



**HAL**  
open science

## Modélisation et caractérisation de matériaux composites tissés.

Ghida Al Achkar, Lionel Pichon, Olivier Dubrunfaut, A. Brézard-Oudot,  
Laurent Daniel, Nabil Benjelloun

► **To cite this version:**

Ghida Al Achkar, Lionel Pichon, Olivier Dubrunfaut, A. Brézard-Oudot, Laurent Daniel, et al.. Modélisation et caractérisation de matériaux composites tissés.. 15èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Mar 2018, Paris, France. hal-01990784

**HAL Id: hal-01990784**

**<https://hal.science/hal-01990784v1>**

Submitted on 19 Aug 2020

**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.

# Modélisation et caractérisation de matériaux composites tissés

Ghida Al Achkar<sup>1</sup>, Lionel Pichon<sup>1</sup>, Olivier Dubrunfaut<sup>1</sup>, Aurore Brézard-Oudot<sup>1</sup>, Laurent Daniel<sup>1</sup>, Nabil Benjelloun<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>GeePs | Group of electrical engineering - Paris, CNRS (UMR 8507) / CentraleSupélec / UPMC / Univ Paris-Sud / Univ. Paris-Saclay,  
 3 & 11 rue Joliot Curie, 91192 Gif sur Yvette, France, {ghida.al-achkar, lionel.pichon, olivier.dubrunfaut,  
 aurore.brezardoudot, laurent.daniel} @geeps.centralesupelec.fr  
<sup>2</sup>IRSEEM-ESIGELEC-EA 4353, av. Galilée, 76801 St-Et-du-Rouvray, nabil.benjelloun@esigelec.fr

**Résumé** — Cette communication présente une approche permettant de déterminer les propriétés électromagnétiques de composites tissés. La méthode repose sur l'estimation du coefficient de blindage du milieu évalué par éléments finis 3D. Les propriétés effectives sont déterminées sur une large bande de fréquences. Les résultats obtenus expérimentalement pour différents échantillons de matériaux sont également présentés<sup>1</sup>.

## I. INTRODUCTION

Les techniques d'homogénéisation permettent de remplacer un milieu hétérogène par un milieu homogène équivalent. En électromagnétisme ces approches permettent de simplifier les études de blindage dans les analyses de compatibilité électromagnétique rayonnée. Si les lois de mélange en statique sont maintenant bien connues, il n'en est pas de même dans le domaine des micro-ondes.

L'obtention des propriétés effectives peut résulter d'approches analytiques ou reposer sur l'exploitation d'outils de modélisation tridimensionnelle. Pour les composites à fibres unidirectionnelles une méthode analytique a été proposée dans [1] en 2D. Dans [2-3] le calcul des propriétés effectives pour des milieux à inclusions sphériques en 3D est réalisé par une modélisation par éléments finis à partir de la connaissance des paramètres S. Aussi de nombreuses approches expérimentales sont actuellement dédiées à ce sujet [4-5]. Concernant les composites tissés des travaux récents proposent la détermination des propriétés effectives à l'aide d'outils de simulation 3D [6-8].

Cette communication propose une méthode d'homogénéisation qui combine un modèle par éléments finis et une méthode d'inversion afin de remonter aux propriétés effectives. La méthodologie est développée dans le cadre du calcul de coefficient de blindage d'une plaque hétérogène. Des résultats expérimentaux obtenus par plusieurs protocoles de mesure sont également présentés.

## II. TECHNIQUE D'HOMOGENEISATION

L'approche développée combine un modèle d'élément finis tridimensionnel avec un algorithme d'inversion.

### A. Modélisation 3D

L'approche proposée repose sur un modèle 3D permettant de représenter une large variété d'inclusions. Fig. 1 montre la géométrie employée : la plaque est entourée de deux côtés

de l'air ambiant, et des PMLs (*Perfectly Matched Layers*) sont ajoutées afin de simuler l'infini. En ce qui concerne les conditions aux limites, l'incidence normale considérée permet d'appliquer des conditions appropriées aux surfaces parallèles et perpendiculaires au champ électrique  $\vec{E}$ .

