HAL
open science

Modèle phénoménologique du champ d'induction B en fonction du champ d'excitation H dans une matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques

Ziyin Xiang, Bhaawan Gupta, Minh-Quyen Le, Gildas Coativy, Benjamin Ducharne

To cite this version:

Ziyin Xiang, Bhaawan Gupta, Minh-Quyen Le, Gildas Coativy, Benjamin Ducharne. Modèle phénoménologique du champ d'induction B en fonction du champ d'excitation H dans une matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques. 3ème SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2018), Jul 2018, Nancy, France. hal-01834785

HAL Id: hal-01834785

https://hal.science/hal-01834785v1

Submitted on 11 Jul 2018

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.

Modèle phénoménologique du champ d'induction B en fonction du champ d'excitation H dans une matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques

Ziyin Xiang[1], Bhaawan Gupta[1,2], Minh Quyen Le[1], Gildas Coativy[1], Benjamin Ducharne[1]
[1]Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France
[2]ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University,
International Joint Unit, Tohoku University, Sendai, JAPAN

RESUME – A partir de résultats expérimentaux complétés par de la modélisation du type éléments finis, un modèle à constantes localisées magnétiques d'une matrice polymère remplie de particules magnétiques est proposé dans cet article. En raison de la nature intrinsèquement diélectrique du polymère et tant que le seuil de percolation n'est pas atteint, même pour un pourcentage élevé de particules l'échantillon testé montre une grande résistivité. Cette propriété implique une limitation importante du développement de courants de Foucault dits « macroscopiques ». Tenant compte de cette caractéristique, le modèle proposé est limité aux courants de Foucault microscopiques (principalement liés aux mouvements des parois des domaines magnétiques). Cette approche est validée par des comparaisons simulations/mesures sur une large bande de fréquence de l'excitation.

Mots-clés — Matrice polymère magnétique, hystérésis magnétique, dépendance en fréquence.

1. INTRODUCTION

L'utilisation de l'impression 3D comme un outil de fabrication rapide est une technique très prometteuse qui permet d'envisager des pièces avec des géométries complexes à partir de la conception assistée par ordinateur. En raison des mauvaises propriétés mécaniques ainsi que d'un nombre d'applications relativement limité, l'impression de pièces polymères pures est restée marginale au sein des entreprises. L'avènement de l'impression 3D dans le milieu industriel ne se fera qu'en fonction du développement rapide de composites polymères imprimables de hautes performances. Les composites imprimables constitués d'une matrice polymère remplie de particules magnétiques, également appelée matériaux magnétiques composites présentent de gros intérêts car ils peuvent fournir une solution pour de nombreuses applications industrielles: détection des dommages ou auto-guérison [1], soudage thermoplastique par induction [2], noyaux magnétiques pour inductances ou transformateurs électriques [3]. Selon l'application ciblée, l'accent peut être mis sur la capacité à conduire le flux magnétique (inductance électrique) ou sur la distribution locale des pertes par hystérésis magnétique (pertes Joules) qui se traduisent par des variations localisées de la température (soudage thermoplastique).

Dans les matériaux ferromagnétiques, les pertes magnétiques qui réunissent les pertes par hystérésis ainsi que les pertes par courant de Foucault apparaissent dès qu'un échantillon testé est exposé à un champ d'excitation magnétique H variable dans le temps. Ces pertes magnétiques ont deux origines:

- Les courants de Foucault dits « microscopiques », dont l'origine provient des interactions entre les parois des domaines magnétiques et la microstructure lors de la magnétisation de l'échantillon.
- Les courants de Foucault dits « macroscopiques » liés à l'équation de diffusion du champ magnétique et fortement dépendant des propriétés physiques du matériau (conductivité et perméabilité).

Chacune de ces contributions présente une dépendance en fréquence, en revanche ces dépendance ne sont pas les mêmes. A une tout autre échelle, il est légitime de supposer que lorsqu'une matrice polymère est remplie d'un pourcentage important de particules ferromagnétiques, les propriétés des matériaux ferromagnétiques continuent d'exister.

