



**HAL**  
open science

# Méthode de caractérisation de la réponse dynamique de matériaux magnétique dans un état d'aimantation quelconque : problème direct

Jorge Lezaca, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

## ► To cite this version:

Jorge Lezaca, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Méthode de caractérisation de la réponse dynamique de matériaux magnétique dans un état d'aimantation quelconque : problème direct. JCMM 2010 : 11èmes journées de caractérisation microondes et matériaux, Mar 2010, Brest, France. hal-00487223

**HAL Id: hal-00487223**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00487223>**

Submitted on 7 Jun 2010

**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 DE LA REPONSE DYNAMIQUE DE MATERIAUX MAGNETIQUE DANS UN ETAT D'AIMANTATION QUELCONQUE : PROBLEME DIRECT

*Jorge LEZACA<sup>1</sup>, Patrick QUEFFELEC<sup>1</sup>, Alexis CHEVALIER<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Lab-STICC UMR 3192 -Université de Bretagne Occidentale –Université Européen de Bretagne

### 1. RESUME

Ce travail décrit l'analyse électromagnétique (E.M.) d'une structure de propagation de type triplaque dont la section transversale est partiellement remplie du matériau magnétique anisotrope à caractériser. L'approche théorique retenue est basée sur l'analyse modale des différentes régions de la structure et, aux discontinuités, du raccordement des champs associés à chaque mode. Une méthode particulière de recherche, en variable complexe, des racines de l'équation caractéristique a été développée. Les diagrammes de dispersion et les paramètres S traduisant le caractère non-réciproque de la structure sont présentés. Il s'agit de la première étape dans la mise en œuvre d'une nouvelle technique de mesure large bande « in situ » (environnement E.M. réel) des composantes du tenseur de perméabilité et de la permittivité des ferrites aimantés. Des procédures basées sur cette méthode de caractérisation pour trouver la largeur de raie à mi-hauteur  $\Delta H$  à différentes fréquences et la fréquence de résonance gyromagnétique des ferrites sont décrites.

### 2. INTRODUCTION

Les ferrites sont largement utilisées dans le domaine des microondes pour leurs caractères non-conducteur, non-réciproques et la dépendance de leur réponse dynamique (perméabilité) vis-à-vis de leur état de polarisation (état d'aimantation). Le matériau magnétique inséré dans le dispositif microonde est généralement aimanté par un champ extérieur. Selon l'application, l'état d'aimantation du dispositif micro-onde varie (Fig. 1a). Le comportement dynamique des ferrites est alors décrit par une perméabilité tensorielle (Fig. 1b). Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des méthodes de caractérisation qui permettent de remonter aux éléments du tenseur de perméabilité quelque soit l'état d'aimantation.

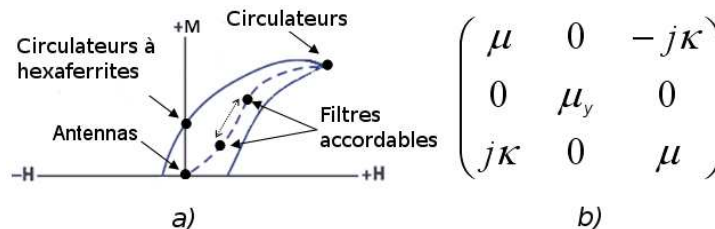


Fig. 1. a) états d'aimantation exploités dans les dispositifs micro-ondes à ferrite conventionnels. b) tenseur de perméabilité.

