

# Méthode de mesure basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation électromagnétique des métamatériaux

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

► **To cite this version:**

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Méthode de mesure basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation électromagnétique des métamatériaux. 17èmes Journées Nationales Microondes, May 2011, Brest, France. pp.1E-3. hal-00678491

**HAL Id: hal-00678491**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00678491>**

Submitted on 13 Mar 2012

**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.

## Méthode de mesure basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation électromagnétique des métamatériaux

Sandra Gómez<sup>1</sup>, Patrick Quéffelec<sup>1</sup>, Alexis 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

Sandra.Gomez@univ-brest.fr : correspondant principal

### Résumé

Une méthode large bande en ligne triplaque pour mesurer des propriétés électromagnétiques (permittivité  $\epsilon$  et perméabilité  $\mu$  complexes) des métamatériaux est présentée. La bande de fréquence, la géométrie et la configuration des champs électromagnétiques de la ligne utilisée sont bien adaptées à la caractérisation de ce type de matériaux. La description de la cellule, les conditions nécessaires pour garantir la validité des mesures et quelques résultats expérimentaux sont présentés.

### 1. Introduction

Les métamatériaux sont des structures composites qui présentent des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément. Parmi ces qualités nous trouvons la possibilité de modifier la permittivité et la perméabilité du matériau pour obtenir un comportement adapté à une application spécifique.

Les principales caractéristiques de ces matériaux sont l'hétérogénéité, l'anisotropie et la dispersion. La dispersion requiert des études large bande pour bien appréhender leur comportement selon la fréquence. La propriété d'anisotropie du métamatériau implique que les valeurs de  $\epsilon$  et  $\mu$  dépendent de l'orientation du champ électromagnétique. Enfin, le caractère hétérogène pose la question de la validité des méthodes d'homogénéisation pour l'analyse de leur réponse en hyperfréquences.

Généralement les métamatériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique. Les formes les plus utilisées pour ces motifs sont les réseaux d'anneaux circulaires ou carrés de type Split Ring Resonator (SRR) ou métasolénoïdes [1]. L'interaction des champs électromagnétiques avec les inclusions est à l'origine du comportement résonant typique des métamatériaux. Pour bien caractériser ces structures il est donc nécessaire de respecter une orientation adaptée du champ électromagnétique. En effet, le champ électrique  $E$  doit être parallèle aux boucles métalliques et le champ magnétique  $H$  perpendiculaire.

Cet article présente une méthode de caractérisation des métamatériaux utilisant une ligne de type triplaque asymétrique. D'abord, nous présenterons la cellule et son

intérêt pour la mesure de la perméabilité et de la permittivité des métamatériaux. Puis nous présenterons deux méthodes d'analyse électromagnétique différentes de la cellule et les résultats expérimentaux obtenus sur des métasolénoïdes respectivement à partir des deux approches. Enfin nous monterons la procédure suivie pour valider les paramètres obtenus, la détermination de la taille minimale de l'échantillon et l'influence de la cellule de mesure sur le comportement du matériau.

### 2. Méthodes de caractérisation

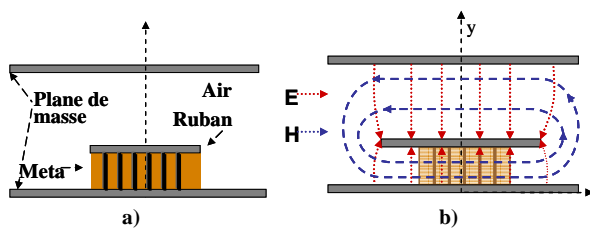
En général les méthodes de caractérisation des métamatériaux sont basées dans un premier temps sur la mesure des coefficients de réflexion et de transmission de cellules chargées par l'échantillon à caractériser puis dans un deuxième temps sur le calcul des valeurs de  $\epsilon$  et  $\mu$  à partir d'analyses électromagnétiques adaptées à la géométrie de la cellule et la bande de fréquence exploitée.

