



**HAL**  
open science

## Caractérisation de matériaux magnétiques anisotropes en ligne coaxiale

Vinod V. K. Thalakkatukulathil, A. Chevalier, Patrick Queffelec

► **To cite this version:**

Vinod V. K. Thalakkatukulathil, A. Chevalier, Patrick Queffelec. Caractérisation de matériaux magnétiques anisotropes en ligne coaxiale. 20èmes Journées Nationales Micro-Ondes- JNM 2017, May 2017, Saint Malo, France. hal-01784550

**HAL Id: hal-01784550**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-01784550v1>**

Submitted on 3 May 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Caractérisation de matériaux magnétiques anisotropes en ligne coaxiale

Vinod V K Thalakkatukalathil<sup>1</sup>, A. Chevalier<sup>1</sup> et P. Queffelec<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, 29238 Brest Cedex 3  
Vinod.Vkthalakkatukalathil@univ-brest.fr

**Abstract** – Dans le but final de déterminer les propriétés dynamiques des ferrites aimantés, cet article présente l'étude des spectres de la puissance absorbée d'échantillons de type YIG aimantés axialement dans une cellule coaxiale APC7. La présence de plusieurs pics secondaires dans les résultats expérimentaux est expliquée par la non-homogénéité du champ statique interne aux ferrites. L'évaluation des champs démagnétisants et le calcul du champ interne sont alors réalisés à l'aide du logiciel magnétostatique Ansys Maxwell3D et des simulations dynamiques à l'aide du logiciel Ansys HFSS. Un outil électromagnétique prédictif est proposé pour une modélisation plus réaliste des propriétés dynamiques des ferrites, en prenant en compte les champs statiques internes de polarisation.

### 1. Introduction

Les Ferrites sont des matériaux largement utilisés dans l'électronique hyperfréquence pour de nombreuses applications notamment dans le secteur des télécommunications en raison de leurs faibles pertes d'insertion et de leurs propriétés d'isolation élevées. La mise en œuvre de circulateurs/isolateurs est basée sur le comportement non-réciproque de la propagation d'une onde électromagnétique (EM) dans les ferrites aimantés. Les ferrites sont également utilisés pour la réalisation de déphaseurs hyperfréquences et d'antennes miniatures dans la bande UHF. Le contrôle précis des performances de ces composants nécessite la détermination préalable du comportement dynamique des matériaux ferrites quel que soit leur état d'aimantation.

Mis à part le cas désaimanté, leur caractérisation expérimentale dans un état d'aimantation quelconque reste un problème difficile. En effet une des caractéristiques des matériaux magnétiques est la dépendance de leur réponse dynamique à la forme de l'échantillon à tester. De plus, pour les matériaux magnétiques de forme non-ellipsoïdale, ce qui est le cas le plus fréquemment rencontré dans un dispositif à ferrite, le champ d'aimantation statique interne n'est pas uniforme. Dans ces conditions, la détermination expérimentale d'une perméabilité effective ou moyenne ne constitue pas la solution la plus précise pour aider le concepteur des dispositifs à ferrite.

Les logiciels de simulation commerciaux utilisent différents modèles [1]–[3] pour déterminer le tenseur de perméabilité  $\mu$ , selon l'état d'aimantation. Ces modèles

utilisent comme paramètres d'entrée, des grandeurs physiques comme l'aimantation à saturation, le champ d'anisotropie, etc. pour calculer la perméabilité. Cependant, la plupart des simulateurs électromagnétiques restent limités à certains états d'aimantation, en raison des hypothèses simplificatrices sur lesquelles se base le modèle du tenseur de perméabilité utilisé. Ces limitations rendent difficile, voire impossible, la conception des dispositifs dès lors que le ferrite n'est pas saturé ou totalement désaimanté.

