Homogénéisation de matériaux composites pour le blindage électromagnétique

Valentin Préault, Romain Corcolle, Laurent Daniel, Lionel Pichon

▶ **To cite this version:**

Valentin Préault, Romain Corcolle, Laurent Daniel, Lionel Pichon. Homogénéisation de matériaux composites pour le blindage électromagnétique. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065257

HAL Id: hal-01065257
https://hal.science/hal-01065257

Submitted on 18 Sep 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.

Homogénéisation de matériaux composites pour le blindage électromagnétique

Valentin PREAULT[1], Romain CORCOLLE[1], Laurent DANIEL[1,2] et Lionel PICHON[1]

[1] Laboratoire de Génie Électrique de Paris, CNRS (UMR 8507)/SUPELEC/UPMC/Univ Paris-Sud, 11 rue Joliot Curie, 91192 Gif sur Yvette, France.

[2] School of Materials, University of Manchester, M1 7HS, Manchester, UK.

RESUME – Afin d'alléger la masse des systèmes dans le domaine des systèmes embarqués, le recours à des boîtiers de blindage en matériau composite commence à être envisagé. Malheureusement, les outils numériques classiques tels que Eléments Finis pour modéliser ces systèmes ne peuvent être utilisés car cela mène à un problème numérique trop complexe à résoudre à cause du trop grand écart entre l'échelle des hétérogénéités et celle de la structure. L'utilisation des méthodes d'homogénéisation est alors une solution pertinente pour étudier les matériaux composites. Ce papier présente un modèle d'homogénéisation dynamique valide sur une large gamme de fréquences.

Mots-clés – Milieu effectif, Compatibilité Electromagnétique (CEM), Problèmes d'inclusion.

1. INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux composites se répand de plus en plus rapidement dans les filières automobiles et aéronautiques grâce aux gains que cela peut apporter sur la masse du véhicule ou de l'aéronef. Afin de réduire encore plus la masse du véhicule ou de l'aéronef, les constructeurs envisagent de remplacer les boîtiers de blindage, actuellement en aluminium par des matériaux composites. Le recours à ces nouveaux matériaux doit donc s'accompagner d'outils de modélisation pertinents afin de prédire correctement les performances que l'on peut obtenir.

Les outils numériques classiques tels que la Méthode des Eléments Finis ne permettent pas d'étudier un boîtier de blindage (taille de l'ordre de la dizaine de cm) réalisé en matériau composite de type matrice époxy renforcée par des fibres de carbone (diamètre de l'ordre de la dizaine de μm). Un tel problème numérique requerrait des capacités de calcul difficilement accessibles. L'utilisation des méthodes d'homogénéisation permet d'outrepasser ces limitations en prédisant le comportement macroscopique du matériau composite afin de remplacer ce dernier par un matériau homogène dans le calcul de structure (voir Figure 1), menant de fait à un problème numérique bien plus raisonnable.

S'il existe de nombreux modèles d'homogénéisation pour les matériaux hétérogènes, la plupart d'entre eux sont adaptés à des sollicitations quasi-statiques ; et ceux développés pour des sollicitations dynamiques (comme c'est le cas dans une application de blindage CEM) ne sont pas pertinents sur toute une large gamme de fréquences. Ce papier présente un nouveau modèle d'homogénéisation semi-analyique basé sur des problèmes d'inclusion et permettant de modéliser sur une large gamme de fréquences des matériaux composites pour le blindage CEM.

2. MODÈLE D'HOMOGÉNÉISATION

Le modèle d'homogénéisation utilisé dans cette contribution est basé sur des problèmes d'inclusion [1]. L'hypothèse est faite que chacune des phases se comporte "en moyenne" comme une inclusion plongée dans un milieu infini (voir Figure 2). Le choix des propriétés du milieu infini permet alors de modéliser les éventuelles interactions entre les constituants. Pour des sollicitations statiques, des choix simples ont permis de retrouver des bornes ou estimations classiques en homogénéisation.

