

Conception d'un circulateur triplaqué à ferrite bi-bande fonctionnant en champ faible

V.Olivier^{1,2}, L.Huitema¹, T.Monédière¹, B.Lenoir², P.Pouliguen³

¹ XLIM - Systèmes RF - Equipe Antennes & Signaux - Faculté des Sciences et Techniques
123 Av. Albert Thomas 87060 Limoges Cedex, vincent.olivier@unilim.fr

² INOVEOS SARL Rue Jacques Chaminade ZAC du Fourneault 19100 BRIVE LA GAILLARDE, blenoir@inoveos.com

³ DGA/DS/MRIS - Parcelle Est Bâtiment 26, 60 Bd. du général Martial Valin, CS 21623, 75509 PARIS Cedex 15, philippe.pouliguen@intradef.gouv.fr

Résumé – Cet article présente la conception d'un circulateur triplaqué à ferrite fonctionnant en champ faible sur deux bandes de fréquence simultanément. En utilisant le principe du couplage des modes propres fondamentaux et supérieurs dans une cavité ferrite, un phénomène de circulation bi-bande est obtenu. Les résultats des simulations électromagnétiques montrent un élargissement de la bande instantanée par rapport au fonctionnement en champ fort.

1. Introduction

L'essor des systèmes multi-bandes offre la possibilité de réduire le nombre d'équipements nécessaire pour réaliser les mêmes fonctions qu'en mono-bande. La conception de circulateurs fonctionnant sur plusieurs bandes de fréquence est donc nécessaire dans des systèmes multi-bandes complets afin de conserver une isolation tout en réduisant l'encombrement.

Les circulateurs à ferrites font l'objet de nombreuses recherches depuis plusieurs dizaines d'années. La majorité de ces recherches reposent sur l'étude du couplage des modes à polarisation inverse dans les cavités ferrites pour obtenir une fonction de circulation. Dans la majorité des cas, seuls les modes fondamentaux sont utilisés, conduisant ainsi à une circulation mono-bande. La circulation multi-bande est cependant modélisée par H. Razavipour [1] dans le cas d'un circulateur en guide d'onde. Un premier circulateur bi-bande a été réalisé en technologie triplaqué par H. Turki [2]. Ce circulateur fonctionne avec un ferrite polarisé en champ fort. Les fréquences de résonance des modes à polarisation inverse du champ fort sont plus rapprochées que celles du champ faible [3] conduisant à des bandes passantes limitées. De plus, la polarisation en champ fort ne permet pas une circulation à des fréquences élevées, c'est pourquoi une conception de circulateur bi-bande à ferrite polarisé en champ faible est proposée ici. Les fréquences de circulations sont fixées avant la conception par le cahier des charges suivant : deux bandes de circulations aux fréquences de 5 et 10 GHz avec 15 dB d'isolation minimum dans les bandes. Pour respecter ces conditions, une méthode permettant de régler l'écart entre les deux bandes de circulation est mise au point grâce à une étude modale dans les résonateurs à ferrite.

2. Modes résonants dans les cavités ferrites

2.a. Propriétés des ferrites

L'étude des circulateurs à ferrite s'appuie principalement sur l'étude des modes propres des cavités cylindriques en matériaux ferrites. En effet les matériaux ferrites, lorsqu'ils sont polarisés par un champ magnétique statique orthogonal au plan du résonateur à ferrites, acquièrent des propriétés d'anisotropie en hautes fréquences. Il est possible de modéliser cette anisotropie à travers un tenseur de perméabilité. Le modèle de tenseur le plus courant est le modèle de Polder [4](1), utilisable dans le cas des ferrites saturés, ce qui sera le cas dans notre étude.

$$\mu = \mu_0 \bar{\bar{\mu}}_r = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

L'anisotropie du ferrite est généralement caractérisée par sa perméabilité effective μ_{eff} et son facteur d'anisotropie g_k obtenus grâce aux termes diagonaux μ et non-diagonaux κ du tenseur de perméabilité.

