

Impact des modèles de lois de comportement magnétique anisotropes non-linéaires sur la modélisation des pertes fer dans les transformateurs

J. Drappier¹, F. Guyomarch¹, R. Cherif² et Y. Le Menach¹

¹Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 - L2EP, F-59000 Lille, France

²ESME, ESME Research Lab Lille, France

Résumé—Cet article étudie la prise en compte de l'anisotropie par différents modèles de comportement dans la simulation des pertes magnétiques d'un transformateur constitué d'acier électrique conventionnel à grains orientés (GO) dans un environnement de simulation par la méthode des éléments finis. Les tôles GO sont couramment utilisées pour améliorer l'efficacité des machines électriques, mais leur comportement complexe nécessite une modélisation précise. Des résolutions non-linéaires pour différents modèles d'anisotropie ont été mises en œuvre et comparées à des modélisations non-linéaires isotropes et linéaires anisotropes. Ensuite, un modèle de perte de fer anisotrope d'Appino *et al.* a été appliqué pour évaluer les pertes de fer.

I. INTRODUCTION

Les machines électriques font actuellement l'objet de recherches intensives visant à améliorer leur efficacité de quelques pourcents. Une solution consiste à utiliser des tôles à grains orientés (GO). Réputés pour leurs performances magnétiques supérieures dans la direction de laminage (DL) (perméabilité élevée et faibles pertes magnétiques), ces aciers sont généralement utilisés pour guider le flux magnétique le long de cette direction privilégiée. Cependant, ces tôles affichent non seulement un comportement non-linéaire, mais également des caractéristiques magnétiques fortement anisotropes entre la DL et la direction transversale (DT). Considérer le comportement anisotrope de ces matériaux est essentiel lors de l'examen des propriétés magnétiques (e.g. les pertes fer).

Implémentée dans le logiciel de méthode des éléments finis (EF) code_Carmel, cette étude s'appuie sur différents modèles de lois de comportement anisotropes, tels que le modèle elliptique [1] et le modèle elliptique modifié [2]. Ces modèles reposent uniquement sur des mesures dans les directions de laminage et transversale. Une analyse comparative les confronte à des approches plus courantes, notamment une modélisation isotrope non-linéaire et une modélisation anisotrope linéaire.

Ensuite, un modèle anisotrope de pertes fer, présenté dans [3] et récemment mis en œuvre dans un environnement de simulation EF [4], a été utilisé pour évaluer les pertes fer dans un quart de transformateur en acier GO aux dimensions d'un cadre Epstein. Des simulations magnétostatiques 3D ont été effectuées, calculant les pertes fer à partir des distributions par éléments finis des champs magnétiques \mathbf{H} et \mathbf{B} .

II. MODÈLES D'ANISOTROPIE MAGNÉTIQUE

A. Notations et hypothèses

La définition de nos modèles implique de considérer le système de coordonnées local des tôles (DL, DT, DN), où DN représente la direction normale aux tôles. Le tenseur

de perméabilité μ porte le comportement magnétique des matériaux. Il établit la relation entre l'induction magnétique et le champ magnétique selon $\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H}) \mathbf{H}$.

Tel que mesurée dans [5], la loi de comportement le long de DN est supposée être faible et linéaire. Cette hypothèse permet de découpler le comportement magnétique le long de DN. On suppose également un comportement anhystérique.

Les modèles considérés initialement développés en 2D, permettent de déterminer les perméabilités dans le plan principal. Comme mentionné dans l'introduction, nous avons choisi des modèles nécessitant des mesures des caractéristiques magnétiques dans les directions DL et DT. Plus précisément, nous avons choisi des modèles de type elliptique, qui seront décrits en détail ici. L'implémentation de modèles anisotropes complexes non-linéaires reste encore à ce jour. La principale difficulté résidant dans la convergence du solveur non-linéaire.