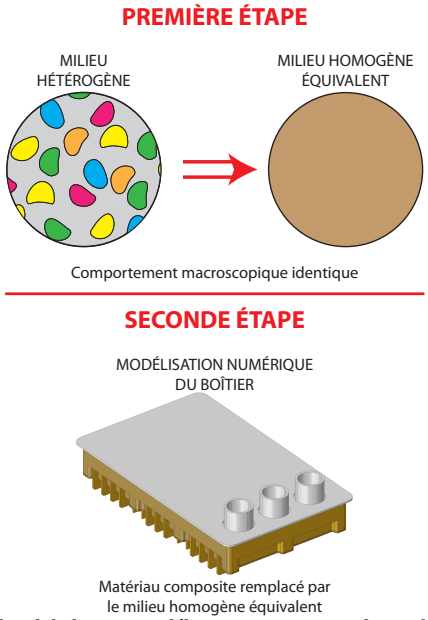

Fig. 1. Démarche globale pour modéliser une structure utilisant des matériaux composites.

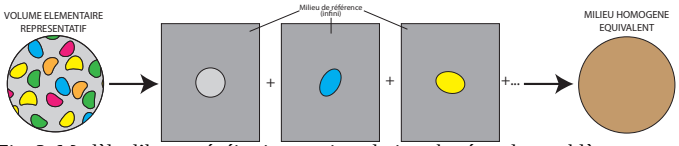

Fig. 2. Modèle d'homogénéisation semi-analytique basé sur les problèmes d'inclusion.

L'extension de ce modèle aux sollicitations dynamiques peut se faire également à travers le choix des propriétés de ce milieu infini [2] ce qui a permis d'améliorer le modèle de Maxwell-Garnett [3], couramment utilisé pour ce type d'application. Par ailleurs, le modèle d'homogénéisation basé sur les problèmes d'inclusion permet de retrouver cette estimation de Maxwell-Garnett (MG) en choisissant les propriétés du milieu infini comme suit :

$$\varepsilon^*_\infty = \varepsilon^*_1 \tag{1}$$

où l'indice 1 vaut pour la matrice et l'indice 2 pour les renforts conducteurs.

L'extension de ce modèle aux sollicitations dynamiques s'est faite à travers l'introduction du rapport ϕ/λ (ϕ taille caractéristiques des renforts conducteurs, λ longueur d'onde dans le matériau composite) dans le choix des propriétés du milieu infini :

$$\varepsilon^*_\infty = \varepsilon^*_1 + \varepsilon^*_2 \cdot \left(\frac{\phi}{\lambda}\right)^2 \tag{2}$$

Néanmoins, ce nouveau modèle (appelé MHD pour Modèle d'Homogénéisation Dynamique) atteignait ses limites dès lors que la répartition du champ électrique dans les renforts conducteurs faisait apparaître une influence de l'épaisseur de peau (hautes fréquences et/ou grande conductivité).

Un nouveau modèle (appelé MHDE pour Modèle d'Homogénéisation Dynamique Etendu) permettant de prendre en compte cette influence de l'effet de peau a été développé. Cela se traduit par l'introduction des pertes Joule des renforts conducteurs dans la conductivité électrique σ_∞ du milieu infini [4] :

$$\varepsilon^*_\infty = \varepsilon^*_1 - j\frac{\sigma_\infty}{\omega} \tag{3}$$

$$\frac{\sigma_\infty}{\omega} = \frac{2}{R^2}(1+f_2)\varepsilon_1 \int_0^R r \left|\frac{\mathcal{J}_1(r\cdot k_2)}{\mathcal{J}_0(R\cdot k_2)}\right|^2 dr \tag{4}$$

où k_2 représente le vecteur d'onde dans les fibres, et $\mathcal{J}_1$ et $\mathcal{J}_0$ sont les fonctions de Bessel de 1ère espèce du 1er et du 2nd ordre. R représente le rayon des fibres et f_2 la fraction volumique de ces dernières. Cette expression provient en fait d'une estimation des pertes Joule dans les fibres.

