



# L'ÉNERGIE AU CŒUR DES ONDES

## RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT :

### GESTION "INTELLIGENTE"

#### **Prédiction des propriétés effectives de matériaux composites par une méthode de Machine Learning**

#### *Prediction of the effective properties of composite materials by a Machine Learning method*

---

**Kameni Abelin, Palessonga Den, Bensetti Mohamed**

*Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris – GeePs  
CNRS UMR8507 CentraleSupélec Université Paris-Saclay Sorbonne Université  
11, rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91190 Gif sur Yvette*

---

Mots clés (*en français et en anglais*) : *Efficacité de blindage, matériaux composites, réseaux de neurones*  
: *Shielding effectiveness, composite materials, neural network*

---

#### **Résumé/Abstract**

Par soucis de réduction de poids et gain de place, les matériaux composites sont progressivement introduits dans la fabrication des boîtiers de protection de systèmes embarqués. L'estimation des propriétés physiques effectives d'un milieu homogène équivalent à un matériau composite est très importante pour le dimensionnement de ces nouveaux types de boîtiers. Lorsque la structure interne de ces matériaux composites est complexe ou inconnue, les approches d'homogénéisation analytiques classiques ne sont pas adaptées. Dans cet article, une approche de prédiction des propriétés effectives de matériaux composites via un problème inverse basé sur une méthode de Machine Learning (réseaux de neurones) est présentée. La procédure consiste à évaluer les propriétés effectives d'un matériau composite en utilisant des valeurs d'efficacité de blindage issues d'un modèle analytique.

To reduce weight and save space, composite materials are progressively introduced in the manufacture of enclosures for embedded systems. The estimation of the effective physical properties of a homogeneous medium equivalent to a composite material is very important for the design of these new types of enclosures. When the internal structure of these composite materials is complex or unknown, classical analytical homogenization approaches are not suitable. In this paper, an approach to predict the effective properties of composite materials through an inverse problem based on a Machine Learning method (neural network) is presented. The process consists of evaluating the effective properties of a composite material using shielding effectiveness values from an analytical model.

#### **1 Introduction**

Le progrès technologique de ces dernières années a conduit à une augmentation des dispositifs électroniques embarqués dans le domaine des transports (automobile, aéronautique, ferroviaire, maritime). Le nombre important de cette électronique a accru les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM). Afin de garantir le bon fonctionnement de ces systèmes embarqués, des solutions de protection doivent être mises en place pour réduire le rayonnement électromagnétique et augmenter l'immunité de ceux-ci. Les boîtiers de blindage électromagnétique sont l'une des solutions préconisées pour réduire les problèmes d'interférences électromagnétiques, mais leurs utilisations ajoutent des contraintes supplémentaires en termes de poids et de place. Alliant légèreté et bonnes propriétés mécaniques, les matériaux composites pouvant offrir les mêmes performances d'efficacité sont en train de remplacer progressivement les matériaux conducteurs classiques.

L'introduction de ces matériaux pour la protection des systèmes électroniques passe par leur caractérisation qui est d'autant plus compliquée que la structure interne du matériau est complexe. Les méthodes d'homogénéisation sont mises en place pour déterminer les propriétés physiques effectives de ces matériaux (perméabilité magnétique, conductivité et permittivité électrique) qui seront par la suite utilisés pour le dimensionnement des boîtiers. Pour les cas simples de matériaux composites des approches d'homogénéisation analytiques ont été développées pour simplifier la modélisation de ces matériaux. Le modèle d'homogénéisation de Maxwell-Garnett est utilisé dans les cas des applications en quasi-statique [1] et un modèle d'homogénéisation dynamique qui prend en compte les effets de la haute fréquence a été proposé pour traiter un plus grand spectre d'applications [2]. Lorsque les matériaux composites sont de structures internes plus complexes ou inconnues, ces approches analytiques ne conviennent pas et il est nécessaire de mettre en place d'autres procédures permettant d'estimer ces propriétés physiques effectives.

L'objectif de notre travail est de prédire les propriétés effectives d'un équivalent homogène au matériau composite via un problème inverse basé sur une méthode de Machine Learning. La procédure consiste à prédire les propriétés effectives en utilisant des valeurs d'efficacité de blindage issues de l'expérimentation ou de la modélisation. La méthode de Machine Learning consiste en une procédure de réseaux de neurones dont les données d'entrées contiennent l'efficacité de blindage et les données de sorties sont la conductivité électrique  $\sigma$ , la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  et la permittivité électrique  $\epsilon_r$ . Dans cet article, les données d'entrées sont construites à l'aide d'un modèle d'homogénéisation analytique.

