



**HAL**  
open science

## Méthode de caractérisation large bande de matériaux magnétiques quelque soit leur état d'aimantation

Jorge Lezaca, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

► **To cite this version:**

Jorge Lezaca, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Méthode de caractérisation large bande de matériaux magnétiques quelque soit leur état d'aimantation. JCMM 2012 : 12èmes journées de caractérisation microondes et matériaux, Mar 2012, Chambéry, France. hal-00801274

**HAL Id: hal-00801274**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00801274>**

Submitted on 15 Mar 2013

**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.

## METHODE DE CARACTERISATION LARGE BANDE DE MATERIAUX MAGNETIQUES QUELQUE SOIT LEUR ETAT D'AIMANTATION

J. Lezaca <sup>1</sup>, P. Quéffelec <sup>1</sup>, A. Chevalier <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 3192, UEB, Université de Bretagne Occidentale - 6 av. Le Gorgeu, CS 93837,  
29238 Brest Cedex 3, France  
alexis.chevalier@univ-brest.fr

### 1. INTRODUCTION

Les matériaux magnétiques, et notamment les ferrites, sont largement utilisés pour leurs propriétés anisotropes dans les dispositifs micro-ondes tels que les isolateurs, les déphaseurs ou les circulateurs. Ce caractère anisotrope est obtenu par l'application d'un champ magnétique statique dans le but d'aimanter le matériau. La perméabilité prend alors une forme tensorielle dont les composantes dépendent de la fréquence mais également de l'état d'aimantation. Pour concevoir les dispositifs il est nécessaire de connaître les propriétés dynamiques du matériau mais la mesure expérimentale de la perméabilité est souvent limitée soit au cas désaimanté (méthode en ligne coaxiale) soit au cas saturé (méthode en cavité résonnante) [1]. Cela ne suffit pas pour décrire le comportement dans des dispositifs comme les filtres accordables où le matériau n'est que partiellement aimanté. Nous avons développé au laboratoire une méthode de caractérisation large bande qui permet de caractériser les propriétés électromagnétiques du matériau au travers des composantes  $\mu$  et  $\kappa$  du tenseur de perméabilité quelque soit son état d'aimantation. Nous présentons dans ce travail la méthode de mesure et les résultats expérimentaux obtenus sur des ferrites pour plusieurs états d'aimantation.

### 2. DESCRIPTION DE LA METHODE DE MESURE

La méthode est basée sur la mesure d'une ligne de transmission de type triplaque partiellement remplie par le matériau magnétique à caractériser. Deux parties identiques de l'échantillon sont placées au dessus et en dessous du ruban métallique central comme le montre la figure 1. De chaque côté du ruban sont placés deux diélectriques dont les permittivités  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont choisies très différentes afin de garantir un comportement non réciproque de la cellule ( $S_{12} \neq S_{21}$ ). Ceci est nécessaire pour obtenir un nombre suffisant de grandeurs mesurées ( $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{11}$ ) afin d'extraire les trois paramètres complexes du matériau à caractériser : la permittivité  $\epsilon$ , le terme diagonal  $\mu$  et le terme extra-diagonal  $\kappa$  du tenseur de perméabilité. La méthode de dépouillement des données expérimentales (paramètres  $S$  mesurés) se décompose alors en deux parties.

Dans un premier temps le problème direct consiste à calculer les paramètres  $S$  théoriques de la ligne de transmission grâce à une analyse électromagnétique dynamique prenant en compte la propagation du mode fondamental et des modes d'ordre supérieur dans la région chargée. Pour cela nous représentons la cellule de mesure par un modèle équivalent simplifié en se basant sur deux hypothèses. L'énergie électromagnétique est principalement confinée entre le ruban central et les plans de masses ( $b \ll a$ ) et seuls les modes d'ordre supérieur  $TE_{n,0}$  seront excités dans la région chargée [2]. La figure 2 présente le modèle équivalent, les conducteurs (plans de masse inférieur et ruban central) sont représentés par des CCE (Court-Circuit Electrique) et les plans latéraux par des CCM (Court-Circuit Magnétiques). Etant donnée la symétrie des champs dans la cellule de mesure, seule une moitié de la section transverse est modélisée.