### 3. CARACTERISATION DES FERRITES : ETAT DE L'ART.

Actuellement, il existe plusieurs méthodes de caractérisation des matériaux magnétiques dans le domaine des hyperfréquences. Dans le cas des ferrites désaimantés, la méthode basée sur l'utilisation d'une ligne de transmission de type coaxiale est la plus utilisée [1]. Cette méthode donne accès à la perméabilité scalaire effective et ne peut pas être utilisée pour déterminer les éléments du tenseur de perméabilité lorsque l'échantillon est aimanté. Pour les ferrites saturées, les méthodes mono-fréquence, en cavités résonantes généralement, sont utilisées [2]. Ces méthodes donnent la largeur à mi-hauteur  $\Delta H$  de la raie d'absorption du matériau, grandeur représentant les pertes magnétiques, à une fréquence de 9,4 GHz dans le cas de la méthode standard. L'utilisation de ces méthodes résonnantes à d'autres fréquences reste limitée en raison de la taille des cavités et celle des échantillons à mettre en œuvre à plus basses fréquences.

Nous avons développé au laboratoire une méthode de caractérisation large-bande qui permet de remonter aux éléments du tenseur de perméabilité [3]. Cette méthode basée sur une analyse quasi-statique d'une ligne microruban reste cependant limitée à quelques GHz du fait de l'approximation quasi-statique d'une part, et des résonances de dimension liées à la largeur de l'échantillon d'autre part.

## 4. DESCRIPTION DE LA METHODE

### 4.1 Cellule de mesure :

Dans le but d'étendre la mesure large bande du tenseur de perméabilité à des fréquences plus élevées, nous proposons ici une méthode de caractérisation basée sur l'analyse dynamique d'une ligne triplaue (Figure 2a).

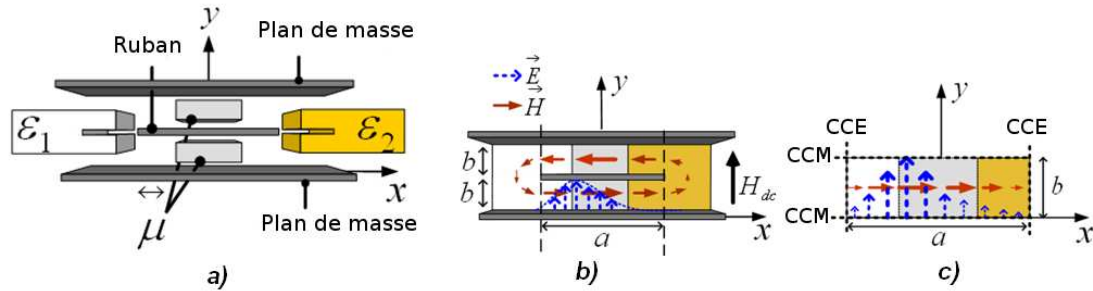


Fig. 2. a) Ligne triplaue. b) Carte des champs pour la propagation directe. c) Structure théorique équivalente

Cette ligne est partiellement remplie aux extrémités par deux diélectriques de permittivité différente et au centre par deux échantillons identiques du matériau magnétique à caractériser. Le reste de la ligne est constitué d'air. Dans cette configuration, le matériau magnétique induit un déplacement d'énergie différent selon le sens de propagation de l'onde (direct et rétrograde). La Figure 2.b. montre le déplacement d'énergie pour la propagation direct; pour la propagation rétrograde l'énergie est déplacée vers l'autre bord du ruban. Grâce à cet effet de déplacement de champs, associé à l'asymétrie de la structure de propagation, l'onde interagit avec un diélectrique différent suivant le sens de propagation rendant la ligne non-réciproque ( $S_{12} \neq S_{21}$ ). Cette non-réciprocité de la cellule de mesure est indispensable pour remonter aux éléments du tenseur car elle apporte le nombre nécessaire de paramètres mesurables (paramètres  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ) pour remonter aux variables du tenseur ( $\mu$ ,  $\kappa$ ,  $\mu_y$ ). La structure de propagation choisie est une ligne triplaue parce que le mode dominant de propagation est le mode TEM (Transverse Electromagnétique). Ce mode de propagation est entièrement décrit par la théorie classique de champs E.M. à la différence des modes Quasi-TEM (apparaissant dans les lignes coplanaire ou microruban) auxquelles doivent être apportés des facteurs correctifs afin d'obtenir une description réaliste du phénomène de propagation. Le rapport géométrique  $a/b$  de la structure (Fig. 2b) est choisi très supérieur à 1 afin limiter les effets de bords et concentrer l'essentiel de l'énergie électromagnétique entre le plan masse et le ruban [4]. Dans ces conditions, la structure réelle peut être représentée par une structure équivalente simplifiée (Fig. 2.c.). Dans cette structure des conditions aux limites de type court circuit électrique (CCE) sont appliquées pour remplacer le plan masse et le ruban et de type court circuit magnétique (CCM) perpendiculairement aux bords latéraux du ruban.

