



**HAL**  
open science

# Méthode de caractérisation électromagnétique large bande des métamatériaux

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

► **To cite this version:**

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Méthode de caractérisation électromagnétique large bande des métamatériaux. TELECO2011 & 7ème JFMMA, Mar 2011, Tanger, Maroc. pp.ID66. hal-00678508

**HAL Id: hal-00678508**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00678508>**

Submitted on 19 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 ELECTROMAGNETIQUE LARGE BANDE DES METAMATERIAUX

<sup>1</sup>S. Gomez; <sup>1</sup>P. Quéffélec; <sup>1</sup>A. Chevalier

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

[sandra.gomez@univ-brest.fr](mailto:sandra.gomez@univ-brest.fr); [patrick.queffelec@univ-brest.fr](mailto:patrick.queffelec@univ-brest.fr); [alexis.chevalier@univ-brest.fr](mailto:alexis.chevalier@univ-brest.fr)

**Resumé:** The design of new types of metamaterials and the development of applications require good knowledge of their electromagnetic properties. Many characterization methods have been proposed to find the permittivity and permeability but due to the particular structure of these materials some key considerations must be taken into account. In this work an “in-situ” method for obtaining the complex parameters is presented. The measurement cell consists in a stripline which produces the adequate conditions identified for the characterization of this type of structures. The advantages of using this cell, its electromagnetic analysis and some experimental and simulated results are presented.

**Key words:** Métamatériaux, perméabilité, permittivité, ligne triplaque.

### I. INTRODUCTION

LES métamatériaux sont des matériaux artificiels qui présentent des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément. La caractéristique la plus intéressante est la possibilité de contrôler ou de modifier la permittivité et la perméabilité du matériau pour obtenir un comportement adapté à une application spécifique.

Les métamatériaux sont utilisés pour améliorer les performances des antennes, des filtres et des coupleurs. Leur principal avantage est la miniaturisation des dispositifs grâce à un indice de réfraction assez facilement ajustable que peut même être négatif à certaines fréquences [1].

En général, les métamatériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique. Parmi les structures les plus connues nous trouvons le Split Ring Resonator (SRR) ou Résonateur en Anneau Fendu (RAF) et les métasolénoïdes [2], [3].

L'interaction des champs électromagnétiques avec les inclusions produit le comportement résonant typique qui caractérise les métamatériaux. Le champ magnétique induit un courant dans les anneaux métalliques produisant un effet inductif. Un effet capacitif apparaît également entre les parties métalliques placées à différents potentiels. Ces interactions sont à l'origine de valeurs négatives de l'indice de réfraction lorsque la permittivité et la perméabilité du matériau sont simultanément négatives.

Les autres caractéristiques particulières des métamatériaux sont l'hétérogénéité, l'anisotropie et la dispersion de leurs paramètres constitutifs. La dispersion : dépendance en fréquence de la permittivité  $\epsilon$  et la perméabilité  $\mu$ , requiert des études large bande pour bien appréhender le comportement dynamique du matériau. La propriété d'anisotropie du métamatériau (composantes extradiagonales non nulles des tenseurs de permittivité et perméabilité), implique qu'il existe une dépendance de  $\epsilon$  et  $\mu$  par rapport à la direction de l'excitation. Enfin, le caractère fortement hétérogène du métamatériau complique l'utilisation des méthodes d'homogénéisation pour l'analyse de leur comportement.

Nous présentons une nouvelle méthode de caractérisation des métamatériaux utilisant une cellule de type tri-plaque asymétrique. La géométrie, la bande de fréquence et la configuration des champs électromagnétiques de cette cellule sont bien adaptées à la caractérisation des métamatériaux. Après une présentation de la cellule et de son intérêt pour la mesure de la perméabilité et de la permittivité des métamatériaux, nous montrerons quelques résultats expérimentaux obtenus sur des métasolénoïdes. Nous rappellerons également les deux analyses électromagnétiques associées et comparerons les différents résultats obtenus avec une simulation effectuée à l'aide d'un logiciel commercial (HFSS Ansoft Corp.).