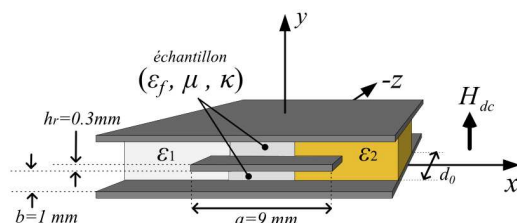


Figure 1 : Cellule de mesure

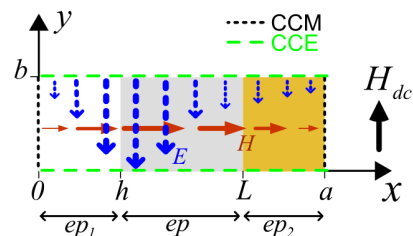


Figure 2 : Modèle équivalent de la cellule

L'analyse dynamique consiste ensuite à déterminer les diagrammes de dispersion des modes dans les différentes sections de la cellule [3, 4]. Celle où la propagation s'effectue dans l'air est analogue à une ligne de transmission biplaque remplie d'air, le diagramme de dispersion est obtenu rapidement à partir de relations analytiques. En revanche pour la section chargée par les trois matériaux (diélectrique 1, échantillon sous test et diélectrique 2) la relation de dispersion est plus compliquée à obtenir. Il faut

déterminer les expressions des champs dans chacun des matériaux puis appliquer les conditions de continuités aux interfaces entre matériaux ( $x=h$  et  $x=L$ ). Cela conduit à un système de 4 équations à 4 inconnues dont les valeurs propres représentent les constantes de propagations des différents modes (propagés et évanescents) dans la section chargée. Une fois le diagramme de dispersion déterminé dans chaque section de la ligne, les conditions de continuités des champs d'une section à l'autre permettent de calculer les paramètres S théoriques de la cellule. Dans ce problème direct, il est nécessaire de renseigner les valeurs des paramètres électromagnétiques ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ ) pour calculer les champs dans chaque matériau.

Dans un deuxième temps, le problème inverse consiste à remonter aux paramètres expérimentaux ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ ) du matériau sous test en utilisant une procédure d'optimisation numérique qui consiste à faire converger les paramètres S théoriques obtenus par le problème direct vers les paramètres S mesurés expérimentalement. Une des originalités de la procédure utilisée est de contourner les problèmes d'incertitudes rencontrés sur les phases des paramètres S de réflexion au voisinage des résonances (lorsque  $|S_{ii}|$  tend vers 0). Au lieu de résoudre le problème inverse fréquence par fréquence, nous avons choisi de réaliser l'optimisation simultanément sur la totalité de la bande de fréquence en comparant uniquement les modules des paramètres S. Pour cela nous sommes amenés à définir au préalable le comportement fréquentiel des paramètres ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ ). Nous avons choisi de représenter le matériau sous test par une permittivité  $\epsilon(f)$  peu dispersive comme le montrent généralement les ferrites grâce à une fonction de type Debye définie par ses trois paramètres ( $\epsilon_\infty$ ,  $\epsilon_{stat}$ ,  $\tau$ ) avec un temps de relaxation très petit. Les composantes  $\mu(f)$  et  $\kappa(f)$  du tenseur de perméabilité sont déterminées par le modèle « Generalized Permeability tensor » [5] développé au laboratoire avec ses variables d'entrée ( $4\pi M_s$ ,  $H_a$ ,  $\alpha$ ,  $N_y$ ,  $H_{dc}$ ,  $f$ ) représentant respectivement l'aimantation à saturation, le champ d'anisotropie magnétocristalline, le facteur d'amortissement, le facteur de forme du ferrite, le champ statique externe appliqué et la fréquence. La fonction de minimisation de la procédure d'optimisation s'écrit alors :

$$F(X) = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} \left[ \sum_{i=1}^{i=2} \sum_{j=1}^{j=2} \left( |S_{ij}^{(theo)}(X, f)| - |S_{ij}^{(mes)}(X, f)| \right)^2 \right] \text{ avec } X = [\epsilon(f), \mu(f), \kappa(f)] \quad (1)$$

Les paramètres des lois analytiques constituent les variables d'entrée du vecteur d'optimisation X. Lorsque l'erreur minimale est trouvée, les fonctions  $\epsilon(f)$ ,  $\mu(f)$  et  $\kappa(f)$  correspondent aux paramètres effectifs du matériau mesuré. Le code développé au laboratoire pour réaliser cette procédure d'optimisation est écrit en Matlab® et utilise la routine *lsqnonlin*.

