

Modèle de magnétostriction macroscopique local prenant en compte l'anisotropie et l'effet des contraintes

Serigne Saliou MBENGUE, Nicolas BUIRON, Vincent LANFRANCHI

Université de Technologie de Compiègne (UTC), Laboratoire Roberval- UTC, Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne- UTC

RESUME – Sur ce document est présentée une méthode de calcul de la magnétostriction ainsi que l'aimantation à l'échelle macroscopique (échelle supérieure à celle du cristal) des tôles ferromagnétiques doux à faible épaisseur. Ces dernières, utilisées dans la conception des appareils électriques (transformateur, moteurs électriques), voient leurs caractéristiques (telles que l'anisotropie et le couplage magnétoélastique) changées à cause de certains traitements (tels que le laminage et le découpage des tôles). Ainsi pour une meilleure précision de calcul de la magnétostriction et de l'aimantation, l'anisotropie et l'effet des contraintes sont pris en compte. Une comparaison entre des valeurs expérimentales et théoriques sera présentée pour la validation du modèle. Puis les résultats de quelques scénarii de test ainsi que de l'implémentation en éléments finis seront exposés.

MOTS-CLES – Matériaux ferromagnétiques doux, Magnétostriction, Aimantation, Anisotropie, Couplage magnétoélastique, Transformateur, Vibration.

1. Introduction

L'utilisation croissante de l'énergie électrique dans les systèmes embarqués (hybridation des voitures et électrification des avions) d'une part, et la contrainte de masse d'autre part entraîne une utilisation importante des matériaux ferromagnétiques à forte puissance massique. Cependant, cela peut amplifier certains phénomènes parasites tels que la magnétostriction qui est une source importante de bruit des transformateurs [1]. L'art antérieur permet de distinguer principalement deux méthodes de calcul de la magnétostriction à l'échelle macroscopique. Une première méthode qui est basée sur l'identification des coefficients polynomiaux de magnétostriction [2], [3]... Une deuxième méthode utilisant une approche multiéchelle [4], [5] permet de calculer la magnétostriction grâce à la connaissance de la distribution des orientations ainsi que les caractéristiques des cristaux constituant la tôle. Ainsi dans l'optique de la réduction des vibrations dues à la magnétostriction, un modèle prenant en compte l'anisotropie et l'effet de la contrainte grâce à une caractérisation macroscopique est proposé dans ce document. Le principe de calcul de la magnétostriction sera présenté brièvement dans un premier temps puis une comparaison sera faite entre les valeurs expérimentales et calculées. L'impact de l'anisotropie ainsi que de la contrainte sur la magnétostriction sera mis en évidence. Pour finir, les résultats de l'implémentation en éléments finis du modèle sur un transformateur seront exposés.

2. Présentation du modèle

En négligeant l'effet de la température, la variation de l'énergie totale (enthalpie) à contrainte constante d'une tôle ferromagnétique déformable est fonction de la variation de son aimantation [6], [7]. Etant donné que la magnétostriction est directement liée à l'aimantation (voir version finale), alors elle peut être estimée grâce à la minimisation de l'énergie du matériau par rapport à l'aimantation. Du point de vue macroscopique, l'aimantation d'une tôle ferromagnétique résulte de différents facteurs décrits ci-dessous (cette partie sera détaillée dans la version finale).

2.1 L'anisotropie de forme

Comme son nom l'indique, elle est due à la forme du matériau. Dans le cas des tôles à faible épaisseur, cet effet tend à contraindre l'aimantation dans le plan de la tôle [8] grâce à un champ démagnétisant. Ainsi l'hypothèse d'une aimantation plane, valide dans tout le document, peut être faite :

$$\vec{M} / \begin{cases} \|\vec{M}\| = kM_s \text{ avec } -1 \leq k \leq 1 \text{ et } M_s \text{ aimantation à la saturation} \\ (\vec{M}, DL) = \theta \text{ avec } -\pi \leq \theta \leq \pi \text{ et } DL \text{ direction de laminage de la tôle} \end{cases} \quad (1)$$

L'anisotropie de forme est associée à l'énergie de champ démagnétisant. Elle est fonction de l'aimantation de la tôle et est notée :

$$E_D = f_1(k, \theta) \quad (2)$$

2.2 L'anisotropie induite par la texture cristallographique du matériau

Comme le montre la Figure 1 ci-dessous [9], l'expérience des métallurgistes nous dit que le laminage des tôles a une grande influence sur l'orientation des cristaux. En effet les tôles ont tendance à s'aimanter plus facilement vers la direction de laminage.

