deux plans de masses il existe deux barreaux de ferrites qui sont situés à un endroit où l'ellipticité est maximale (sur un côté du substrat d'alumine), un conducteur central métallique qui assure le passage du signal est mis entre les deux barreaux et est noyé dans le substrat d'alumine.

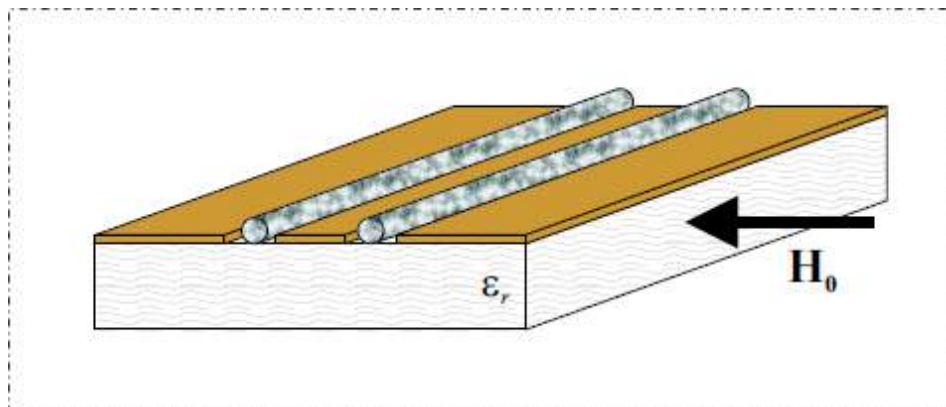
Il existe un effet non réciproque grâce à l'aimantation des barreaux de ferrites. Ainsi, une isolation d'environ 30 dB est obtenue dans la bande de 2,4 à 3,6GHz sous un champ de 180mT [38].

FIGURE II.23 – *Isolateur triplaques à résonance*

II.4.5.5 Les isolateurs coplanaires à résonance

Dans cette partie on peut citer quelques travaux sur les isolateurs coplanaires effectués au sein du Laboratoire DIOM (aujourd'hui fusionné au laboratoire Hubert Curien) comme les travaux de Bayard [33], S. Capraro [34], T. Rouiller [39] et de S. Kirouane [35].

Ces isolateurs sont basés sur l'étude de faisabilité menée par Wen en 1969 [7] qui propose avec une ligne coplanaire (CPW) sur laquelle il place deux barreaux de ferrite Trans-Tech G1000 de dimension 0,254 mm x 0,127 mm x 15,24 mm, la possibilité d'obtenir une isolation de 37dB à la fréquence de 6GHz pour des pertes d'insertion inférieures à 2dB. Il indique que cette structure est facile à réaliser et utilise des matériaux magnétiques de faible volume.

FIGURE II.24 – *Isolateur coplanaire à résonance*

Le seul obstacle sur cette structure est l'usinage des barreaux à cause de leur section très faible. C'est pourquoi B. Bayard en 1999 propose une solution, celle d'utiliser des poudres et

des liquides magnétiques à la place des barreaux [33]. Le dépôt de matériau magnétique est de faible quantité de façon à obtenir une faible épaisseur de ferrite dans les fentes de la ligne coplanaire.

