



**HAL**  
open science

# Identification du tenseur de conductivité électrique d'une plaque en MCFC par utilisation d'un capteur multi-bobine à champ magnétique tournant

Ahmed Chaouki Lahrech, Bachir Abdelhadi, Mouloud Feliachi, Abdelhalim Zaoui, Mohammed Naïdjate

## ► To cite this version:

Ahmed Chaouki Lahrech, Bachir Abdelhadi, Mouloud Feliachi, Abdelhalim Zaoui, Mohammed Naïdjate. Identification du tenseur de conductivité électrique d'une plaque en MCFC par utilisation d'un capteur multi-bobine à champ magnétique tournant. 9ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC 2017), Nov 2017, Paris, France. hal-03714855

**HAL Id: hal-03714855**

**<https://hal.science/hal-03714855>**

Submitted on 6 Jul 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.

# Identification du tenseur de conductivité électrique d'une plaque en MCFC par utilisation d'un capteur multi-bobine à champ magnétique tournant

Ahmed Chaouki Lahrech<sup>1</sup>, Bachir Abdelhadi<sup>1</sup>, Mouloud Feliachi<sup>2</sup>, Abdelhalim Zaoui<sup>3</sup> and Mohammed Naidjate<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LSTE Laboratory, Department of Electrical Engineering, University of Batna 2, Fesdis, Batna, 05078, Algeria

<sup>2</sup>Research Institute of Electrical Energy (IREENA-IUT), CRTT, 44602 Saint Nazaire Cedex, France

<sup>3</sup>Electromagnetic Systems Laboratory, Polytechnic Military School (EMP), Bordj-El-Bahri Algiers 16111, Algeria

<sup>4</sup>Laboratoire de Physique des Matériaux, Université de Laghouat, Laghouat 03000, Algeria

E-mail: lahrech.ch@gmail.com

**Résumé** — Nous proposons une méthode sans contact pour l'identification du tenseur de conductivité électrique d'une plaque en matériau composite à fibre de carbone (MCFC) à l'aide d'un nouveau capteur à courant de Foucault multi-bobines utilisant un champ magnétique tournant. Le processus de l'inversion est basé sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA). Le calcul direct associé aux RNA, utilise la méthode des éléments finis 3D (MEF-3D).

## I. INTRODUCTION

Grâce à leur grande légèreté et leur excellente résistance mécanique et chimique, les matériaux composites à fibres de carbone (MCFCs) ont une place importante dans les industries manufacturières, par rapport aux matériaux conventionnels. Leur utilisation s'est répandue dans différents secteurs industriels de haute technologie tels que l'aérospatial, l'aéronautique et l'automobile.

Il est de première importance de connaître les propriétés électriques des MCFCs pour des applications telles que le chauffage par induction [1] ou le contrôle non destructif à courants de Foucault (CND-CF) [2].

La méthode de caractérisation sans contact basée sur la technique CND-CF, a été évaluée au fil des années par ceux qui utilisent un capteur à courants de Foucault tournant [3]. Cependant, ce type de capteur est sujet à des imprécisions de mesures qui pourraient être engendrées par d'éventuelles variations du lift off suite au mouvement du capteur tournant.

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle architecture de capteur à courants de Foucault comportant plusieurs bobines excitées par une source de courant sinusoïdal biphasé dans le but d'éliminer la rotation mécanique du capteur.

Tout d'abord, nous présenterons la description du système modélisé. Ensuite, nous effectuerons la modélisation numérique par l'utilisation de la méthode des éléments finis 3D. Enfin, nous présenterons des résultats d'inversion par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels.

## I. DESCRIPTION DU SYSTÈME

La nouvelle architecture que nous proposons pour le capteur à courants de Foucault à champ magnétique tournant est représentée schématiquement sur la Fig. 1. Il s'agit d'un capteur multi bobines rectangulaires situé à une distance  $l$  d'une plaque en MCFC d'épaisseur  $e$ . Ces bobines sont excitées par une source de courant sinusoïdal biphasé ( $I_A$ ,  $I_B$ ). Les valeurs numériques des paramètres du système sont données dans le Tableau 1.

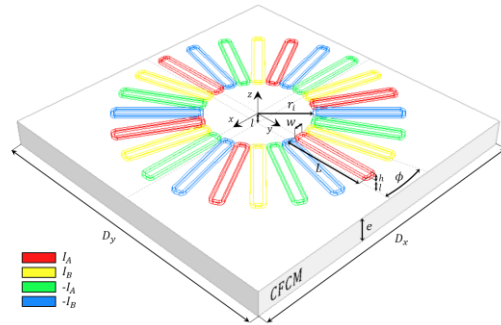


Fig. 1. Système modélisé.

