

# Caractérisation non destructive par courants de Foucault de l'état de contraintes dans les matériaux magnétiques

Abla DAHIA<sup>1</sup>, Eric BERTHELOT<sup>1</sup>, Yann LE BIHAN<sup>1</sup>, Laurent DANIEL<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie Electrique de Paris, CNRS UMR8507 ; SUPELEC ; UPMC ; Univ Paris-Sud  
11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>School of Materials, University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom  
abla.dahia@lgep.supelec.fr

**RESUME** - L'objectif de ce travail est d'étudier une technique de caractérisation de l'état de contraintes dans les matériaux magnétiques par la méthode du contrôle non destructif par courants de Foucault. Cette technique exploite l'effet de la contrainte sur le comportement magnétique d'un matériau magnétique. Un modèle multi-échelle a été utilisé pour décrire le comportement magnétique d'un matériau magnétique soumis à une contrainte mécanique. Un modèle éléments finis 3D a été développé pour modéliser l'influence de l'état de contraintes dans un matériau magnétique sur le signal fourni par un capteur à courants de Foucault. Un protocole de caractérisation expérimentale a été mis en place pour valider la modélisation 3D développée.

*Mots-clés*— Capteur à courants de Foucault, instrumentation, contraintes mécaniques, contraintes résiduelles, magnétostriction.

## 1. INTRODUCTION

La connaissance de l'état de contraintes dans un matériau est importante lorsque le bon fonctionnement du système qui l'inclut peut en être impacté. Il existe plusieurs méthodes destructives et non destructives pour la mesure des contraintes dans un matériau. La méthode non destructive la plus utilisée pour la mesure des contraintes est la diffraction des rayons X [1] mais c'est une technique contraignante et coûteuse. Comme les propriétés magnétiques d'un matériau magnétique dépendent de l'état de contraintes, il paraît envisageable de caractériser l'état de contraintes d'un tel matériau, par ailleurs conducteur, par la méthode du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) [2]. Cette technique est potentiellement intéressante car elle présente plusieurs avantages : elle est simple à mettre en œuvre, automatisable et peu coûteuse. Afin de réaliser cet objectif, à savoir l'identification inverse de l'état de contraintes à partir du signal fourni par un capteur CF, on doit dans un premier temps identifier la dépendance de ce signal à l'état de contraintes du matériau contrôlé. Dans ce but, ce travail propose de mettre en œuvre une double modélisation. D'une part, l'effet de la contrainte sur la perméabilité magnétique est modélisé par un modèle multi-échelle. D'autre part, un modèle reposant sur la

méthode des éléments finis (MEF) 3D a été développé pour décrire les conséquences d'une modification de perméabilité magnétique sur le signal fourni par un capteur CF. Pour valider cette approche, une comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus en parallèle est proposée.

## 2. MODELE MULTI-ECHELLE

Le comportement magnétique d'un matériau magnétique soumis à une contrainte a été décrit à l'aide d'un modèle multi-échelle (MME) [3,4]. Ce MME est basé sur une description énergétique de l'équilibre magnéto-élastique. Différentes échelles sont considérées : l'échelle du domaine magnétique, l'échelle du monocristal et l'échelle du polycristal. Les règles de passage d'une échelle à l'autre permettent de relier l'échelle macroscopique (pour laquelle on associe une loi de comportement moyen) à l'échelle microscopique (pour laquelle les mécanismes physiques pertinents peuvent être décrits). Le MME permet de prédire le comportement d'un matériau magnétique soumis à une contrainte mécanique multiaxiale. Seule la partie réversible (anhystérétique) du comportement magnéto-élastique est modélisée. Dans cet article, ne sont considérées que des contraintes de traction uniaxiale. La figure 1 présente les deux composantes - dans le plan de l'éprouvette - du tenseur de perméabilité magnétique modélisé pour un alliage de FeCoV initialement isotrope, en fonction de la contrainte uniaxiale appliquée selon l'axe-X. Comme cela a déjà été observé expérimentalement, l'effet de la contrainte est non linéaire et non symétrique en traction et compression. Le MME prédit également l'anisotropie magnétique induite par la contrainte appliquée.