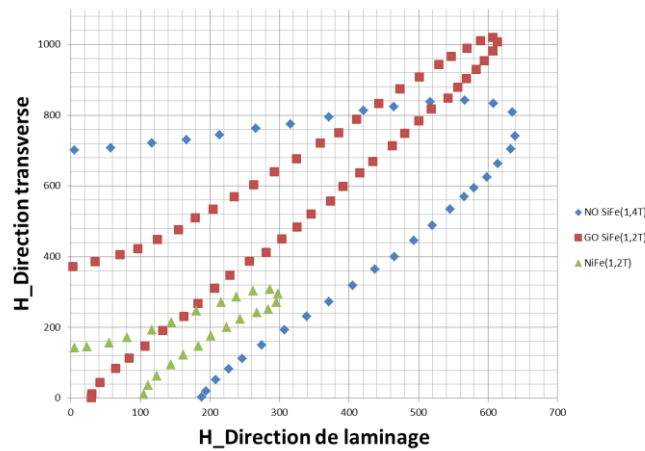


Figure 1 : Représentation polaire du champ d'excitation de trois échantillon [9]

Cette anisotropie, que nous détaillerons dans la version finale, est liée à une énergie qui dépend de l'aimantation de la tôle :

$$E_K = f_2(k, \theta) \quad (3)$$

2.3 L'anisotropie induite par la contrainte

Elle résulte du couplage magnétoélastique qui est une caractéristique intrinsèque de la tôle.

$$E_\sigma = f_3(\underline{\underline{\sigma}}, k, \theta) \text{ avec } \underline{\underline{\sigma}} \text{ tenseur de contrainte macroscopique local} \quad (4)$$

2.4 L'énergie de Zeeman

Elle correspond à l'interaction entre l'aimantation macroscopique locale et le champ magnétique extérieur appliqué.

$$E_Z = f_4(\vec{H}_0, k, \theta) \text{ avec } \vec{H}_0 \text{ champ magnétique externe appliqué} \quad (5)$$

Ainsi pour calculer la magnétostriction ainsi que l'aimantation macroscopique locale de la tôle à l'équilibre (à contrainte et champ magnétique donnés), une minimisation de l'énergie totale (qui est la somme des énergies décrites précédemment) par rapport à k et θ sera faite :

$$\begin{cases} \min(E_{tot}(k, \theta, \underline{\sigma}, \vec{H}_0)) \\ -1 \leq k \leq 1 \\ -\pi \leq \theta \leq \pi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \vec{M}_{eq}(k_{eq}, \theta_{eq}) & \text{aimantation à l'équilibre} \\ S_{=eq}^{\mu} & \text{magnétostriction à l'équilibre} \end{cases} \quad (6)$$

3. Résultats

Comme illustre la Figure 2 ci-dessous, une première expérimentation a été faite afin de valider les paramètres du modèle. L'essai, fait en basse fréquence grâce à un cadre d'Epstein, porte sur une bande en FeSi.

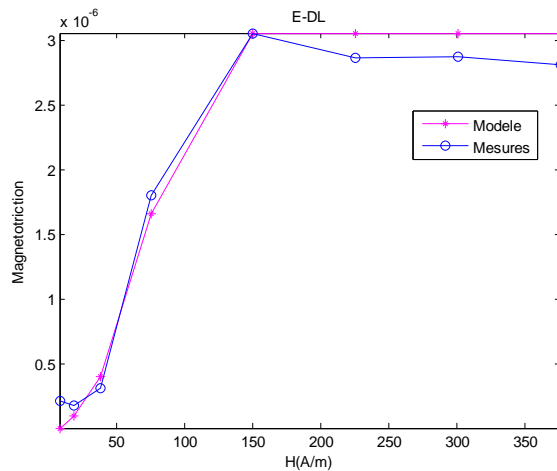


Figure 2 : Comparaison entre valeurs expérimentales et simulées de la magnétostriction dans la direction de laminage de la bande

Afin de mettre en évidence l'effet de l'anisotropie (voir Figure 3 ci-dessous), nous avons calculé la magnétostriction avec un champ magnétique parallèle (0 deg) puis perpendiculaire (90 deg) à la direction de laminage. A l'instar de l'anisotropie, la Figure 3 ci-dessous montre l'impact de la contrainte sur la magnétostriction selon que la tôle est en traction ou en compression.