Le tenseur de perméabilité μ peut être vu comme une variation de norme entre H et B multipliée par une variation d'orientation. Dans le contexte particulier de nos modèles, la relation entre les angles de nos champs est donnée par :

$$\tan \beta = \frac{\mu_{DT}(H)}{\mu_{DL}(H)} \tan \theta \quad (1)$$

μ_{DL} et μ_{DT} représentant les caractéristiques mesurées le long des deux directions principales et θ et β les angles respectifs de \mathbf{H} et \mathbf{B} par rapport à la DL. De plus, comme illustré dans [6], μ est exprimé sous la forme d'un tenseur diagonal :

$$\mu = \mu_{scal} \begin{pmatrix} \frac{\cos \beta}{\cos \theta} & 0 \\ 0 & \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

avec μ_{scal} le facteur dépendant du modèle étudié.

B. Les modèles

Les illustrations de la Figure 1 représentent l'évolution de l'induction B en fonction des champs appliqués le long de DL et DT (resp. H_x et H_y). Chaque modèle est défini ainsi :

— Modèle elliptique [1] :

$$\mu_{scal} = (\cos^2(\beta)/\mu_{DL}^2(H) + \sin^2(\beta)/\mu_{DT}^2(H))^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

— Modèle elliptique modifié [2] :

$$\mu_{scal} = (\cos^n(\beta)/\mu_{DL}^n(H) + \sin^n(\beta)/\mu_{DT}^n(H))^{-\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

avec $n = 1,4$ comme proposé dans [2].

— Modélisation isotrope non-linéaire : considération de la caractéristique selon DL pour la tôle, soit $\mu = \mu_{DL}$.

— Modélisation anisotrope linéaire : approximations linéaires des caractéristiques selon les directions principales, avec $\mu_{DL} = 26\,281,2 \mu_0$ et $\mu_{DT} = 2159,5 \mu_0$.

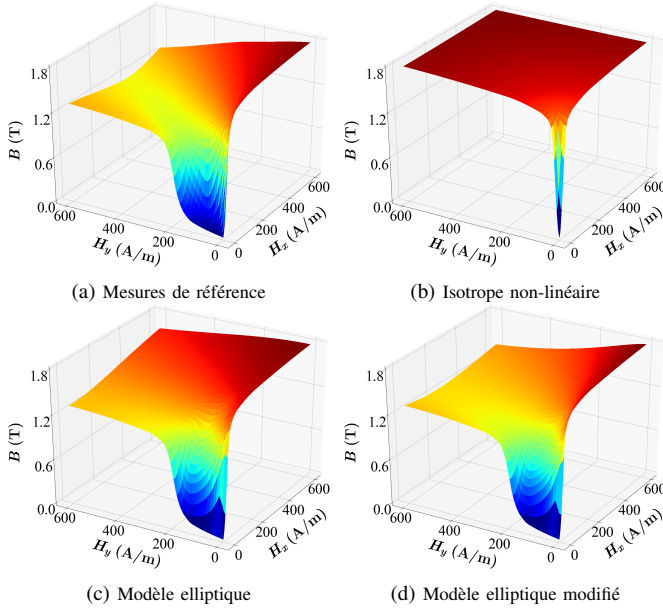


FIGURE 1. Niveau d'induction en fonction des composantes du champ.

III. MODÈLE DE PERTES ANISOTROPES D'APPINO

Pour le modèle de pertes fer d'Appino *et al.* [3], l'étude s'appuie sur des travaux antérieurs [4], réalisant pour un comportement linéaire la simulation des pertes dans un noyau toroïdal. Ce modèle sépare les pertes totales en trois composants : les pertes par hystérésis, les pertes classiques et les pertes excédentaires. Les pertes par hystérésis, représentant les pertes quasi-statiques par cycle de magnétisation, sont notamment calculées en utilisant le niveau de polarisation maximale \hat{J} et l'angle θ_a du champ appliqué \mathbf{H}_a . Pendant la simulation, les effets du champ démagnétisant \mathbf{H}_d résultant de l'anisotropie ont été soigneusement pris en compte. La simulation numérique fournit la distribution du champ résultant \mathbf{H} , de telle sorte que $\mathbf{H} = \mathbf{H}_a + \mathbf{H}_d$.