### II. Méthodes de caractérisation

La caractérisation des propriétés électromagnétiques des métamatériaux constitue

une étape fondamentale pour la conception de nouvelles structures mais également pour le développement d'applications.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour choisir la structure électromagnétique la mieux adaptée, les principaux sont la bande de fréquence d'utilisation, la géométrie ainsi que l'orientation des inclusions. Cette dernière caractéristique est très importante car le comportement recherché du métamatériau n'est obtenu que pour une orientation particulière des champs électrique et magnétique vis-à-vis des inclusions.

Par exemple, dans le cas d'une structure planaire de type SRR ou métasolénoïde, le champ électrique  $E$  doit être parallèle aux boucles métalliques et le champ magnétique  $H$  perpendiculaire (Fig. 1). Il est également nécessaire que l'amplitude des champs vus par les inclusions soit constante dans tout le volume du matériau.

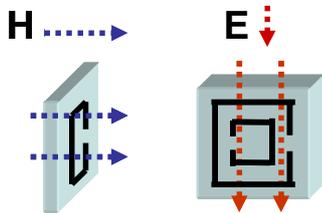


Fig. 1. Distribution idéale du champ électrique et magnétique pour un métamatériau type SRR.

Plusieurs méthodes sont actuellement employées pour caractériser les métamatériaux : on retrouve des méthodes en espace libre qui nécessitent des volumes d'échantillons importants pour des fréquences au-dessous de 10 GHz [4]. Des méthodes en cavité résonnante qui ont une grande sensibilité et qui sont bien adaptées à la caractérisation des matériaux à faibles pertes mais dont les résultats sont obtenus uniquement à une fréquence particulière [5]-[6]. Ils existent également des méthodes en ligne de transmission (guide d'onde [7] et microruban [8]) qui sont bien adaptées aux fréquences micro-ondes mais elles ne présentent pas la configuration des champs électromagnétiques requise par ce type de matériaux. Les méthodes utilisant des sondes coaxiales présentent le problème de l'adaptation de la structure du métamatériau à la forme du guide.

En général, ces méthodes sont basées sur la mesure des coefficients de réflexion et transmission des cellules chargées par le métamatériau et le calcul des valeurs de  $\epsilon$  et  $\mu$  à partir d'une analyse électromagnétique particulière à chaque configuration.

### III. La méthode en ligne triplaque

La méthode proposée ici utilise une cellule en ligne de transmission de type triplaque asymétrique

initialement développée au laboratoire pour la mesure des matériaux magnétiques [9]. En effet nous allons montrer que la configuration des champs électromagnétiques et la bande de fréquence de cette méthode est bien adaptée à la caractérisation des métamatériaux. Cette méthode permet la caractérisation 'in situ' puisqu'elle reproduit l'environnement réel rencontré en pratique au niveau des applications.

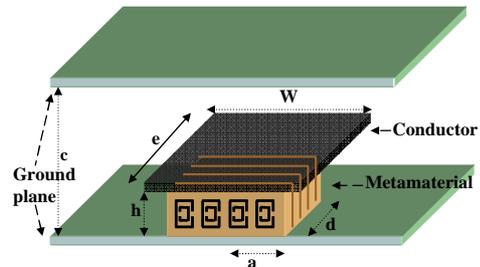


Fig. 2. Ligne triplaque asymétrique.

