



**HAL**  
open science

## Méthode de caractérisation de métamatériaux en ligne triplaque à hauteur variable

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

► **To cite this version:**

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Méthode de caractérisation de métamatériaux en ligne triplaque à hauteur variable. JCMM 2012 : 12èmes journées de caractérisation microondes et matériaux, Mar 2012, Chambéry, France. hal-00801270

**HAL Id: hal-00801270**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00801270>**

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 DE METAMATERIAUX EN LIGNE TRIPLAQUE A HAUTEUR VARIABLE

S. Gómez<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  
sandra.gomez@univ-brest.fr

### 1. INTRODUCTION

Les métamatériaux sont des structures composites qui peuvent présenter des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément. Généralement les métamatériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique, ce qui leur confère une structure hétérogène. La représentation électromagnétique de ces milieux à partir d'une permittivité  $\epsilon$  et d'une perméabilité  $\mu$  effectives, est limitée aux cas des cellules élémentaires dont les dimensions sont très largement inférieures à la longueur d'onde [1]. De plus, le caractère anisotrope crée une dépendance des paramètres constitutifs ( $\epsilon$  et  $\mu$  effectives) par rapport à l'orientation du champ électromagnétique. Enfin, le caractère résonant dû à l'interaction entre les différentes inclusions entraîne un comportement dispersif et une variation en fréquence des paramètres effectifs. Dans un travail précédent nous avons présenté une méthode basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation des métamatériaux dans la bande de fréquences micro-ondes [2]. Les résultats obtenus ont montré que la configuration des champs électromagnétiques de la structure triplaque est bien adaptée à la mesure des paramètres effectifs des métamatériaux. Les simulations électromagnétiques effectuées ont montré qu'il est nécessaire de prendre en compte un nombre minimum d'inclusions pour garantir le caractère représentatif des mesures réalisées et obtenir le comportement asymptotique du métamatériau. Il faut donc une méthode de caractérisation capable de mesurer un nombre suffisant de cellule élémentaire.

Dans le travail présenté ici nous proposons une méthode basée sur l'utilisation d'une ligne triplaque symétrique dont les plans de masse inférieur et supérieur sont mobiles. La hauteur de la cellule de mesure peut ainsi être ajustée à la taille du métamatériau à caractériser afin de prendre en compte un nombre suffisant d'inclusions. Nous présenterons d'abord la cellule, ses caractéristiques et ses avantages pour la caractérisation des métamatériaux. Ensuite nous présenterons quelques résultats de simulation et de calcul qui permettent d'obtenir les paramètres effectifs de l'échantillon.

### 2. LA METHODE DE MESURE

La méthode de mesure utilise une ligne de transmission de type triplaque symétrique partiellement remplie (Figure 1a) par deux échantillons identiques de métamatériau placés au-dessus et au-dessous du ruban central. L'originalité de la cellule de mesure est de posséder des plans de masse mobiles permettant la variation de la hauteur ruban – plan de masse. La configuration des champs électromagnétiques dans la section transverse est présentée dans la Figure 1b. Nous pouvons observer que cette distribution est bien adaptée aux métamatériaux comme par exemple les métasolénoïdes. En effet les lignes de champ électrique sont parallèles aux fils métalliques et celles du champ magnétique sont perpendiculaires aux boucles. Cette orientation conduit aux phénomènes résonants recherchés.

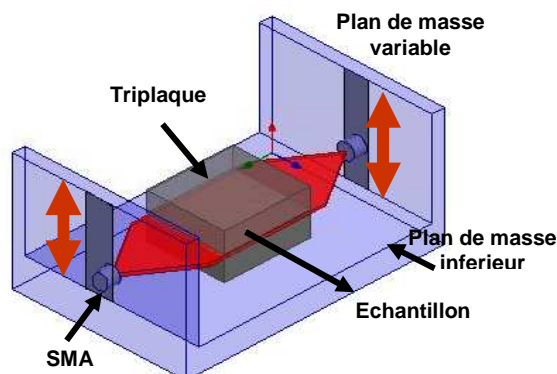


Figure 1a : Ligne triplaque (plan de masse supérieur absent)