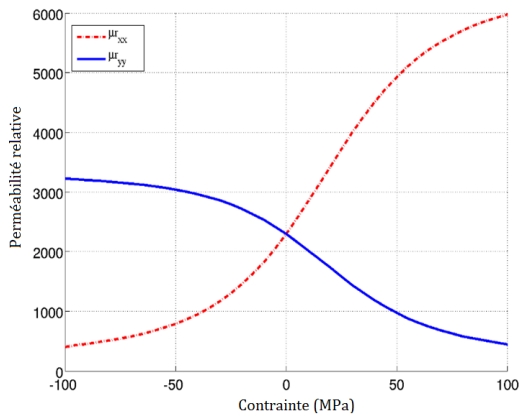


Fig.1 Composantes du tenseur de perméabilité relative en fonction de la contrainte appliquée pour un alliage de FeCoV (contrainte de traction/compression selon l'axe-X)

### 3. MODELISATION DE LA REPONSE DU CAPTEUR CF

La MEF a été retenue pour la modélisation du dispositif de contrôle par CF. Une formulation en potentiels combinés, associant potentiel vecteur magnétique et potentiel scalaire électrique, est utilisée. La figure 2 présente la configuration d'étude constituée d'un capteur CF composé de deux bobines enroulées autour d'un circuit magnétique en ferrite en forme de U placé à proximité d'un matériau ferromagnétique soumis à une contrainte uniaxiale  $T_{xx}$ . Les deux bobines sont connectées en série et de manière à générer un champ magnétique circulant d'un pôle vers l'autre pôle. La grandeur de sortie du capteur est l'impédance  $Z$  mesurée aux bornes des deux bobines. Comme le champ d'excitation utilisé dans le CND par CF est assez faible (de l'ordre de quelques A/m), un calcul MEF linéaire est implémenté. Compte tenu des symétries physiques, le problème 3D a été étudié sur le quart de la géométrie. Deux types d'éléments finis ont été utilisés pour le maillage : des éléments hexaédriques qui permettent de prendre aisément en compte une faible épaisseur de peau, et des éléments tétraédriques pour les milieux non critiques vis-à-vis de la finesse de maillage mais de géométrie complexe. Afin d'assurer la conformité du maillage à l'interface entre les régions maillées par des éléments hexaédriques et celles maillées par des éléments tétraédriques, des éléments pyramidaux de transition sont utilisés. Le maillage est composé dans cette application d'approximativement  $2 \times 10^5$  éléments. L'impédance  $Z$  est composée d'une partie réelle  $R$  déterminée à partir du calcul des pertes par effet Joule dans le domaine conducteur (matériau magnétique), et d'une partie imaginaire  $X$  calculée à partir de l'énergie magnétique stockée dans l'ensemble du domaine d'étude ( $Z = R + jX$ ).

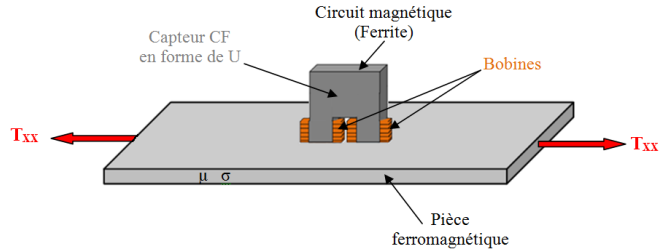


Fig.2 Configuration CF d'étude

## 4. EXPERIMENTATION

La figure 3 montre le banc expérimental qui a été mis en place pour étudier l'effet de la contrainte sur le signal fourni par un capteur CF. Les caractéristiques du capteur sont précisées en figure 4. Le matériau ferromagnétique étudié, un alliage FeCoV, est placé entre les mors d'une machine de traction/compression Zwick/Roell Z030. Le capteur CF est placé à proximité de l'éprouvette. Un analyseur d'impédance Agilent 4294A est utilisé pour mesurer l'impédance  $Z$  du système matériau-capteur en fonction de la contrainte  $T_{xx}$  appliquée.