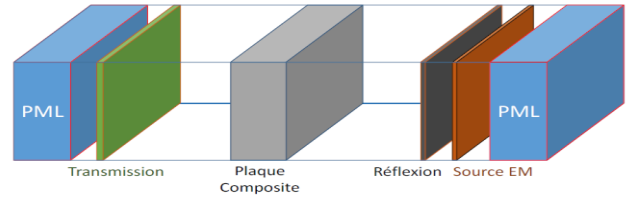


Fig. 1. Domaine de calcul

### B. Inversion

L'homogénéisation proposée s'appuie sur l'hypothèse qu'il existe un milieu homogène dont le comportement face à une onde électromagnétique est le même que la plaque composite à caractériser. Le coefficient de blindage  $SE_{CAL}$  pour un tel milieu étant bien défini en fonction de ses propriétés effectives et celui du composite  $SE_{SIM}$  étant calculé par éléments finis, le problème se ramène à la minimisation de la fonction coût  $F_c$  (1).

$$F_c = |SE_{SIM} - SE_{CAL}(\epsilon^*, \mu^*)| \quad (1)$$

Le coefficient SE dépend de l'épaisseur  $l$  de la plaque et des propriétés électromagnétiques (permittivité, perméabilité, conductivité).

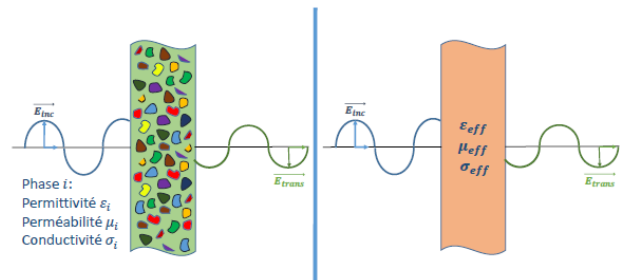


Fig. 2. Détermination du coefficient de blindage

Ce problème d'optimisation est traité à l'aide d'une hybridation entre un algorithme génétique (AG) et un algorithme déterministe quasi-Newton. Les variations de la fonction coût peuvent donner lieu en effet à plusieurs

<sup>1</sup> Ce travail de recherche est soutenu par la chaire de mécatronique automobile, une collaboration entre Faurecia, CentraleSupélec et l'Esigelec

minima locaux. L'AG reste la méthode la plus adaptée à ce cas-là puisqu'il manipule à chaque itération des candidats provenant de tout le domaine de définition de la fonction. Toutefois, aux alentours de l'optimum global, la convergence est très lente et l'utilisation d'une méthode hybride est donc justifiée.

### C. Résultats numériques

L'approche proposée ci-dessus a été validée dans un premier temps dans un cadre 2D et pour des fibres unidirectionnelles [9]. Nous étudions ici le cas de fibres conductrices tissées dont un motif périodique maillé est présenté Fig. 3. Le tableau 1 montre les propriétés électromagnétiques des deux phases qui constituent la plaque. Celle-ci est illuminée en incidence normale par une onde plane dont la fréquence varie de 1 GHz à 50 GHz. L'effet du contact entre les fibres est pris en considération en rajoutant des couches minces dans le but de définir un milieu électriquement identique aux fibres sans recours à un maillage plus raffiné.

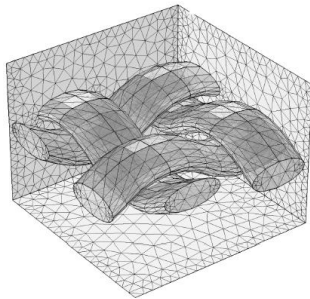


Fig. 3. Cellule périodique de fibres tissées

Tableau 1. Propriétés des différents constituants du composite

Phase	Permittivité relative	Conductivité $\sigma$ [S/m]	Perméabilité relative
Matrice	$\epsilon_m^* = 2$	0	1
Fibres	$\epsilon_f^* = 2$	4000	1

La Figure 4 montre le coefficient de blindage de la plaque, pour des fibres séparées par une distance  $d_z$ , qui s'avère inférieur au coefficient obtenu avec contact. Ce dernier donne naissance à un courant qui circule en boucles fermées dans les fibres, permettant ainsi de mieux s'opposer au champ incident. Toutefois, ce coefficient diminue avec la fréquence à cause de l'effet de peau qui devient plus important.

