



**HAL**  
open science

# Modélisation de Parois Minces Conductrices dans une Méthode Galerkin Discontinue pour l'Évaluation du Blindage de Boîtiers d'Équipements Électroniques

Mohamed Boubekour, Abelin Kameni, Lionel Pichon

► **To cite this version:**

Mohamed Boubekour, Abelin Kameni, Lionel Pichon. Modélisation de Parois Minces Conductrices dans une Méthode Galerkin Discontinue pour l'Évaluation du Blindage de Boîtiers d'Équipements Électroniques. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065301

**HAL Id: hal-01065301**

**<https://hal.science/hal-01065301>**

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.

# Modélisation de Parois Minces Conductrices dans une Méthode Galerkin Discontinue pour l'Évaluation du Blindage de Boîtiers d'Équipements Électroniques

M. Boubekour, A. Kamani, L. Pichon

Laboratoire de Génie Électrique de Paris, UMR 8507 CNRS, SUPELEC  
Université Paris Sud et Université Pierre et Marie Curie  
Plateau du Moulon, 91192 Gif sur Yvette, France

**RESUME** – Cet article présente une approche de modélisation permettant d'éviter de mailler les parois minces conductrices en les remplaçant par des interfaces. Ce travail s'appuie sur l'implémentation d'une condition d'interface dans une méthode Galerkin Discontinue en domaine temporel. L'évaluation de l'efficacité du blindage de différentes cavités est proposée en exemple pour illustrer l'intérêt de cette approche.

**MOTS-CLES** – Compatibilité Électromagnétique, Efficacité de Blindage, Parois Conductrices, Domaine Temporel, Galerkin Discontinue

## 1 Introduction

Le développement des nouvelles technologies dans les domaines tels que l'électronique, l'électricité et l'électromagnétisme, a donné une importance considérable à l'étude de la cohabitation des systèmes. En compatibilité électromagnétique, plusieurs problèmes requièrent une approche numérique adéquate afin d'évaluer l'efficacité du blindage. La prise en compte de petits détails par rapport à la taille du système est importante lors des simulations numériques, mais conduit à l'augmentation de la taille de la mémoire utilisée et du temps de calcul.

Dans le but d'éviter la discrétisation spatiale des parois minces, plusieurs conditions d'interface ont été développées. Dans le domaine fréquentiel, une solution analytique peut être utilisée pour lier le champ électromagnétique des deux côtés de la paroi [1]. Dans le domaine temporel, une transformée de Fourier ou Laplace inverse peut être combinée avec un produit de convolution. Par exemple l'implémentation de cette approche a été réalisée dans une méthode de Différences Finies dans le Domaine Temporel (DFDT) [2]. Néanmoins, l'erreur résiduelle présente dans la méthode DFDT peut affecter significativement le résultat numérique.

La méthode Galerkin Discontinue (GD) est basée sur une résolution locale du problème dans chaque élément. Elle nécessite des termes de flux pour connecter les éléments adjacents [3]. Contrairement aux méthodes DFDT, la méthode DG a l'avantage d'être bien adaptée, aux maillages non structurés, à l'utilisation des éléments d'ordre spatial élevé. Un schéma numérique temporel d'ordre élevé du type Runge Kutta permet de réduire la dispersion numérique introduite par des schémas de type saute mouton très usuels en DFDT.

Dans cet article, une condition d'interface est introduite afin de remplacer les parois minces conductrices lors de la modélisation des problèmes tridimensionnels en compatibilité électromagnétique. Cette condition d'interface est implémentée dans un module GD de "l'open source" GMSH [4].

## 2 Formulation du problème

On considère les équations de Maxwell en domaine temporel :

$$\begin{cases} \epsilon \partial_t \vec{E} - \nabla \times \vec{H} = -\vec{J} \\ \mu \partial_t \vec{H} + \nabla \times \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

avec  $\epsilon$  la permittivité du milieu et  $\mu$  sa perméabilité. La densité de courant est définie par  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ , avec  $\sigma$  la conductivité.

La formulation variationnelle de la méthode GD de (1) sur chaque élément  $T$  est donnée par :

$$\begin{cases} \int_T \epsilon \partial_t \vec{E} \cdot \vec{\phi} - \int_T \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{\phi} - \int_{\partial T} (\vec{n} \times \vec{H})^{num} \cdot \vec{\phi} = - \int_T \sigma \vec{E} \cdot \vec{\phi} \\ \int_T \mu \partial_t \vec{H} \cdot \vec{\psi} + \int_T \vec{E} \cdot \nabla \times \vec{\psi} + \int_{\partial T} (\vec{n} \times \vec{E})^{num} \cdot \vec{\psi} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

avec  $\vec{\phi}$  et  $\vec{\psi}$  des fonctions test.

