

Modélisation d'une matrice de capteurs à courants de Foucault.

Modelling of arrayed eddy current sensor.

A. Zaoui^{1,2}, M. Feliachi², M. Djennah¹

¹EMP, BP17 Bordj El Bahri 16100 Alger, ALGERIE

²IREENA-IUT, 37, Boulevard de l'université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire Cedex, FRANCE
abdelhalim.zaoui@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ

L'utilisation d'une matrice de capteurs à courants de Foucault dans le contrôle non destructif permet un gain considérable en temps d'inspection et une meilleure résolution spatiale par la miniaturisation des bobines. Nous proposons dans cet article une modélisation rapide de ce système. Pour ce faire, nous calculons dans un premier temps le champ par éléments finis d'une seule bobine. Le champ total produit par la matrice de capteurs est ensuite déterminé à partir de la superposition des résultats de calcul éléments finis 2D axisymétrique. La validation du modèle est obtenue par comparaison de ces résultats avec ceux issus d'un calcul éléments finis 3D et à partir de mesures expérimentales.

ABSTRACT

The use of arrayed eddy current sensors in NDT of conductive material brings high speed inspection and better space resolution by miniaturization of coils. We propose in this work a fast modeling of this system. For this purpose we compute in the first step the electromagnetic field produced by one sensor coil. After this the total field produced by the arrayed sensor is computed by superposition of 2D axisymmetrical finite element results. The validation of the model is given by comparison with the 3D finite element results and experimental data.

1. INTRODUCTION

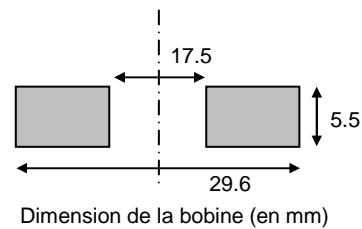
La matrice de capteurs à courant de Foucault peut être réalisé par assemblage d'un ensemble de capteurs identiques et fonctionnent d'une manière autonome, le contrôle est fait par échantillonnage de mesure [1]. Du point de vue modélisation cela revient à l'étude d'un seul capteur. Nous proposons dans ce travail la modélisation d'une matrice de capteurs constituée par la mise en série d'un ensemble de bobines et alimentée par une seule source de courant [2]. La mesure instantanée de la tension électrique de chaque bobine donne une investigation rapide de l'état de santé de la pièce test.

Dans la section suivante, nous commençons par la modélisation d'un seul capteur et ensuite nous présentons le modèle de la matrice de capteurs. La validation du modèle est obtenue par la comparaison avec des résultats d'un calcul éléments finis 3D puis avec des mesures expérimentales.

2. MODELE DE CALCUL POUR UN SEUL CAPTEUR

La matrice est constituée d'un ensemble de capteurs, chaque capteur est une bobine à double fonction (excitation et mesure). Les caractéristiques de la bobine sont :

Nombre de couches: 13
 Nombre de spires par couche: 11
 Nombre total de spires: $11 \times 13 = 143$
 Diamètre du fil : 0.4 mm



La modélisation doit tenir compte de certains phénomènes physiques liés aux fréquences de travail du capteur. Les principaux phénomènes qui peuvent apparaître sont l'effet de peau, l'effet de proximité et la capacité parasite inter spire. C'est ainsi que nous avons effectué une analyse expérimentale de l'impédance de la bobine dans la gamme des fréquences inférieures à 100 KHz. L'analyse est faite pour une bobine seule (sans charge) en utilisant un analyseur d'impédance Agilent-4294A. Le résultat est donné par la figure 1