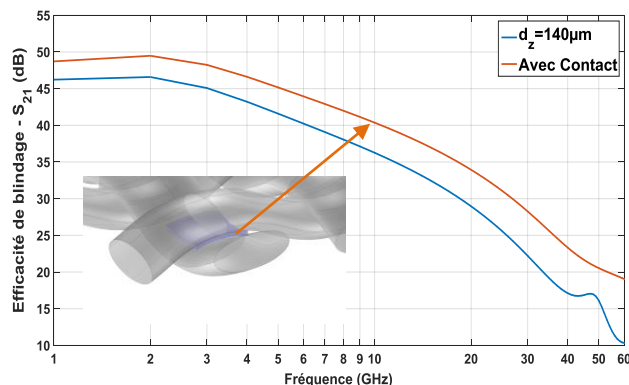


Fig. 4. Coefficient de blindage de la plaque composite sans/avec contact entre fibres

L'application de l'algorithme d'inversion décrit dans II.B. permet de remonter aux propriétés effectives du composite. La permittivité étant invariable, le calcul se réduit à la recherche d'une conductivité effective (Fig.5). Cette conductivité évolue de manière identique au coefficient de blindage en fonction de la fréquence de l'onde incidente.

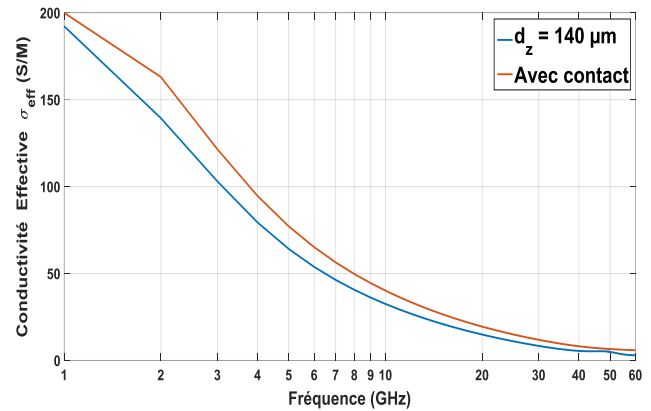


Fig. 5. Conductivité effective du composite en fonction de la fréquence sans/avec contact entre les fibres

## III. ANALYSE DU COMPORTEMENT DES COMPOSITES TISSES

### A. Tissage et composites multicouches

La comparaison d'un tissage (sans contact entre fibres) à un composite comportant deux couches de fibres dans des directions perpendiculaires montre un comportement similaire en fonction de la fréquence. Néanmoins, l'atténuation se montre moins importante quand il s'agit d'un composite tissé. Ceci est illustré sur la Figure 6 pour un composite aux fibres cylindriques à base circulaire de rayon  $R=0.38\text{mm}$  ( $\epsilon_r=5$ ,  $\sigma=1000$  S/m) occupant une fraction volumique de 16,9%. Les fibres sont plongées dans une matrice diélectrique ( $\epsilon_r=5$ ,  $\sigma=0$  S/m).

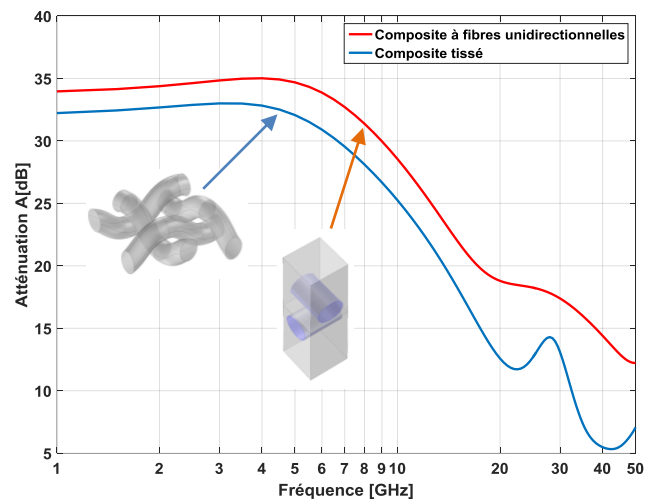


Fig. 6. Atténuation : tissage vs. fibres unidirectionnelles

### B. Fibres et direction du champ incident

L'efficacité du blindage dépend de l'angle que forme le champ incident (considéré dans notre cas normal à la plaque) avec les fibres du matériau. Afin d'analyser cette dépendance, les deux cas suivants sont étudiés séparément :