La cellule de mesure est composée d'un ruban conducteur entouré de deux plans de masse. Le ruban est plus proche du plan de masse inférieur afin de concentrer l'énergie dans la région où se trouve l'échantillon (Fig. 2). Dans cette région la configuration des champs électromagnétiques se rapproche de celle d'une ligne microruban : le champ électrique est parallèle aux lignes métalliques du métamatériau et le champ magnétique est perpendiculaire aux boucles. Dans cette configuration, l'amplitude des champs est constante dans tout le volume du matériau et le mode propagé est supposé quasi-TEM. Pour la mesure de métamatériaux, la largeur de l'échantillon doit rester inférieure à celle du ruban de la ligne, ce que explique que notre cellule ne peut pas être comparée à une ligne microruban réelle.

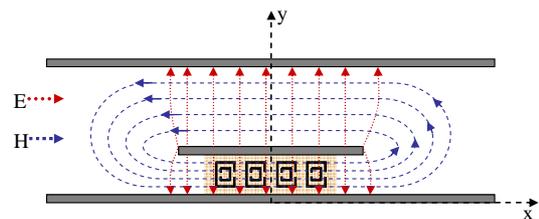


Fig. 3. Carte de champs de la ligne utilisée

La Figure 3 présente la distribution des champs électromagnétiques dans la cellule de mesure chargée par le matériau à mesurer.

Les paramètres de transmission et de réflexion (paramètres  $S$ ) sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel puis une analyse électromagnétique permet de remonter à la permittivité et la perméabilité du matériau. Deux types d'analyse électromagnétique ont été utilisés pour calculer  $\epsilon$  et  $\mu$ . Elles sont toutes les deux basées sur l'approximation quasi-statique.

## La méthode variationnelle

La section transverse réelle de la cellule est composée de plusieurs couches différentes (air au dessus du ruban, lames d'air au dessus et au dessous du matériau) (Fig. 4b). La théorie variationnelle consiste à homogénéiser la section transversale de la ligne et à la représenter par une permittivité et perméabilité effective (Fig. 4a) [9]. En utilisant les fonctions de Green il est possible de déterminer la capacité et l'inductance par unité de longueur de la structure équivalente effective. Les valeurs théoriques des paramètres effectifs ( $\epsilon^{th}$  et  $\mu^{th}$ ) s'expriment alors en fonction des capacités et inductances de la cellule chargées et celles de la cellule à vide ( $C_0$  et  $L_0$ ).

$$\mu_{eff}^{th} = \frac{L}{L_0} \text{ and } \epsilon_{eff}^{th} = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

Nous pouvons ensuite calculer de façon analytique les coefficients de transmission  $S_{21}$  et de réflexion  $S_{11}$  de la cellule de mesure à l'aide de la technique de Nicolson et Ross [10]. Ceci correspond au problème direct.

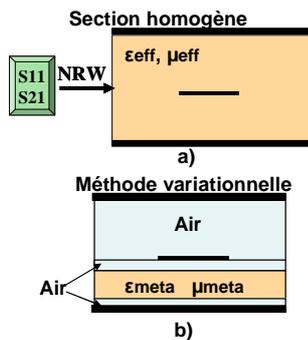


Fig. 4. Procédure pour la méthode variationnelle

Pour obtenir les paramètres intrinsèques du métamatériau à partir des mesures, un problème inverse doit être résolu. Celui-ci consiste à minimiser une fonction erreur entre les paramètres S mesurés et les paramètres S théoriques.

## La théorie des lignes de transmission

La géométrie asymétrique de la cellule triplaque permet d'approximer son comportement à celui d'une ligne biplaque caractérisée par une permittivité effective (Fig 5).

La méthode quasi-statique basée sur la théorie des lignes de transmission considère que seul le mode quasi-TEM se propage. Le problème direct consiste à obtenir les paramètres S en fonction des propriétés électromagnétiques de l'échantillon. Le problème inverse calcule les relations analytiques entre  $\epsilon$  et  $\mu$  et les paramètres S mesurés en utilisant les expressions de Nicolson-Ross-Weir. Cette procédure évite l'emploi d'un procès d'optimisation puisque des relations analytiques permettent

d'exprimer les paramètres constitutifs du matériau directement en fonction de la constante de propagation et l'impédance de la ligne [11].