Les techniques les plus utilisées actuellement pour caractériser les métamatériaux sont réalisées en espace libre, en cavité résonnante ou en ligne de transmission [2]. La première méthode (espace libre), est recommandée pour les très hautes fréquences. Cependant pour des applications au-dessous de 10 GHz, des volumes importants d'échantillons sont nécessaires. La seconde (cavité résonnante), présente une grande sensibilité et est bien adaptée à la caractérisation des matériaux à faibles pertes mais avec l'inconvénient d'être mono-fréquence. Enfin, les méthodes en ligne de transmission (guide d'onde et microruban) sont bien adaptées aux fréquences micro-ondes mais elles ne présentent pas toujours la configuration des champs électromagnétiques requise par ce type de matériaux.

### 3. La cellule 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 [3]-[4]. Cette cellule 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 (figure 1.a). L'échantillon doit être

placé dans la cellule de telle façon à ce que le champ électrique soit parallèle aux lignes métalliques du métamatériau et le champ magnétique soit perpendiculaire aux boucles, et ce pour l'ensemble des cellules élémentaires constituant l'échantillon (figure 1.b). Dans l'hypothèse quasi-statique où il se propage dans la structure qu'un mode quasi-TEM, cette condition est respectée si l'on place l'échantillon dans la région située entre le ruban métallique de la ligne et son plan de masse inférieur (figure. 1.a). La largeur de l'échantillon sera donc inférieure à celle du ruban. L'amplitude des champs électrique et magnétique est également constante dans tout le volume du matériau. Le type de mesure réalisée peut-être considéré comme 'in situ' puisque la cellule reproduit un environnement électromagnétique proche de celui rencontré en pratique pour les applications planaires (antennes patch, par exemple). Après la mesure des paramètres de transmission et de réflexion de la cellule, une étude électromagnétique est effectuée pour remonter aux paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$  du matériau. Deux types d'analyse électromagnétique basés sur l'approximation quasi-statique ont été utilisés pour calculer  $\epsilon$  et  $\mu$ .



**Figure 1.** a) Ligne triplaque asymétrique.  
b) Carte des champs.

### 3.a. La méthode variationnelle

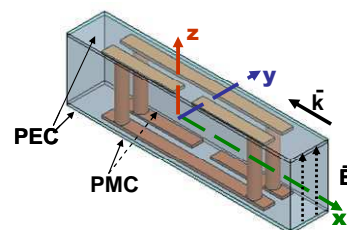
La première méthode est une approche variationnelle qui considère que la section transverse réelle de la cellule chargée peut être décomposée en plusieurs couches horizontales différentes (air au dessus du ruban, lames d'air au dessus et au dessous du matériau). Cette méthode variationnelle consiste à homogénéiser la section transverse et à la représenter par une permittivité et perméabilité effective. Puis en utilisant les fonctions de Green, il est possible de calculer la capacité et l'inductance de la cellule et de relier les paramètres effectifs ( $\epsilon_{\text{eff}}$  et  $\mu_{\text{eff}}$ ) de la section transverse de la ligne aux valeurs trouvées pour la cellule chargée ( $C, L$ ) et à vide ( $C_0, L_0$ ). Ceci correspond au problème direct. Ensuite, les formulations de NRW [5] permettent d'exprimer les paramètres effectifs à partir des coefficients de transmission  $S_{21}$  et de réflexion  $S_{11}$  mesurés à l'analyseur de réseau. Enfin, un problème inverse est utilisé pour obtenir les paramètres intrinsèques du métamatériau à partir des mesures. Nous employons une procédure d'optimisation qui consiste à minimiser une fonction erreur représentant la distance euclidienne entre les grandeurs ( $C, L$ ) théoriques et celles déduites des paramètres  $S$  mesurés de la cellule.