### 3. PROCEDURE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

La cellule de mesure est réalisée en laiton, ses dimensions sont précisées sur la figure 3. Les paramètres S sont mesurés dans la bande de fréquence [100MHz-12GHz] à l'aide d'un analyseur de réseau Agilent E8364A. La première étape de la procédure expérimentale consiste à calibrer le dispositif de mesure, nous avons choisi une calibration de type SOLT conduisant à des plans de références situés dans les plans des connecteurs en R1 et R2. Nous effectuons ensuite un changement de plan de référence (deembedding) afin de comparer les paramètres S mesurés aux paramètres théoriques qui sont calculés au niveau des plans de l'échantillon R1\* et R2\* (figure 4). Ce changement de référence est réalisé par une description en quadripôle de chacune des sections de la cellule à l'aide de la théorie des lignes. La correction des paramètres S tient ainsi compte des déphasages mais également du changement d'impédance entre les accès coaxiaux à 50 ohms et la ligne triplaque à 18 ohms.

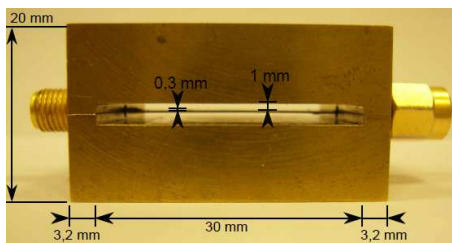


Figure 3 : Dimensions de la cellule de mesure

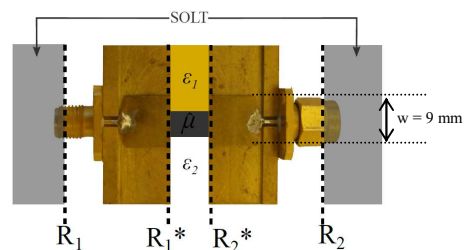


Figure 4 : Plan de référence des paramètres S

Etant donné le nombre élevé de variable d'optimisation, ici trois pour le modèle de Debye de permittivité et cinq pour le modèle du tenseur de perméabilité, la résolution du problème inverse peut très vite conduire à des impasses numériques (minima locaux). Nous avons donc défini une procédure expérimentale en deux étapes pour les échantillons magnétiques qui consiste à déterminer dans un

premier temps uniquement la permittivité du matériau. Nous exploitons le fait que la réponse magnétique des ferrites à l'état désaimanté n'est présente que dans la partie basse fréquence du spectre. Cette hypothèse est bien adaptée aux compositions que nous souhaitons mesurer, elle le serait moins pour des matériaux présentant une résonance gyromagnétique naturelle à plus haute fréquence comme les hexaferrites. Ainsi suffisamment loin au-delà de la résonance gyromagnétique, le matériau ne présente qu'un comportement purement diélectrique (figure 5). Le matériau étant désaimanté il n'est pas nécessaire de rendre la structure dissymétrique et la mesure se fait avec la cellule chargée uniquement du ferrite ( $\epsilon_2 = \epsilon_1 = 1$ ). L'optimisation pour trouver la fonction analytique  $\epsilon(f)$  est alors réalisée dans la bande haute fréquence en figeant les valeurs de  $\mu$  à 1, celle de  $\kappa$  à zéro.

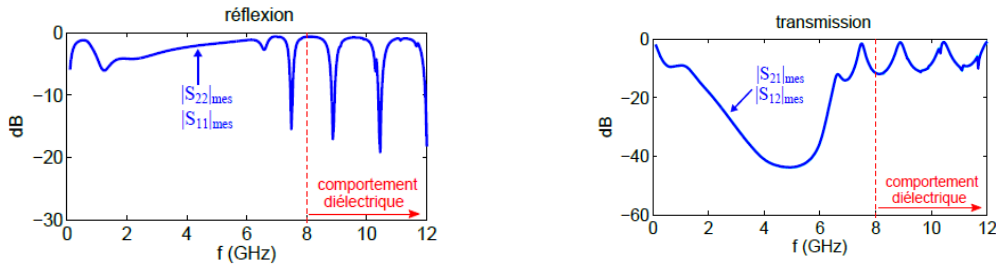


Figure 5 : Paramètres S mesurés d'un ferrite spinel désaimanté : comportement diélectrique haute fréquence

Notons que la présence de plusieurs résonances de dimensions est ici un atout pour l'optimisation large bande alors qu'elle est préjudiciable pour une résolution de type fréquence par fréquence. Une fois la permittivité du ferrite déterminée, nous avons supposé qu'elle ne varie pas en fonction du champ magnétique appliqué. Nous avons alors figé sa valeur dans la procédure d'optimisation de la réponse magnétique afin de simplifier la résolution du problème inverse.