TABLEAU I. VALEURS NUMERIQUES DES DIMENSIONS DU CAPTEUR ET DE LA PLAQUE EN MCFC.

Élément	Paramètres	Valeurs
Plaque en MCFC	Nombre de plis	4
	Orientations des fibres ( $\theta$ )	(0°, 45°, 90°, -45°)
	Conductivités ( $\sigma_L$ , $\sigma_T$ )	( $1 \times 10^4$ - $5 \times 10^4$ , $0.2 \times 10^2$ - $1 \times 10^2$ ) S/m
Capteur	Épaisseur du pli ( $e$ )	0.125 mm
	Surface ( $D_x \times D_y$ )	(36×36) mm <sup>2</sup>
	Nombre de bobines	24
	Rayon interne ( $r_i$ ) Rayon externe ( $r_e$ )	1.6 mm 5.2 mm
Bobine rectangulaire	Nombre de spires	1
	Longueur ( $L$ )	3.2 mm
	Largeur ( $W$ )	0.4 mm
	Hauteur ( $h$ )	0.1 mm
	Angle entre les bobines ( $\phi$ )	15°
Source biphasée	Lift off ( $l$ )	0.125 mm
	Intensité, Fréquence	0.25 A, 1 MHz

## II. PROBLÈME DIRECT

La modélisation numérique est effectuée en utilisant la MEF-3D. Le problème électromagnétique est formulé en potentiel vecteur magnétique et potentiel scalaire électrique,  $A$ ,  $V \cdot A$  :

$$\nabla \times (\nu_0 \nabla \times A) - \nabla (\nu_0 \nabla \cdot A) + \overline{\overline{\sigma}} (j\omega A + \nabla v) = 0, \text{in} \Omega_c \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot (\overline{\overline{\sigma}} j\omega A + \overline{\overline{\sigma}} \nabla v) = 0, \text{in} \Omega_c \quad (2)$$

$$\nabla \times (\nu_0 \nu_r \nabla \times A) - \nabla (\nu_0 \nu_r \nabla \cdot A) = J_s, \text{in} \Omega_n \quad (3)$$

$\Omega_n$ ,  $\Omega_c$ ,  $\nu_0$ ,  $\nu_r$ ,  $\omega$  et  $J_s$  sont respectivement la région non-conductrice, la région des courants de Foucault, la réductivité magnétique du vide, la réductivité magnétique relative, la pulsation électrique et la densité de courant d'excitation.

Dans ce cas, Le tenseur de conductivité homogénéisée  $\overline{\overline{\sigma}}$  d'une plaque en MCFC est donné par l'expression (4) [3] :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_L \cos^2(\theta) + \sigma_T \sin^2(\theta) & 1/2((\sigma_L - \sigma_T) \sin(2\theta)) \\ 1/2((\sigma_L - \sigma_T) \sin(2\theta)) & \sigma_L \sin^2(\theta) + \sigma_T \cos^2(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Une fois que le potentiel vecteur magnétique  $\mathbf{A}$  et le potentiel scalaire électrique  $V$  sont déterminés, la variation d'impédance  $\Delta Z$  d'une bobine  $k$  du nouveau capteur à CF multi-bobines est calculée en utilisant l'équation (5).

$$I_s^{-2} \Delta Z^{(k)} = - \int_{\Omega_s} (E^{(k)} - E_0^{(k)}) \cdot J_s^{(k)} d\Omega \quad (5)$$

$E$  et  $E_0$ , sont respectivement le champ électrique de la bobine  $k$ , en présence et en absence de la plaque en MCFC.

La Fig. 2 montre une comparaison entre le résultat de la variation d'impédances normalisée en fonction de l'angle de rotation de la bobine par le capteur conventionnel [3] et le résultat des variations des impédances normalisées en fonction de l'orientation des bobines par le nouveau capteur proposé. Nous constatons que les deux résultats sont en bonne concordance.

La Fig. 3 représente les variations des impédances normalisées en fonction de la conductivité longitudinale et la conductivité transversale de la plaque en MCFC constituée de quatre plis orientés dans les directions ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ).

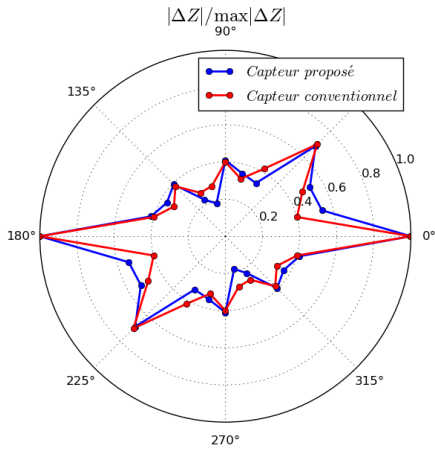


Fig. 2. Comparaison entre les résultats des variations des impédances normalisées par le capteur conventionnel et par le nouveau capteur proposé, pour cette valeur des conductivités longitudinale et transversale : ( $\sigma_L = 1 \times 10^4$  S/m,  $\sigma_T = 1 \times 10^2$  S/m).