IV. RÉSULTATS

Les simulations 3D des pertes via la formulation \mathbf{A} ont été réalisées sur une période à 50 Hz, avec un courant d'excitation de 22,5 mA traversant deux bobines de 88 spires, chacune positionnée sur une section droite du transformateur. Ce dernier se compose de quatre tôles disposées en deux couches, similaire à celles d'un cadre Epstein, empilées de telle sorte que la tôle supérieure dans le coin du cadre ait un grain orienté horizontalement, tandis que celle inférieure est orientée verticalement. Le niveau d'induction maximal n'excède pas 1,5 T, correspondant à un champ résultant inférieur à 550 A/m. Les résultats dans la Table I et la Figure 2 montrent des variations significatives dans les pertes fer totales et locales entre les modèles. Une meilleure prise en compte de l'anisotropie, comme avec le modèle elliptique modifié, plus proche des mesures, entraîne une diminution des pertes totales, avec une forme de perte très différente de celle de la modélisation isotrope. Notons que la modélisation linéaire est pertinente ici, car l'on reste globalement en deçà du point de saturation.

TABLE I – PERTES MASSIQUES CALCULÉES POUR DIFFÉRENTS MODÈLES.

Modèles	Iso. non-lin.	Aniso. lin.	Ell.	Ell. mod.
Pertes totales (W/kg)	0,1562	0,1169	0,1259	0,1119
Pertes max. (W/kg)	1,0597	0,8624	0,4511	0,4027

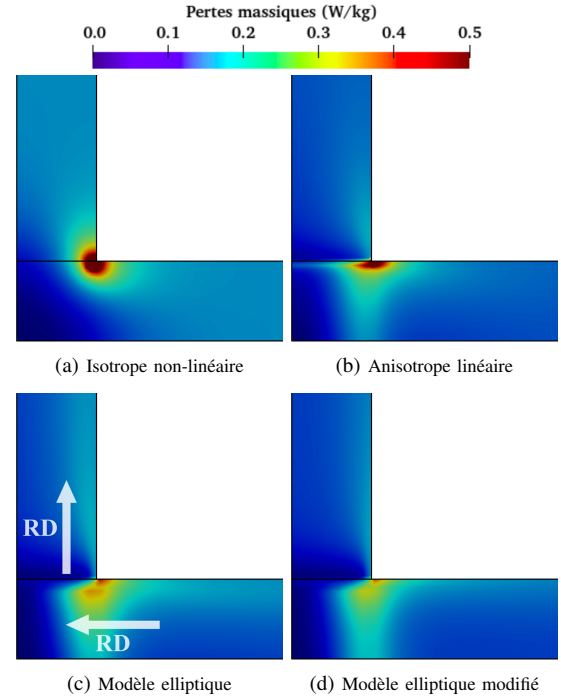


FIGURE 2. Pertes fer spécifiques (W/kg) des tôles supérieures par modèle.

V. CONCLUSION

Cette étude met en évidence l'importance de considérer l'anisotropie dans le calcul des pertes fer, en se basant sur le cas pratique de la modélisation d'un transformateur. Plus précisément, il est observé que la modélisation isotrope non-linéaire fournit peu d'informations pertinentes dans la prédiction des pertes par rapport à d'autres modèles qui intègrent l'anisotropie, même de manière relativement simple. Notre prochaine étape consistera à explorer des modèles plus fidèles à la physique des matériaux, nécessitant alors le renforcement de la robustesse du solveur non-linéaire.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Di Napoli and R. Paggi, "A model of anisotropic grain-oriented steel," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 19, no. 4, pp. 1557–1561, 1983.
- [2] O. Bíró *et al.*, "A modified elliptic model of anisotropy in nonlinear magnetic materials," *COMPEL*, vol. 29, no. 6, pp. 1482–1492, 2010.
- [3] C. Appino *et al.*, "Static and dynamic energy losses along different directions in GO steel sheets," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 500, p. 166281, 2020.
- [4] L. A. Millan Mirabal *et al.*, "Iron loss modeling of grain-oriented electrical steels in fem simulation environment," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 2, pp. 1–5, 2022.
- [5] N. Hihat *et al.*, "Normal permeability of grain non-oriented, grain oriented and amorphous electrical steel sheets," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 46, no. 2, pp. 349–354, 2014.
- [6] D. Huttenloher, H. Lorenzen, and R. Nuscheler, "Investigation of the importance of the anisotropy of cold-rolled electrical steel sheet," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 20, no. 5, pp. 1968–1970, 1984.