



**HAL**  
open science

## Caractérisation expérimentale de métamatériaux en utilisant une ligne triplaque à hauteur variable

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

► **To cite this version:**

Sandra Gomez, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Caractérisation expérimentale de métamatériaux en utilisant une ligne triplaque à hauteur variable. 18èmes Journées Nationales Microondes, May 2013, Paris, France. 4 p. hal-00951707

**HAL Id: hal-00951707**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00951707>**

Submitted on 25 Feb 2014

**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.

## Caractérisation expérimentale de métamatériaux en utilisant une ligne triplaque à hauteur variable

Sandra Gomez<sup>1</sup>, Patrick Quéffelec<sup>1</sup>, Alexis Chevalier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6285, UEB, Université de Bretagne Occidentale - 6 av. Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3s

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

### Résumé

Nous présentons une méthode de caractérisation expérimentale des propriétés électromagnétiques des métamatériaux dans la bande (1-6 GHz). Cette technique se base sur la mesure des paramètres de répartition d'une ligne triplaque à hauteur variable permettant ainsi de caractériser des métamatériaux dont le nombre de cellules peut varier suivant plusieurs directions. Cette possibilité d'augmenter le nombre de cellules est nécessaire pour l'étude de la réponse asymptotique des métamatériaux. Nous présentons la cellule de mesure, la procédure expérimentale et les premiers résultats expérimentaux.

### 1. Introduction

Les métamatériaux sont des structures hétérogènes, anisotropes et dispersives. Ils sont en général formés par des cellules élémentaires réalisées à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique. Afin de caractériser leur comportement électromagnétique, les métamatériaux peuvent être considérés comme des milieux homogènes représentés par des tenseurs de permittivité ( $\epsilon$ ) et de perméabilité ( $\mu$ ) effectives. Ceci, à condition que les dimensions des cellules élémentaires ( $d$ ) soient très largement inférieures à la longueur d'onde ( $d \ll \lambda$ ) [1].

Le caractère fini des dimensions du matériau à caractériser peut générer des incohérences dans la comparaison entre les résultats de mesure et ceux issus des simulations pour lesquels le matériau est considéré comme infini. Pour aborder cette problématique nous introduisons le concept de Nombre Élémentaire de Cellules (NEC). Cette notion va nous permettre de trouver les conditions expérimentales à respecter de manière à déterminer la réponse asymptotique du matériau, qui ne dépend plus du nombre de cellules prises en compte. L'application de ce concept impose des conditions particulières à la cellule de mesure. Celle-ci doit permettre la caractérisation d'échantillons composés de plusieurs couches, et donc la fabrication d'une cellule à hauteur variable.

D'autre part, pour tenir compte du caractère dispersif et anisotrope des métamatériaux, des considérations supplémentaires doivent être aussi envisagées. Ainsi, la

dispersion implique l'utilisation d'une méthode large bande. De plus, l'anisotropie impose que l'excitation soit homogène pour que toutes les cellules du métamatériau soient excitées par une polarisation homogène de l'onde électromagnétique (EM) (même amplitude et même orientation du champ EM). Cette configuration permet d'extraire sans ambiguïté, l'un des éléments des tenseurs de permittivité et perméabilité, celui dans la direction du champ de mesure.

La technique présentée pour la caractérisation expérimentale des métamatériaux utilise une ligne triplaque qui permet de satisfaire les conditions mentionnées précédemment. D'abord, nous présenterons le principe de la méthode de mesure et son intérêt pour la caractérisation des métamatériaux. Ensuite nous rappellerons le critère du NEC et expliquons de quelle manière il est pris en compte dans la technique de caractérisation. Enfin, nous présenterons la procédure de mesure, les résultats expérimentaux et la comparaison avec des simulations électromagnétiques.

### 2. Méthode de caractérisation

#### 2.a. Procédure générale

De façon générale, les techniques expérimentales de caractérisation des métamatériaux se basent sur la mesure des coefficients de réflexion et de transmission de dispositifs, puis sur l'utilisation d'une procédure inverse permettant de remonter aux paramètres constitutifs ( $\epsilon$  et  $\mu$ ) du matériau grâce à l'analyse électromagnétique du dispositif.

Une première méthode de caractérisation en ligne triplaque asymétrique a été précédemment appliquée au cas des métamatériaux [2]. Cette méthode a permis de valider le concept et la procédure de caractérisation, mais n'a pas permis de satisfaire le critère lié au NEC. Des simulations EM réalisées à l'aide du logiciel Ansoft HFSS ont permis de montrer qu'en général un minimum de sept cellules élémentaires dans chaque direction devaient être présentes lors de la mesure pour obtenir un comportement asymptotique. Ce critère peut être satisfait en utilisant une nouvelle cellule de mesure, permettant de caractériser des échantillons en augmentant le nombre de cellules selon plusieurs directions.