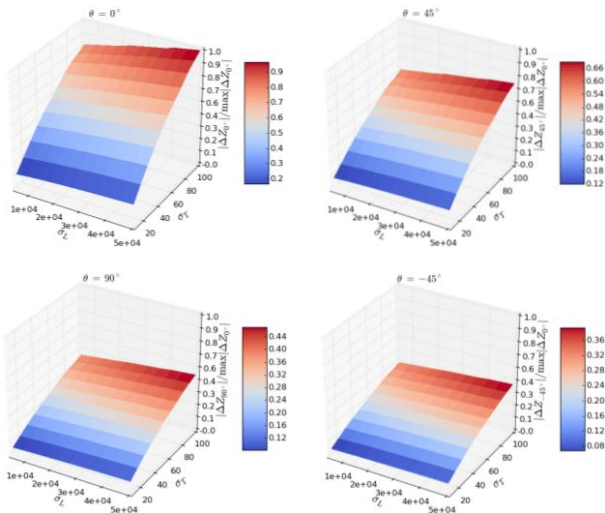


Fig. 3. Variations des impédances normalisées en fonction de  $\sigma_L$  et  $\sigma_T$  de la plaque à quatre plis ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ).

### III. PROBLÈME INVERSE

Le problème inverse est résolu par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA). Dans ce travail, nous avons obtenu 312 données (312 exemples) et celles issues des calculs éléments finis 3D sont stockées dans un fichier qui forme la base d'apprentissage. Les paramètres recherchés étant la conductivité longitudinale ( $\sigma_L$ ) et la conductivité transversale ( $\sigma_T$ ), ceux-ci sont obtenus en sortie des RNA. Les autres paramètres, la partie réelle et la partie imaginaire des variations des impédances normalisées  $Re(\Delta Z)$ ,  $Im(\Delta Z)$  constituent l'entrée.

Les RNA utilisés sont de type MLP (*Multi Layer Perceptron*) contenant seulement une seule couche cachée ayant 20 neurones à fonction d'activation type tangente sigmoïde et une couche de sortie contenant un seul neurone à fonction d'activation linéaire. L'apprentissage est effectué au moyen de l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Les résultats de l'inversion sur une base de test de 47 exemples (15%), pris aléatoirement dans le domaine d'apprentissage, sont représentés en Fig. 4.

Ces résultats montrent clairement que l'inversion par RN est très bien réalisée pour l'estimation des composantes du tenseur de conductivité électrique.

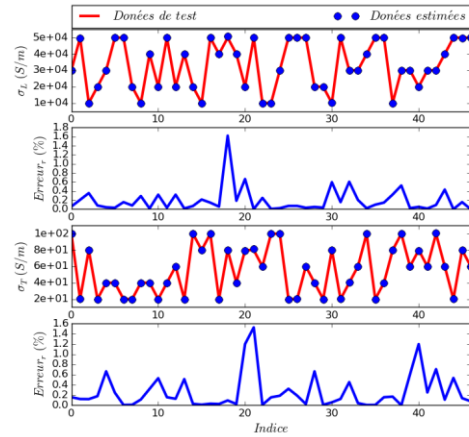


Fig. 4. Résultats de l'inversion sur la base de test pour la conductivité longitudinale et pour la conductivité transversale.

### CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons présenté une nouvelle architecture de capteur à courant de Foucault multi-bobines à champ magnétique tournant. Les avantages associés à l'utilisation de ce capteur incluent une grande vitesse de caractérisation et une meilleure sensibilité, ce qui le rend très attrayant et fiable. La méthodologie choisie utilisant la MEF et les RNA pour l'identification du tenseur de conductivité électrique d'une plaque en MCFC est présentée. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

### REFERENCES

- [1] S. Bensaid, D. Trichet, and J. Fouladgar, "3D Simulation of Induction Heating of Anisotropic Composite Materials", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 5, pp. 1568–1571, May 2005.
- [2] G. Mook, R. Lange, and O. Koeser, "Non-Destructive Characterization of Carbon-Fibre-Reinforced Plastics by Means of Eddy-Currents", *Compo. Sci. Technol.*, vol. 61, pp. 865–873, 2001.
- [3] H. Menana and M. Féliachi, "Modeling the Response of a Rotating Eddy Current Sensor for the Characterization of Carbon Fiber Reinforced Composites", *EPJ Appl. Phys.*, vol. 52, p. 23304, 2010.