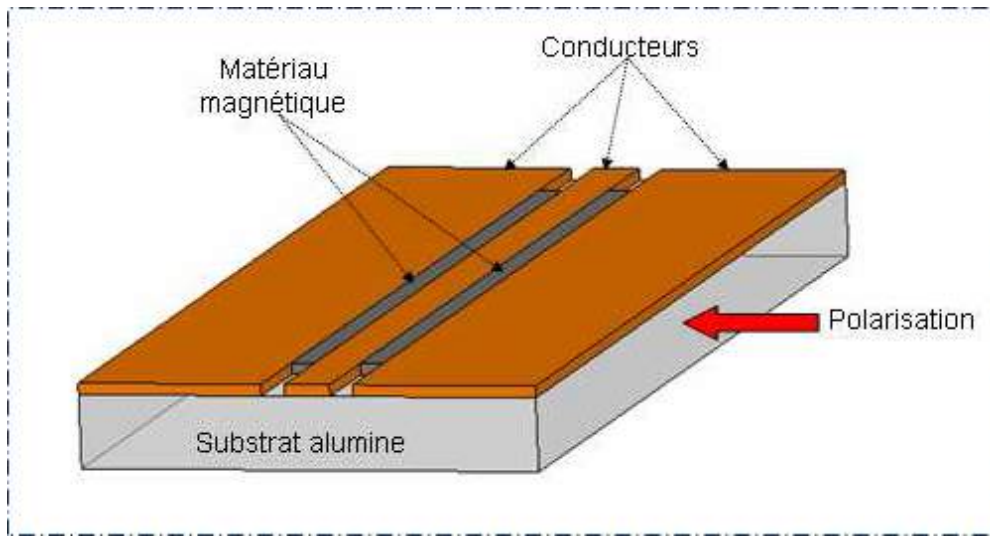


FIGURE II.25 – *Isolateur coplanaire proposé par B. Bayard[33]*

Le résultat de cette configuration indique qu'il existe un effet non-réciproque mais de faible valeur avec un écart d'environ 3dB entre les deux paramètres de transmission pour un champ de polarisation 340kA/m.

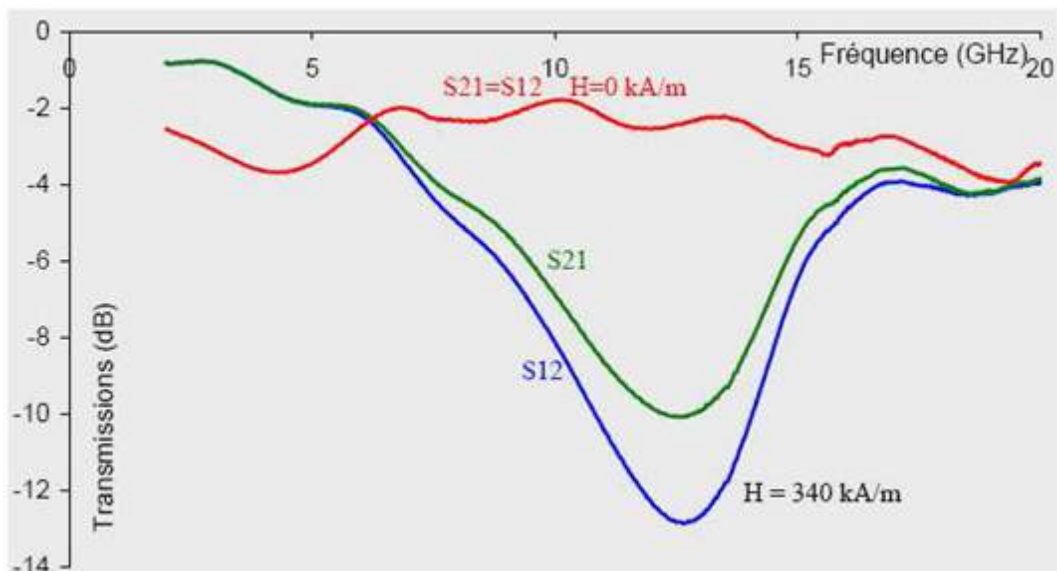


FIGURE II.26 – *Résultat obtenu par B. Bayard [33]*

La structure n'a pas apporté beaucoup d'effet non-réciproque à cause des importantes pertes d'insertion d'environ 10dB, pour une isolation de 13dB environ. C'est pourquoi d'autres chercheurs comme S. Capraro [34] et T. Rouiller [39] ont travaillé dans le même laboratoire sur ce composant en mettant une couche complète de ferrite en dessous des lignes conductrices.

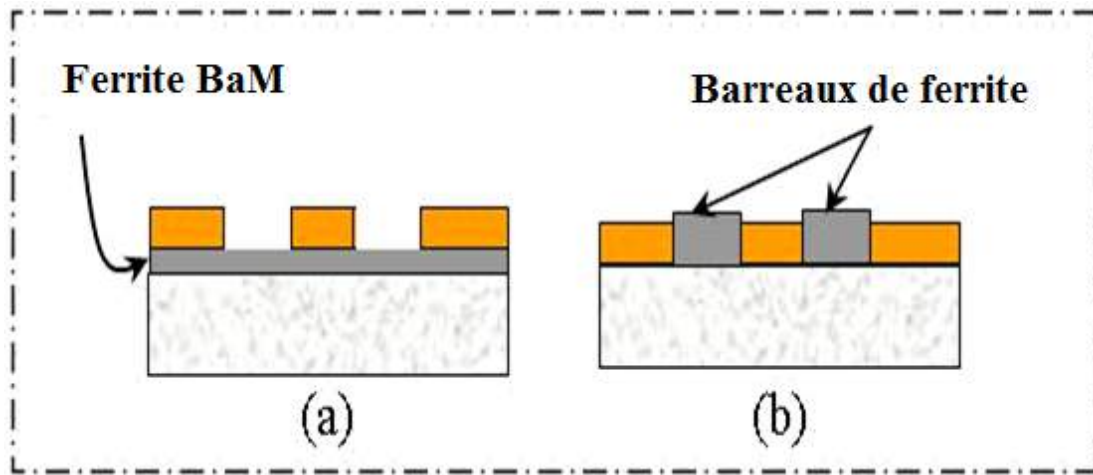


FIGURE II.27 – *Isolateur coplanaire (a) : à substrat de ferrite, (b) : à barreaux de ferrite*