## 2.b. Méthode en ligne triplaque symétrique à hauteur variable

Nous avons conçu et réalisé une cellule de mesure de type triplaque symétrique dont l'une des particularités est de présenter une hauteur variable (figure 1). La structure principale est fabriquée en aluminium tandis que le ruban central est réalisé en laiton. Deux connecteurs SMA, mâle et femelle, sont soudés aux extrémités du ruban pour se connecter aux câbles 50  $\Omega$  de l'analyseur. L'âme centrale des connecteurs se prolonge dans le corps de la cellule par un trou dont les dimensions sont fixées pour présenter également une impédance de 50 $\Omega$ . Le ruban conducteur central reste dans une position fixe, tandis que les deux plans de masse sont libres de monter ou descendre grâce à l'utilisation des vis de réglage.

Cette configuration permet d'adapter la hauteur de la cellule à celle du matériau à mesurer et ainsi de caractériser des échantillons constitués de plusieurs couches de métamatériaux. Deux échantillons identiques du matériau à caractériser doivent être placés au-dessus et au-dessous du ruban central.

Dans la zone centrale, le rapport entre la hauteur et la largeur du ruban garantit que l'amplitude et la direction des champs électrique et magnétique sont constantes. Par conséquent si la largeur de l'échantillon reste inférieure à celle du ruban alors chaque cellule du matériau sera illuminée par la même configuration de champ.

Le problème inverse qui permet de remonter aux paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$  du matériau s'appuie sur une analyse électromagnétique de la cellule basée sur l'approximation quasi-statique et la théorie des lignes de transmission. Elle permet de relier de façon analytique les paramètres S du dispositif aux paramètres constitutifs du matériau  $\epsilon$  et  $\mu$ . A cela s'ajoute plusieurs étapes de correction afin de prendre en compte le caractère inhomogène de la section transverse de la ligne.

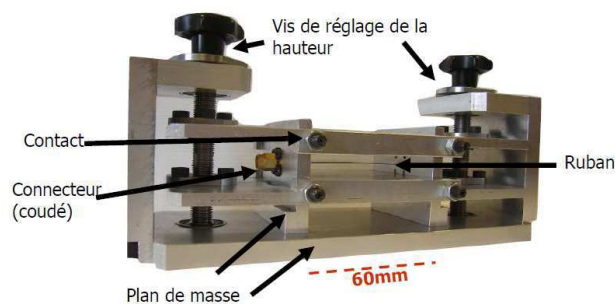


Figure 1. Cellule de mesure en ligne triplaque.

## 3. Procédure de mesure et résultats

La ligne triplaque à hauteur variable est conçue pour permettre la mesure de plusieurs cellules élémentaires de métamatériau dans les trois directions. Le ruban central fait 17 mm de large, 50 mm de long et la hauteur entre plan de masse et ruban peut varier entre 1mm et 6mm. La cellule présente donc une impédance caractéristique différente pour chaque hauteur ce qui implique une procédure d'étalonnage particulière. Dans un premier temps, l'étalonnage de type SOLT est réalisé à l'extrémité des câbles de jonction de l'analyseur et

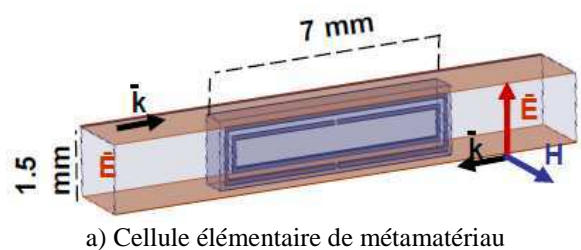
permet de placer les plans de référence au niveau des connecteurs SMA. Puis, une étape analytique complémentaire est implémentée pour corriger les effets propres de la cellule et ramener les plans de références au niveau des faces de l'échantillon à mesurer. Cette deuxième étape d'étalonnage est réalisée à partir de la mesure de la cellule vide et permet de prendre en compte à la fois la désadaptation d'impédance, les transitions ligne coaxiale vers triplaque (« taper ») et les pertes ohmiques de la cellule.

La validité de la méthode de mesure, depuis la procédure d'étalonnage jusqu'au programme de dépouillement, a été vérifiée sur des matériaux diélectriques connus.