La sensibilité de la méthode est directement liée aux dimensions de l'échantillon. La longueur de l'échantillon permet d'augmenter l'interaction onde matière et ainsi la précision. La largeur de l'échantillon et des diélectriques permet de jouer sur la dissymétrie de la structure qui doit être suffisante pour que le comportement anisotrope mesuré assure la convergence de l'optimisation. Enfin la hauteur de l'échantillon est normalement égale à la hauteur de la cellule mais en pratique elle est légèrement inférieure. Ces lames d'air entre l'échantillon et les plans de masse se traduisent par des paramètres S mesurés perturbés par des résonances très étroites. Le tableau 1 regroupe les trois configurations de dimensions qui ont été testées.

	Largeur (mm) échantillon (ep)	Longueur (mm) échantillon (d <sub>0</sub> )	Largeur (mm) diélectrique (ep <sub>2</sub> )	Gap d'air ( $\mu\text{m}$ )
Forme 1	7	18	1	20
Forme 2	5	5	2	50
Forme 3	5	18	2	50

Tableau 1 : Dimensions des échantillons testés.

Les mesures nous ont montré qu'une largeur de diélectrique de 1mm conduit à une non-réciprocité trop faible pour résoudre correctement le problème inverse, la forme 1 a donc été écartée. Pour une largeur de diélectrique de 2 mm nous avons testé deux longueurs, la plus longue aurait normalement dû conduire aux meilleurs résultats. Malheureusement la présence des lames d'air (50 $\mu\text{m}$ ) affecte d'autant plus la mesure que l'échantillon est long. La figure 6 montre l'effet des gaps d'air sur les coefficients de transmission. On y voit de nombreuses résonances qui vont perturber la résolution du problème inverse.

Finalement nous avons choisi les dimensions de la forme 2 pour la mesure de nos échantillons. La figure 7 présente les paramètres S mesurés pour cette forme pour un champ appliqué de 800 Oe. Le comportement non réciproque est important et les paramètres peu perturbés par les lames d'air.

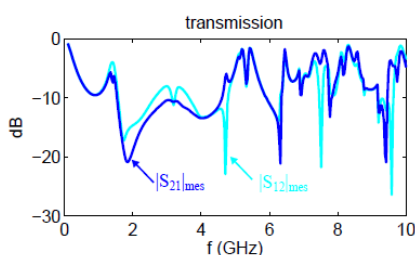


Figure 6 : influence des gaps d'air pour la forme 3

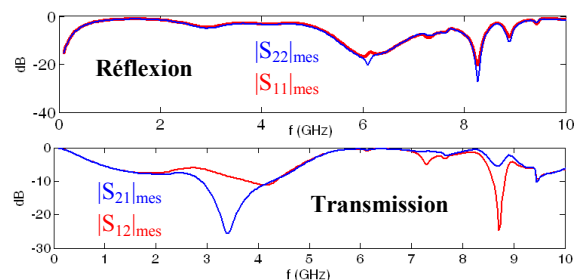


Figure 7 : paramètres S mesurés pour la forme 2

La figure 8 présente les spectres des composantes  $\mu$  et  $\kappa$  du tenseur de perméabilité issus des mesures d'un ferrite spinel Temex<sup>®</sup> U21 pour des valeurs de champ appliqué  $H_{dc}$  variant de 0 à 1000 Oe.