## 2 Propriétés effectives physiques du matériau composite

Pour déterminer l'efficacité de blindage d'une plaque, on enregistre le champ électromagnétique en un point en présence et en absence de la plaque. Le champ incident ( $E_i, H_i$ ) étant le champ en absence de la plaque et le champ total ( $E_T, H_T$ ) c'est-à-dire diffracté plus incident étant le champ en présence de la plaque. On définit alors l'efficacité de blindage magnétique par :  $SE_H = 20 \text{ Log} \left( \left| \frac{H_i}{H_T} \right| \right)$

On considère dans cet exemple une plaque composite en résine d'époxy renforcée par des fibres conductives cylindriques. La densité de fibres conductives est de  $\tau_f = 19.83\%$ . La plaque est assimilée à un milieu bi-phasique dilué et les modèles d'homogénéisation analytiques peuvent s'appliquer pour en déterminer les propriétés effectives équivalentes.

Dans ce qui suit, pour deux cas de polarisation du champ incident nous allons utiliser un réseau de neurones de type « feed-forward back propagation » à deux couches pour évaluer la conductivité effective du milieu homogène équivalent. Ce réseau de neurones prendra en données d'entrées, l'efficacité de blindage et la fréquence et rendra en sortie la valeur de conductivité du milieu homogène équivalent. L'entraînement du réseau de neurones se fera à l'aide de la solution analytique 1D du calcul de l'efficacité de blindage. Les résultats obtenus seront comparés à ceux des modèles d'homogénéisation analytiques.

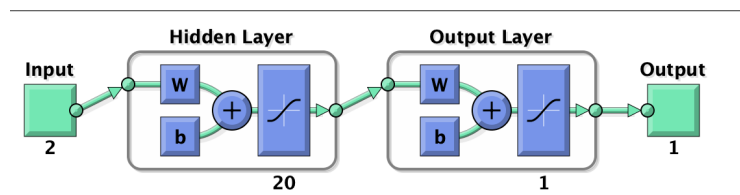


Figure 1 : structure du réseau de neurones

### 2.1 Polarisation parallèle aux fibres.

Dans cet exemple, on considère une plaque de 1 cm d'épaisseur comportant 5 fibres suivant son épaisseur (Figure 2). La matrice contenant les fibres est de propriétés  $\sigma_m = 0 \text{ S/m}$  et  $\epsilon_{rm} = 1$ . Lorsque le champ d'excitation est polarisé parallèlement aux fibres, le modèle d'homogénéisation analytique qui s'applique est celui de Wiener qui se traduit par une loi de mélange [4]. Dans ce cas, la conductivité effective du milieu homogène équivalent s'écrit :  $\sigma_{eff} = \tau_f \sigma_f + (1 - \tau_f) \sigma_m$

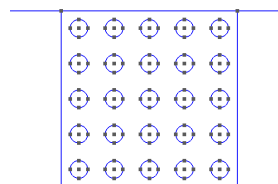


Figure 2 : Vue 2D de la plaque en résine époxy renforcée de fibres conductives, 5 fibres dans l'épaisseur.

Le réseau de neurones a été entraîné pour une fréquence de 100 MHz, pour une efficacité de blindage comprise entre 20 dB et 60 dB et pour des conductivités comprises entre 20 S/m et 150 S/m. Sur la Figure 3, les résultats du

modèle d'homogénéisation analytique et celui du réseau de neurones sont comparés. On trace la conductivité prédite et homogénéisée en fonction de l'efficacité de blindage. Ces résultats montrent un bon comportement du réseau de neurones qui fournit des estimations très proches du modèle analytique lorsque les données d'entrée sont dans le même intervalle que les valeurs utilisées pour l'entraînement.