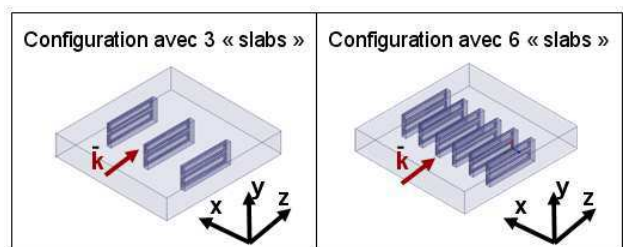
Concernant la mesure de métamatériaux, nous avons choisi des structures de type Split Ring Resonator (SRR) (figure 2a). Ils font partie des métamatériaux présentant une perméabilité négative à la fréquence de résonance. Le métamatériau a été conçu pour résonner dans la bande de fonctionnement de la cellule de mesure (entre 1 et 6 GHz), et son caractère allongé a été choisi pour permettre d'introduire plusieurs couches suivant la hauteur. Les simulations HFSS nous ont permis de valider le comportement résonant autour de 3.5 GHz avec une perméabilité négative. Les échantillons ont été fabriqués par dépôt de pistes de cuivre de 17  $\mu\text{m}$  d'épaisseur sur des substrats de AR1000 ( $\epsilon_r=10$ ) d'épaisseur 0.63 mm.

### 3.a. Mesure de métamatériaux

La mesure d'une seule cellule étant difficile en raison du faible volume de matière mise en jeu, nous avons choisi une configuration remplissant toute la section centrale de la ligne afin d'obtenir un niveau de signal suffisamment fort. L'échantillon est donc constitué de 3 « plaquettes » de métamatériau dans la direction  $Ox$ , chacun composé de deux cellules élémentaires dans la direction  $Oy$  et d'une cellule dans la direction de propagation  $Oz$  (figure 2b gauche).



a) Cellule élémentaire de métamatériau

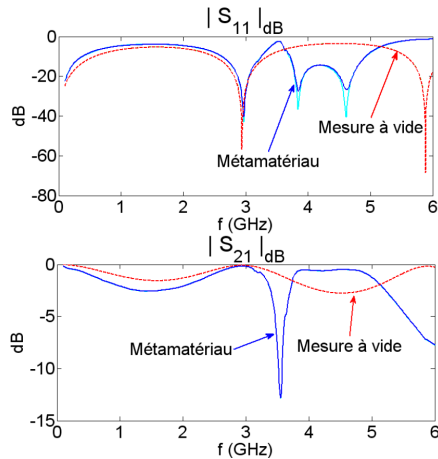


b) Configuration de mesure

Figure 2. a) Cellule élémentaire de métamatériau. b) Configuration de mesure.

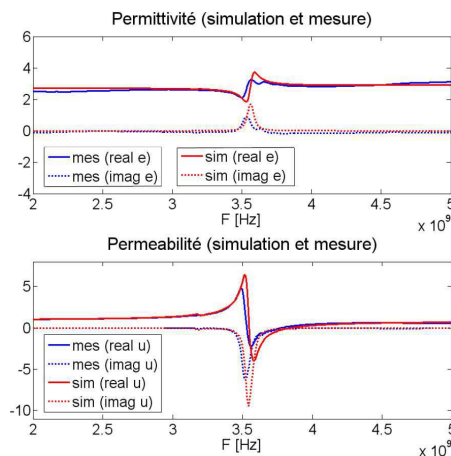
Les dimensions d'une « plaquette » sont dans ce cas :  $5.6 \times 3 \times 7 \text{ mm}^3$ . La largeur suivant  $Ox$  (5.6 mm) correspond à l'épaisseur du substrat augmentée d'une portion d'air de façon à placer exactement trois plaquette sur la largeur du ruban; la hauteur est de 3 mm due à la présence de 2 cellules élémentaires suivant  $Oy$  (figure 2b).

La figure 3 montre les paramètres S de réflexion et de transmission mesurés au niveau des connecteurs SMA (après étalonnage de type SOLT sans appliquer la correction analytique) pour la cellule à vide et pour la cellule chargée par le métamatériau.