- Le champ électrique incident est perpendiculaire aux fibres (Figure 7).
- Le champ électrique incident est parallèle aux fibres (Figure 8).

L'exemple choisi étant identique à III-A. (en conservant les mêmes fractions volumiques et propriétés électriques), il s'avère que le blindage est maximal dans le deuxième cas.

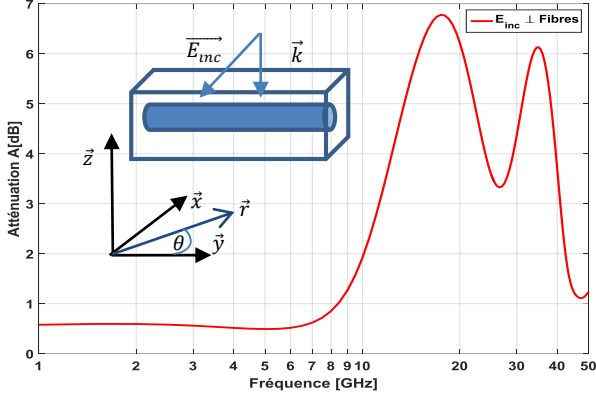


Fig. 7. Atténuation du champ perpendiculaire aux fibres

Dans [10], le champ électrique tournant dans les fibres (en coordonnées cylindriques) s'écrit (1), pour le cas d'un champ électrique perpendiculaire aux fibres, en fonction de l'intensité du champ incident  $E_0$ , de la constante de propagation dans les fibres  $k_f$ , ainsi que les fonctions de Bessel de première espèce et d'ordre 0/1 :  $J_{0/1}(x)$ .

$$E_{\theta,\perp}(r, \omega, t) = \frac{k_f}{\sigma_f + j\omega\epsilon_f} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_m}{\mu_m}} \cdot E_0 \cdot \frac{J_1(r,k)}{J_0(R,k)} \cdot e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma_f \cdot \vec{E} \quad (2)$$

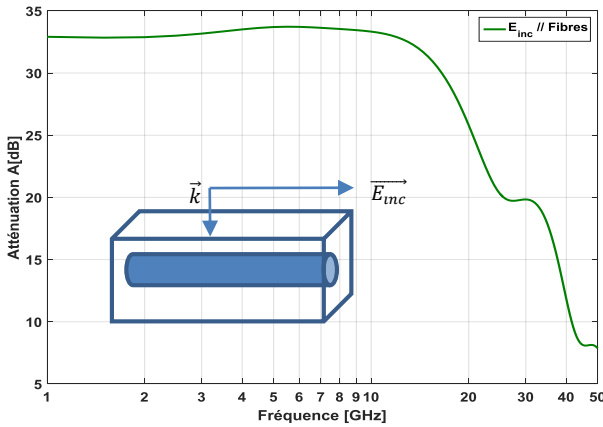


Fig. 8. Atténuation du champ parallèle aux fibres

D'après la relation constitutive (2), on déduit les courants induits pour les deux cas précédents. On pourrait ainsi expliquer la différence entre les valeurs de l'atténuation par le fait que la polarisation du champ électrique influence le courant sollicité dans les fibres, ce qui affecte l'intensité du champ opposé au champ incident.

#### IV. MESURES

Le paragraphe précédent (III-B.) met en évidence l'anisotropie des matériaux composites. Toutefois, leurs propriétés électriques dépendent, non seulement de la polarisation de l'onde incidente, mais aussi de sa fréquence. Les matériaux considérés étant non-magnétiques, les

protocoles de mesure mis en œuvre doivent permettre d'accéder à la permittivité et/ou la conductivité effective.

