



**HAL**  
open science

## Vers la Modélisation de Structures Textiles Complexes à l'aide de Simulateur Full-Wave

Farid Haddad, B. Sauviac, Bernard Bayard

### ► To cite this version:

Farid Haddad, B. Sauviac, Bernard Bayard. Vers la Modélisation de Structures Textiles Complexes à l'aide de Simulateur Full-Wave. 20eme Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM 2020), Apr 2021, Lyon, France. hal-03828459

**HAL Id: hal-03828459**

**<https://hal.science/hal-03828459v1>**

Submitted on 25 Oct 2022

**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.



## Vers la Modélisation de Structures Textiles Complexes à l'aide de Simulateur Full-Wave

**Farid Haddad, Bernard Bayard, Bruno Sauviac**

Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516 CNRS, Université de Lyon, Université Jean Monnet, F-42000 Saint-Étienne, France.

(farid.haddad, bernard.bayard, bruno.sauviac)@univ-st-etienne.fr

**Résumé .** Une méthode simple de modélisation de blindage électromagnétique des structures homogènes et non homogènes a été proposée. L'exploitation de la forme périodique de ces structures textiles permet d'établir un modèle simple de calcul de l'efficacité de blindage sur la base de leurs motifs périodiques planaires.

L'approche de modélisation par motif périodique a été validée pour les grilles et tresses métalliques en configuration planaire.

Les résultats de simulation numérique 3D des motifs périodiques obtenus par un outil de simulation numérique commercial montrent un très bon accord avec les modèles analytiques existant.

### I. INTRODUCTION

Les avancées technologiques en électrotechnique et en électronique de puissance ont permis l'électrification de nombreuses fonctions industrielles, notamment dans les transports ferroviaires, aéronautiques ou automobiles. Dans l'ensemble de ces fonctions, la compatibilité électromagnétique (CEM) est devenue une contrainte majeure dont l'étude et la compréhension ne cessent de se complexifier. En effet, le nombre de systèmes électriques intégrés dans lesquels coexistent des courants faibles et élevés devient de plus en plus important. Ces systèmes électriques ont une chaîne de puissance significative composée des batteries, des convertisseurs de puissance et des moteurs électriques. Ces organes sont repartis en différents endroits en fonction de la place disponible et de leur utilisation, la conséquence est un câblage complexe permettant le passage des courants élevés, générant eux-mêmes des champs électromagnétiques importants de différentes fréquences selon les dispositifs qui les créent [1], [2], [3].

Dans ce contexte, la conception d'un tel équipement et ses connecteurs est une étude complexe à mener. Des nombreux paramètres interviennent dans les phases d'études qui permettent aux concepteurs de maîtriser les contraintes CEM à bord.

Dans l'objectif de répondre à ces aspects CEM, plusieurs pistes sont envisagées. Placer par exemple les équipements sensibles dans des boîtiers métalliques permet un blindage électromagnétique efficace contre les perturbations rayonnées [4].

Travailler directement sur le revêtement des câbles permet d'assurer l'immunité des signaux transmis et/ou de minimiser le rayonnement émis. C'est sur cette approche que porte notre travail. Nous sommes particulièrement intéressés à la problématique du blindage de câbles à l'aide de structures textiles métalliques (tresses, tissus ou tricots) constituées par une ou plusieurs couches cylindriques concentriques au conducteur intérieur.

Pour le calcul du blindage électromagnétique obtenu pour différentes configurations capables de protéger les câbles, plusieurs modèles analytiques ont été proposés dans littérature principalement pour modéliser des câbles tressés [5], [6], [7], [8], [9]. L'utilisation d'outils de simulation numérique, permettant de résoudre le problème électromagnétique est très difficile, à cause de la complexité des réalisations textiles. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies permettant de simuler numériquement des structures relativement complexes, sans avoir accès à des super-calculateurs et en assurant un temps de calcul raisonnable.

Le travail présenté dans ce papier met en place des outils de simulations analytiques et numériques du comportement électromagnétique de structures planaires infinies soumises à une onde électromagnétique. En se basant sur le principe de la périodicité, une étude s'est attachée à modéliser des grilles et tresses métalliques qui s'approchent des réalisations pratiques fabriquées avec des technologies textiles. Il s'agit de simuler numériquement une couche non homogène et de tenter d'en obtenir un modèle équivalent en termes de propriétés électromagnétiques. Tout d'abord, l'approche est présentée pour un cas simple d'une couche métallique homogène. Ensuite, les cas de grilles et tresses métalliques sont traités par l'intermédiaire de leurs motifs périodiques planaires. Les résultats obtenus avec notre approche et un logiciel de simulation électromagnétique [10] sont comparés à ceux de calculs issus de modèles analytiques existants, permettant ainsi de montrer la pertinence de l'approche.