3. RÉSULTATS

Afin de vérifier les performances de ces modèles, le coefficient de blindage obtenu avec des plaques en matériau composite est étudié. Le matériau composite étudié est constitué de fibres de carbone, toutes parallèles, et noyées dans une résine époxy. Les fibres sont perpendiculaires au champ électrique (d'amplitude E_i) de l'onde plane qui illumine cette plaque (direction de propagation de l'onde perpendiculaire à la plaque). Le coefficient de blindage (SE pour Shielding Effectiveness) de la plaque est obtenu en déterminant l'amplitude du champ électrique E_t de l'onde qui a effectivement traversé la plaque :

$$SE = 20log\left|\frac{E_i}{E_t}\right| \tag{5}$$

Une modélisation par Eléments Finis de cette plaque hétérogène est également faite afin de disposer d'une solution de référence. Il faut noter que les hypothèses utilisées dans ce cas d'étude (plaque infinie) nous permettent de modéliser le système sur un domaine assez restreint grâce à des conditions de périodicité.

Les résultats sont présentés sur la Figure 4. Les conditions du modèle Eléments Finis sont donnés sur la gauche, ainsi que les propriétés des constituants. Sur la figure de droite, les résultats des 3 modèles d'homogénéisation ainsi que la solution de référence Eléments Finis sont tracés en fonction de la fréquence de l'onde incidente. δ_2 indique l'épaisseur de peau dans les fibres.

épaisseur de la plaque : 6mm
diamètre des fibres : 50μm
fraction volumique des fibres f_2 : 19.63%
permittivités : $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_0$
conductivités : $\sigma_1 = 0S/m$ et $\sigma_2 = 40000S/m$

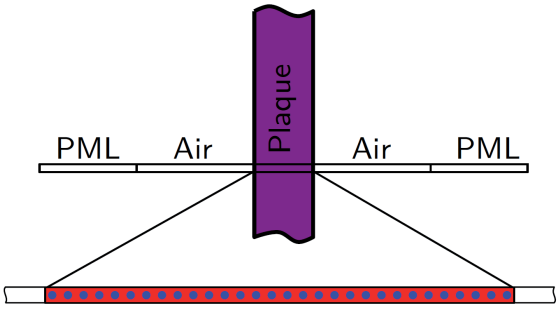

Fig. 3. Conditions du calcul Eléments Finis avec le matériau hétérogène.

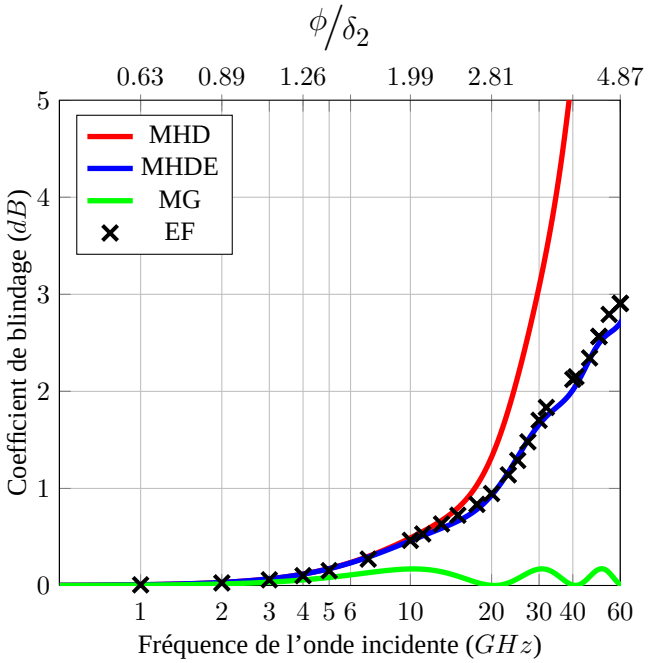

Fig. 4. Comparaison des résultats provenant de 3 modèles d'homogénéisation avec ceux provenant d'une modélisation par Eléments Finis.

Ces résultats montrent que le modèle MG n'est pertinent (dans cette situation) que pour des fréquences de l'ordre du GHz environ. Le MHD a permis d'étendre la gamme de validité jusqu'à 10∼15 GHz. Enfin, le MHDE semble bien prendre en compte le comportement du matériau composite pour des fréquences jusqu'à 60 GHz.