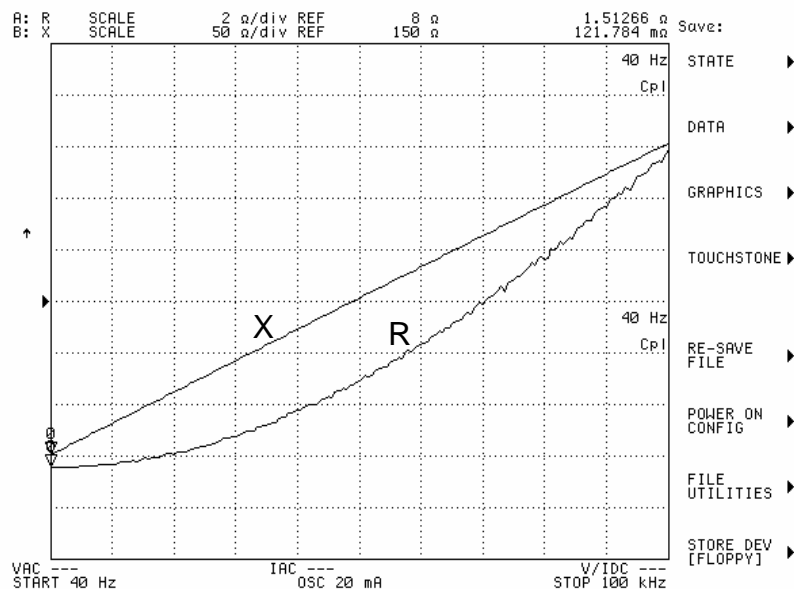


Fig. 1. Mesure donnée par un analyseur de spectre (Agilent-4294A) dans la gamme de fréquences 40 Hz- 100 kHz: R : Résistance, X: Réactance

Nous observons que la résistance de la bobine augmente à partir de la fréquence de 10KHz, ce phénomène est dû à l'effet de proximité entre les spires de la bobine et non pas à l'effet de peau qui doit apparaître à des fréquences supérieures à 100KHz. Cet effet est pris en compte dans la modélisation.

Pour tenir en compte de l'effet de proximité, la bobine n'est pas considérée comme un seul block comme il se fait habituellement, mais on considère toutes les spires de la bobine comme des régions géométriques distinctes liées par l'équation du circuit électrique.

A partir des équations de Maxwell le problème électromagnétique en potentiel vecteur magnétique A et dans le repère cylindrique est décrit par :

$$\frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (rA_\varphi) - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial (rA_\varphi)}{\partial t} = Js_i \quad (1)$$

$$Js_i = -\frac{\sigma}{2\pi r_i} V_i \quad (2)$$

ν : reluctivité magnétique, σ : conductivité électrique

V_i : tension électrique de la spire i , r_i : rayon de la spire i .

La figure 2 illustre la comparaison entre les valeurs mesurées et calculées de la résistance de la bobine.

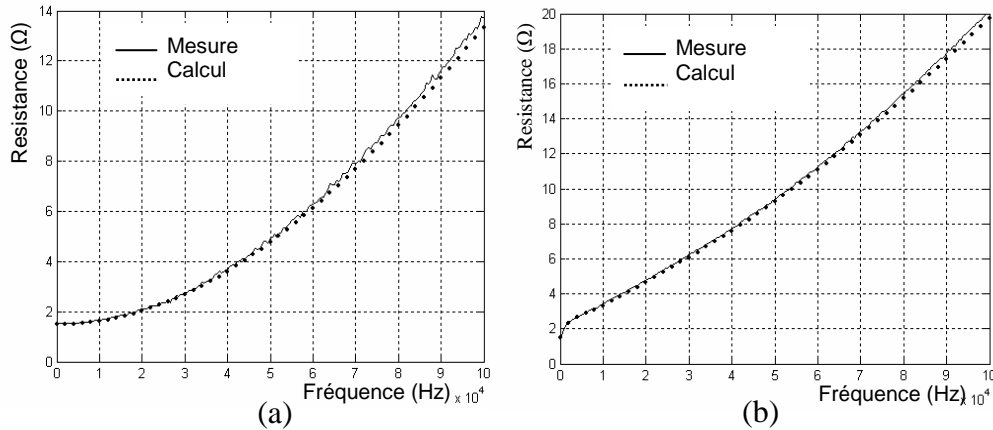


Figure 2 : Résistance mesurée et calculée de la bobine en fonction de la fréquence.
 (a) bobine dans le vide, (b) bobine en présence de la pièce test

La résistance mesurée est influencée par l'effet de proximité et les courants induits dans la plaque test. Pour la bobine dans le vide la résistance est influencée uniquement par l'effet de proximité qui est plus apparent à partir de 10 kHz. En présence de la plaque test (figure 2-b), les courants induits développés dans cette dernière affectent la résistance de la bobine même à base fréquences.