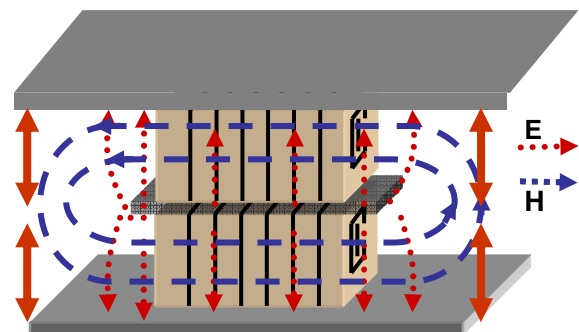


Figure 1b : Distribution des champs électromagnétiques.

Pour garantir une orientation homogène du champ magnétique sur tout le matériau, la largeur du ruban doit être plus grande que la hauteur de la ligne. De plus le matériau doit rester dans la zone centrale

du ruban et ne pas dépasser ses bords latéraux. Dans ces conditions, les champs excitent d'une façon homogène, en amplitude et en direction, tous les motifs métalliques du métamatériau. Le fait de pouvoir changer la hauteur entre les plans de masse et le ruban a deux principaux avantages. D'abord nous avons la possibilité de mesurer, avec la même cellule, les propriétés de plusieurs types de métamatériaux. Ensuite, nous pouvons introduire plusieurs couches de cellules élémentaires et obtenir ainsi la réponse représentative du métamatériau. Cette dernière caractéristique sera détaillée dans la suite.

### 3. NOMBRE MINIMUM D'INCLUSIONS

Grâce à une étude de convergence réalisée à l'aide de simulations électromagnétiques, nous avons trouvé les dimensions minimales des échantillons (en termes de nombre de cellules élémentaires de métamatériau), nécessaires pour obtenir un résultat qui représente le comportement intrinsèque du matériau. Pour obtenir ces conditions, différents motifs de métamatériaux ont été simulés dans une configuration de champs similaire à celle qu'on trouve dans la pratique à l'intérieur de la cellule de mesure. En augmentant le nombre de cellules élémentaires dans le sens de propagation du champ électrique et du champ magnétique (Figure 2a), nous avons observé une variation des paramètres S et par conséquent, de la permittivité et la perméabilité calculées. La Figure 2b montre un exemple sur la perméabilité d'un métasolénoïde, l'augmentation progressive du nombre d'inclusions se traduit dans un premier temps par un décalage de la fréquence de résonance puis dans un deuxième temps par un comportement asymptotique où la réponse ne dépend plus du nombre d'inclusion.

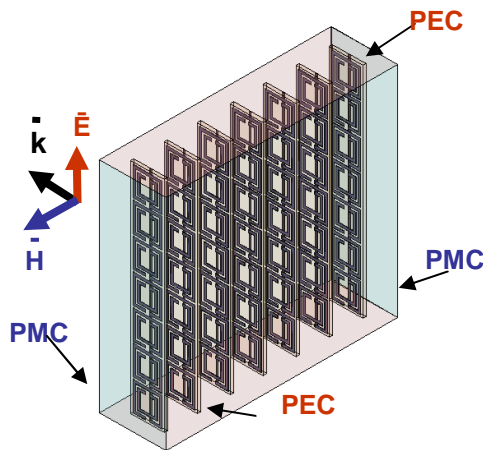


Figure 2a : Echantillon de métamatériau de type SRR en augmentant le nombre de cellules élémentaires

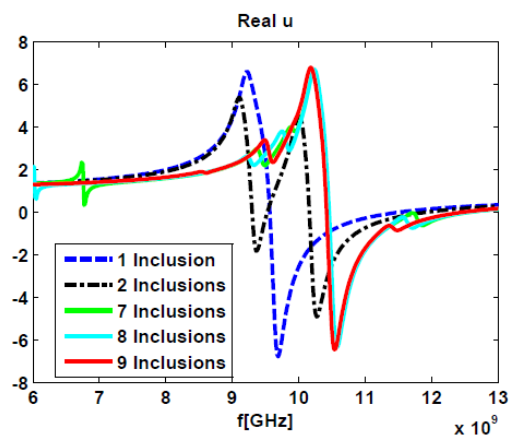


Figure 2b : Perméabilité en augmentant le nombre d'inclusions.