Pour valider le modèle dans un cas plus général, les résultats provenant du MHDE ont été comparés à ceux provenant du modèle Eléments Finis un faisant varier certains paramètres. Les paramètres sont ceux indiqués sur la Figure 3, excepté pour la conductivité de la matrice qui est cette fois légèrement conductrice ($\sigma_1 = 0.1S/m$), et seul le paramètre indiqué dans la légende de chaque figure varie. Les paramètres que l'on fait varier sont : fraction volumique des fibres (Figure 5), diamètre des fibres (Figure 6), permittivité de la matrice époxy (Figure 7), conductivité des fibres (Figure 8).

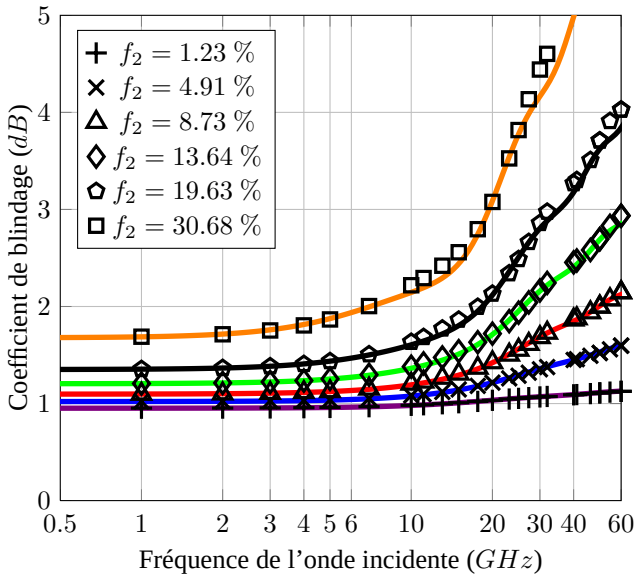

Fig. 5. Comparaison du DHME avec les résultats EF en faisant varier le taux de fibres (à diamètre constant).

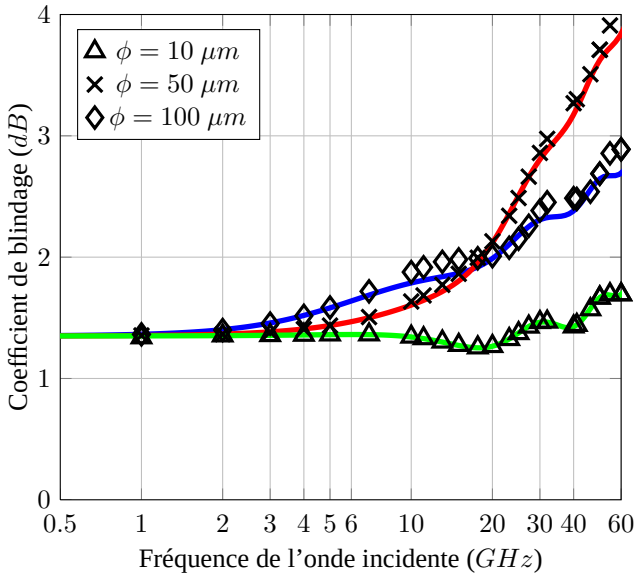

Fig. 6. Comparaison du DHME avec les résultats EF en faisant varier le diamètre des fibres (en maintenant le taux de fibres constant).

Dans tous les cas répertoriés sur ces figures, nous pouvons observer que le DHME fournit une bonne estimation du coefficient de blindage de la plaque composite. L'erreur avec les résultats Eléments Finis reste faible ($< 5\%$). Le modèle est pertinent, que ça soit en hautes fréquences et avec des conductivités importantes de fibres. La gamme de validité du DHME est donc bien plus large que pour les modèles MG et DHM qui étaient limités à de plus basses fréquences ($\sim$GHz pour MG, $\sim$10GHz pour le DHM) lorsque le contraste en conductivité était important.