Les lames d'air situés entre l'échantillon et le ruban conducteur et le plan de masse inférieur induisent des erreurs sur la détermination des paramètres électriques du matériau. Nous avons utilisé la loi de Wiener pour prendre en compte ces lames d'air dans les expressions de  $\mu_r$  et  $\epsilon_r$  données par 2 et 3 :

$$\mu_r = \frac{\omega \mu_0 h_a (1-R) - Z_0 W(\gamma)(1+R)}{\omega h_s \mu_0 \epsilon_0 (R-1)} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{h_s (\gamma^2)}{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 (h_s \mu_r + h_a) - h_a (\gamma^2)} \quad (3)$$

ou  $\omega$  est la pulsation angulaire,  $W$  est le largeur du ruban,  $h_a$  la hauteur de lame d'air,  $h_s$  la hauteur du substrat à mesurer,  $Z_0$  l'impédance caractéristique de la cellule,  $R$  le coefficient de réflexion et  $\gamma$  la constante de propagation.

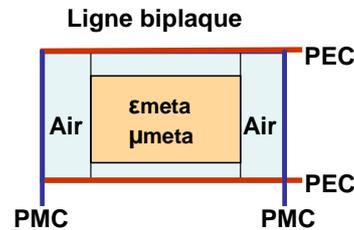


Fig. 5. Procédure pour la méthode quasi-statique TL

En utilisant la méthode quasi-statique nous obtenons les paramètres effectifs. Pour prendre en compte l'effet de l'air au-dessus du ruban, le modèle de ligne de transmission microruban proposé par Hammerstad est employé et les paramètres intrinsèques sont obtenus.

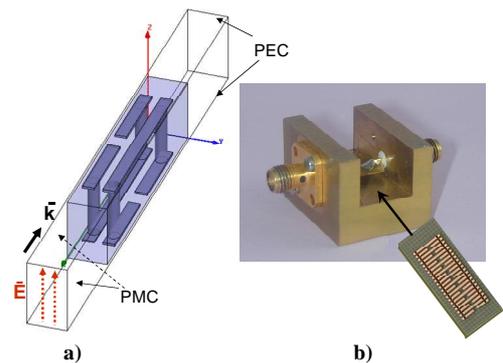


Fig. 6. Cellule élémentaire et la méthode tri-plaque

## IV. Résultats

La Figure 6a montre le type de métamatériau que nous avons mesuré et la configuration de la simulation effectuée sur HFSS. Celui-ci est composé d'un réseau de SRR imprimés sur un substrat diélectrique [12]. La taille de l'échantillon est bien adaptée à notre cellule de mesure et le matériau est placé dans la région sous le ruban qui

présent une configuration adaptées des champs électromagnétiques. La Figure 6b présente l'insertion de l'échantillon constitué de onze cellules élémentaires dans la cellule de mesure.

Les figures 7 à 10 présentent les résultats de mesure obtenus pour la perméabilité et la permittivité du matériau sur la bande de fréquence 10 MHz à 6 GHz. Nous pouvons observer la similitude entre les deux méthodes d'extraction des paramètres S et les simulations réalisés à l'aide du logiciel HFSS.

Le comportement résonant typique de ce type de matériaux est complètement caractérisé et nous pouvons bien différencier les bandes de fréquence ou la permittivité et perméabilité présentent des valeurs particulières.

Les différences observées entre la courbe TL sans prendre en compte les lames d'air (rouge) et la courbe TL corrigée (vert) (Fig. 7), montrent l'importance de corriger les valeurs obtenues à

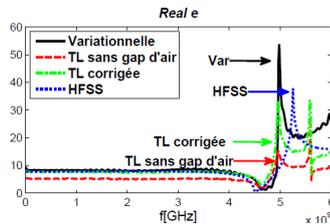


Fig. 7. Partie réelle de la permittivité du métamatériau.