### II. PRINCIPE DE LA MODÉLISATION PAR ÉLÉMENT PÉRIODIQUE

L'efficacité de blindage (SE) d'un plan traduit l'affaiblissement du champ traversant le matériau qui constitue le blindage. L'onde électromagnétique va subir des phéno-

mènes de réflexion/réfraction à chaque interface qu'elle va rencontrer en traversant le blindage. Il en résulte globalement une réflexion d'une partie du signal dans l'air et une transmission au-delà du matériau constituant le blindage.

Sur la base des équations de propagation en espace libre, le calcul de l'efficacité de blindage électromagnétique des structures planes homogènes est donnée par l'expression ci-après [11] :

$$SE = \frac{1 - \Gamma^2 T^2}{T(1 - \Gamma^2)} \quad (1)$$

Où  $\Gamma$  et  $T$  désignent respectivement la réflexion à l'interface et la transmission à travers le matériau.

Notre démarche se propose de modéliser l'efficacité de blindage à l'aide d'un outil de simulation numérique. L'approche proposée, permet de limiter les temps de calcul en utilisant un concept de périodicité sur la structure à l'étude. La technique utilisée va être validée sur le cas extrêmement simple d'une plaque homogène dont le résultat est connu et donné par l'équation (1).

Le principe consiste pour commencer, à déterminer un élément périodique de la structure. Dans le cas d'une plaque homogène, il est évident que n'importe quelle portion ayant la même épaisseur que la plaque peut faire l'affaire (voir Fig. 1(a)). Une fois le motif périodique défini, la propriété de périodicité peut être mise à profit en utilisant dans la simulation, des conditions particulières de frontières dites "master/slave" appliquées sur les quatre parois latérales de ce motif élémentaire de façon à reproduire le comportement infini et périodique du plan. Le modèle est excité par une onde plane qui est assurée par des "Floquet ports" utilisés exclusivement pour des structures périodiques suivant deux modes d'excitation (TE, TM) et selon la polarisation (voir Fig. 1(b)). Cette approche du problème permet (à condition d'avoir maillé la cellule élémentaire correctement) de calculer les paramètres  $S_{ij}$  et d'accéder aux champs transmis et de déduire l'efficacité de blindage du plan.

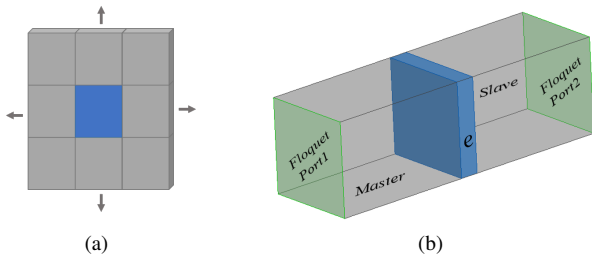


FIGURE 1. (a) Structure périodique infinie, (b) Principe de simulation par motif périodique.

Les résultats des simulations numériques pour différentes configurations physiques et géométriques du plan ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $e$ ) et différentes conditions d'éclairement (incidence,

polarisation) ont été comparés au calcul analytique obtenu par l'équation (1).

On présente sur la Fig. 2 l'un des résultats pour une incidence normale et oblique de l'onde sur un plan métallique d'épaisseur  $e = 100 \mu m$ ,  $\sigma = 10^6 S/m$  et  $\epsilon = \mu = 1$ .

Les différents résultats obtenus en incidence normale et

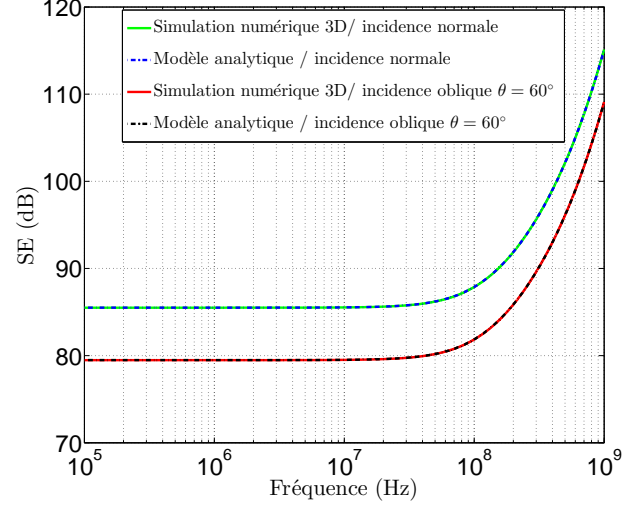


FIGURE 2. Comparaison de SE d'un plan métallique par simulation numérique 3D et le calcul analytique.

oblique avec l'outil de simulation numérique représentent un excellent accord avec ceux issus des calculs analytiques, ce qui valide notre démarche et permet de passer à des structures plus complexes.