A partir d'un nombre d'inclusions suffisamment grand (plus de 7), une convergence de la réponse est observée. Ce phénomène est dû au couplage entre cellules élémentaires adjacentes, qui est une propriété du matériau, mais aussi à l'interaction entre les parties métalliques du métamatériau en regards des parties métalliques de la cellule de mesure (ruban et plan de masse). Ces phénomènes prennent beaucoup d'importance lorsqu'il y a peu de cellules et sont ensuite diminués lorsque le nombre de cellules est suffisant. Il faut donc mesurer un nombre suffisant d'inclusions. La cellule proposée répond à cette problématique car elle permettra de mesurer dans la même structure des matériaux contenant un nombre d'inclusion différent.

### 4. CELLULE DE MESURE

La cellule de mesure à plan de masse variable a été réalisée en aluminium au laboratoire, une photo du prototype est présentée sur la Figure 4a. Les dimensions de la section transversale et du ruban central ont été déterminées en fonction de trois critères importants.

- 1) La hauteur maximale doit être la plus grande possible pour permettre la mesure de plusieurs couches de métamatériaux.
- 2) Le rapport entre la hauteur et la largeur du ruban central est calculé pour favoriser la propagation d'un seul mode TEM dans la section vide.
- 3) Les conditions de murs magnétiques CCM et de murs électriques CCE doivent être valables jusqu'à 6 GHz indépendamment de la hauteur de la cellule.

Ces trois contraintes étant antinomiques, nous avons suivi la procédure suivante. Tout d'abord exprimer la fréquence d'apparition du premier mode d'ordre supérieur en fonction des dimensions de la structure triplaque (largeur du ruban  $W$  et hauteur  $h$ ), celle-ci est représentée sur la Figure 3. Puis favoriser la plus grande hauteur pour permettre la mesure de plusieurs couches de métamatériaux en

respectant le critère d'apparition de la première fréquence du mode supérieur au-dessus de 6 GHz. Enfin le troisième critère, qui établit les conditions pour obtenir une distribution uniforme des champs électrique et magnétique au-dessus et au-dessous du ruban central impose une largeur  $W$  beaucoup plus grande que la hauteur  $h$ . Cependant, l'augmentation importante de la largeur du ruban centrale entraîne nécessairement la diminution de la fréquence d'opération de la cellule.

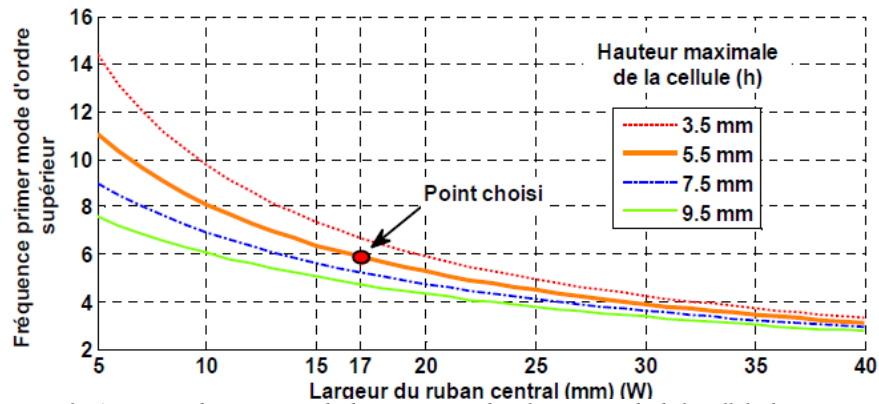


Figure 3 : Apparition du premier mode de propagation dans la section vide de la cellule de mesure

Après avoir pris en compte toutes ces considérations les dimensions ont été déterminées. La longueur totale de la cellule est de 60mm, la largeur du ruban central a une valeur fixe de 17mm et la hauteur peut varier entre 1mm et 5.5mm (Figure 4b).