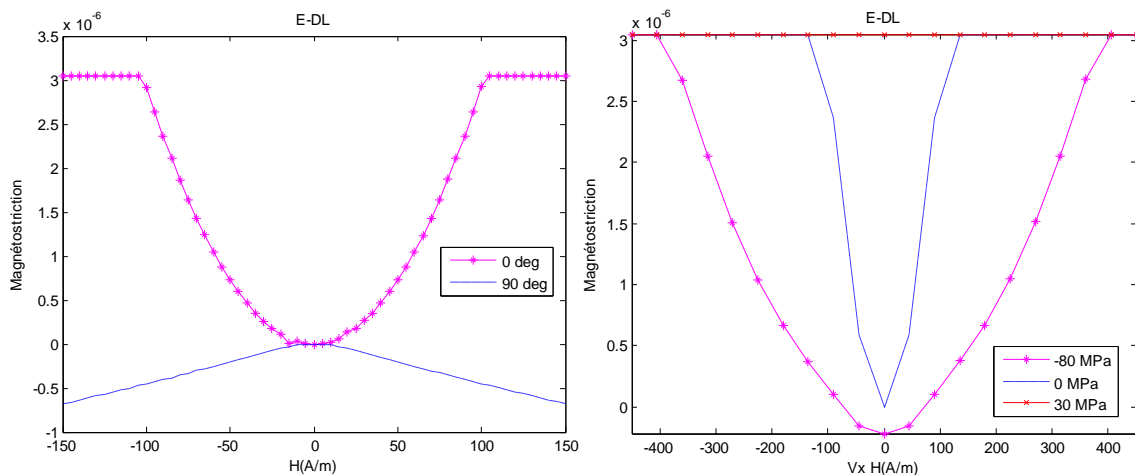


Figure 3 : Magnétostriction suivant la direction de laminage de la tôle : Mise en évidence de l'anisotropie (figure de gauche) et de l'effet de la contrainte (figure de droite)

Le modèle a été utilisé dans un calcul éléments finis dont les résultats sont montrés dans la Figure 4 ci-dessous. En effet un couplage unidirectionnel¹, préconisé pour les calculs de vibrations d'origine magnétique dans les structures ferromagnétiques [10], est utilisé pour calculer la magnétostriction d'un noyau ferromagnétique de type transformateur en FeSi à grains non orientés.

¹ Calcul séparé de la distribution du champ magnétique puis des contraintes qui en résultent.

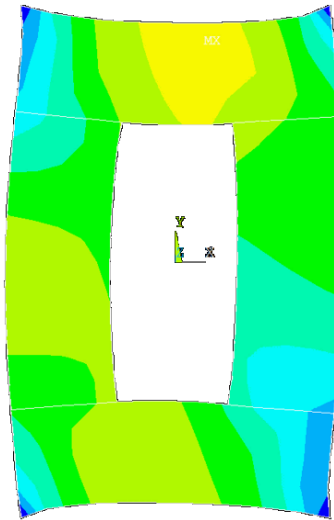


Figure 4 : Déformation magnétostrictive à un instant donné d'un noyau ferromagnétique de type transformateur excité par un champ magnétique à 50Hz

4. Conclusion

Comme le montre les résultats, ce modèle prend en compte l'anisotropie due à la texture et à la forme de la tôle ainsi que l'effet des contraintes sur cette dernière. Grâce à une caractérisation macroscopique de la tôle, qui sera détaillée dans la version finale ainsi que la description du modèle, ce modèle permettra plus facilement de calculer la déformation magnétostrictive dans les appareils électriques.

5. Références

- [1] Pyungwoo JANG, Gwangbo CHOI, « Acoustic Noise Characteristics and Magnetostriction of Fe-Si Powder Cores », IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 2012, Korea.
- [2] Nicolas GALOPIN., « Modélisation et caractérisation de matériaux actif pour la conception de dispositifs magnéto-électriques », THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS XI, 2007, Paris (France).
- [3] D.C. JILES, M.K. DEVINE, « The law of approach as a means of modelling the magnetomechanical effect », Journal of Magnetism and Magnetic Materials 140-144, 1995, USA.
- [4] Laurent DANIEL, Olivier HUBERT, Nicolas BUIRON, René BILLARDON, « Reversible magneto-elastic behavior: A multiscale approach », Journal of the Mechanics and Physics of Solids 56 1018-1042, 2008.
- [5] F. GANET, O. HUBERT, X. MININGER, F. BOUILLAULT, L. BERNARD, « Application of the magneto-mechanical coupling to the prediction of deformation of non-oriented FeSi based transformers », Compumag, 2013.
- [6] Etienne DU TREMOLET DE LACHEISSERIE, « Approche thermodynamique du magnétisme », Magnétisme – Tome I Fondements 2000, Grenoble (France).
- [7] Chaitanya MUDIVARTHI, Supratik DATTA, Jayasimha ATULASIMHA, Alison B. FLATAU, Phillip G. EVANS, Marcelo J. DAPINO, « Equivalence of magnetoelastic, elastic, and mechanical work energies with stress-induced anisotropy », Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials 2008.
- [8] Jean-Pierre NOZIERES, « Ferromagnétisme », TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, 1998, Grenoble (France).
- [9] B. CORNUT, A. KEDOUS-LEBOUC, Th. WAECKERLE, « From metallurgy to modeling of electrical steels: a multiple approach to their behavior and use based on physics and experimental investigations », JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, 1996, Grenoble (France).
- [10] Besbes M., « Contribution à la modélisation numérique des phénomènes couplés magnétoélastiques. Application à l'étude des vibrations d'origine magnétique dans les M.R.V. », THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VI, 1995, Paris (France).