En statique, les conductivités transversales et longitudinales ( $\sigma_x$  et  $\sigma_y$ ) sont mesurées à l'aide de la méthode des pointes (Fig. 9). Cet essai a pour but de caractériser des couches minces, il permet de remonter à la conductivité à partir de la résistance de la plaque et de ses dimensions géométriques. Les pointes doivent être en contact direct avec les fibres afin d'assurer la circulation du courant. Des premiers résultats montrent que les composites tissés sous test présentent une forte conductivité effective dans le plan (x,y) de l'ordre de  $10^4$  S/m.

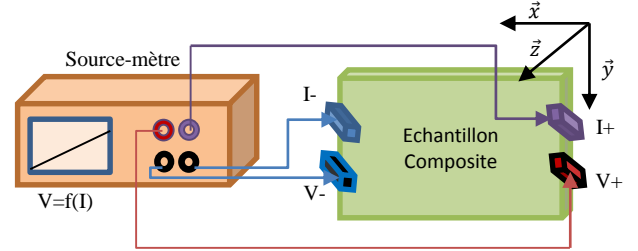


Fig. 9. Montage de la méthode des pointes

Quant à la permittivité ( $\epsilon_z$ ,  $\sigma_z$ ) en basses fréquences, un banc d'essai capacitif est mis en place afin de calculer le circuit électrique équivalent du composite. En outre, pour couvrir des fréquences plus élevées, des essais large bande en cellule coaxiale peuvent être utilisés [11].

#### Références

- [1] V. Préault, R. Corcolle, L. Daniel, L. Pichon, "Effective permittivity of shielding composite materials for microwave frequencies", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55, No. 6, pp. 1178-1186, 2013.
- [2] Jiaran Qi, Henrik Kettunen, Henrik Wallén, and Ari Sihvola, Quasi-Dynamic Homogenization of Geometrically Simple Dielectric Composites, *ACES JOURNAL*, VOL. 25, NO. 12, DECEMBER 2010, pp 1036-1045.
- [3] Henrik Kettunen, Jiaran Qi, Henrik Wallén, and Ari Sihvola, Homogenization of Thin Dielectric Composite Slabs: Techniques and Limitations, *ACES JOURNAL*, VOL. 26, NO. 3, MARCH 2011, pp 179-187.
- [4] R. Tumayan, X. Bunlon, A. Reineix, "A method using an open TEM cell to extract the complex permittivity of an unknown material", 2014 International Symposium on EMC, pp. 1102-1106, Oct. 2014.
- [5] D. Micheli *et al.*, "Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete composite reinforced with carbon nanotubes in the mobilephones frequency band", *Materials science and engineering B* 188, pp. 119-129, 2014.
- [6] M. S. Mirotnik, S. Yarlagadda, R. McCauley and P. Pa, "Broadband electromagnetic modeling of woven fabric composites", *IEEE Trans. on Microwave theory and techniques*. Vol. 60, pp. 158-169, Jan. 2012.
- [7] L. Yao, X. Wang, F. Liang, R. Wu, B. Hu, Y. Feng, and Y. Qiu, "Modeling and experimental verification of dielectric constants for three-dimensional woven composites," *Composites Sci. Technol.*, vol. 68, pp.1794-1799, 2008.
- [8] V. Volski and G. Vanderbosch, "Full-wave electromagnetic modeling of fabrics and composites," *Composites Sci. Technol.*, vol. 69, pp. 161-168, 2009.
- [9] G. Al Achkar, L. Pichon, N. Benjelloun, L. Daniel, "A broadband electromagnetic homogenization method for composite materials", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018 (accepted)
- [10] V. Préault, R. Corcolle, L. Daniel, L. Pichon, "Influence of skin effect on the effective shielding effectiveness of composite materials", *Journal of applied Physics* 115, 154904, 2014.
- [11] A. Gensbittel, A. Banisadr, O. Dubrunfaut, J.C. Badot, A. Kreisler, A. Degardin, "Caractérisations diélectriques de films minces d'YBaCuO semiconducteur en vue de l'optimisation de bolomètres pour l'imagerie THz", 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux 2010.