Les termes d'interface entre les éléments adjacents sont évalués en utilisant les "flux" numériques  $(\vec{n} \times \vec{E})^{num}$  et  $(\vec{n} \times \vec{H})^{num}$  donnés par [3] :

$$\begin{cases} (\vec{n} \times \vec{H})^{num} = \vec{n} \times \frac{\{Z\vec{H}\}}{\{Z\}} - (\vec{n} \times \frac{\{\vec{n} \times [\vec{E}]\}}{\{Z\}}) \\ (\vec{n} \times \vec{E})^{num} = \vec{n} \times \frac{\{Y\vec{E}\}}{\{Y\}} + (\vec{n} \times \frac{\{\vec{n} \times [\vec{H}]\}}{\{Y\}}) \end{cases} \quad (3)$$

avec  $Z = \frac{1}{Y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ,  $[u] = \frac{u^+ - u^-}{2}$  and  $\{u\} = \frac{u^+ + u^-}{2}$ .

Le "-" représente la valeur de l'élément courant, et "+" celle de l'élément adjacent.

Pour les simulations, un schéma de type Runge-Kutta explicite est utilisé pour la discrétisation temporelle, et des éléments de maillage d'ordre trois.

## 3 Condition d'interface de la paroi conductrice

On considère une paroi conductrice homogène, d'épaisseur  $d$ , de perméabilité  $\mu$ , de permittivité  $\epsilon$  et de conductivité  $\sigma$ . En utilisant la solution analytique unidimensionnelle fréquentielle à l'intérieur de la paroi [2], on en déduit une relation entre les composantes tangentiels du champ électromagnétique des deux cotés de la paroi. La relation est donnée par :

$$\begin{cases} \vec{n} \times \vec{E}^0(t) = \vec{n} \times [\vec{n} \times (z_1 * \vec{H}^0(t) - z_2 * \vec{H}^d(t))] \\ \vec{n} \times \vec{E}^d(t) = \vec{n} \times [\vec{n} \times (z_2 * \vec{H}^0(t) - z_1 * \vec{H}^d(t))] \end{cases} \quad (4)$$

où,  $(\vec{E}^0, \vec{H}^0)$  et  $(\vec{E}^d, \vec{H}^d)$  sont les champs électromagnétiques des deux cotés de la paroi,  $z_1 = z_1(t, d, \epsilon, \mu, \sigma)$  et  $z_2 = z_2(t, d, \epsilon, \mu, \sigma)$  sont deux fonctions d'impédance issues de la solution analytique.

Soient  $(\vec{E}^-, \vec{H}^-)$  les valeurs du champ électromagnétique dans l'élément courant et  $(\vec{E}^+, \vec{H}^+)$  dans l'élément adjacent. Les termes de "flux" sont issus de l'équation (4) :

$$\begin{cases} (\vec{n} \times \vec{H})^{num,n} = \vec{n} \times \vec{H}^{-,n} \\ (\vec{n} \times \vec{E})^{num,n} = \vec{n} \times \vec{E}^{+,n} \end{cases} \quad (5)$$

## 4 Résultats Numériques

Un problème transitoire est étudié. On considère une cavité bidimensionnelle avec une ouverture. les dimensions de la cavité sont  $50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  et la taille de l'ouverture est  $10 \text{ cm}$ , l'épaisseur de la paroi est de  $5 \text{ mm}$ . (voir Fig. 1a)

Cette Cavité est illuminé par une impulsion gaussienne. Le champ électrique est calculé au centre de la cavité. Différentes valeurs de la conductivité des parois sont comparées :  $\sigma = 10 \text{ S/m}$ ,  $\sigma = 100 \text{ S/m}$ ,  $\sigma = 1000 \text{ S/m}$  et  $\sigma = +\infty$  (Conducteur Électrique Parfait (CEP)). La perméabilité de la paroi est  $\mu = 5\mu_0$  et sa permittivité est  $\epsilon = 5\epsilon_0$ , où  $\mu_0$  et  $\epsilon_0$  sont respectivement la perméabilité et la permittivité du vide.

Pour le cas  $\sigma = 10 \text{ S/m}$ , le champ électrique est comparé avec le cas ou la paroi est maillée. Le maillage contient 30000 éléments triangulaires pour le cas ou la paroi est maillée à cause d'une fine discrétisation autour de celle-ci. Pour le cas ou la paroi est remplacée par la condition d'interface, le maillage contient 3000 éléments. Le temps de calcul pour le cas de la paroi maillée est de l'ordre de 20 heures et d'une heure pour le cas ou la paroi est remplacée par la condition d'interface. On remarque qu'il n'y a pas de différence dans le résultat, ce qui montre l'intérêt de cette approche (voir Fig. 2a).