3. MODELE DE CALCUL DE LA MATRICE DE CAPTEURS

Pour reconstituer le champ électromagnétique produit par la matrice de capteurs à courant de Foucault, qui est de nature tridimensionnelle, nous utilisons le principe de superposition. Dans le cas linéaire la superposition consiste à une translation spatiale dans le plan de la matrice du capteur puis une sommation vectorielle des champs électromagnétiques produits par chaque bobine, ce qui est donnée par les formules suivantes [3] :

$$\begin{cases} A_x(x, y, z) = \sum_{k=1}^{nc} \text{sign}(I_{sk}) \frac{oy_k - y}{r_k} A_\varphi(r_k, z), \\ A_y(x, y, z) = \sum_{k=1}^{nc} \text{sign}(I_{sk}) \frac{x - ox_k}{r_k} A_\varphi(r_k, z), \\ A_z(x, y, z) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Dans l'équation 3, A_φ est le potentiel vecteur magnétique solution de équation 1 pour une seule bobine, nc le nombre de bobines de la matrice de capteurs, ox_k, oy_k les coordonnées du centre de la bobine k , x, y, z sont les coordonnées cartésiennes de point de calcul, r_k est

la distance entre le point de calcul et le centre de la bobine k , et $sign(I_{sk})$ indique le sens du courant source dans la bobine k .

En utilisant la superposition et par un seul calcul axisymétrique, on peut rapidement calculer le champ électromagnétique produit par une matrice de bobines. La figure 3 présente les courants de Foucault générés par une matrice de 3x4 bobines sur la surface d'une plaque conductrice.

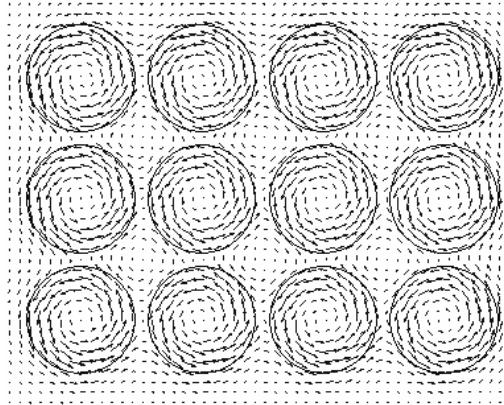


Fig. 3. Courants de Foucault dans une plaque conductrice générés par une matrice de 3x4 bobines.

4. VALIDATION PAR UN CALCUL ELEMENTS FINIS 3D

Un calcul élément finis 3D de la matrice de capteurs nécessite une taille de mémoire informatique importante en plus la présence d'un nombre important de capteur augmente la taille du maillage. Pour des raisons de simplification on considère uniquement deux bobines (Fig. 4) dans le calcul EF 3D pour la validation de l'approche de superposition.

La validation est faite par un code de calcul élément finis 3D développé dans notre laboratoire sous l'environnement Matlab [4], ce code est basé sur la formulation A-V et associée au logiciel de maillage Gmsh 3D (Fig. 4) (www.geuz.org/gmsh).

La Figure 4 illustre la géométrie du problème introduite dans Gmsh. Les données de maillage sont ensuite translatsés au format Matlab pour le calcul EF.