### 3.b. La méthode en ligne de transmission

La deuxième méthode, basée sur la théorie des lignes de transmission, considère que la ligne triplaque asymétrique peut-être approximée à une ligne biplaque constituée par le ruban métallique et le plan de masse inférieur. Les plans latéraux situés de part et d'autre du ruban, perpendiculaires à ce dernier, sont considérés comme des plans de court-circuit magnétique. L'analyse électromagnétique de cette structure équivalente se réduit au calcul de la capacité et de l'inductance par unité de longueur de la section transverse de la ligne biplaque. Cette fois, il existe des relations analytiques permettant d'exprimer directement les paramètres constitutifs du matériau en fonction de la constante de propagation et de l'impédance de la ligne. Cette méthode permet d'éviter l'emploi d'une procédure d'optimisation pour inverser le problème. Afin de prendre en compte la présence éventuelle de lames d'air entre l'échantillon et les plans métalliques nous apportons une correction à l'aide d'une loi de mélange de type Wiener. Enfin, la dernière étape pour obtenir les paramètres intrinsèques, consiste à appliquer le modèle d'Hammerstad d'une ligne microruban pour prendre en compte l'air au dessus du ruban central.

## 4. Résultats de mesure

Le métamatériau mesuré (figure 2) est de type métasolénoïde, fabriqué par l'IETR de l'Université de Rennes [6] en utilisant une technologie d'impression double face associée à des via métalliques. La figure 3 présente la permittivité mesurée obtenue pour le matériau sur la bande de fréquence 10 MHz - 6 GHz. Nous pouvons observer la bonne concordance entre les deux méthodes d'extraction des paramètres  $S$  et les simulations numériques de cette structure réalisées à l'aide du logiciel commercial HFSS.



**Figure 2.** Cellule élémentaire.

Nous pouvons remarquer l'effet important de la prise en compte des lames d'air dans la méthode en ligne de transmissions TL en observant les différences entre la courbe « TL sans lames d'air » (rouge) et la courbe « TL corrigée » (vert) de la Figure 3. La même concordance est observée sur la perméabilité mesurée.

## 5. Détermination de la taille de l'échantillon

Dans l'étape suivante de ce travail nous allons évaluer la validité des résultats précédents en étudiant l'influence du nombre d'inclusions sur les paramètres calculés et l'effet de la cellule de mesure sur le

comportement de l'échantillon. Cette analyse va nous permettre de déterminer la taille minimale du matériau à caractériser (c'est-à-dire le nombre d'inclusions à prendre en compte) qui nous donnera une réponse représentative du comportement du matériau infini (réponse asymptotique).

Pour répondre à ces questions, nous avons effectué des simulations électromagnétiques à l'aide du logiciel HFSS. Nous avons modélisé une structure de type biplaque remplie de cellules de métamatériau avec des conditions aux limites particulières (murs électriques et magnétiques) (figure 2) illuminée par une onde plane incidente. Les paramètres S issus de la simulation nous permettent ensuite de remonter comme précédemment à la permittivité et la perméabilité du métamatériau.

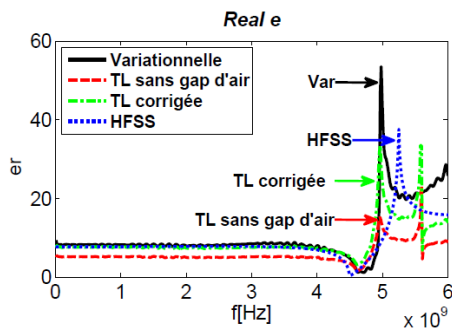


Figure 3. Comparaison théorie, simulations EM et expérience.