Face à cette réalité, nous avons développé un outil théorique rigoureux pour déterminer de manière prédictive les propriétés EM des ferrites, quel que soit leur état d'aimantation. Cet outil, qui combine une analyse magnétostatique de l'échantillon, un modèle généralisé à tous les états d'aimantation du tenseur de perméabilité [4] et le logiciel commercial CST Microwave Studio®, a été validé pour la conception des déphaseurs et celle des antennes à ferrite [5], [6]. La plupart des paramètres d'entrée dépendent des propriétés statiques du ferrite. Le seul paramètre dynamique d'entrée du modèle est le facteur d'amortissement, qui est lié, dans un état saturé, à la largeur de raie à mi-hauteur  $\Delta H$ . Cette dernière caractéristique est mesurée conventionnellement à l'aide d'une méthode en cavité résonante utilisant un échantillon sphérique.

Dans la référence [7], nous avons présenté une technique permettant de caractériser le facteur d'amortissement pour les ferrites polycristallins qui contourne les contraintes liées à la mesure conventionnelle sur un échantillon sphérique en cavité résonante. De plus, cette technique exploitant une ligne coaxiale, elle est large bande. Les difficultés rencontrées dans l'utilisation de cette méthode pour les ferrites denses résident dans l'apparition de plusieurs pics de résonance dans la courbe de puissance absorbée et dans l'évaluation précise du champ statique interne. Ainsi, ces pics multiples rendent difficile la procédure de dépouillement pour extraire le facteur d'amortissement.

Dans ce travail, nous étudions l'origine des pics secondaires observés dans les spectres de puissance absorbée des ferrites denses ainsi que la non-uniformité des champs magnétiques internes grâce à l'association des logiciels commerciaux magnétostatique Maxwell 3D et hyperfréquence HFSS. Nous proposons également une approche théorique qui associe une analyse magnétostatique, un modèle généralisé du tenseur de

perméabilité et le logiciel commercial Ansys HFSS afin d'obtenir une description plus précise des performances des dispositifs à ferrites quel que soit l'état d'aimantation du matériau.

## 2. Dispositif expérimental

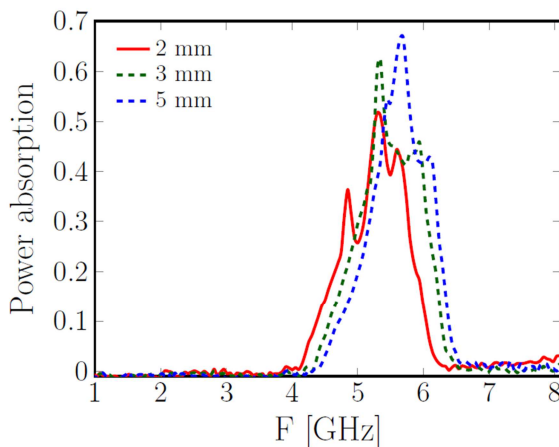
La cellule de mesure est une ligne coaxiale APC7 à l'intérieur de laquelle est inséré l'échantillon de ferrite de forme toroïdale. L'ensemble est placé dans l'entrefer d'un électro-aimant, qui crée un champ statique dans l'axe de la cellule de mesure, i.e.: dans la direction de propagation de l'onde EM. Sous l'action du champ magnétique statique, le matériau s'aimante et devient anisotrope.

Pour quantifier les effets démagnétisants nous avons testé des échantillons d'épaisseurs différentes (2, 3, 4, 5 et 6 mm) de ferrites denses (grenats d'Yttrium fer, YIG-39 de chez Exxelia TEMEX). Pour obtenir les propriétés statiques, la mesure du cycle d'hystérésis de chaque échantillon a été réalisée à l'aide d'un magnétomètre vibrant (VSM). Les paramètres de réflexion  $S_{11}$  et de transmission  $S_{21}$  sont ensuite mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau dans la bande [130 MHz-20 GHz] pour des intensités de champ magnétique statique variant de 0 à 2200 Oe.

La puissance absorbée est définie par la relation :

$$P=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2 \quad (1)$$

La Figure 1 montre clairement la présence de pics de résonances secondaires sur la puissance absorbée des échantillons denses. Ces pics suivent un comportement attendu : lorsque le champ statique augmente ils se décalent vers les hautes fréquences. Après saturation chaque résonance montre alors une variation linéaire en fréquence avec l'augmentation du champ statique [7].