### 4.2 Analyses dynamique :

Le programme de dépouillement des mesures comporte deux parties: le problème direct qui calcule les paramètres S théoriques de la cellule de mesure et le problème inverse qui optimise les variables du tenseur de perméabilité ( $\mu$ ,  $\kappa$ ,  $\mu_y$ ) afin d'ajuster les paramètres S théoriques aux paramètres S mesurés. Nous présentons ici le problème direct. Celui se base sur l'analyse dynamique de la cellule en définissant les champs EM dans chaque matériau. Pour calculer les champs dans les éléments magnétiques au départ inconnus, nous utilisons le modèle de tenseur de perméabilité «General Permeability Tensor» (GPT) [5]. Ce model a comme paramètres d'entée les propriétés statiques, pertes, et paramètres géométriques du matériau magnétique. Il décrit le comportement dynamique des composantes du tenseur de perméabilité ( $\mu$ ,  $\kappa$ ,  $\mu_y$ ) sur une large bande de fréquences en prenant en compte son état d'aimantation. Ensuite, l'application des conditions de continuité sur les deux discontinuités diélectrique/ferrite permet d'obtenir un système de quatre équations à quatre inconnues en variable complexe. Pour déterminer les valeurs propres de ce système d'équations (constantes de propagation des différents modes propagés ou évanescents) nous avons développé une procédure numérique basée sur la combinaison de la méthode dichotomique étendue au plan complexe et de la méthode de Müller. Cette procédure permet d'obtenir les coefficients de propagation pour les  $n$  premiers modes souhaités. La figure

3 présente les 8 premiers coefficients de propagation pour un ferrite saturé. Le caractère non réciproque de la structure est clairement mis en évidence par les écarts observables entre les modes directs et rétrogrades. Nous remarquons également qu'en basse fréquence les modes supérieurs commencent à propager de l'énergie sous forme de modes magnétostatiques, ce qui montre l'importance de prendre en compte suffisamment de modes dans l'analyse.

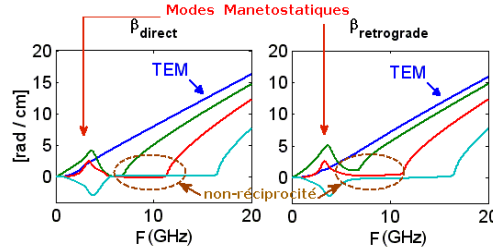


Fig. 3. Diagramme de dispersion non réciproque de la section chargée de la cellule de mesure.

Enfin pour obtenir les paramètres  $S$  de la ligne de transmission nous effectuons le raccordement modal sur les plans d'entrée et de sortie selon la direction de propagation ( $Oz$ ) pour les  $n$  premiers modes excités. En utilisant les propriétés d'orthogonalité des modes, les coefficients de couplage sont identifiés. Les Paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  ont une relation directe avec les coefficients de couplage. Pour l'identification des paramètres  $S_{22}$  et  $S_{12}$ , la procédure est la même mais avec une excitation du mode fondamental TEM provenant du cote opposé de la structure. La figure 4 présente la validation de notre problème direct par une comparaison des paramètres  $S$  théoriques obtenus par notre méthode et ceux simulés par le logiciel HFSS®.