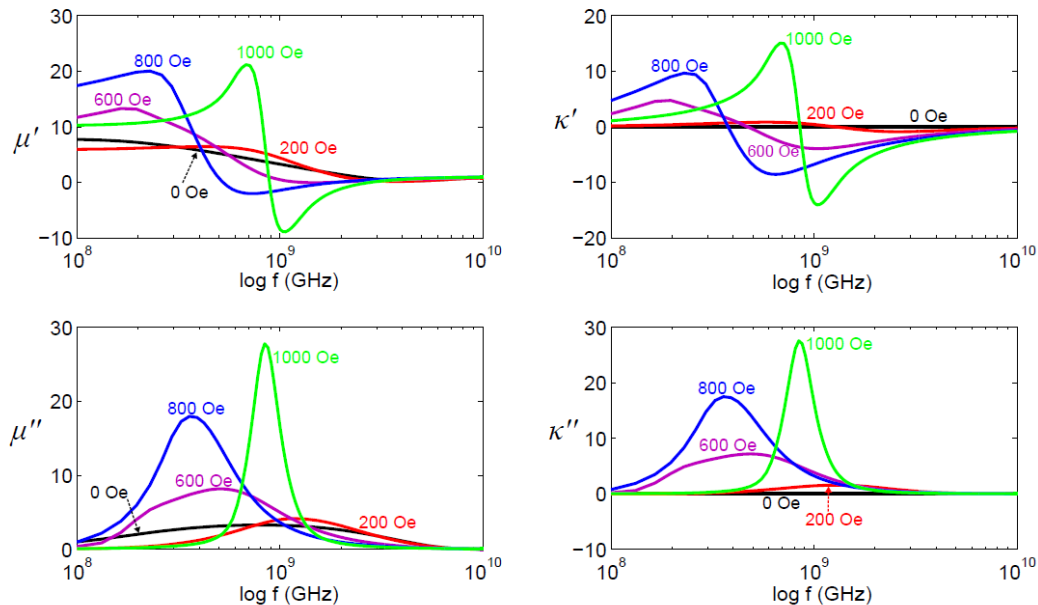


Figure 8 : Résultats de mesures des composantes du tenseur de perméabilité d'un ferrite U21 en fonction du champ appliqué

Dans un premier temps la fréquence de résonance ( $F_r$ ) décroît sous l'effet des champs démagnétisants macroscopiques. Nous expliquons ce comportement à l'aide des relations de Kittel appliquées à la forme planaire de l'échantillon. En effet en absence de champ extérieur l'organisation des moments magnétiques conduit préférentiellement à une répartition dans le plan de l'échantillon générant une fréquence de résonance plus élevée que dans le cas d'un échantillon de forme torique. Lorsque le champ magnétique augmente les moments basculent progressivement vers une direction perpendiculaire au plan de l'échantillon générant une fréquence de résonance plus basse. Au-delà d'une certaine valeur de champ tous les moments ont basculés, et voient la même forme d'échantillon. La fréquence de résonance retrouve une variation proportionnelle au champ magnétique appliqué  $F_r = \gamma \cdot H_{dc}$ . Nous observons également que la largeur du pic d'absorption diminue au fur et à mesure que le matériau s'aimante traduisant l'alignement progressif des moments magnétiques dans la direction du champ appliqué.

#### 4. CONCLUSION

La méthode de caractérisation présentée dans ce travail s'appuie, d'une part, sur la mesure d'une ligne de transmission de type triplaque rendue non réciproque par une dissymétrie de sa structure et, d'autre part, une analyse dynamique permettant de prendre en compte les modes supérieurs de propagation. Cette méthode constitue un nouvel outil permettant de mesurer le comportement dynamique des ferrites sur une large bande de fréquence quelque soit leur état d'aimantation. Les grandeurs accessibles sont les spectres de la permittivité  $\epsilon(f)$  et des composantes du tenseur de perméabilité  $\mu(f)$  et  $\kappa(f)$ . Cet outil apporte des informations supplémentaires aux paramètres mono-fréquence ( $\Delta H$  et  $\Delta H_{eff}$ ) habituellement déterminés pour décrire le comportement dynamique des ferrites saturés et permettra d'établir en particulier la variation de  $\Delta H$  en fonction de la fréquence, ce que les techniques standards actuelles ne permettent pas.

#### 5. REFERENCES

- [1] Chen, LF. *et al.* « Microwave Electronics measurement and materials characterisation », Wiley, (2004).
- [2] Hines M., « Reciprocal and Nonreciprocal Modes of Propagation in Ferrites Stripline and Microstrip Devices », *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 19, 1971.
- [3] Lezaca, J *et al.* « Broadband permeability measurement method for ferrites at any magnetization state: direct problem » *Int. J. of Microwave Wireless Technologies*, doi:10.1017/S1759078711000341 (2011).
- [4] Lezaca, J. « Conception et réalisation d'une méthode de caractérisation hyperfréquence large bande : application à la mesure des propriétés électromagnétiques des diélectriques et des ferrites aimantés » *thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale*, (2011).
- [5] Gelin, P. *et al.*, « Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators », *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, (2008).