### III. VALIDATION DU PRINCIPE SUR UNE GRILLE À GRANDS TROUS

Suivant le principe de la périodicité présenté précédemment, nous procédons à des simulations numériques des grilles métalliques périodiques. L'efficacité de blindage d'une grille métallique planaire (voir Fig. 3(a)) a été calculé dans [12] mais uniquement dans le cas d'ouvertures carrées, grandes devant la longueur d'onde. Ce calcul a été fait pour une polarisation TE (transverse-électrique) ou TM (transverse-magnétique). La modélisation repose sur le calcul de l'impédance électrique de la grille réalisée par des fils de conductivité  $\sigma$ , de perméabilité  $\mu$  et de l'inductance de surface associée  $L_s$ , donnée par [12] :

$$L_s = -\frac{L\mu_0}{2\pi} \log \left( 1 - e^{-2\pi r/L} \right) \quad (2)$$

Avec :  $L$  le coté du motif périodique carré (période de la grille) et  $r$  le rayon de fils.

L'efficacité de blindage de la grille est calculée selon les deux types de polarisation de l'onde incidente (TE ou TM) pour un angle d'incidence ( $\theta$ ) :

$$SE_{TE} = \frac{1 + 2(Z_s^{TE}/Z_0) \cos(\theta)}{2(Z_s^{TE}/Z_0) \cos(\theta)} \quad (3)$$

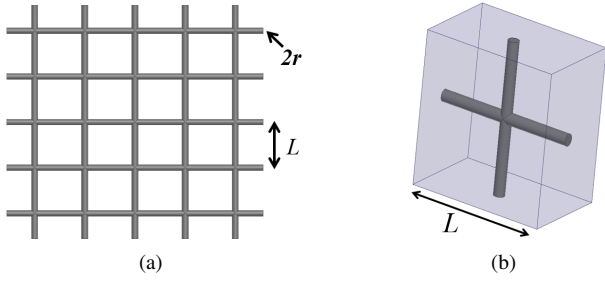


FIGURE 3. (a) Grille homogène carrée, (b) Motif périodique.

$$SE_{TM} = \frac{2(Z_s^{TM}/Z_0) + \cos(\theta)}{2(Z_s^{TM}/Z_0)} \quad (4)$$

$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  est l'impédance de vide.  $Z_s^{TE}$  et  $Z_s^{TM}$  sont les impédances de surface de la grille suivant la polarisation TE ou TM. Elles sont exprimées comme suit :

$$Z_s^{TE} = L Z_w + j\omega L_s \quad (5)$$

$$Z_s^{TM} = Z_s^{TE} - \frac{j\omega L_s}{2} \sin^2(\theta) \quad (6)$$

$Z_w$  est l'impédance de la grille, elle est donnée par :

$$Z_w = \frac{1}{\pi r^2 \sigma} \frac{X I_0(X)}{2 I_1(X)} \quad (7)$$

Avec :  $X = \sqrt{j\omega\mu\sigma r^2}$  et les fonctions  $I_n(X)$  représentent les fonctions de Bessel modifiées d'ordre n.

### III.1. Incidence normale

Sur la base du motif périodique planaire illustré en Fig. 3(b), l'efficacité de blindage obtenue par des simulations numériques 3D de deux types de grilles métalliques (voir Table 1) a été comparée au calcul issu du modèle analytique. Les résultats sont présentés sur la Fig. 4.

TABLE 1. Types de grilles

Types	$L$ (mm)	$r$ (um)	$\sigma$ (MS/m)
Grille 1	5	50	15
Grille 2	3	65	30

### III.2. Incidence oblique

En tenant compte de l'angle d'incidence  $\theta$ , une comparaison de SE obtenue par la simulation et celle du calcul analytique est présentée sur la Fig. 5. Ce calcul a été fait pour la grille 1 avec un angle d'incidence  $\theta = 60^\circ$  en polarisation TE et TM.