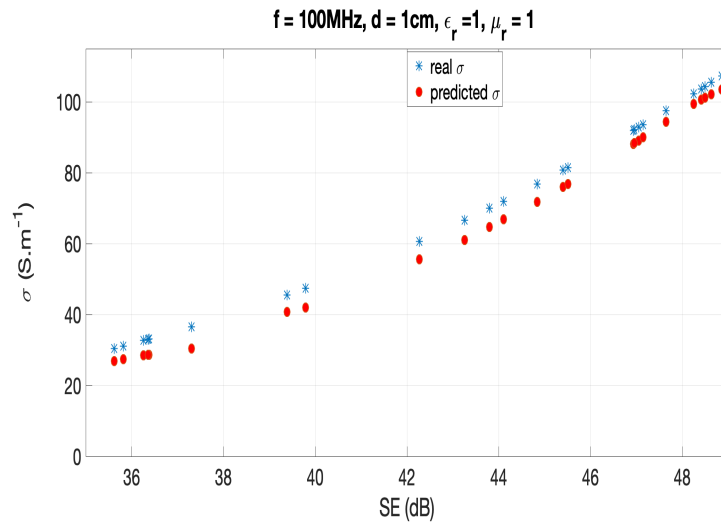


Figure 3 : Comparaison des conductivités effectives du milieu homogène équivalent prédite et homogénéisée dans le cas d'un champ incident parallèle aux fibres.

## 2.2 Polarisation perpendiculaire aux fibres.

Dans cet exemple, on s'intéresse au cas où le champ d'excitation est polarisé perpendiculairement aux fibres. Le modèle d'homogénéisation dynamique est celui qui donne la meilleure estimation des propriétés effectives [2]. Dans ce cas, la conductivité effective du milieu homogène équivalent dépend de la fréquence. Son calcul analytique est présenté dans les références [2,3].

Pour entraîner le réseau de neurones, on s'appuie sur les résultats de calcul d'efficacité de blindage pour une plaque d'épaisseur 6 mm comportant  $\tau_f = 19.63\%$  de fibres conductives  $\sigma_f = 10000$  S/m et  $\epsilon_{rf} = 1$  dans une matrice d'époxy  $\sigma_e = 0$  S/m et  $\epsilon_{re} = 2$ . Ces fibres sont placées pour en avoir 30 suivant l'épaisseur de la plaque (Figure 4).

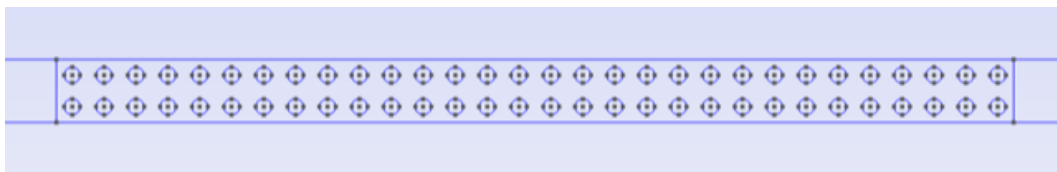


Figure 4 : Vue 2D de la plaque en résine époxy renforcée de fibres conductives, 30 fibres dans l'épaisseur.

Pour une gamme de fréquence [100 MHz, 5 GHz], on a l'efficacité de blindage SE dans l'intervalle [0, 3E-1] et la conductivité du milieu homogène équivalent dans [0, 1E-2]. Ils sont évalués en N=200 points de fréquence et serviront respectivement comme données d'entrée et données de sortie pour l'entraînement du réseau de neurones. Une autre plaque, de même structure que la précédente, d'épaisseur 3mm, comportant  $\tau_f = 19.83\%$  de fibres conductives  $\sigma_f = 50000$  S/m et  $\epsilon_{rf} = 1$ , est utilisée pour tester le réseau de neurones sur la même gamme de fréquence. Les données efficacité de blindage obtenues de manière analytique sont utilisées en entrée du réseau de neurones. On note que cette efficacité de blindage se trouve dans l'intervalle [0, 35E-2]. Nous comparons (Figure 5 et 6) la conductivité du milieu homogène prédite et celle calculée par la formule d'homogénéisation analytique. La prédiction est proche de la courbe analytique lorsque les valeurs d'entrées sont dans le même intervalle que celles utilisées pour l'entraînement du réseau de neurones. Lorsqu'on est au-delà ( $0.3 < SE < 0.35$ ), la courbe de prédiction présente un plateau et s'éloigne de la courbe analytique. Ce résultat montre un bon comportement de l'approche basée sur un réseau de neurones.

