



**HAL**  
open science

# Modélisation multiphysique de composites multiferroïques granulaires par la méthode des éléments finis

Hakeim Talleb, Romain Corcolle, Xavier Mininger, Laurent Daniel, Zhuoxiang Ren, Frédéric Bouillault

## ► To cite this version:

Hakeim Talleb, Romain Corcolle, Xavier Mininger, Laurent Daniel, Zhuoxiang Ren, et al.. Modélisation multiphysique de composites multiferroïques granulaires par la méthode des éléments finis. Conference NUMELEC 2017, Nov 2017, Paris, France. hal-01659724

**HAL Id: hal-01659724**

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01659724v1>

Submitted on 17 Mar 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 multiphysique de composites multiferroïques granulaires par la méthode des éléments finis

Hakeim Talleb, Romain Corcolle, Xavier Mininger, Laurent Daniel, Zhuoxiang Ren et Frédéric Bouillault  
GeePs, CNRS UMR 8507, CentraleSupélec, Univ Paris Sud, UPMC, 11 rue Joliot-Curie 91192 Gif-sur-Yvette,  
E-mail: hakeim.talleb@upmc.fr

**Résumé** — Ce papier propose d'étudier un composite magnétoélectrique homogénéisé de type 0-3 à l'aide de la méthode des éléments finis et d'une homogénéisation par formulation analytique. Des résultats de simulation en régime dynamique sont présentés pour valider le principe de résolution.

## I. INTRODUCTION

Les composites multiferroïques exhibant un couplage magnétoélectrique (ME) sont des composites à base de matériaux fonctionnels ayant la particularité d'associer mutuellement des phases ferroélectriques et ferromagnétiques. Ces composites ME qui exhibent un coefficient ME  $\tilde{\alpha}_V$  lorsqu'ils sont excités par un champ magnétique sont autant importants d'un point de vue technologique que fondamental. D'un point de vue technologique, ils ouvrent la voie à de nombreuses applications potentielles pour l'électronique du futur (capteurs magnétiques, transducteurs d'énergie). Au niveau fondamental, ces composites du type  $\text{BaTiO}_3/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  sont très intéressants pour appréhender la complexité des couplages coexistant entre les propriétés électriques, mécanique et magnétiques.

## II. OBJECTIF

Actuellement, de nouveaux procédés de fabrication se basent sur une nouvelle technique de frittage flash ou SPS (Spark Plasma Sintering). Cela permet d'obtenir des composites de type « 0-3 » donnant une répartition aléatoire entre les phases ferroélectriques et ferromagnétiques.

Ce papier se propose de montrer que l'utilisation de la méthode des éléments finis pour modéliser un composite ME de type 0-3 présente ici un véritable avantage puisque chaque élément du maillage peut être considéré comme homogène en possédant simultanément une phase ferroélectrique et une phase ferromagnétique. De cette manière, les faibles pertes magnétiques dues aux courants de Foucault en régime dynamique peuvent être introduites dans la méthode des

éléments finis en imposant une permittivité effective complexe dans la formulation.

## III. SYSTÈME DE RÉOLUTION

Le système de résolution en régime harmonique linéaire du problème multiphysique magnéto-mécano-électrique se base sur le système (1) qui est décrit dans [1-2] :

$$[K]\{\mathcal{X}\} = \{\mathcal{F}\} \quad (1)$$

La matrice  $K$  est la matrice *globale* caractérisant le système, les vecteurs  $\{\mathcal{X}\}$  et  $\{\mathcal{F}\}$  contiennent respectivement les inconnues et les sollicitations extérieures du problème. Les inconnues du problème sont les déplacements nodaux  $\{\mathbf{u}\}$ , le potentiel électrique  $\{V\}$ , le potentiel vecteur magnétique  $\{\mathbf{a}\}$  et les charges électriques  $\{Q\}$  localisées sur les électrodes. L'excitation magnétique est réalisée en imposant une source de courant  $I_n$  sur les bords du domaine de calcul [1-2]. Le problème est résolu en 2D sous l'hypothèse des contraintes planes.