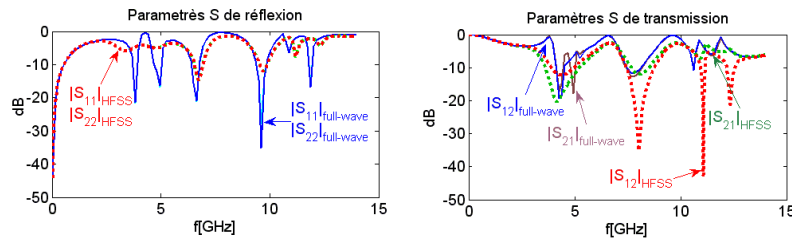


Fig. 4. Comparaison des paramètres  $S$  du problème direct avec ceux issus du logiciel HFSS pour une ferrite saturé ( $4\pi Ms=1200$  G,  $H_a=380$  Oe,  $\epsilon=14,9-j0,01$ ,  $\tan(\gamma)<2\cdot 10^{-4}$ ,  $H_{dc}=2kOe$ )  $\epsilon_1=1,07-j0,01$  (mousse)  $\epsilon_2=15,5-j0,01$  ( $TiO_2$ ).

## 5. APPLICATIONS DE LA METHODE

### 5.1 Mesure de la largeur de raie à mi-hauteur :

La représentation des pertes magnétiques des ferrites à partir de la largeur à mi-hauteur de la raie d'absorption (courbe  $\mu''(H_{dc})$ ) n'a de sens que pour les ferrites saturés. En effet, cette grandeur apparaît dans les formulations des éléments diagonaux et extra-diagonaux du tenseur de perméabilité issues de l'approche de Polder (théorie du macro-spin). Les procédures classiques pour la détermination de la largeur de raie  $\Delta H$  utilisent des cavités résonantes (mesure à la fréquence de résonance de la cavité de la perméabilité d'un échantillon pour différentes valeurs du champ statique de polarisation) [2].

Etant donné que la fréquence de résonance de la cavité est directement liée à sa taille, ces méthodes sont difficilement utilisables à basse ou très haute fréquence pour mesurer  $\Delta H$ . La méthode de caractérisation que nous proposons permettra de développer une procédure pour caractériser  $\Delta H$  sur une large-bande en une seule phase expérimentale. L'avantage majeur de cette approche est la possibilité de déterminer  $\Delta H$  en basse fréquence où les méthodes classiques souffrent de l'usage de cavités et d'échantillons volumineux. La détermination précise de  $\Delta H$  requiert la connaissance du champ statique qui règne à l'intérieur de l'échantillon de ferrite. Seul des échantillons de forme ellipsoïdale permette un calcul exacte du champ interne connaissant le champ appliqué extérieurement, à l'aide par exemple d'un électroaimant. Dans notre cas, puisque l'échantillon se présente sous la forme d'une plaquette parallélépipédique, ce calcul serait approché. Nous avons donc opté pour la minimisation des champs démagnétisants. Pour cela, les matériaux métalliques (ruban et plan masse) sont remplacés par un matériau ferromagnétique et le circuit magnétique est fermé avec les pôles d'un électroaimant comment le montre la Fig. 5.a. Dans cette configuration, le Champ  $H_{int}$  dans le ferrite est proche en intensité du champ

$H_{dc}$  créé par l'électroaimant. Ensuite, la méthode de caractérisation développée est utilisée pour déterminer les composants du tenseur de perméabilité ( $\mu'$ ,  $\mu''$ ,  $\kappa'$  et  $\kappa''$ ) à différents états d'aimantation (Fig. 5.b). Afin de déterminer  $\Delta H$  à une certaine fréquence, les spectres de la partie imaginaire de la perméabilité diagonale ou extra-diagonale mesurés pour différentes valeurs du champ statique de polarisation  $H$  sont exploités pour déduire la courbe  $\mu''(H)$  à la fréquence souhaitée comme l'illustre la Fig. 5.c à la