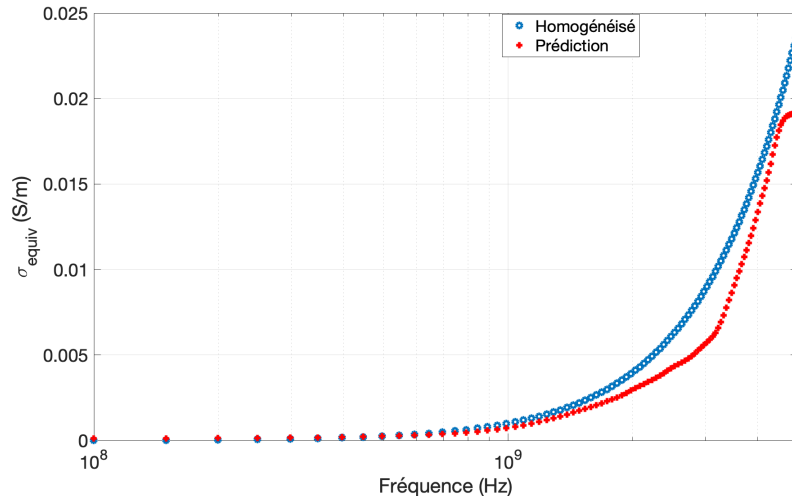


Figure 5 : Comparaison des conductivités effectives du milieu homogène équivalent prédite et homogénéisé en fonction de la fréquence, dans le cas d'une polarisation incidente perpendiculaire aux fibres.

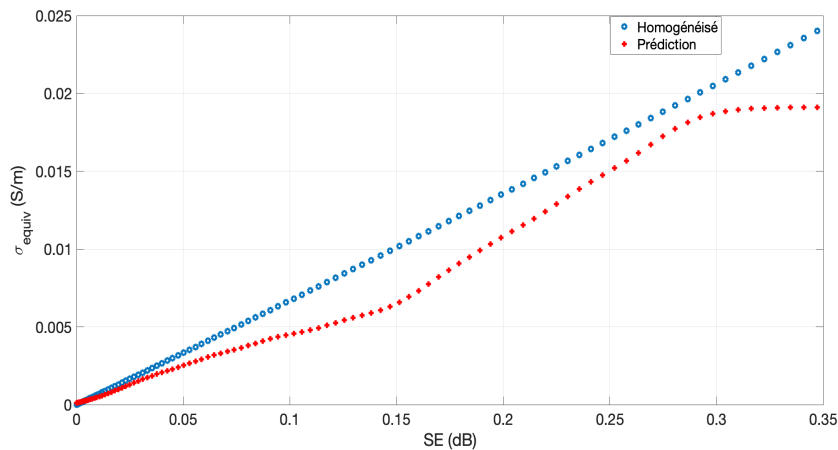


Figure 6 : Comparaison des conductivités effectives du milieu homogène équivalent prédite et homogénéisé en fonction de l'efficacité de blindage, dans le cas d'une polarisation incidente perpendiculaire aux fibres.

### 3 Conclusion

L'exemple proposé dans cette version montre la pertinence de l'utilisation d'une approche de Machine Learning pour résoudre un problème inverse pour la caractérisation de matériaux composites. Pour deux exemples de plaque comportant un taux de fibres de 19.83%, la comparaison des propriétés effectives montre un bon comportement du réseau de neurones pour l'estimation des propriétés effectives à partir de la connaissance de l'efficacité de blindage et de la fréquence.

### Références bibliographiques

- [1] Sihvola, A.H., "Electromagnetic Mixing Formulae and Applications". IEE Electromagnetic Waves Series 47, 1999.
- [2] V. Preault, R. Corcolle, L. Daniel et L. Pichon, "Effective Permittivity of Shielding Composite Materials for Microwave Frequencies". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 55.6, pp. 1178–1186, 2013.
- [3] M. Boubekeur, A. Kameni et L. Pichon, "Modeling of thin heterogeneous sheets in the discontinuous Galerkin method for 3D transient scattering problems". European Physical Journal: Applied Physics, vol. 73, 2016
- [4] J.R. Gaier, "Intercalated graphite fiber composites as EMI in aerospace structures", IEEE, Trans Electromagn. Compatibility, vol.34, n.3, pp-351-356, 1992.