## IV. HOMOGENÉISATION ET PERMITTIVITÉ COMPLEXE

L'homogénéisation dans l'hypothèse linéaire (petite variation autour d'un point de magnétisation) d'un composite ME du type  $(1-\eta)\text{BaTiO}_3-\eta\text{CoFe}_2\text{O}_4$  est réalisée en utilisant une formulation analytique (adaptée aux comportements couplés) proposée dans [3] pour laquelle le taux de remplissage  $\eta$  est défini comme  $N_m/N = N_m/(N_p + N_m)$ , où  $N_p$  et  $N_m$  sont respectivement le nombre de nano-éléments piézoélectriques et magnétoélectriques au sein du composite ME. A titre d'exemple, les figures 1-(a), (b) et (c) montrent l'évolution en fonction de ce taux de remplissage des coefficients élasto-magnéto-électriques, à savoir les coefficients élastiques  $\bar{c}_{ij}$ , piézo-électriques/magnétiques  $\bar{e}_{ij}$ ,  $\bar{q}_{ij}$  ainsi que des permittivités  $\bar{\epsilon}_{ii}^S$  et perméabilités  $\bar{\mu}_{ii}^S$  à déformation constante.

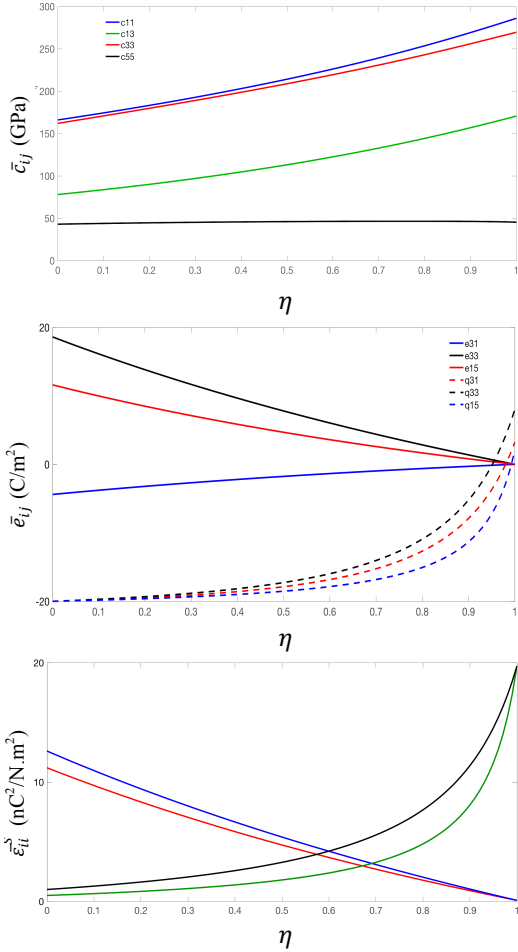


Figure 1 : Homogénéisation des coefficients élasto-magnéto-électriques

Sous l'hypothèse des contraintes planes, l'ensemble des coefficients est réduit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} c_{2D} &= \bar{c}_{ab} - \bar{c}_{a3}\bar{c}_{3b}/\bar{c}_{33} \\ \bar{f}_{mk} &= \bar{f}_{m3} \bar{c}_{k3}/\bar{c}_{33} \\ g_{2D}^S &= \bar{g}_{in}^S + \bar{f}_{i3}\bar{f}_{n3}/\bar{c}_{33} \end{aligned} \quad (2)$$

où  $(ab) \in \{(1,1), (2,2), (1,2), (6,6)\}$ ,  $f = e$  ou  $q$ , avec  $m = 3$  et  $k = 1,2$   $g = \varepsilon = \mu, l, n \in \{(1,3)\}$