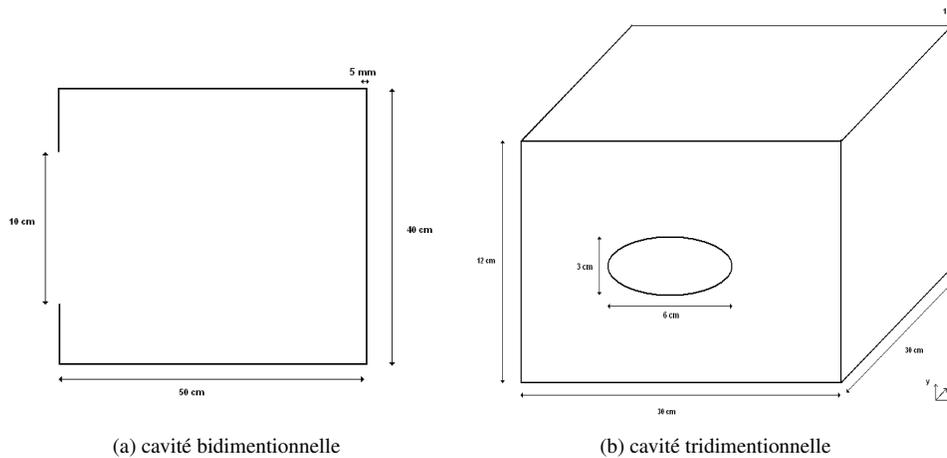
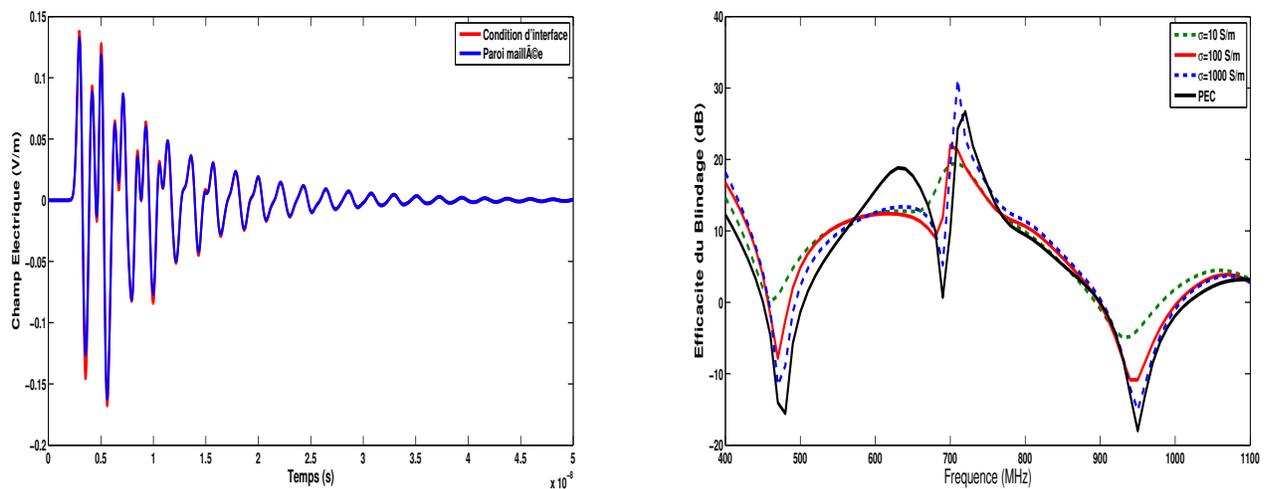


FIGURE 1 – Boîtiers étudiés

L'efficacité du blindage, obtenue avec une transformée de fourrier, montre une atténuation au niveau des résonances. Ceci s'explique par la transmission des parois (voir Fig. 2b).

Pour la conférence, la méthode sera plus détaillée, et différents exemples seront traités.



(a) Comparaison entre le cas de la paroi maillée et le cas de l'utilisation de la condition d'interface

(b) Comparaison de l'efficacité du blindage

FIGURE 2 – Comparaison pour différentes valeurs de conductivité

## Références

- [1] F. Bocquet, L. Pichon, A. Razek, "3D FEM Analysis of Electromagnetic Wave Scattering from a Dielectric Sheet in EMC Problems", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 2791-2794, 1998.
- [2] M.S. Sarto, "A new Model for the FDTD Analysis of the Shielding Performances of Thin Composite Structures", *IEEE Trans. Electromagnetic Comp.*, vol. 41, no. 4, pp. 298-306, 1999.
- [3] A. Kameni, A. Modave, M. Boubekour, V. Preault, L. Pichon, C. Geuzaine, "Evaluation of shielding effectiveness of composite wall with a time domain discontinuous Galerkin method", *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 64, no. 2, 2013, 24508 (4 pages).
- [4] C. Geuzaine, J.-F. Remacle, "Gmsh : a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 77, no. 11, pp. 1309-1331, 2009.