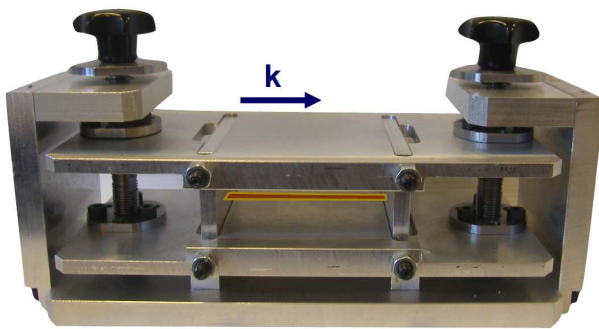


Figure 4a : Cellule de mesure (vue de coté)

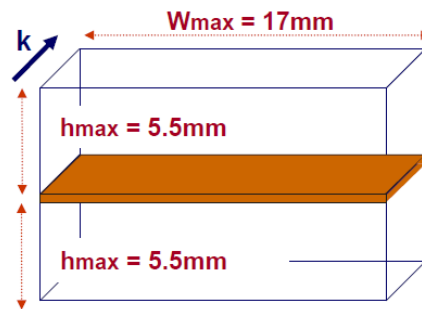


Figure 4b : Dimensionnes maximales de la cellule de mesure (vue de face)

Une particularité de cette méthode de mesure à hauteur variable est que l'impédance de la cellule sera différente pour chaque hauteur d'échantillon car la largeur du ruban reste fixe. Cette difficulté sera prise en compte par une procédure de calibration adaptée dans laquelle la mesure à vide de la cellule jouera le rôle de référence.

## 5. PARAMETRES S DE LA STRUCTURE TRIPLAQUE

La structure triplaque chargée a été simulée à l'aide du logiciel commercial HFSS. Les paramètres S de la région contenant un échantillon de type métasolénoïde sont montrés sur la Figure 5.

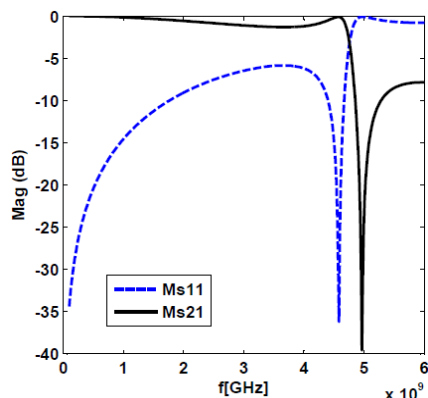


Figure 5a : Paramètres S simulés (Magnitude dB)

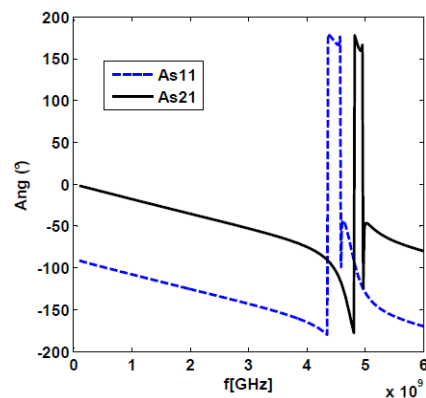


Figure 5b : Paramètres S simulés (Phase °)

Nous observons qu'il est possible de bien caractériser le comportement d'un matériau sur une large bande de fréquences jusqu'à 6 GHz. La configuration des champs à l'intérieur de la cellule nous permet de bien identifier les propriétés résonantes présentes dans ce type de métamatériau.