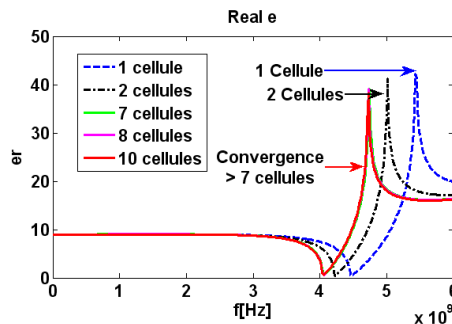


Figure 4. Réponse en augmentant plusieurs cellules dans la direction du champ électrique.

#### 5.a. Plusieurs cellules élémentaires

Nous avons tout d'abord augmenté la quantité de cellules élémentaires dans chacune des directions des champs électrique et magnétique. Les résultats obtenus montrent une variation de la fréquence de résonance lorsque le nombre d'inclusion augmente. Mais, au-delà d'un certain nombre, nous avons observé une convergence et les paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$  ne sont plus sensibles au nombre d'inclusion (figure 4).

Nous avons également réalisé des simulations en augmentant le nombre d'inclusion simultanément dans les deux directions E et H comme indiqué sur la figure 5.

Les valeurs obtenues de la permittivité et la perméabilité diffèrent alors de celles obtenues précédemment (figure 6, pour une seule cellule élémentaire et pour une matrice 7x7 cellules). Ce résultat

indique qu'une réponse représentative est obtenue uniquement si les cellules élémentaires sont ajoutées dans plusieurs directions et que le couplage entre elles est pris en compte.

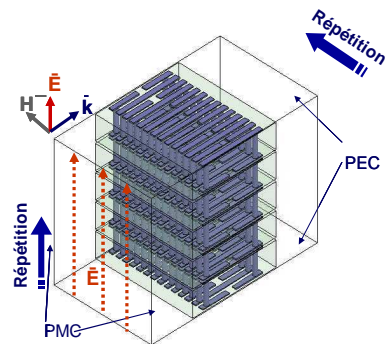


Figure 5. Structure en augmentant plusieurs cellules dans les deux directions.

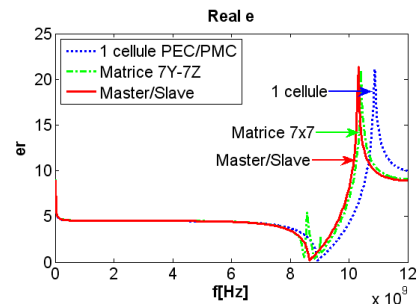


Figure 6. Permittivité en augmentant le nombre de cellules dans deux directions.

Nous pouvons déduire que dans ces conditions, une seule cellule élémentaire n'est pas suffisante pour décrire le comportement asymptotique d'un échantillon de métamatériau. En général, nous avons observé qu'un minimum de sept cellules dans chaque direction était nécessaire pour garantir une réponse du matériau indépendante du nombre d'inclusions.

#### 5.b. Influence de la cellule de mesure

Il est nécessaire de prendre en compte l'influence de la cellule de mesure sur le comportement observé du métamatériau. En effet les plans métalliques présents au-dessus et en-dessous du matériau interagissent de façon forte avec les inclusions en regard, modifiant la carte des champs localement.

L'effet des interactions peut être provoqué aussi bien entre les inclusions et les murs électriques (en affectant la permittivité) ou entre les murs magnétiques et les anneaux (en affectant la perméabilité).

Pour bien comprendre cette problématique, une analogie avec la simulation des métamatériaux peut être faite. Dans les deux cas (mesure et simulation), la taille de l'échantillon doit être limitée. Ce dernier comporte alors un nombre fini de cellules élémentaires, nombre que nous allons fixer de manière à atteindre le comportement asymptotique du matériau (réponse d'un matériau infini). Dans le cas de la cellule triplaque, l'échantillon est placé entre le plan de masse et le ruban,

sans dépasser la largeur de ce dernier. Les conditions aux limites transversales de l'échantillon sont identiques à celles prises en compte en simulation : deux plans de court-circuit électrique CCE limitent les extrémités haute et basse de l'échantillon et deux plans de court-circuit magnétique CCM limitent les bords droit et gauche (figure 7). La présence réelle en pratique, et fictive en simulation de ces plans de court-circuit, garantit la bonne orientation du champ électromagnétique par rapport aux inclusions constituant le matériau. Ceci présente par contre l'inconvénient de modifier la cartographie des champs aux frontières de l'échantillon par rapport à celle qui existerait réellement dans un métamatériau comportant une infinité de cellules.

