

# Revue Sciences & Maintenance®

Editeur : **Association française des ingénieurs et responsables de maintenance**

Directeur de la publication : **Claude Pichot**

A travers sa revue scientifique francophone, diffusée exclusivement au format électronique, l'Afim et ses partenaires du Réseau maintenance francophone (dont le Réseau Normalisation et Francophonie), souhaitent promouvoir la recherche appliquée et l'innovation en maintenance. Domaine vaste et pluridisciplinaire, la maintenance génère de nombreuses publications concernant des méthodes expérimentales ou intuitives qui ne sont pas validées par une démarche scientifique rigoureuse. Par ailleurs, la demande d'information en langue française, du Québec à l'Afrique du Nord, en passant par différents pays d'Europe et d'Asie est forte. Ainsi, l'Organisation internationale de la Francophonie qui rassemble 75 pays recense 220 millions de locuteurs français dans le monde. Les journées Innova-Maintenance® initiées par l'Afim en 2011 participent également à cette promotion.

## **Modélisation des courants de Foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts (2012)**

H. Menana, M. Feliachi, G. Berthiau  
Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique IREENA-IUT, CRTT - 37 Boulevard de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire Cedex, France

**Résumé :** Dans ce travail, nous proposons un modèle numérique pour le calcul des courants de Foucault dans les matériaux composites à fibres de carbone, en vue de la détection et la caractérisation des éventuels défauts qu'ils peuvent contenir. Nous commençons par décrire les propriétés physiques et géométriques des matériaux composites auxquels nous nous intéressons. Ensuite nous présentons, à travers un exemple, quelques résultats de calcul numérique des courants de Foucault dans ce type de matériaux, obtenus à l'aide d'un modèle numérique que nous avons développé.

# **Modélisation des courants de Foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts**

## *Eddy current modelling in a composite material in the aim of defect characterization*

H. Menana, M. Féliachi et G. Berthiau

Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique IREENA-IUT  
CRTT, 37 Boulevard de l'université, BP 406, 44602, Saint Nazaire cedex, France.  
hocine.menana@univ-nantes.fr

### **RESUMÉ**

Dans ce travail, nous proposons un modèle numérique pour le calcul des courants de Foucault dans les matériaux composites à fibres de carbone, en vue de la détection et la caractérisation des éventuels défauts qu'ils peuvent contenir. Nous commençons par décrire les propriétés physiques et géométriques des matériaux composites auxquels nous nous intéressons. Ensuite nous présentons, à travers un exemple, quelques résultats de calcul numérique des courants de Foucault dans ce type de matériaux, obtenus à l'aide d'un modèle numérique que nous avons développé.

*In this work, we propose a numerical model for eddy currents computation in carbon fiber reinforced composites in the aim of defect characterization. Firstly, we describe the physical and geometrical properties of the composite materials we are interested in. Secondly, we present, through an example, some results of eddy currents computation in this type of material, obtained by a numerical model which we have developed.*

### **INTRODUCTION**

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, et sont aptes à remplir plusieurs fonctions.

Malgré les remarquables performances des matériaux composites, ces derniers n'échappent pas aux règles et normes de qualité et de sécurité. Il est nécessaire d'effectuer des contrôles non destructifs (CND) des composants fabriqués à base de matériaux composites et qui occupent une place importante dans le système où ils sont intégrés, afin de déceler les défauts potentiels avant leur mise en service et les dommages qu'il peuvent subir en service.

Certaines techniques de contrôle non destructif s'appliquent aux matériaux composites, telles que les ultrasons, la radiographie ou la thermographie infrarouge. Cependant, ces techniques, appliquées au contrôle des matériaux composites, présentent quelques limitations en termes de précision, de sensibilité, de fidélité de mesure, de reproductibilité du signal et parfois de difficulté de calibration. L'adaptation de ces techniques à ces matériaux représente un investissement financier important qui a pour conséquence une utilisation limitée par les petites et moyennes entreprises.

De récentes expériences ont montré qu'il est possible d'effectuer le CND des matériaux composites conducteurs, et ce à moindre coût, en adaptant des équipements à courants de Foucault conventionnels. Principalement limitée à l'inspection de matériaux métalliques, la technique des courants de Foucault a été utilisée avec succès pour localiser et caractériser des défauts dans des matériaux composites conducteurs, et plus particulièrement des matériaux composites à base de fibres de carbone. Les courants de Foucault sont sensibles aux ruptures de fibres de carbone, même lorsque celles-ci sont si petites qu'elles ne peuvent être détectées par d'autres techniques, et cela représente un avantage significatif.

Malgré des résultats encourageants, la technique de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) appliquée aux matériaux composites demeure compliquée, ceci est dû à la nature hétérogène et anisotrope de leurs conductivités électriques. Très peu de travaux de modélisation ont été réalisés dans ce contexte tant pour le problème direct que pour le problème inverse.