On constate que les résultats obtenus en simulation 3D en incidence normale et oblique sont tout à fait comparables et en bonne concordance avec ceux du calcul analytique. Cette modélisation nous permet de valider notre stratégie de simulation et l'usage du principe de périodicité pour les grilles métalliques.

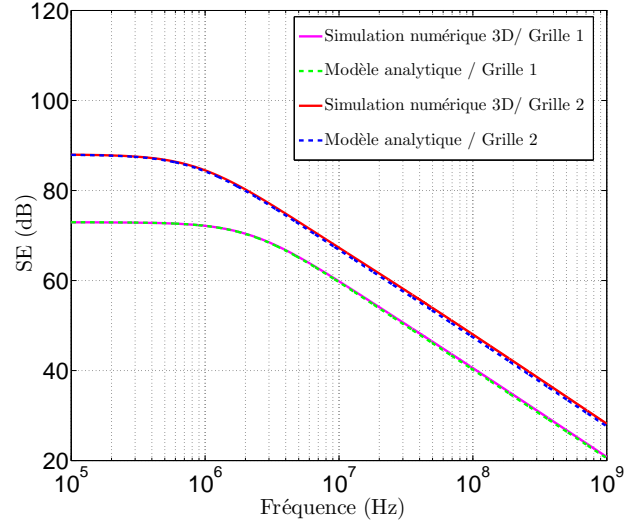


FIGURE 4. Comparaison de SE de grilles métalliques par simulation numérique 3D et le calcul analytique.

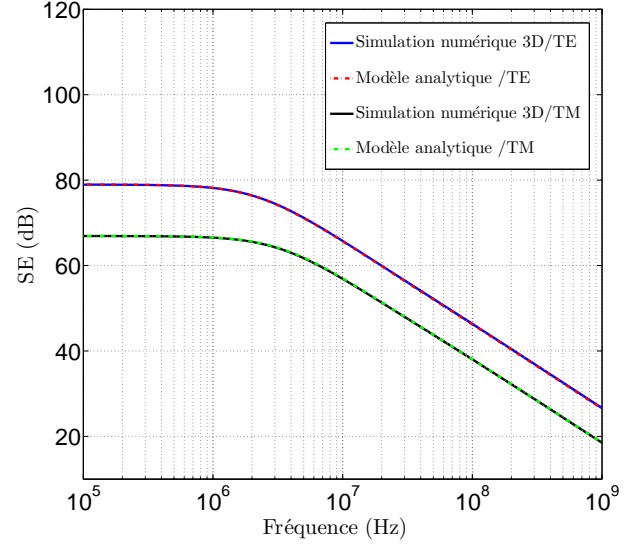


FIGURE 5. Comparaison de SE d'une grille métallique en polarisation TE et TM avec incidence oblique (Grille 1).

## IV. PÉRIODICITÉ POUR LES TRESSSES

Nous proposons dans cette partie d'étendre notre approche en cas des tresses métalliques souvent utilisées pour le blindage des câbles. Analytiquement, plusieurs modèles basés sur le calcul de l'impédance de transfert  $Z_t$ , ont été proposés [5], [6], [7], [8], [9]. Son expression est donnée par la contribution de l'impédance de diffusion due à la diffusion du courant magnétique induit dans le blindage et de la partie inductive provoquée par l'effet des trous et par le couplage entre les fuseaux de la tresse. Dans la Fig. 6, un motif élémentaire d'une tresse simple à trois conducteurs par fuseau est illustré. Ses paramètres géométriques et physiques sont :

$C = 16$  : nombre de fuseaux,  
 $N = 3$  : nombre de conducteurs par fuseau,  
 $d = 0.1$  mm : diamètre d'un conducteur élémentaire,  
 $\sigma = 15$  MS/m : conductivité électrique du matériau,  
 $\varphi = 20^\circ$  : angle de tressage,  
 $L = 1$  mm : période du motif.

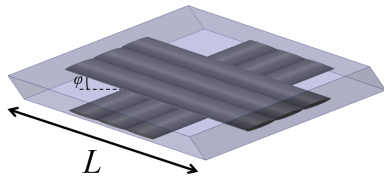


FIGURE 6. Motif périodique d'une tresse simple à trois conducteurs.

Le calcul de l'efficacité de blindage de la tresse est réalisé tout d'abord par simulation numérique 3D et ensuite par un calcul issu des modèles analytiques de l'impédance de transfert [13]. Les résultats sont présentés sur la Fig. 7.