Avec μ_{eff} et g_k :

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} ; \quad g_k = \left| \frac{\kappa}{\mu} \right| \quad (2)$$

La Figure 1 représente le tracé de ces paramètres en fonction de la fréquence et met en évidence l'existence de plusieurs zones.

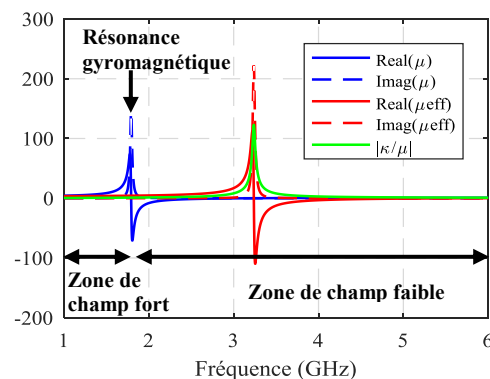


Figure 1. Courbes de perméabilité et zones de fonctionnements ($H_i=640\text{Oe}$, $4\pi M_s=1450\text{G}$).

La zone avant la résonance du terme diagonal μ du tenseur de perméabilité, ou résonance gyromagnétique (GR), est la zone de fonctionnement en champ fort. La deuxième zone de fonctionnement se situe après la résonance de μ , c'est la zone de champ faible.

2.b. Méthodes de détermination des fréquences de résonance dans les cavités à matériaux ferrites

Les études des cavités résonantes à bases de matériaux ferrites [3,5,6,7] reposent sur plusieurs modèles prenant des conditions aux interfaces différentes et considérant l'existence de modes différents ($TM_{\pm nmp}$, $HE_{\pm nm}$). Cependant toutes les études s'accordent à dire que les modes résonants dans ces cavités ne sont plus des modes simples comme dans une cavité en matériaux non-magnétique, mais des paires de modes à polarisations inverses. Les méthodes de détermination des fréquences de résonance des modes propres des cavités ferrites s'appuient sur les modèles présentés en Figure 2.

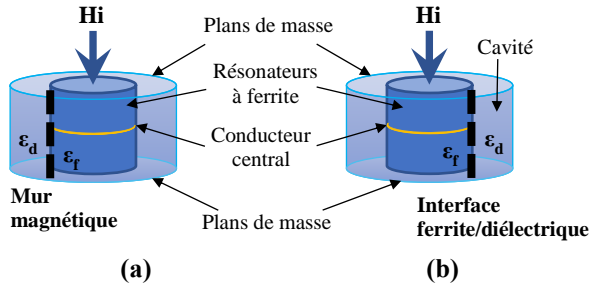


Figure 2. Modèles de résonateur à ferrite de la méthode de Bosma (a) et de la méthode rigoureuse (b)

Les méthodes les plus simples [6] ne prennent pas en compte le diélectrique entourant les disques de ferrites (Figure 2a) et considèrent l'interface ferrite/diélectrique comme un mur magnétique. Les travaux [3,5] prennent en compte le diélectrique (Figure 2b) et permettent de déterminer les fréquences de résonance des modes hybrides $HE_{\pm nm}$ plus proches du cas réel [3] que les modes $TM_{\pm nmp}$ déterminés par H.Bosma [6].

Ici, une méthode numérique de détermination des fréquences de résonance est utilisée en reprenant le principe de la Figure 2b [5,7] sur un logiciel de simulation électromagnétique [8] en excitant faiblement la structure à l'aide de sondes magnétiques. Les pics de résonances des paramètres S obtenus permettent ainsi de connaître les fréquences de résonances des modes et les cartographies des champs E et H dans le ferrite permettent d'identifier ces modes. Un balayage du paramètre H_i (champ magnétique statique interne au ferrite) est effectué par couplage du logiciel de simulation électromagnétique [8] et d'un code Matlab. Les courbes présentées sur la Figure 3, présentent ce balayage en champ fort et en champ faible et comparent les fréquences de résonance avec celles obtenues grâce aux expressions du modèle de Bosma [6] données par les équations (3) et (4).

$$\text{Modes } TM_{+nmp} : J_{n-1}(kR) - \frac{nJ_n(kR)}{kR} \left(1 + \frac{\kappa}{\mu}\right) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Modes } TM_{-nmp} : J_{n-1}(kR) - \frac{nJ_n(kR)}{kR} \left(1 - \frac{\kappa}{\mu}\right) = 0 \quad (4)$$

Avec :

- $k = \frac{\omega}{c} \times \sqrt{\mu_{eff} \times \epsilon_f}$;
- R le rayon des disques de ferrite ;
- ϵ_f la permittivité effective du ferrite.