**Figure 3. Paramètres S mesurés de la cellule triplaque à vide et en charge.**

Il est possible d'identifier plusieurs comportements : Sur les paramètres S mesurés de la cellule vide, nous identifions tout d'abord une résonance de dimension de la cellule qui se traduit par un coefficient de réflexion qui tend vers 0 à 3 GHz et à 6 GHz. Ensuite, sur les paramètres S mesurés de la cellule chargée par le métamatériau, viennent s'ajouter des résonances qui traduisent le comportement dynamique du métamatériau avec en particulier un pic d'absorption sur le paramètre de transmission autour 3.5 GHz



**Figure 4. Spectres de permittivité et perméabilité mesurés pour un échantillon à base d'inclusion SRR**

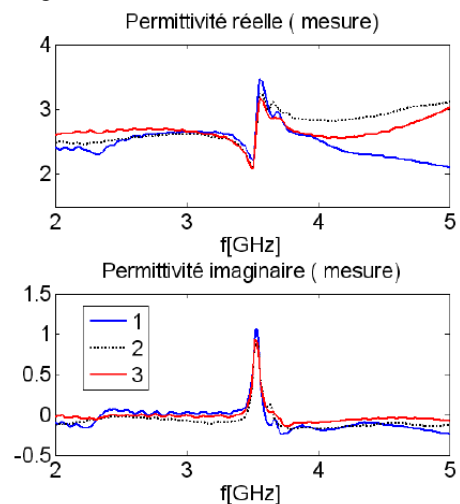
La figure 4 montre les paramètres constitutifs ( $\epsilon$  et  $\mu$ ) du métamatériau obtenu en appliquant le problème

inverse aux paramètres S mesurés et corrigés. Ils sont comparés aux résultats de simulation obtenus à partir du logiciel HFSS. Nous observons bien le comportement attendu pour ce type de métamatériaux (des paramètres constitutifs résonants et une perméabilité négative) et une bonne concordance entre les résultats de mesure et les simulations numériques.

### 3.b. Influence du nombre de cellules suivant la hauteur

Nous avons étudié l'effet d'une augmentation du nombre de cellules de un (1) à trois (3) suivant la direction  $y$  (hauteur). Afin d'obtenir un signal suffisant, nous nous sommes de nouveau placés dans une configuration à trois plaquettes disposées uniformément selon la direction transverse  $Ox$ .

La figure 5 montre les spectres de permittivité  $\epsilon$  et de perméabilités  $\mu$  pour les trois échantillons. Nous obtenons un comportement identique pour les trois configurations. La permittivité et la perméabilité ne montrent pas de variation de la fréquence lorsque le nombre de cellule augmente suivant la hauteur. C'est un effet attendu, car il y a peu d'interactions entre cellule suivant la hauteur en raison de la faible épaisseur de métallisations des pistes. Les interactions électromagnétiques sont faibles car elles se font entre des surfaces en regard qui présentent une épaisseur de 17  $\mu\text{m}$ . Cela n'est pas suffisant pour produire un effet capacitif capable de modifier le comportement du métamatériau. Par ailleurs, les divergences observées sur la permittivité réelle en haute fréquence proviennent des erreurs issues de l'étape de correction analytique d'étalonnage.



**Figure 5. Evolution des spectres de permittivité réelle ( $\epsilon'$ ) et imaginaire ( $\epsilon''$ ) mesurés en fonction du nombre de cellules suivant la hauteur.**

### 3.c. Influence du nombre de cellules suivant la direction transverse $x$

Nous avons également étudié le comportement du métamatériau en augmentant le nombre de cellules dans la direction transversale  $Ox$ . Dans cette partie, les inclusions constituant le métamatériau ont été rapprochées diminuant ainsi la taille des cellules élémentaires suivant l'axe  $Ox$  (figure 2b droite). La

nouvelle largeur est fixée à 2.8 mm, permettant d'introduire jusqu'à 6 cellules suivant la direction transversale. Concernant les autres directions, les échantillons seront constitués de deux cellules élémentaires selon la hauteur  $Oy$  et d'une cellule suivant la direction de propagation  $Oz$ .

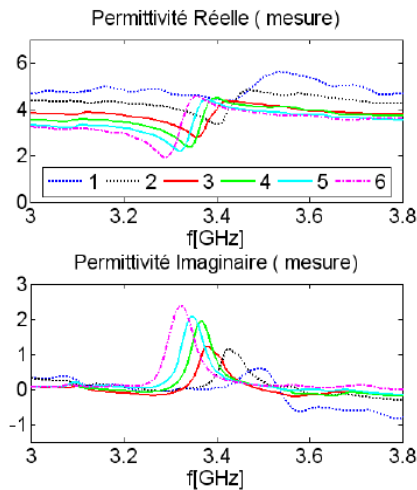


Figure 6. Influence du nombre de cellules suivant la direction transversale ( $\epsilon'$  et  $\epsilon''$ ) mesure.