Les résultats obtenus et présentés sur la figure ci-dessous, montrent une légère amélioration avec un effet non réciproque de 7dB, une isolation de 25dB pour des pertes d'insertion de 18dB à 50GHz (cas du BaM).

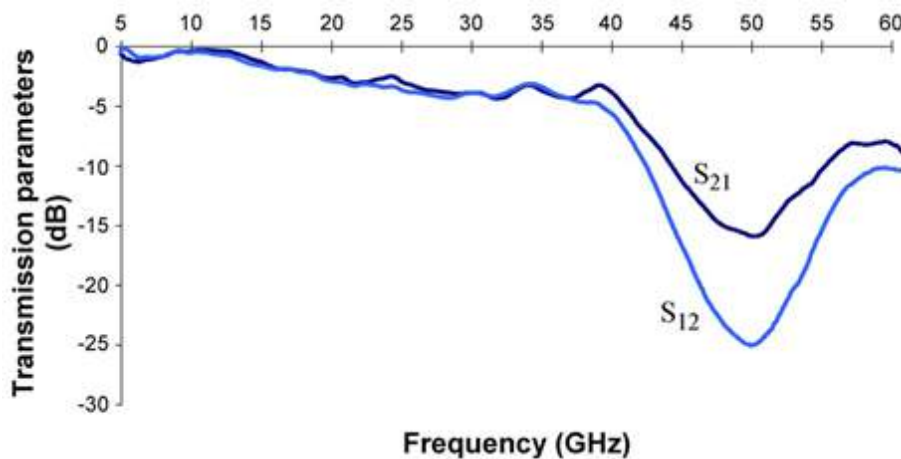


FIGURE II.28 – *Performance de la structure proposée par S. Capraro [34]*

La même structure a été modifiée au sein du laboratoire par S. Kirouane en 2010. La structure est composée de trois rubans métalliques en cuivre dont l'un des plans de masses supérieur est constitué d'une fente qui fait que la structure devient une ligne coplanaire asymétrique. Au contraire les deux ports d'accès sont symétriques suite à des contraintes de mesure et de ports d'excitation pour la simulation.

Une zone de « taper », adaptatrice d'impédance, est insérée entre les ports et la partie asymétrique pour éviter une désadaptation (causée par la variation de la largeur). Cette zone permet donc d'éviter des grosses réflexions de l'onde électromagnétique et de faire progresser graduellement l'impédance caractéristique de 50Ω des deux ports d'accès symétrique à l'impédance de l'asymétrie.

Un plan de masse est ajouté en dessous de la couche magnétique sur le côté présentant la fente dans le plan de masse supérieur afin de créer un guide d'onde secondaire de type microruban.

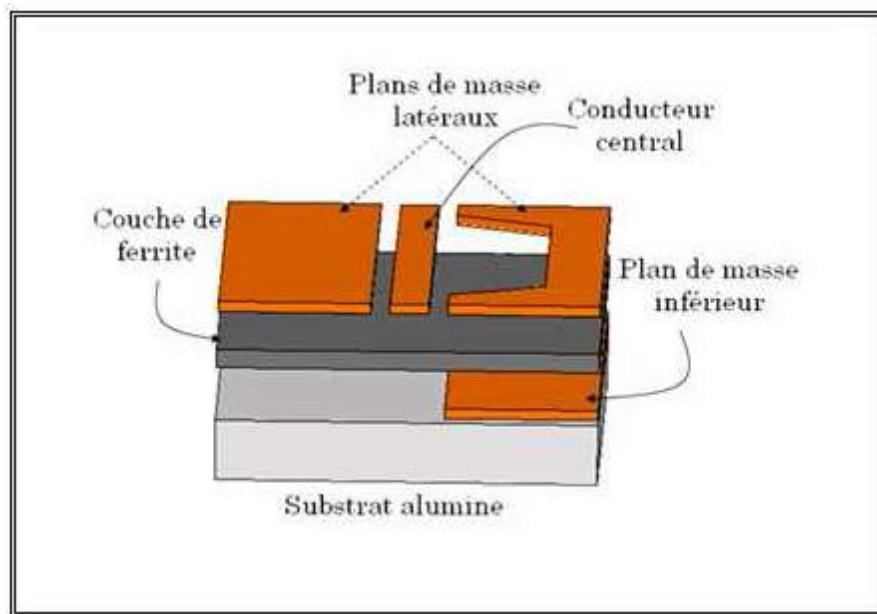


FIGURE II.29 – Géométrie de l'isolateur coplanaire asymétrique, S. Kirouane [35]