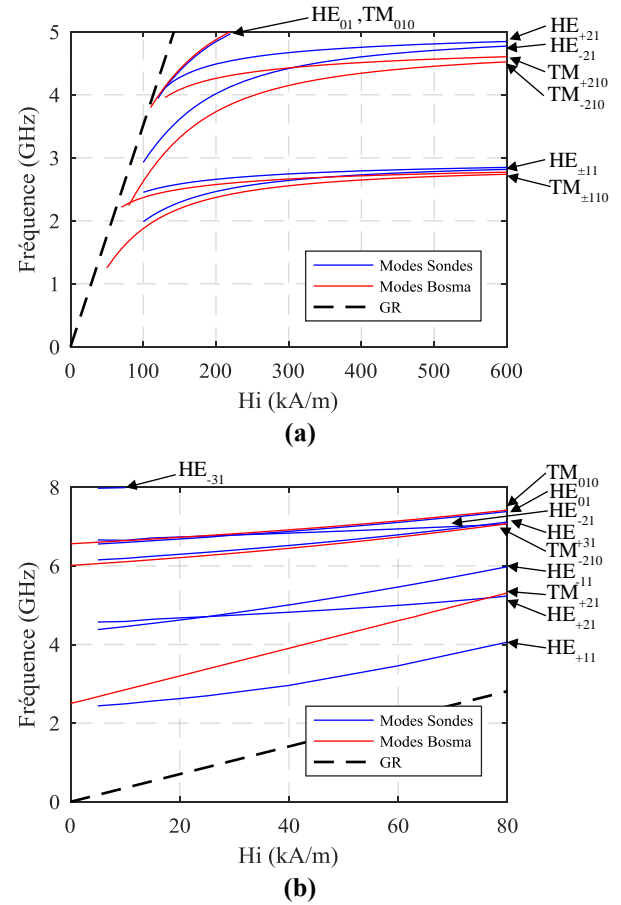


Figure 3. Fréquences de résonance des modes propres dans une cavité ferrite en fonction du champ magnétique statique interne, calculées grâce à une méthode analytique ($TM_{\pm nmp}$) [6] et une méthode numérique ($HE_{\pm nm}$) en champ fort (a) et en champ faible (b) ($R_{ferrite}=8\text{mm}$, $4\pi M_s=892\text{G}$).

Les fréquences de résonance des modes propres obtenues grâce à la méthode analytique de Bosma [6] diffèrent de la méthode numérique. En effet les modes considérés ne sont pas les mêmes puisque la méthode analytique considère l'interface ferrite/diélectrique comme un court-circuit magnétique (Figure 2a) et donc l'existence de modes $TM_{\pm nmp}$. La méthode numérique quant à elle prend en compte le diélectrique entourant le ferrite et se rapproche donc plus du cas réel et des modes hybrides $HE_{\pm nm}$.

Ces résultats mettent en évidence les différences entre les modes de fonctionnement champ fort et champ faible :

- Les modes contrarotatifs sont rapprochés en champ fort alors qu'ils sont beaucoup plus éloignés en champ faible

- L'ordre d'apparition n'est pas toujours le même en champ faible et des modes supérieurs s'intercalent entre des paires de modes contrarotatifs.