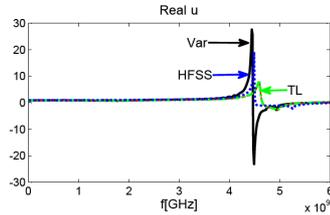


Fig. 8. Partie réelle de la perméabilité du métamatériau

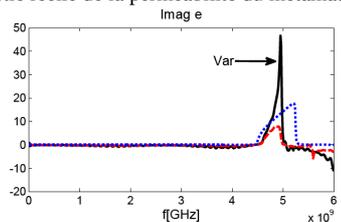


Fig. 9. Partie imaginaire de la permittivité du métamatériau

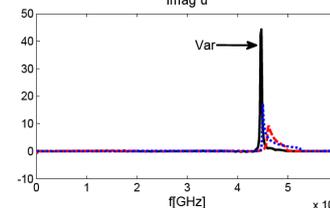


Fig. 10. Partie imaginaire de la perméabilité du métamatériau

partir des lois des milieux effectifs.

## V. Conclusion

Nous avons étudié une nouvelle méthode de caractérisation in-situ appliquée à la mesure des

paramètres électromagnétiques des métamatériaux. La configuration des champs électromagnétiques à l'intérieur de la cellule proposée permet l'excitation adaptée pour une réponse résonante caractéristique de ce type de matériaux.

Deux méthodes d'analyse électromagnétique ont été appliquées pour obtenir les paramètres intrinsèques du matériau, une bonne concordance entre ces deux méthodes et les simulations numériques a été observée.

## VI. Références

- [1] K. Buell, H. Mosallaei, and K. Sarabandi, "A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, p. 135U-146, 2006S.
- [2] Maslovski, P. Ikonen, I. Kolmakov, and S. Tretyakov, "Artificial magnetic materials based on the new magnetic particle: Metasolenoid," *Progress In Electromagnetics Research (PIER)*, vol. 54, p. 61-81, 2005.
- [3] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Physical Review*, vol. 71, pp. 1-11, 2005
- [4] R. B. Gregor, C. G. Parazzoli, K. Li, B. E. C. Koltenbah, and M. Tanielian, "Experimental determination and numerical simulation of the properties of negative index of refraction materials," *Optics Express*, vol. 11, p. 688-695, 2003.
- [5] K. Buell and K. Sarabandi, "A method for characterizing complex permittivity and permeability of meta-materials," *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, p. 408U-411, 2002.
- [6] L. Chen, C. K. Ong, and B. T. G. Tan, "Cavity perturbation technique for the measurement of permittivity tensor of uniaxially anisotropic dielectrics," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, p. 1023-1030, 1999.
- [7] H. Chen, J. Zhang, Y. Bai, Y. Luo, L. Ran, Q. Jiang, and J. A. Kong, "Experimental retrieval of the effective parameters of metamaterials based on a waveguide method," *Optics Express*, vol. 14, p. 12944U-12949, 2006.
- [8] L. Yousefi, H. Attia, and O. M. Ramahi, "Broadband experimental characterization of artificial magnetic materials based on a microstrip line method," *Progress In Electromag. Research*, vol. 90, pp. 1-13, 2009.
- [9] E. Salahun, P. Quéffélec, M. L. Floc'h, and P. Gelin, "A broadband permeameter for "in situ" measurements of rectangular samples," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, pp. 2743-2745, 2001.
- [10] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-19, pp. 377-382, Nov. 1970.
- [11] P. Quéffélec, S. Mallégo, and M. L. Floc'h, "Automatic measurement of complex tensorial permeability of magnetized materials in a wide microwave frequency range," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, pp. 2128-2134, 2002.
- [12] W. Abdouni, A. C. Tarot, and A. Sharaiha, "Theoretical and experimental effective parameters of metamaterial substrate," *EuCAP*, pp. 3214 - 3217, 2009.