Par rapport à la réalité du matériau infini (comportement asymptotique) une erreur est donc commise en simulation comme en mesure, de part les conditions aux limites imposées à l'échantillon de taille finie. Des simulations électromagnétiques ont montré que cette erreur est minimisée si le nombre de cellules élémentaires constituant l'échantillon garantit la convergence de ses propriétés électromagnétiques.

Pour conclure, la réalisation d'un échantillon comportant un nombre de cellule élémentaire suffisant pour garantir la convergence des propriétés électromagnétiques, constitue une condition nécessaire pour connaître le comportement asymptotique du matériau, et en même temps une façon de minimiser les erreurs dues à l'influence de la cellule sur les caractéristiques mesurées.

## 6. Conclusion

Nous avons étudié une 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 de l'échantillon adaptée à la caractérisation 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.

Pour valider notre méthode, deux problématiques ont été analysées. D'abord, la différence entre la réponse d'une ou plusieurs cellules élémentaires du métamatériau et ensuite l'influence des conditions aux limites imposées par la cellule de mesure. Le concept de « Nombre Élémentaire de Cellules » (NEC) est introduit pour les métamatériaux en référence au nombre minimum d'inclusions que doit avoir l'échantillon dans chaque direction pour garantir le caractère représentatif des mesures réalisées de manière à décrire son comportement asymptotique tout en minimisant les effets de bord.

Pour réaliser les mesures en prenant en compte les conditions trouvées dans cette étude, l'étape suivante du travail consiste à fabriquer une cellule de mesure avec une taille adaptée à de plus grandes dimensions d'échantillons.

## 7. Bibliographie

- [1] 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
- [2] L. Yousefi, H. Attia, and O. M. Ramahi, «Broadband experimental characterization of artificial magnetic materials based on a microstrip line method», Progress In Electromagnetics Research, vol. 90, pp. 1-13, 2009
- [3] E. Salahun, P. Quéffélec, M. L. Floc'h, and P. Gelin, «A broadband permeameter for "in situ" measurements of rectangular samples», IEEE Trans. Mag., vol. 37, pp. 2743-2745, 2001.
- [4] P. Quéffélec, S. Mallécol, and M. L. Floc'h, «Automatic measurement of complex tensorial permeability of magnetized materials in a wide microwave frequency range», IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 50, pp. 2128-2134, 2002.
- [5] 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
- [6] W. Abdouni, A. C. Tarot, and A. Sharaiha, «Theoretical and experimental effective parameters of metamaterial substrate», EuCAP, pp. 3214 - 3217, 2009

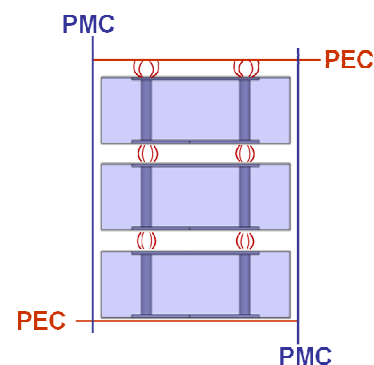


Figure 7. Interaction des inclusions métalliques avec les murs électriques.

## 8. Remerciements

Nous tenons à remercier A. C. Tarot, W. Abdouni et A. Sharaiha de l'IETR UMR 6164, Université de Rennes 1, qui nous ont fourni les échantillons méta-solénoïdes pour illustrer la phase expérimentale de notre étude.