Le couplage de ces paires de modes contrarotatifs va engendrer une fonction de circulation. Il est donc

nécessaire de bien les identifier dans la conception de circulateurs à ferrites. Dans le cas d'un circulateur mono-bande, seuls les modes à polarisation inverse $HE_{\pm 11}$ sont couplés tandis que dans le cas d'un circulateur bi-bande les modes $HE_{\pm 21}$ le sont également [2]. L'écart entre les modes contrarotatifs $HE_{\pm 11}$ ayant un lien avec la largeur de la bande de circulation [3], le fonctionnement champ faible, dont l'écart entre les modes est plus important est donc privilégié afin d'élargir les bandes passantes de fonctionnement. La suite de cet article ne traite donc plus que du fonctionnement en champ faible dans le but d'obtenir un circulateur bi-bande avec de meilleures performances en terme de bandes passantes que les circulateurs bi-bandes en champ fort déjà réalisés [2].

La contrainte principale d'une polarisation des ferrites en champ faible réside dans l'impossibilité de coupler les modes et ainsi obtenir une fonction de circulation avec un conducteur central de type disque si le diélectrique entourant le ferrite est de l'air. En effet si $\epsilon_d=1$, la largeur des lignes à présenter au niveau des trois accès pour passer d'un résonateur à un circulateur est trop importante et n'est physiquement pas réalisable ($\sin\psi > 1$ [9]). Pour conserver un $\epsilon_d=1$ il est donc nécessaire d'utiliser un conducteur central différent du disque pour obtenir des conditions de circulation satisfaisantes.

En utilisant un conducteur central plus complexe, qui peut être de type WYE comme présenté par J. Helszajn [10], les modes étudiés et excités seront modifiés. Le conducteur central WYE, présenté Figure 4a, va fortement perturber les modes propres de la structure, modifiant ainsi leurs fréquences de résonance et leurs champs.

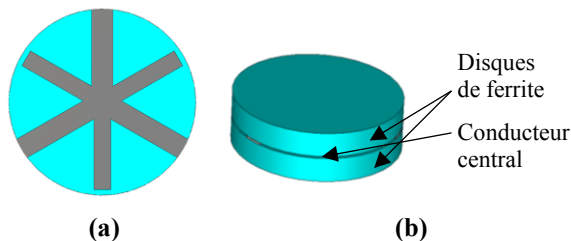


Figure 4. Conducteur central du résonateur WYE (a). Modèle numérique du résonateur (b).

2.c. Dimensionnement du résonateur

La première étape de la conception de ce circulateur est le dimensionnement du résonateur à ferrite. Les méthodes analytiques de H. Bosma [6] n'étant pas valable pour un conducteur central différent du disque, une méthode numérique à l'aide de logiciel de simulations EM CST [8] a été utilisée. La géométrie du conducteur central et des disques de ferrites, la valeur de champ magnétique statique interne aux ferrites H_i et le type de ferrite sont donc déterminés grâce aux simulations EM du résonateur à ferrite Figure 4b.

Le but de cette méthode numérique est de trouver une configuration où les modes $HE_{\pm 11}$ se retrouvent autour de 5 GHz et les modes $HE_{\pm 21}$ autour de 10 GHz sans que les modes HE_{01} et $HE_{\pm 31}$ ne soient trop proches afin de ne pas interférer lors du couplage. Le rayon du résonateur respectant ces conditions est de 6,6 mm, il est constitué du ferrite Y215 et son champ interne H_i est de 640 Oe.

3. Circulation bi-bande en champ faible

3.a. Couplage des modes résonants

Les théories de H. Bosma [6], de C.E. Fay et R.L. Comstock [9] permettent d'obtenir une fonction de circulation mono-bande grâce à un résonateur à ferrite en couplant les modes fondamentaux grâce à des lignes d'accès. La largeur W de ces lignes d'accès est le paramètre déterminant du couplage, les méthodes précédemment évoquées permettent d'en déterminer une valeur approchée dans le cas des circulateurs mono-bandes fonctionnant en champ fort ou en champ faible [11] avec un conducteur central de type disque. Des méthodes analytiques de recherche de la fonction de circulation avec des conducteurs plus complexes (conducteur WYE [10]) existent, mais le couplage des modes supérieurs n'est jamais étudié rigoureusement. Une méthode paramétrique est donc utilisée pour obtenir la largeur de ligne W qui satisfait le couplage des modes fondamentaux et supérieurs simultanément.