La figure 6 montre les paramètres caractéristiques extraits à partir de la mesure. Le déplacement de la fréquence est perceptible lorsque le nombre de cellules élémentaires augmente. Les résultats obtenus pour 1 ou 2 cellules sont très bruités car la réponse produite par l'échantillon du métamatériau à l'intérieur du dispositif de mesure est très faible. Cependant pour un nombre plus élevé d'inclusions, nous arrivons à bien caractériser les spectres de permittivité et de perméabilité du matériau. Nous observons ainsi un comportement asymptotique de la fréquence de résonance avec l'augmentation du nombre d'inclusions

Les différences d'amplitude observées sur la partie réelle de la permittivité sont dues, d'une part, aux difficultés liées à la procédure d'étalonnage et d'autre part, à la présence de lames d'air entre les échantillons et les plans de masse. En effet, même si en théorie la hauteur de la cellule ne varie pas, en pratique il est difficile de contrôler l'épaisseur des lames d'air pour chaque échantillon mesuré.

Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 7. Nous observons le décalage en fréquence des paramètres caractéristiques en fonction du nombre de cellules et une convergence à partir de cinq inclusions.

La figure 8 présente la variation de la fréquence de résonance en fonction du nombre de cellules. Nous observons tout d'abord une variation rapide de la fréquence qui se stabilise pour atteindre un comportement asymptotique au-delà de 5 à 6 cellules. Après, l'augmentation du nombre de cellules ne modifie plus le comportement du métamatériau.

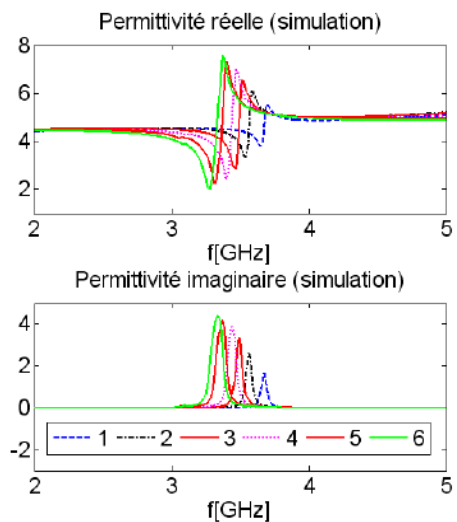


Figure 7. Influence du nombre de cellules suivant la direction transversale ( $\epsilon$  et  $\mu$ ) simulation

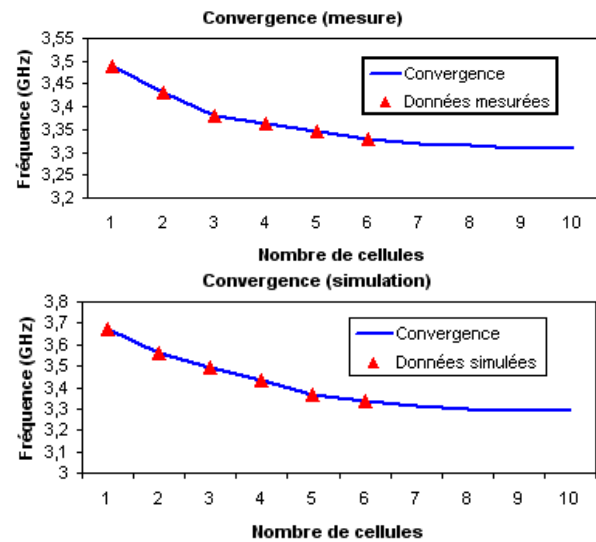


Figure 8. Convergence (simulation et mesure)

#### 4. Conclusion

Nous avons développé une méthode de caractérisation des métamatériaux basée sur la mesure d'une cellule triplaque à hauteur variable. Cette méthode nous offre la possibilité de mesurer des échantillons contenant plusieurs cellules élémentaires dans plusieurs directions et ainsi d'étudier les interactions entre plusieurs cellules. Un très bon accord entre les résultats de simulation et les résultats de mesure est observé et montre qu'un nombre minimum de cellules doit être pris en compte pour représenter la réponse d'un matériau infini.

#### 5. Bibliographie

- [1] T. Cui and et al, « *Metamaterials. Theory, Design, and Applications* ». Springer, 2010.
- [2] S. Gómez, P. Quéffelec, A. Chevalier, « *Méthode de mesure basée sur une ligne triplaque asymétrique pour la caractérisation électromagnétique des métamatériaux* », JNM 2011 – Brest, France.