Les paramètres de l'isolateur coplanaire asymétrique sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Ruban central (μm)	Gap (μm)	Fente 2 (μm)	Largeur (mm)	Longueur (mm)
400	200	1200	4	10

TABLE II.2 – Paramètres géométriques de l'isolateur coplanaire asymétrique [15]

Cet isolateur coplanaire asymétrique est basé sur le phénomène de déplacement de champ et utilise les ondes magnétostatiques. Le résultat de mesure a montré une isolation de 16,5dB autour de 10,5GHz avec des pertes d'insertions de 1,5dB environ. La résonance gyromagnétique est autour de 8GHz, et les ondes magnétostatiques responsables de l'effet d'isolation, apparaissent dans la bande de fréquence de 10 à 14GHz environ, comme le prévoit la physique des couches magnétiques.

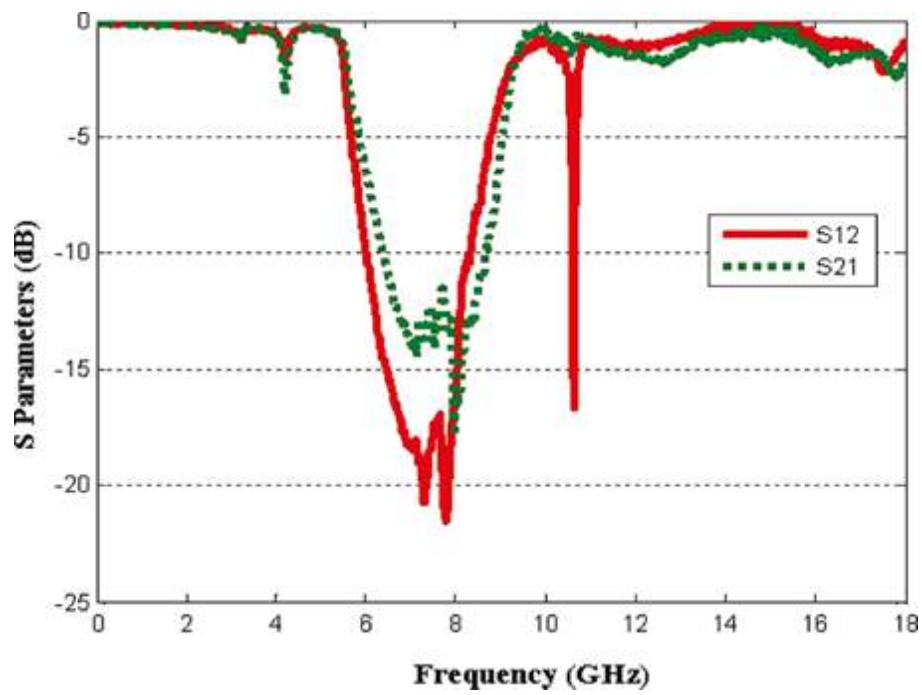


FIGURE II.30 – Performance d'un isolateur coplanaire asymétrique, S.Kirouane [35]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art des différents types de ligne de transmission planaire, et une attention a été portée aux différents types de dispositifs non réciproques existants et plus particulièrement aux isolateurs et leurs applications dans le domaine des hyperfréquences.

Ces composants sont des circuits planaires passifs non réciproques, utilisés dans le domaine des télécommunications, permettant d'assurer le passage du signal dans un sens et de l'isoler dans l'autre sens. Ils utilisent les phénomènes magnétostatiques à haute fréquence comme le phénomène de gyrorésonance, l'effet de déplacement de champ et l'effet de Faraday ou les ondes magnétiques. Ces dispositifs sont conçus à partir de substrats ou des barreaux de ferrites sur lesquels sont structurés les motifs conducteurs du composant.

Plusieurs travaux ont été menés sur les isolateurs avec différentes formes, mais les performances de ces isolateurs sont encore peu satisfaisantes.

Le troisième chapitre porte sur la structure proposée par S. Kirouane pour laquelle nous avons tenté d'optimiser les performances. Une nouvelle structure (évolution de la structure de S. Kirouane) à double fentes plus performante est présentée.