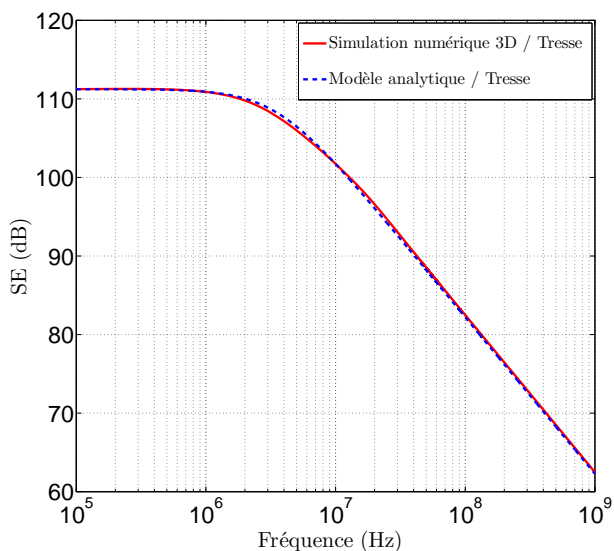


FIGURE 7. Comparaison de SE d'une tresse métallique obtenue par simulation numérique 3D et par calcul analytique.

L'accord obtenu avec l'approche numérique proposée est très bon sur l'ensemble de la gamme de fréquence.

## V. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté une modélisation de l'efficacité de blindage électromagnétique de structures homogènes et non homogènes. Cette modélisation est basée sur l'utilisation des propriétés de périodicité des structures.

Notre approche a été validée pas à pas en augmentant la complexité des blindages à l'étude, d'abord pour une couche homogène, ensuite pour des grilles à grandes

ouvertures carrées et enfin, pour des tresses métalliques en prenant en compte de l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique.

Les résultats obtenus selon l'approche proposée sont en très bon accord avec les calculs des modèles analytiques existant.

Cette approche permet donc d'évaluer les propriétés de blindage de structures complexes ayant un caractère périodique, ce qui est le cas de la plupart des structures de blindage réalisées avec des technologies de type textile. Les outils de simulation permettent de prendre en compte des géométries plus complexes, notre approche, grâce à un temps de calcul raisonnable, permet d'étudier l'influence de paramètres qui ne sont pas accessibles par les modélisations existantes dans la littérature : multifils, croisement de fils, larges ouvertures ou tissage serré, ... Certaines de ces études seront présentées lors du congrès.

## Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre du projet NEXTGEN FUI-AAP22 soutenu par Bpifrance.

## Références

- [1] Y. H. Lee and A. Nasiri, "Conductive CM and DM Noise Analysis of Power Electronic Converters in Electric and Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 392-398, Sep. 2007.
- [2] O. Pinaud, O. Chadebec, L. L. Rouve, J. M. Guichon and A. Vassilev, "Forward Model Computation of Magnetostatic Fields Inside Electric Vehicles", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, pp. 985-988, Feb. 2014.
- [3] P. Concha Moreno-Torres, J. Lourd, M. Lafoz and J. R. Arribas, "Evaluation of the Magnetic Field Generated by the Inverter of an Electric Vehicle", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, pp. 837-844, Feb. 2013.
- [4] Henry. W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", John Wiley, 2nd edition, New York, 1988, ISBN 0-471-85068-3.
- [5] E. F. Vance, "Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-17, pp. 71-77, May. 1975.
- [6] B. Demoulin and P. Degauque, "Shielding Effectiveness of Braids with High Optical Coverage", Proceedings of the International Symposium on EMC, Zurich, pp. 491-495, 1981.
- [7] S. Sali, "An improved model for the transfer impedance calculations of braided coaxial cables", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 33, pp. 139-143, May. 1991.

- [8] T. Kley, “*Optimized single-braided cable shields*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 35, pp. 1-9, Feb. 1993.
- [9] Otin, Ruben, Verpoorte, Jaco, Schippers, H and Isanta, Roger, “*A finite element tool for the electromagnetic analysis of braided cable shields*”, Computer Physics Communications, vol. 191, pp. 209-220, Mar. 2015.
- [10] [www.ansys.com/fr-FR/products/electronics/ansys-hfss](http://www.ansys.com/fr-FR/products/electronics/ansys-hfss)
- [11] A. M. Nicolson and G. F. Ross, “*Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 19, pp. 377-382, Nov. 1970.
- [12] K. F. Casey, “*Electromagnetic shielding behavior of wire-mesh screens*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, pp. 298-306, Aug. 1988.
- [13] F. Haddad and B. Bayard and B. Sauviac, “*Low-Frequency Relation Between Transfer Impedance and Shielding Effectiveness of Braided Cables and Grid Shields*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020.