3.b. Mise en boîtier et cosimulation

Le champ magnétique statique interne aux disques de ferrites est obtenu grâce à des aimants permanents présents de part et d'autre des disques de ferrites. Le champ émis par ces aimants n'est pas constant et subit des effets de bords non négligeables. Ces effets se répercutent ainsi sur la valeur du champ H_i qui ne sera donc pas la même dans tout le ferrite. Une étude magnétostatique est réalisée afin de dimensionner les aimants qui permettront d'avoir un champ appliqué H_a , et donc un champ interne H_i , le plus stable possible dans le ferrite et le plus proche possible de la valeur déterminée lors du dimensionnement du résonateur.

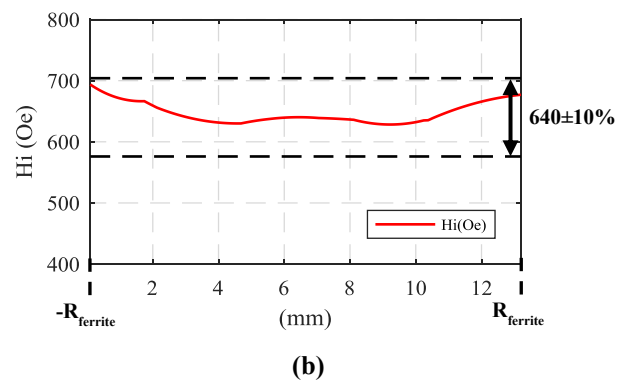
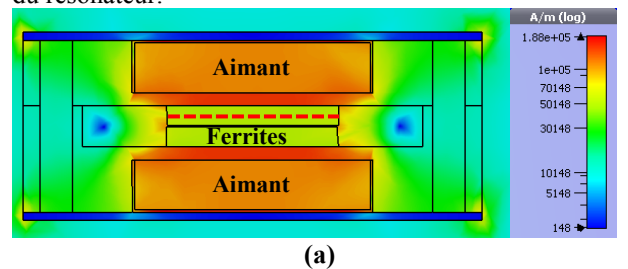


Figure 5. Champ magnétique statique dans le circulateur (a) et au centre du disque de ferrite supérieur (b).

Le champ magnétique statique interne au ferrite Figure 5b varie de moins de 10% de la valeur de 640 Oe définie précédemment. Avec une moyenne de 648 Oe, la non-

uniformité du champ interne ne perturbera donc pas trop le phénomène de circulation.

Une cosimulation magnéto-statique électromagnétique prenant en compte le champ magnétique statique non-uniforme des aimants, a été réalisée afin de modéliser le plus fidèlement possible le circulateur présenté Figure 6.

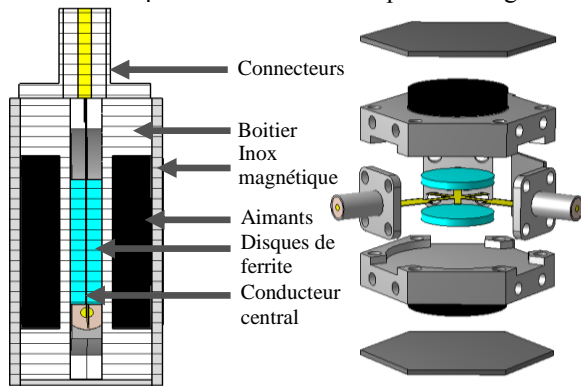


Figure 6. Modèle complet du circulateur.

Les résultats de cosimulation obtenus sont présentés Figure 7. Ils montrent un phénomène de circulation bi-bande aux fréquences de 5 et 10 GHz. Le Tableau 1 présente une comparaison des performances du circulateur bi-bande à ferrite en champ faible avec les mesures du circulateur bi-bande en champ fort [2]. Le fonctionnement en champ faible permet donc d'obtenir des bandes passantes plus importantes.