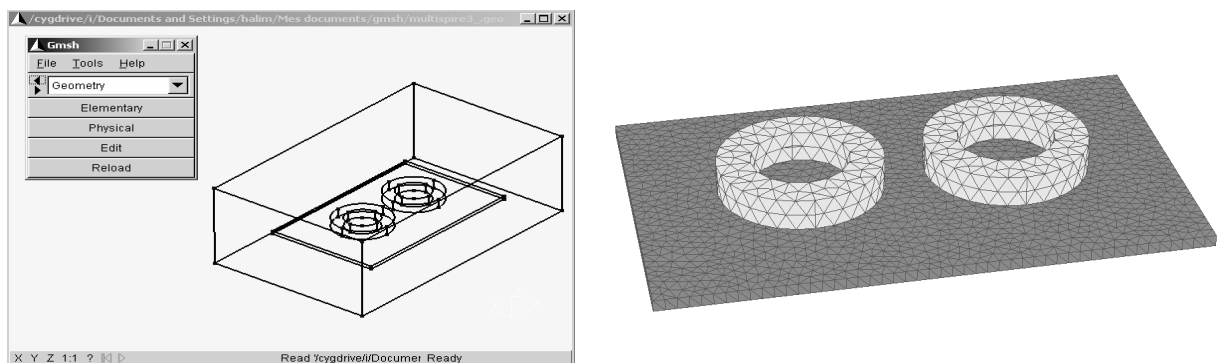


Fig. 4. Géométrie du problème et le maillage dans Gmsh

L'environnement Matlab est choisi pour les facilités de calcul matriciel et la disponibilité des solveurs des systèmes matriciels creux.

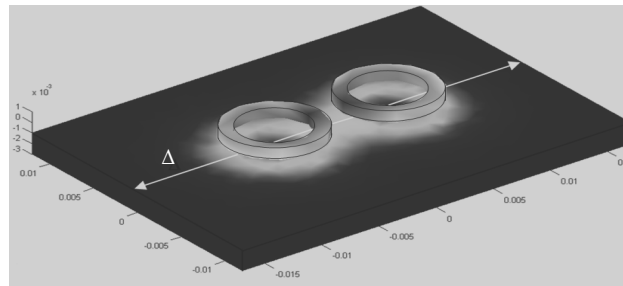


Fig. 5. Résultat pour deux bobines en série place au dessus d'une tôle d'alliage d'aluminium (épaisseur: 2mm, conductivité: 18MS)

La validation de l'approche de superposition par la calcul élément finis 3D est faite par comparaison des valeurs du vecteur potentiel magnétique A le long d'un trajet Δ comme le montre la figure 5. La comparaison est faite pour le cas où les deux bobines sont alimentées dans le même sens ainsi que dans le cas d'alimentation en sens inverse.

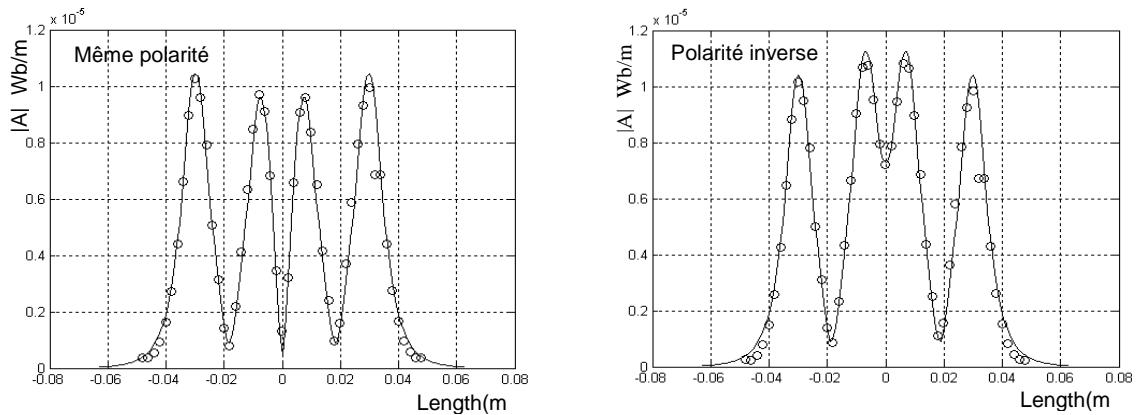


Fig. 6. $|A|$ sur la ligne Δ

— Superposition
 o EF 3D

Cet exemple est traité sur un PC Pentium 4 2.8GHz. La comparaison des performances de calcul entre le modèle EF 3D et le model proposé de superposition est montrée sur le tableau suivant:

Tableau 1 : comparaison des performances de calcul

	Temps CPU	Mémoire RAM
EF 3D	554s	50 Moctets
Superposition	21s	4 Moctets

5. VALIDATION EXPERIMENTALE

La validation expérimentale est faite par l'analyse de l'impédance de deux éléments de la matrice, connectés en série et placés au dessus d'une tôle d'alliage d'aluminium (Fig. 7).

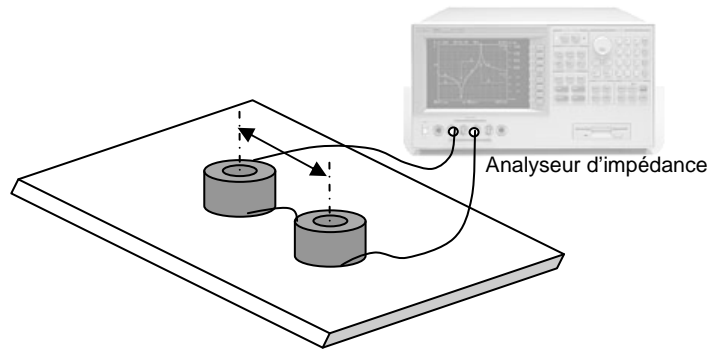


Fig. 7. Test expérimental par analyseur d'impédance.

Figure 8 montre la partie réelle de l'impédance totale. Les mesures sont faites pour différentes distances entre les deux bobines.

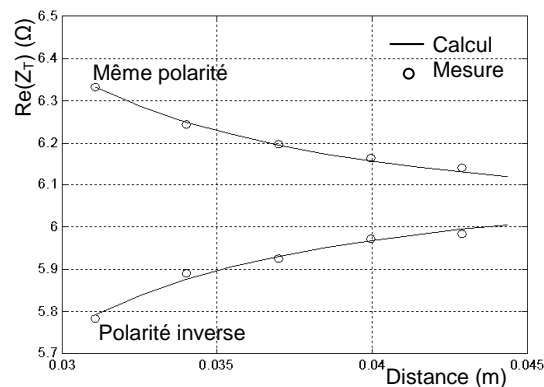


Fig. 8. Partie réelle de l'impédance totale de deux bobines en série à une fréquence de 1 KHz, placées au dessus d'une tôle d'alliage d'Aluminium.

6. CONCLUSION

Par comparaison avec un calcul tridimensionnel complet, le modèle de superposition donne un calcul rapide du champ électromagnétique produit par la matrice de capteurs à courants de Foucault. Ce modèle peut être associé à d'autres méthodes de modélisation en CND principalement celles basées sur les dyades de Green. Ces méthodes nécessitent le calcul du champ électromagnétique incident sur la pièce saine avant d'étudier l'effet de réaction dû à la présence d'éventuels défauts.

Travail réalisé dans le cadre du programme d'action intégré Algéro-Français Tassili.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. Huang et al. "Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes" *NDT&E International* v36 (2003) pp. 515–522.
- [2] Takagi T., Uchimoto T., Nagaya Y., Huang H., Endo H., "Design of eddy current camera for non-destructive testing," *SICE Annual Conference* August 4-6, 2003.
- [3] A.Zaoui, M.Feliachi, V.Doirat, M. Djennah, "A fast 3D modeling of arrayed eddy current sensor," in *Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Fields Computation*, CEFC-2006.
- [4] B.Oszkár, K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No.7, pp.3145-3159., 1989.