Afin de développer des outils de conception et d'optimisation, ainsi que des outils d'aide à la décision, pour le CND-CF des matériaux composites conducteurs, il est nécessaire de développer un modèle numérique rapide et précis, intégrant ces matériaux dans un calcul du champ électromagnétique, et c'est notre objectif dans ce travail. Nous commençons par décrire la structure et les propriétés physiques des matériaux étudiés, puis dans un exemple, nous présentons quelques résultats de calcul des courants de Foucault dans ce type de matériaux.

## STRUCTURE ET PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX ETUDIÉS

La plupart des travaux réalisés dans le domaine du CND par courants de Foucault des matériaux composites concernent les matériaux composites à fibres de carbone à matrice isolante, bien qu'ils ne soient pas les seuls matériaux composites conducteurs. Cela est dû à la large utilisation de ces matériaux dans des secteurs exigeant une grande fiabilité comme l'aéronautique [1].

La conductivité électrique des matériaux composites à fibres de carbone dépend de la fraction volumique, de la structure et l'orientation des fibres dans le matériau. Dans les matériaux composites à fibres de carbone à structure unidirectionnelle noyées dans une matrice isolante, la conductivité, dans le sens transversal aux fibres, n'est pas nulle, car il existe des contacts entre les fibres. Cela est dû au fait que les fibres ne soient pas disposées d'une manière parfaitement rectilignes, et qu'il y ait des fibres qui ne sont pas complètement recouvertes par la matrice [2]-[3]. Cette conductivité varie entre 10 et 100S/m dans la direction transversale aux fibres et entre  $5 \cdot 10^3$  et  $5 \cdot 10^5$  S/m dans la direction des fibres [4]. Pour les mêmes raisons, il existe une conductivité suivant l'épaisseur d'un matériau composite stratifié (figure 1) [2]. La résistance électrique suivant l'épaisseur du stratifié est la somme des résistances volumiques des plis suivant leurs épaisseurs, et des résistances de contact entre plis. Le tenseur de conductivité que nous prenons pour ce type de matériaux est le suivant [5] :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_L \cos^2(\theta) + \sigma_T \sin^2(\theta) & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & \sigma_L \sin^2(\theta) + \sigma_T \cos^2(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_p \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dans (1),  $\sigma_L$  et  $\sigma_T$  sont respectivement les conductivités suivant la direction des fibres et la direction transversale aux fibres,  $\sigma_p$  est la conductivité suivant l'épaisseur et  $\theta$  l'angle d'orientation des fibres par rapport au référentiel choisi (figure 1).

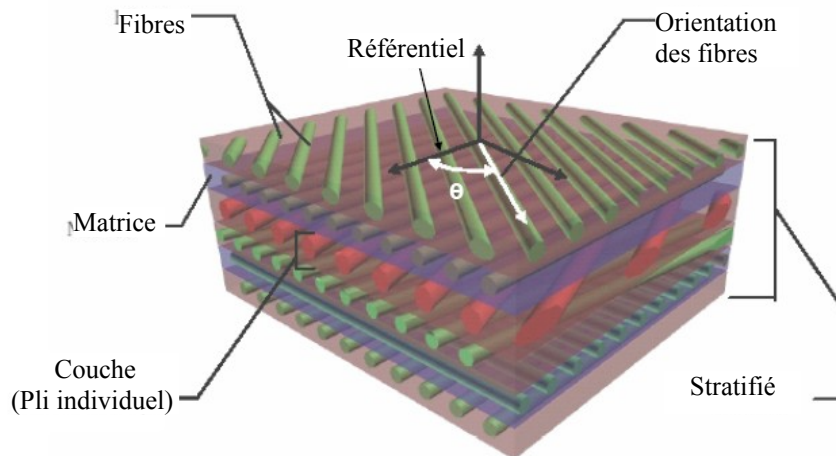


Figure 1. Composite à fibres de carbone stratifié [6]

Les principaux défauts et endommagements rencontrés dans les matériaux composites sont illustrés par la figure suivante. On y trouve : la fissuration et la rupture de la matrice, la rupture de fibres, la décohésion fibre-matrice et le délaminage. Le délaminage est un défaut de cohésion entre deux couches (ou plis) d'un stratifié [7], [8].