## 6. EXTRACTION DE LA PERMITTIVITE ET LA PERMEABILITE

Les paramètres caractéristiques ( $\epsilon$  et  $\mu$ ) de l'échantillon sont obtenus à partir des paramètres S en utilisant une procédure analytique. Dans un premier temps une analyse électromagnétique de type quasi-statique peut être implémentée si l'on considère que seul le mode fondamental se propage à l'intérieur de la ligne. En plus, si la largeur du ruban est suffisamment grande par rapport à la hauteur de la ligne, la structure peut être modélisée par une structure biplaque, les conditions de court circuit électrique (CCE) et magnétique (CCM) sont alors appliqués aux limites de la structure transverse comme le montre la Figure 6a.

Finalement, en utilisant la théorie de lignes de transmission [3], nous pouvons déduire les relations analytiques des paramètres constitutifs  $\epsilon$  et  $\mu$  du métamatériau dans la bande de fréquence d'utilisation de la cellule [0,1 – 6 GHz] (Figure 6b). Les expressions (1) et (2) nous donnent les valeurs de la permittivité et la perméabilité effectives en fonction des paramètres S et les dimensions de l'échantillon.

$$\epsilon_{eff} = \frac{[a + (b-a)\mu]2\gamma - (b-a)}{a\mu_0\epsilon_0\mu\omega^2} \quad (1)$$

$$\mu_{eff} = \frac{aZ_0 2\gamma(1+R)}{h\mu_0\omega(1-R) - (b-a)Z_0 2\gamma(1+R)} \quad (2)$$

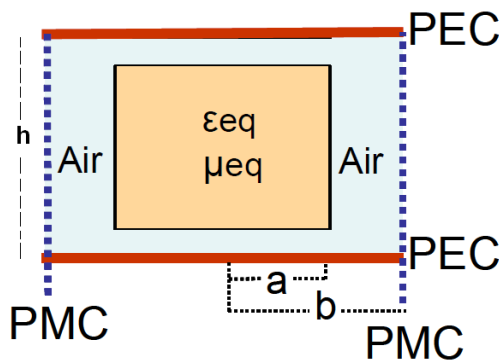


Figure 6a : Section équivalente de la cellule triplaque

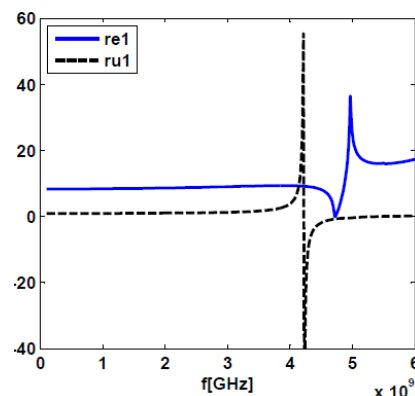


Figure 6b : Paramètres constitutifs du métamatériau

Pour déterminer la permittivité et la perméabilité propres du métamatériau, il reste une étape à réaliser qui consiste à corriger, à l'aide d'une loi de mélange (loi de Wiener), les valeurs de  $\epsilon$  et  $\mu$  calculées à partir des paramètres S mesurées, pour tenir compte des lames d'air situées en dessous et au-dessus de l'échantillon.

## 7. CONCLUSION

Nous avons présenté une méthode de caractérisation adaptée à la mesure des paramètres électromagnétiques des métamatériaux. La configuration des champs électromagnétiques à l'intérieur de la cellule proposée permet l'excitation homogène en amplitude et en direction de toutes les cellules élémentaires présentes dans l'échantillon.

Le concept d'une cellule à hauteur variable permettra l'étude expérimentale de la réponse des métamatériaux en fonction du nombre d'inclusion. De plus, il offre la possibilité de mesurer les propriétés et de caractériser le comportement large bande de plusieurs types de métamatériaux avec la même cellule.

## 8. REFERENCES

- [1] Cui, T.; *et al.*, « Metamaterials. Theory, Design, and Applications », *Springer*, (2010).
- [2] Gomez, S.; *et al.*, « Méthode de mesure basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation électromagnétique des métamatériaux », *JNM*, (2011).
- [3] Quéffelec P.; *et al.*, « 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).