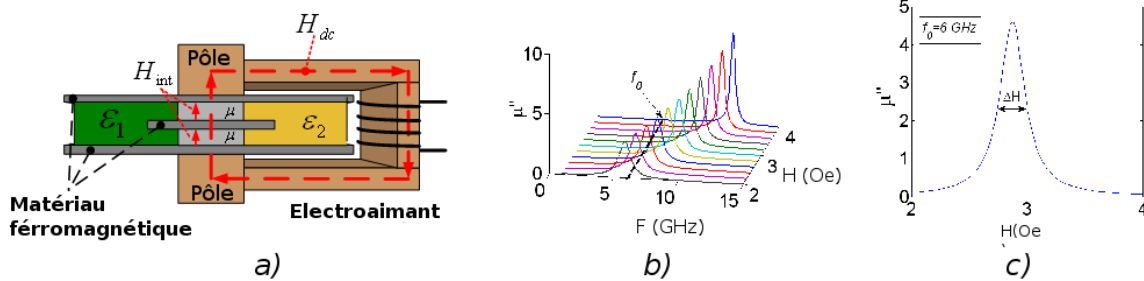


Fig. 5. a) Circuit pour mesurer  $\Delta H$ . b)  $\mu''$  à différents états de aimantation  $H$ . fréquence de 6GHz.

### 5.2 Mesure de la fréquence de résonance gyromagnétique:

La figure 6 montre la différence entre la fréquence d'absorption maximale le long de la ligne de transmission (minimum du module du coefficient de transmission) et la fréquence de résonance gyromagnétique du matériau magnétique issue de notre analyse dynamique. Cette différence est due à la non-homogénéité de la section transversale de la ligne de transmission. L'étude dynamique développée nous permet d'avoir une relation directe entre ces deux quantités basée sur la résolution des équations de Maxwell.

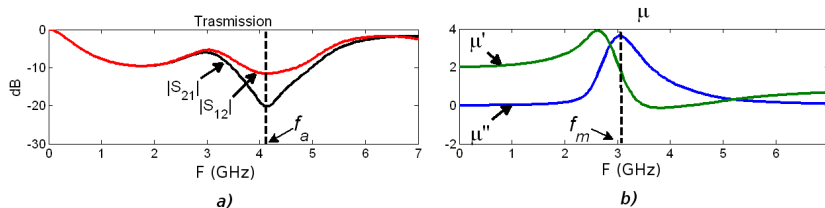


Fig. 6. a) fréquence de absorption. b) résonance gyromagnétique réel.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Avec cette méthode de mesure, il sera non seulement possible d'obtenir directement les spectres des éléments du tenseur de perméabilité sur une gamme de fréquences étendue, mais aussi d'autres paramètres qui caractérisent les propriétés magnétiques des ferrites, car les spectres obtenus seront mesurés pour différentes intensités du champ statique de polarisation. Nous aurons donc accès à des caractéristiques telles que la largeur de raie  $\Delta H$  pour différentes fréquences, la résonance gyromagnétique réelle (et non équivalente) du matériau magnétique ou encore le facteur de Landé  $g$ .

## 7. REFERENCES

- [1] A. Nicolson and G. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM19, no. 4, pp. 337-382, Nov. 1970.
- [2] Gyromagnetic materials intended for application at microwave frequencies - Measuring methods for properties, IEC Std. 60556, 2006.
- [3] P. Quéffelec, S. Malledol and M. le Floch, "Automatic Measurement of Complex Tensorial Permeability of Magnetized Materials in a Wide Microwave Frequency Range", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, pp. 2128-2134, 2002.
- [4] M. Hines, "Reciprocal and Nonreciprocal Modes of Propagation in Ferrites Stripline and Microstrip Devices," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-19, pp. 442-451, 1971
- [5] P. Gelin and P. Quéffelec, "Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 24-31, 2008.