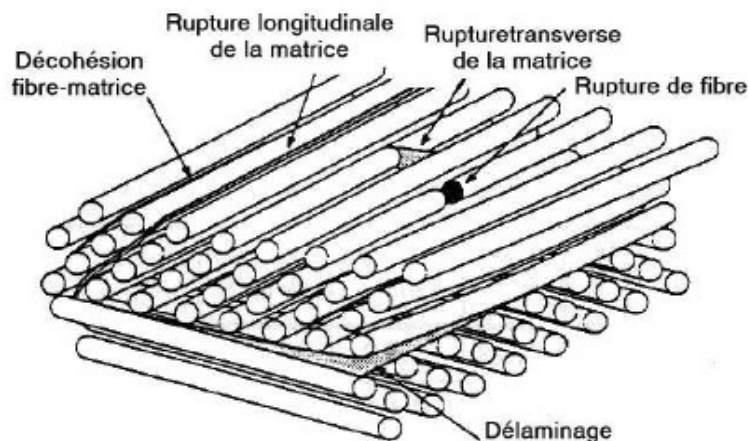


Figure 2. Résumé des différents défauts des matériaux composites à fibres de carbone [7]

## FORMULATION DU PROBLEME ELECTROMAGNETIQUE

Deux difficultés sont rencontrées lors de la modélisation des courants de Foucault dans les matériaux composites à fibres de carbone: leur forte anisotropie et leur conception. En effet, ces matériaux sont généralement composés de plusieurs couches unidirectionnelles d'environ 125  $\mu$  m d'épaisseur, empilées avec différentes orientations des fibres. Pour ces raisons, des modèles empiriques et paramétriques sont largement utilisés pour simuler la réponse d'un capteur à courants de Foucault dans un contrôle de ces matériaux [10], [11]. Quelques modèles semi analytiques utilisant les éléments coques et les dyades de Green sont rencontrés dans la littérature [6], [12] ; cependant, ces modèles sont à applications limitées. La méthode des éléments finis peut facilement tenir compte de l'anisotropie des matériaux, mais cette méthode consomme beaucoup de temps de calcul lorsque le système implique les mouvements de ses parties, ce qui est souvent le cas en CND par courants de Foucault.

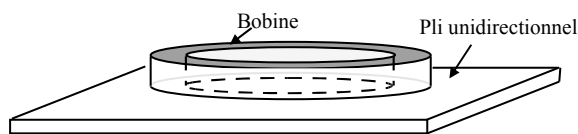
Pour pallier ces difficultés, nous avons développé une méthode de calcul basée sur un couplage entre les différences finies et les équations intégrales de volume, ne maillant que les parties actives du système. Cette méthode est basée sur la formulation en potentiel vecteur électrique et scalaire magnétique  $T$ - $\phi$  donnée par l'équation (2). Ce choix vient du fait que cette formulation tient compte naturellement de la conservation du courant. Les courants induits sont calculés par la relation (3). Les équations (2) et (3) sont résolues par la méthode des différences finies dans le matériau composite et le champ source  $H_s$  dans (2) est calculé en utilisant la formule de Biot et Savart.

$$\nabla \times \bar{\bar{\sigma}}^{-1} \nabla \times T + j\omega \mu (T - \nabla \phi) = -j\omega \mu H_s \quad (2)$$

$$J = \nabla \times T \quad (3)$$

## EXEMPLE DE CALCUL

Dans cet exemple de calcul, nous considérons le système décrit par la figure 3, qui représente une bobine parcourue par un courant alternatif placée à proximité d'un pli unidirectionnel de composite à fibres de carbone. La figure 4 décrit le maillage des parties actives de ce système. Afin de vérifier la conservation des courants induits, le diamètre externe de la bobine est du même ordre que les dimensions du pli. Les figures 5(a, b, c, d) montrent les répartitions des courants induits dans quatre plis qui ont pour orientations des fibres : 0°, 45°, 90° et -45°. Ces figures montrent clairement l'effet de l'orientation des fibres sur la répartition des courants induits.



$$\bar{\bar{\sigma}}, \mu_0$$

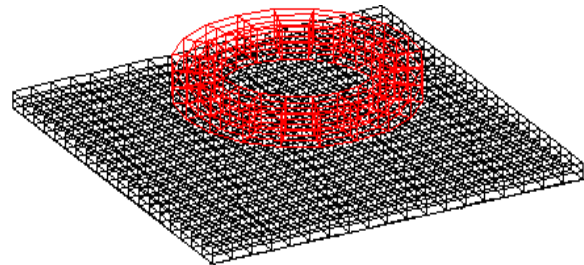
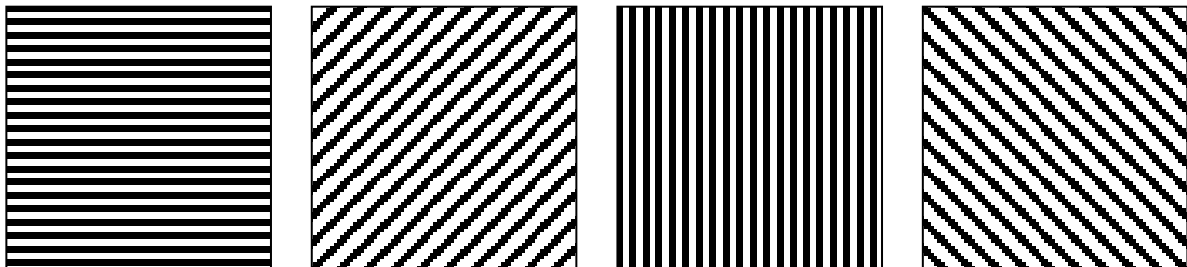