**Figure 1 : Puissance absorbée d'échantillons YIG 39 (Exxelia Temex) d'épaisseurs différentes.  $H=2000\text{Oe}$ ,  $4\pi M_s = 729\text{ G}$ ,  $\epsilon = 14.2$ ,  $\alpha = 0.0068$ .**

L'analyse EM initiale de la cellule de mesure basée sur l'approximation quasi-TEM [7] ne prédit pas les pics observés dans le spectre d'absorption mesuré. La simulation conventionnelle dans le domaine fréquentiel issue du logiciel HFSS qui fait l'hypothèse d'un champ de polarisation uniforme donne des résultats similaires à l'analyse quasi-TEM, et ne peut prendre en compte

l'élargissement du pic d'absorption au voisinage de la fréquence de résonance gyromagnétique. En effet ces simulations considèrent que le champ interne de polarisation est uniforme dans tout le ferrite, alors qu'en réalité, ils sont par nature inhomogènes en direction et en intensité.

L'effet des champs démagnétisants se traduit par une diminution du champ statique interne  $H_{\text{int}}$  vu par les moments magnétiques. Il s'écrit en fonction du champ appliqué  $H_{\text{app}}$ , du champ d'anisotropie  $H_a$ , du facteur de forme  $N$  et de l'aimantation  $M_s$  :

$$H_{\text{int}} = (H_{\text{app}} + H_a - N.M_s) \quad (2)$$

Le calcul exact du coefficient démagnétisant  $N$  n'est possible que dans le cas d'ellipsoïde de révolution et pour une aimantation uniforme [8], [9]. Plusieurs études ont proposé des relations approchées pour des cylindres creux (rondelle épaisse) [10], [11]. A titre d'illustration, le Tableau 1 donne les valeurs des facteurs démagnétisants macroscopiques calculés à partir de la méthode proposée dans [10] pour nos échantillons toriques au standard APC7 ( $D_e = 7\text{ mm}$ ,  $D_i = 3.04\text{ mm}$ ).

Epaisseur	2mm	3mm	5mm	6mm
N	0,562	0,414	0,296	0,243

**Tableau 1. Facteurs démagnétisants calculés pour les échantillons toriques de différentes épaisseurs.**

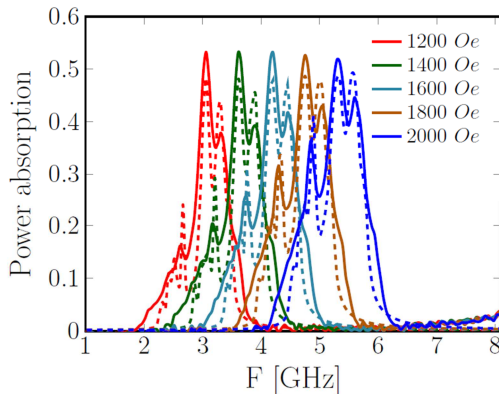
Ces formulations sont basées sur différentes approximations, et ne conduisent pas toujours à des résultats similaires. Dans beaucoup de cas, une simulation magnétostatique de type numérique constitue la meilleure option pour décrire la réalité complexe des champs de polarisation statiques internes.

## 3. Simulations magnétostatiques à l'aide du logiciel Maxwell 3D. Champs internes non-uniformes

Pour une meilleure description des propriétés dynamiques des ferrites, la non-uniformité des champs magnétiques statiques internes doit être prise en compte dans les simulations EM. Une étude magnétostatique à l'aide du logiciel Ansys Maxwell 3D peut être utilisée pour calculer les champs internes non uniformes à l'intérieur du matériau de ferrite. Les champs statiques internes qui sont calculés à partir de cette analyse magnétostatique, sont ensuite utilisés pour définir les spectres de la perméabilité du matériau ferrite dans HFSS.