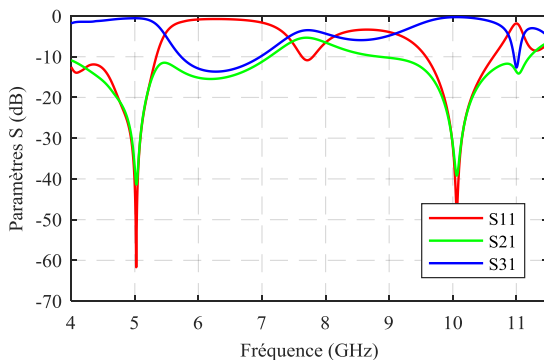


Figure 7. Résultats de simulation du circulateur.

Circulateur	Circulateur en champ faible		Circulateur en champ fort de H. Turki [2]	
	5.08 GHz	10.10 GHz	2.55 GHz	4.40 GHz
Fréquence centrale	5.08 GHz	10.10 GHz	2.55 GHz	4.40 GHz
$ S_{31} $ [dB]	0.55	0.35	0.35	0.4
% de bande $ S_{11} $ [dB] < 15	13.4	6.8	5.0	1.5
% de bande $ S_{11} $ [dB] < 20	9.1	4.2	2.2	0.7

Tableau 1. Performances des circulateurs bi-bandes simulé en champ faible et mesuré en champ fort [2].

4. Conclusion

Une méthode numérique d'identification des modes propres a permis le réglage des modes fondamentaux et supérieurs d'un circulateur triplaque. Le couplage simultané de ces modes permet l'obtention d'un

phénomène de circulation bi-bande fonctionnant en champ faible. Cette première conception de circulateur bi-bande en champ faible montre une amélioration de la bande instantanée par rapport au champ fort.

La réalisation d'un prototype sera la prochaine étape afin d'obtenir une validation expérimentale de ces résultats, qui seront présentés lors de la conférence.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier l'A.N.R qui a financé ce travail, dans le cadre du projet du laboratoire commun INOgyro. Nous remercions également la DGA pour le cofinancement de la thèse CIFRE/Défense pendant laquelle ces travaux sont réalisés.

Références

- [1] H. Razavipour, G. Askari, F. Fesharaki, A New High-Power, Dual-Band, E-plane, Ferrite Circulator, IEEE EUROCON, 2009.
- [2] H. Turki, L. Huitema, T. Monediere, B. Lenoir and C. Breuil, "New Concept Validation of Low-loss Dual-band Stripline Circulator", in *IEEE Transactions on MTT*, 2018
- [3] E. Bois. Contribution à la modélisation de circulateurs à ferrite en structure triplaque par développements modaux. Doctorat, Limoges, 1994
- [4] D. Polder, On the theory of ferromagnetic resonance, Philos. Mag., vol. 40, 1949, p. 99-115.
- [5] M. Latrach, Th Monediere, and F. Jecko. "A new design of cylindrical closed triplate ferrite resonators compared with magnetic wall approximation." *IEEE Transactions on Magnetics* 26.5 (1990): 2856-2862.
- [6] H. Bosma, On the principle of stripline circulation, Proc.IEEE, vol 109, Jan 1962, pp 137-146.
- [7] H. Turki. *Développement de circulateurs à ferrite originaux par l'élaboration d'une démarche de conception fiable*. Doctorat, Limoges, 2018.
- [8] CST Microwave, www.cst.com.
- [9] C. E. Fay, and R. L. Comstock. "Operation of the ferrite junction circulator." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 13.1 (1965): 15-27.
- [10] J. Helszajn, I. Macfarlane, and M. McKay. "Open-circuit parameters of circulators using side-coupled wye resonators: an impedance pole approach." *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation* 151.3 (2004): 263-270.
- [11] Shoukry I. Shams, Mahmoud Elsaadany, and Ahmed A. Kishk. "Including Stripline Modes in the Y-Junction Circulators: Revisiting Fundamentals and Key Design Equations." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 67.1 (2019): 94-107.