Figure 3. Géométrie du système

Figure 4. Maillage des parties actives



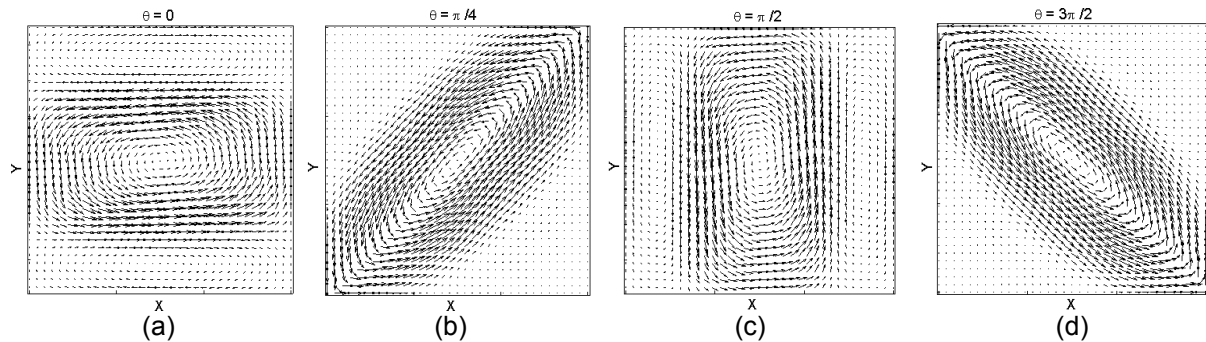


Figure 5 (a, b, c, d). Répartition des courants induits dans les différents plis

## CONCLUSION

La possibilité du contrôle non destructif par courants de Foucault des matériaux composites à fibres de carbone a été mise en évidence à travers plusieurs travaux expérimentaux ; cependant, la nature hétérogène et anisotrope de la conductivité électrique de ces matériaux rend ce contrôle compliqué ; ainsi, très peu de travaux de modélisation ont été réalisés. Dans ce contexte, nous avons développé un modèle numérique basé sur une formulation en potentiel vecteur électrique, où seules les parties actives du système sont maillées. Le modèle développé est rapide et simple à implémenter ; il tient compte facilement des défauts tels que les délaminages et les ruptures de fibres qui sont les principaux défauts rencontrés dans ce type de matériaux.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jae Beom Park, Tomonaga Okabe, and Nobuo Takeda<sup>1</sup>, New concept for modeling the electromechanical behavior of unidirectional carbon-fiber-reinforced plastic under tensile loading, *Smart Mater. Struct.* 12 (2003), pp. 105-114.
- [2] D. D. L. Chung, Structural health monitoring by electrical resistance measurement, *Smart Mater. Struct.* 10 (2001) 624-636.
- [3] J. B. Park, T. K. Hwang, H. G. Kim and Y. D. Doh, Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites, *Smart Mater. Struct.* 16 (2007) 57-66.
- [4] R. Grimberg, A. Savin, R. Steigmann, A. Bruma, Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and kevlar, *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia, pp. 223-228.
- [5] S. B. Pratap, and W. F. Weldon, Eddy current in anisotropic composites applied to pulsed machinery, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 2, pp. 437-444, March 1996.
- [6] S. Bensaid, Contribution à la caractérisation et la modélisation électromagnétique des matériaux composites anisotropes, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2006.
- [7] N. Bahlouli, Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle, IPST-ULP. ([année ?](#))
- [8] R. L. Crane, Nondestructive Inspection of Composites, *Comprehensive Composite Materials* ISBN (set): 0-08 0429939 Volume 5; (ISBN: 0-080437230); pp. 227-233. ([année ?](#))
- [9] R. A. Pethrick, Bond Inspection in Composite Structures, *Comprehensive Composite Materials* ISBN (set): 0-08 0429939 Volume 5; (ISBN: 0-080437230); pp. 359-392. ([année ?](#))

- [10] Gerhard Mook, Rolf Lange, Ole Koeser, Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents, *Composites Science and Technology* 61 (2001) 865-873.
- [11] Isabelle Dufour and Dominique Placko, Separation of conductivity and distance measurements for eddy current nondestructive inspection of graphite composite materials, *J. Phys. III France* 3 (1993) 1065-1074.
- [12] Thomas M. Roberts, Harold A. Sabagh, L. David Sabagh, Electromagnetic Interactions with an Anisotropic Slab, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, November 1988, pp. 3193-3200.