Dans le logiciel Maxwell 3D, l'échantillon est défini par un matériau anisotrope non-linéaire et sa perméabilité est calculée dans chaque direction à partir du cycle d'hystérésis (B-H) en fonction de l'amplitude du champ appliqué. Des conditions aux limites spécifiques sont imposées pour définir un champ magnétique externe uniforme le long de la direction de propagation. Enfin, les résultats issus de Maxwell 3D sont utilisés dans HFSS pour définir une aimantation non uniforme dans l'échantillon. HFSS utilise ces valeurs de champ statique interne en association avec les valeurs de l'aimantation à

saturation  $4\pi M_s$ , et la largeur de raie à mi-hauteur  $\Delta H$ , dans le modèle conventionnel de Polder afin de déterminer le tenseur de perméabilité de l'échantillon et, *in fine*, calculer les paramètres S de la structure.



**Figure 2 : Spectres d'absorption de puissance mesurés (-) et simulés (- -) pour l'échantillon de 2 mm d'épaisseur pour différents champs statiques.**

Les spectres d'absorption de puissance mesurés et simulés pour un échantillon de 2 mm d'épaisseur soumis à différents champs statiques sont indiqués à la Figure 2. Les spectres d'absorption de puissance simulés montrent à présent plusieurs pics et concordent avec les résultats des mesures.

D'après ces résultats, il est clair que les pics multiples et l'élargissement des pertes observés au niveau des spectres d'absorption de puissance sont dus à la non-uniformité du champ statique de polarisation interne dans l'échantillon de ferrite. Les effets des champs démagnétisants liés à taille et la forme de l'échantillon sont déterminants, et il est nécessaire d'évaluer rigoureusement ces effets pour obtenir des résultats réalistes lors des simulations EM.

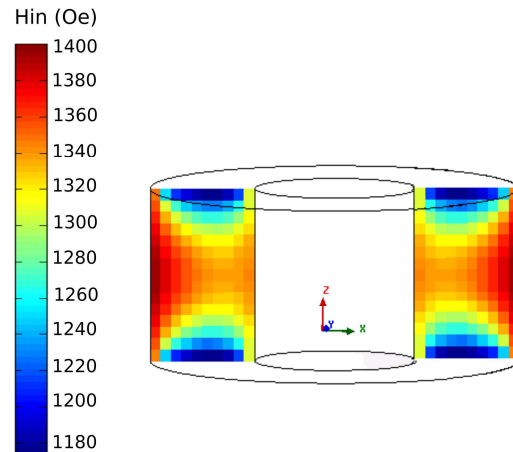
L'association de Maxwell 3D avec HFSS donne des résultats satisfaisants pour les dispositifs intégrant des ferrites saturés. En effet, le logiciel HFSS utilise le modèle de Polder pour calculer les éléments du tenseur de perméabilité du ferrite anisotrope. Cette approche est valable uniquement dans l'état saturé. Le comportement dynamique des ferrites dans des états rémanents ou partiellement aimantés ne peut pas être décrit par cette approche théorique.

#### 4. Outil EM prédictif – Intégration des modèles théoriques dans Ansys HFSS

Nous proposons un outil théorique pour prédire les propriétés EM des ferrites de façon plus fiable en tenant compte de l'inhomogénéité des champs internes de polarisation et applicable à tous les états d'aimantation. Cet outil combine une analyse magnétostatique, un modèle général du tenseur de perméabilité et le logiciel de simulation Ansys HFSS.

L'inhomogénéité du champ statique interne au ferrite est étudiée grâce à un solveur magnétostatique précédemment développé au Lab-STICC [5]. Cette analyse magnétostatique propose une description plus réaliste des champs statiques internes. Le solveur calcul

le cycle d'hystérésis dans chaque cellule du maillage à partir du modèle énergétique de Stoner-Wohlfarth [12]. Chaque cellule peut suivre un cycle différent (majeur ou mineur) quel que soit son état d'aimantation. La Figure 3 présente l'amplitude du champ interne calculé dans un échantillon de forme torique d'épaisseur 3mm, l'inhomogénéité apparaît clairement.