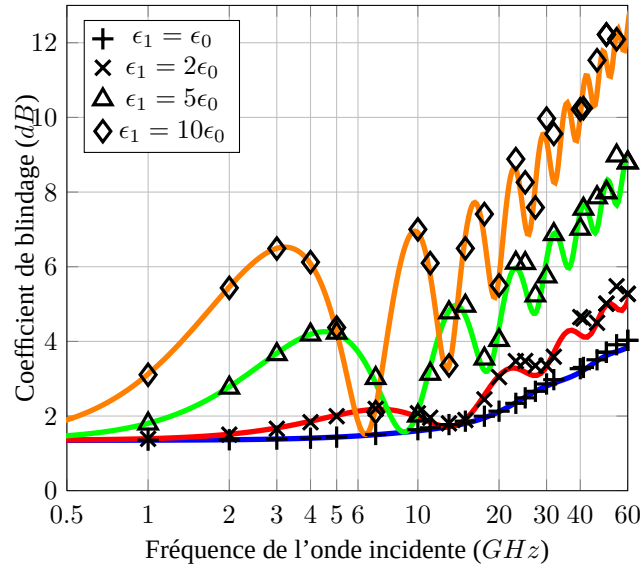

Fig. 7. Comparaison du DHME avec les résultats EF en faisant varier la permittivité de la matrice.

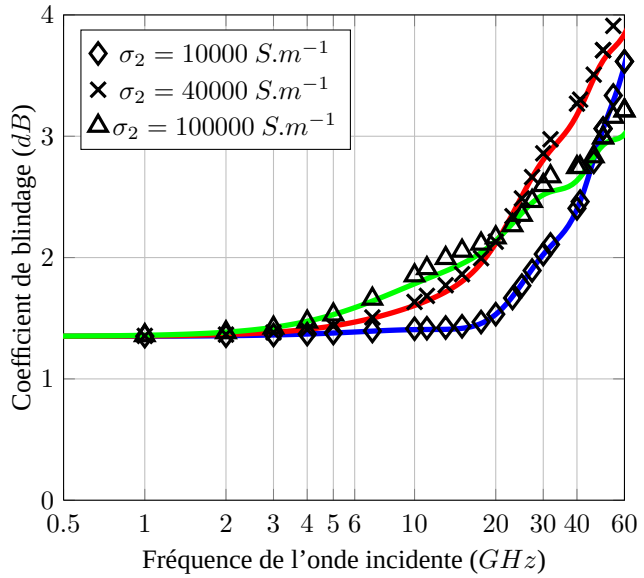

Fig. 8. Comparaison du DHME avec les résultats EF en faisant varier la conductivité des fibres (à diamètre constant).

4. CONCLUSION

Ce nouveau modèle d'homogénéisation semi-analytique fournit une estimation pertinente des propriétés électromagnétiques de matériaux composites pour des applications de blindage CEM. La gamme de validité du modèle permet de prendre en compte une large plage de fréquences mais aussi des conductivités des renforts élevées. Ce modèle peut maintenant être inséré dans un modèle numérique pour déterminer les performances obtenues avec des matériaux composites du types fibres de carbone unidirectionnelles/matrice époxy. Une poursuite de ces travaux sera de prendre en compte d'autres types de microstructure, comme les tissages de fibres de carbone plongés dans une matrice époxy, strucure intensivement utilisée dans le domaine des composites pour des raisons de tenue mécanique.

[1] L. Daniel, R. Corcolle, "A note on the effective magnetic permeability of polycrystals", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 7, pp. 3153–3158, 2007.

[2] V. Préault, R. Corcolle, L. Daniel, L. Pichon, "Effective permittivity of shielding composite materials for microwave frequencies", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 6, pp. 1178–1186, 2013.

[3] A. Sihvola, *ElectromagneticMixing Formulas and Applications*, IEE Electromagnetic Waves Series 47 (1999).

[4] V. Préault, R. Corcolle, L. Daniel, L. Pichon, "Influence of Skin Effect on the Effective Permittivity of Shielding Composite Materials", *J. Appl. Phys.*, vol. 115, pp. 154904, 2014.