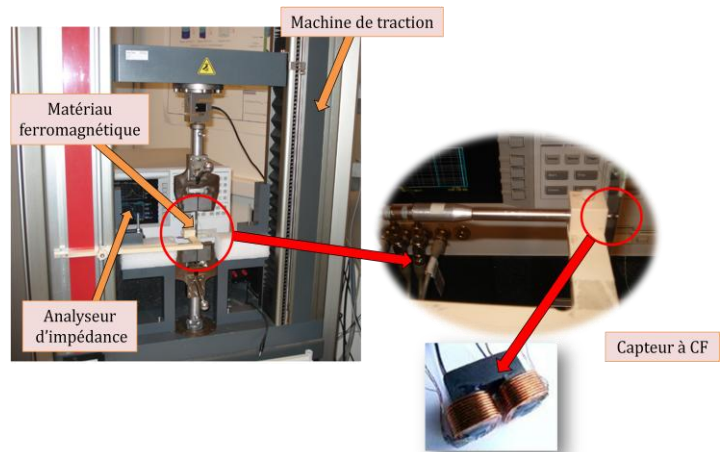
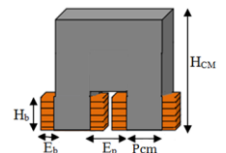


Fig.3 Banc de mesure

Tableau 1. Caractéristique du capteur CF

Nombre de spires	$2 \times 123$
Hauteur de la bobine ( $H_b$ )	1mm
Hauteur du circuit magnétique ( $H_{cm}$ )	3mm
Distance entre les deux pôles ( $E_p$ )	1mm
Epaisseur de la bobine ( $E_b$ )	0.45mm
Profondeur du circuit magnétique ( $P_{cm}$ )	1mm
Perméabilité relative du circuit magnétique	1100



## 5. RESULTATS

La variation relative d'impédance  $|Z(T) - Z(0)|/|X(0)|$  en fonction de la fréquence d'excitation du capteur CF pour différentes contraintes de traction  $T$  appliquées est montrée sur les figures 4 et 5 ci-après. Les courbes correspondent respectivement aux résultats obtenus à partir des mesures et des calculs MME+MEF. On remarque que pour une contrainte  $T_{xx}$  donnée, les deux courbes obtenues à partir de la mesure et du calcul EF ont la même allure en fonction de la fréquence. Il faut noter que les échelles sont identiques en abscisses mais différentes en ordonnées et qu'aucun paramètre de la modélisation n'a été identifié à partir des mesures effectuées. La fréquence optimale de travail - qui correspond à une sensibilité maximum du capteur CF - peut être déduite. Elle vaut 400 kHz dans le cas de la mesure alors que le calcul MME+MEF la prévoit à 870 kHz. On peut toutefois montrer qu'un ajustement de la valeur de la conductivité - choisie ici à 3.84 MS/m d'après [5] - permettrait d'éliminer ce décalage. Une explication possible de cet écart modèle/essai est la non prise en compte des pertes magnétiques par excès (pertes supplémentaires par résonance de parois) dans le MEF. En effet, ces pertes varient en  $f^{3/2}$  ( $f$  étant la fréquence) [6].

Les amplitudes sont plus élevées dans le cas du calcul MME+MEF que dans la mesure. Cet écart pourrait être attribué à une mauvaise identification du lift-off (distance capteur-pièce) utilisée dans le calcul MEF. Des tests de validation sont en cours pour valider cette hypothèse.