**Figure 3 : Champ statique interne calculé dans le tore de ferrite YIG par l'analyse magnétostatique, pour un champ externe appliqué  $H_{dc}=1600$  Oe.**

Une fois le champ interne déterminé, nous utilisons le modèle (GPT) de tenseur de perméabilité [4] pour calculer les composantes du tenseur dans le ferrite. Ce modèle est basé sur les équations classiques de Landau-Lifshitz-Gilbert et prend en compte les phénomènes physiques inhérents à l'aspect polycristallin comme l'effet Polder-Smit, l'hystérésis et une distribution statistique des formes de grains et des domaines. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont d'ordre statique avec l'aimantation à saturation ( $4\pi M_s$ ) et le champ d'anisotropie magnéto-cristalline ( $H_a$ ) et dynamique avec le coefficient d'amortissement ( $\alpha$ ).

Le modèle GPT est utilisé pour calculer les neuf composantes du tenseur de perméabilité du matériau aimanté. Puis, pour définir ces composantes à chaque valeur de fréquence dans le logiciel HFSS, une interpolation linéaire est réalisée sur les parties réelle et imaginaire des points calculés. Les paramètres S sont alors calculés dans le domaine fréquentiel.

#### 5. Résultats et discussions

Les champs internes sont calculés à l'aide du solveur magnétostatique. Le champ interne pour l'échantillon YIG de 3mm est présenté Figure 3 dans le cas d'un champ appliqué  $H_{dc}=1600$  Oe. L'analyse magnétostatique montre que les champs démagnétisants varient dans l'espace et que les champs internes sont inhomogènes par nature. La symétrie de l'échantillon conduit cependant à un champ interne indépendant de l'angle 'Phi'.

Afin de prendre en compte la variation en direction et en amplitude des champs démagnétisants, l'échantillon de ferrite est subdivisé en plusieurs régions cylindriques concentriques dans lesquelles le champ interne peut être considéré uniforme (Figure 4). Dans chaque zone, le

champ interne est considéré uniforme ; le modèle GPT est alors utilisé pour calculer le tenseur de perméabilité en tenant compte du champ interne et du tenseur des coefficients démagnétisants  $N$  de la zone considérée.

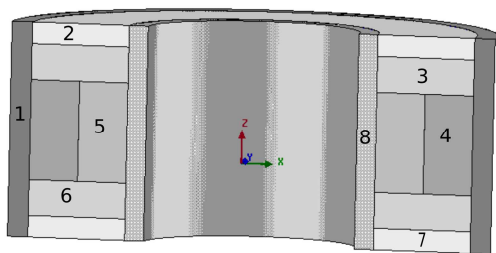


Figure 4. coupe transversale de l'échantillon montrant les zones de champ interne uniforme.

Le modèle GPT nous permet de déterminer les composantes du tenseur de perméabilité de façon prédictive pour tout état d'aimantation. La puissance absorbée est ensuite calculée à partir des paramètres  $S$  simulés par HFSS et comparée aux résultats de mesure. Nous avons également comparé les spectres à la puissance obtenue avec les simulations Maxwell 3D.

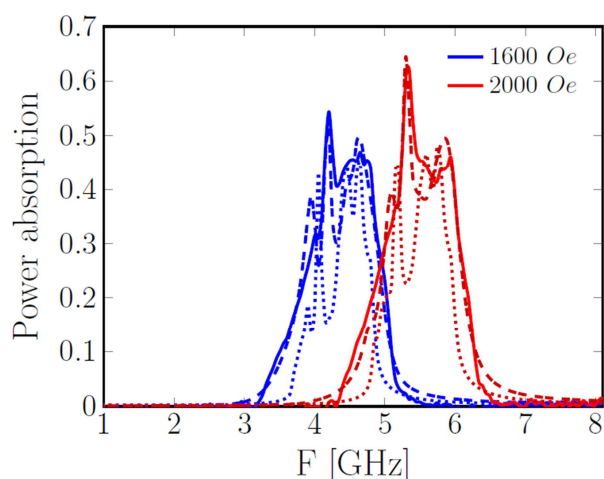


Figure 5 : Spectres d'absorption de puissance mesurés (-) et simulés pour l'échantillon 3mm Maxwell 3D (...), GPT+HFSS (- -)