En plus des pertes mécaniques, le composite possède en régime dynamique des pertes liées à la présence de courants de Foucault lorsque le composite ME est excité longitudinalement par un champ magnétique dynamique  $H$  (voir figure 2). Dans le plan 2D  $z0x$ , la perméabilité complexe peut alors être introduite dans la formulation intégrale par la relation suivante [4-5] :

$$\bar{\mu}^* = \bar{\mu}_{ii}^S \frac{\tanh(t\gamma)}{t\gamma} \quad (3)$$

où  $i = 1,3$ ,  $\gamma = \frac{1+j}{2\delta_s}$ , avec  $\delta_s = 1/\sqrt{\sigma\mu_{33}^S\pi f}$  l'épaisseur de peau.

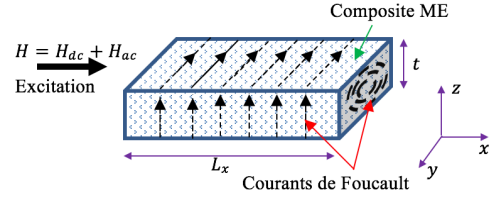


Figure 2 : Illustration des courants de Foucault

La figure 3 montre la réponse dynamique (pertes mécaniques et magnétiques incluses) selon différents taux de remplissage  $\eta$  pour une structure de longueur  $L_x=14$  mm et  $t = 1$  mm. On peut alors observer la variation d'amplitude du coefficient ME  $\tilde{\alpha}_V$  et le décalage de la fréquence de résonance en fonction du taux de remplissage.

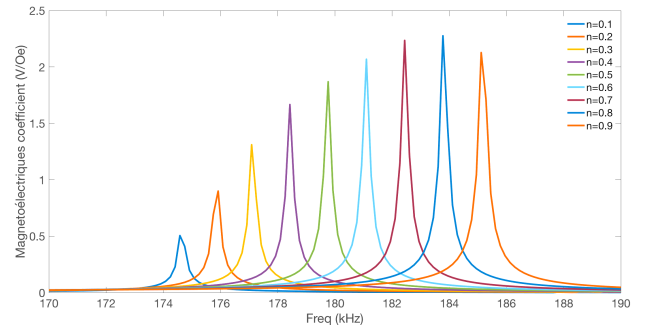


Figure 3 : Réponses dynamiques selon différents taux de remplissage

## V. CONCLUSION

Ce papier ouvre la voie à la modélisation d'un composite ME de type 0-3 en mixant la méthode des éléments finis 2D avec une formulation analytique d'homogénéisation adaptée aux problèmes couplés. La méthode a été employée sur un matériau  $(1-\eta)\text{BaTiO}_3-\eta\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

## REFERENCES

- [1] T.T Nguyen, F. Bouillault, L. Daniel and X. Mininger, "Finite element modeling of magnetic field sensors based on nonlinear magnetolectric effect", *Journal of Applied Physics*, 109, 084904 (2011).
- [2] H. Talleb and Z. Ren, "Finite element modeling of magnetolectric laminate composites in considering nonlinear and load effects for energy harvesting", *Journal of Alloys and Compounds*, 615(5), 65–74 (2014).
- [3] R. Corcolle, L. Daniel and F. Bouillault, "Generic formalism for homogenization of coupled behavior: Application to magnetoelastoelectric behavior", *Physical Review B*, 78, 214110 (2008).
- [4] G. Liu, C. Zhang, W. Chen, and S. Dong, "Eddy-current effect on resonant magnetolectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric laminated composites", *Journal of Applied Physics*, 114, 027010 (2013).
- [5] H. Hamzeshbahmani, P. Anderson, J. Hall and D. Fox, "Eddy Current Loss Estimation of Edge Burr-Affected Magnetic Laminations Based on Equivalent Electrical Network—Part I: Fundamental Concepts and FEM Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 642-650, April 2014.