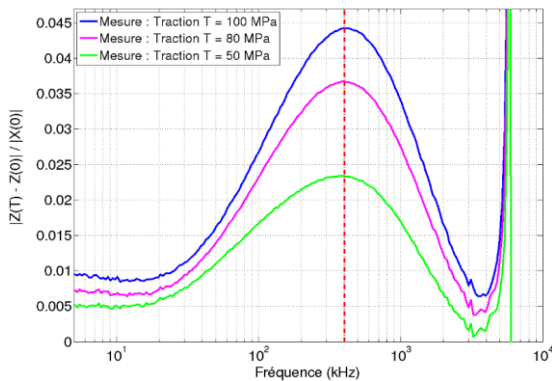


Fig.4 Variation relative d'impédance pour différentes contraintes de traction  $T$  appliquées (50, 80 et 100MPa) en fonction de la fréquence d'excitation du capteur CF : résultats de mesure

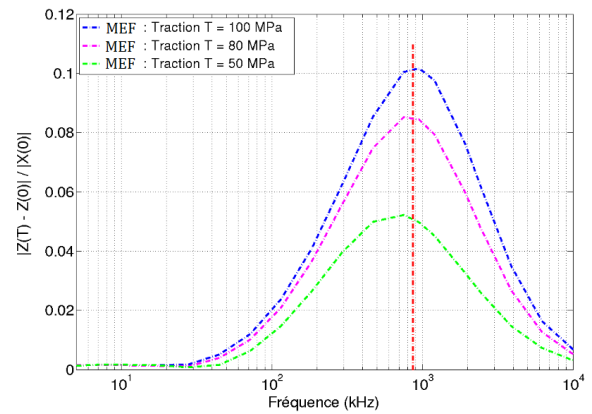


Fig.5 Variation relative d'impédance pour différentes contraintes de traction  $T$  appliquées (50, 80 et 100MPa) en fonction de la fréquence d'excitation du capteur CF : résultats de calculs numériques

## 6. CONCLUSIONS

La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault est une solution intéressante pour caractériser l'état de contraintes d'un matériau magnétique. Ce papier propose une méthodologie pour la modélisation d'un tel contrôle. L'objectif à terme est de la mettre en œuvre pour la conception de capteurs CF et l'analyse des données de mesure dans une démarche d'inversion. Les résultats obtenus montrent un très bon accord qualitatif entre modèle et essai et donc la faisabilité de cette approche. Un meilleur accord nécessite une meilleure identification des paramètres utilisés tant pour la loi de comportement que pour la géométrie de l'essai. Différentes structures de capteurs CF seront considérées pour obtenir une meilleure sensibilité aux contraintes. Dans ce travail, seules des contraintes uniaxiales ont été considérées. Dans la pratique, les contraintes sont souvent multiaxiales. La multiaxialité sera prise en compte et fera l'objet de recherches plus poussées.

## 7. REFERENCES

- [1] J. Withers et H.K.D.H. Bhadeshia, "Residual Stress Part 1 - Measurement Techniques", *Materials Science and Technology*, **17**:355-365, 2001.
- [2] H.C. Schoenekess, W.Ricken et W.J. Becker "Method to Determine Tensile Stress Alterations in Prestressing Steel Stands by Means of an Eddy-Current Technique", *IEEE Sensors Journal*, **7(8)**:1200-1205, 2007.
- [3] L. Daniel, O. Hubert, N. Buiron et R. Billardon, "Reversible magneto-elastic behavior: a multiscale approach", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **56(3)**:1018-1042, 2008.
- [4] L. Daniel et N. Galopin, "A Constitutive Law for Magnetostrictive Materials and its Application to Terfenol-D Single and Polycrystals", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **42(2)**:153-159, 2008.
- [5] [http://www.magmet.com/nam/images/NAM\\_cat\\_combinedCh5.pdf](http://www.magmet.com/nam/images/NAM_cat_combinedCh5.pdf)
- [6] G. Bertotti, «General properties of power losses in soft ferromagnetic materials», *IEEE Transactions on magnetics*, **24(1)**, 1988.