Les spectres de la puissance absorbée pour un échantillon YIG de 3mm, mesurés et simulés par notre outil, sont présentés Figure 5 pour différentes valeurs de champ appliqué. Les résultats simulés par notre outil sont en très bon accord avec ceux mesurés. Les résultats issus de notre outil théorique sont plus proches de la mesure que ceux prédit par Maxwell-HFSS. Ainsi, l'ajout de l'analyse magnétostatique a permis d'améliorer le caractère prédictif du modèle GPT. Grâce à la prise en compte de l'inhomogénéité des champs internes, le modèle théorique proposé permet de mieux prédire les propriétés dynamiques des ferrites anisotropes et cela quel que soit leur état d'aimantation.

## 6. Conclusion

Cette étude a montré que les effets des champs démagnétisants dus à la forme et aux dimensions de l'échantillon sont essentiels dans le cas des échantillons non ellipsoïdaux. Il est alors nécessaire d'évaluer les champs internes pour réaliser des simulations EM réalistes. En prenant en compte les variations des champs internes d'une zone à l'autre, le modèle théorique proposé permet de prédire efficacement le comportement EM des ferrites quel que soit leur état d'aimantation.

## 7. Remerciements

Tous les calculs ont été réalisés sur le cluster de calcul hautes performances WINCHYPS1. Ce cluster est géré par la plateforme TechHyp du Lab-STICC.

## References

- [1] D. Polder, "On the theory of ferromagnetic resonance," *Physica*, vol. 15, no. 1, pp. 253–255, 1949.
- [2] E. Schlömann, "Microwave Behavior of Partially Magnetized Ferrites," *J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 1, pp. 204–214, Jan. 1970.
- [3] J.J.Green and F. Sandy, "Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 22, no. 6, pp. 641–645, Jun. 1974.
- [4] P. Gelin and P. Queffelec, "Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 24–31, 2008.
- [5] A. Le Gouellec, G. Verissimo, P. Queffelec, V. Laur, I. Albert, and T. Girard, "Ferrite-based phase shifters design: The modeling problem of non-saturated anisotropic ferrites," *Microw. Symp. Dig. IMS 2013 IEEE MTT- Int.*, pp. 1–4, Jun. 2013.
- [6] J. P. Cortes Nino, P. Queffelec, A. Chevalier, G. Verissimo, and J. L. Mattei, "Modeling antennas printed on magnetized substrate: Application to the design of a tunable PIFA antenna," *Microw. Conf. EuMC 2015 Eur.*, pp. 933–936, Sep. 2015.
- [7] V. V. K. Thalakkatukalathil, A. Chevalier, and P. QUEFFELEC, "Caractérisation électromagnétique des matériaux magnétiques anisotropes: vers une nouvelle approche de la détermination de la largeur de raie à mi-hauteur," in *14èmes JCMM 2016*, Calais, France, 2016.
- [8] J. A. Osborn, "Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid," *Phys. Rev.*, vol. 67, no. 11–12, pp. 351–357, Jun. 1945.
- [9] E. C. Stoner, "The demagnetizing factors for ellipsoids," *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 36, no. 263, pp. 803–821, Dec. 1945.
- [10] S. G. Sandomirskii, "Calculation of short hollow cylinders under magnetization parallel to the generatrix," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 109–112, Feb. 2009.
- [11] M. Beleggia, D. Vokoun, and M. De Graef, "Demagnetization factors for cylindrical shells and related shapes," *J. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 9, pp. 1306–1315, May 2009.
- [12] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, "A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 4, pp. 3475–3518, Jul. 1991.