2. MODELISATION

Dans l'étude que nous présentons ici, les noyaux magnétiques caractérisés ont été imprimés à partir du composite PLA « Rustable Magnetic Iron » de proto-Pasta (diamètre 1,75 mm). Ce composite consiste en une matrice polymère d'acide polylactique (PLA) et une phase particulaire de 25% en poids de fer. Le pourcentage de particules est suffisamment faible pour éviter le seuil de percolation. Si nous supposons que la distribution des particules est homogène, alors chaque particule est isolée électriquement (cette propriété sera confirmée par l'étude microscopique présentée dans la version élargie de l'article). Cette isolation électrique empêche l'apparition de courants de Foucault macroscopiques et, par conséquence, les pertes ferromagnétiques sont limitées aux mouvements des parois de domaine à l'origine des courants de Foucault microscopiques. Dans [4]-[6], une formulation simple est proposée pour tenir compte des pertes joules, de l'évolution du champ d'induction B, en fonction du champ d'excitation H dans un matériau ferromagnétique lorsque la conductivité électrique du matériau est faible et que la contribution dynamique est

principalement basée sur des courants de Foucault microscopiques:

$$\rho.\frac{dB(t)}{dt} = H_{dyn}(t) - f^{-1}_{static}(B(t)) \qquad (1)$$

Dans cette équation $f^{1}_{static}(B(t))$ représente une contribution quasi-statique hystérétique qui, dans un matériau ferromagnétique, peut être modélisée par les modèles scalaires classiques de l'hystérésis magnétique de Preisach [7] ou de Jiles-Atherton [8]. $\rho.dB/dt$ est la contribution dynamique (pertes dynamiques) associée aux courants de Foucault microscopiques, et ρ, une constante qui dépend de la géométrie et de la nature du matériau. Dans le cas du composite polymère considéré dans cette étude, cette formulation est encore valable, mais le pourcentage élevé de polymère non ferromagnétique dans le composite limite fortement le niveau d'induction. Un comportement non linéaire (saturation) sous un champ magnétique raisonnable pour ce type de matériel est tout simplement inconcevable. Du coup f^{1}_{static} peut être remplacé par une fonction linéaire $\mu_0.\mu_r$ ou μ_r s'interprète comme la perméabilité relative du composite polymère.

3. Caracterisation

Un banc de caractérisation (figure 1) a été développé pour la mesure des propriétés magnétiques des composites polymères. Un électro-aimant de laboratoire est utilisé pour la création du champ magnétique d'excitation. Un tesla mètre du type model 5080 de chez F.W. Bell permet la mesure de ce champ d'excitation. Deux cylindres de diamètre 20 mm et de longueur 10 mm enlacés respectivement d'une bobine de 200 spires seront caractérisés. Le premier cylindre est imprimé à partir du composite magnétique, le deuxième est imprimé à partir d'un PLA pure, il nous servira de référence et nous permettra de corriger la dérive de l'intégration nécessaire au calcul du champ magnétique B à travers l'échantillon. Un oscilloscope Agilent DSO1014A est utilisé pour l'acquisition et la sauvegarde des signaux.

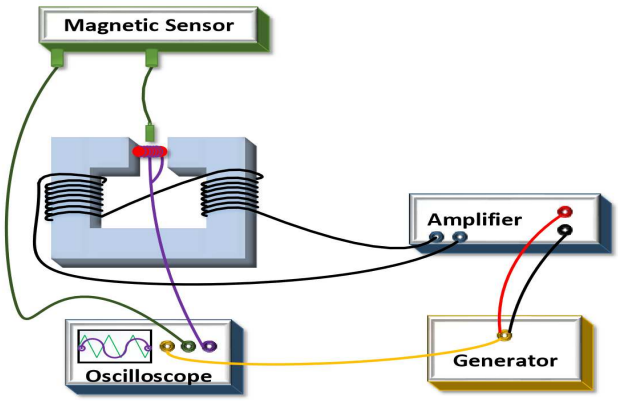

Fig. 1. Banc de mesure pour la caractérisation des composites polymères

En parallèle ce banc de caractérisation de la simulation par éléments finis a été développé. L'objectif de cette modélisation est de déterminer l'évolution de la perméabilité moyenne du composite polymère en fonction du pourcentage de particule, de la taille des particules, de leurs natures et de leurs formes. La figure n°2 présente comme premier résultat de simulation la distribution du champ magnétique pour un composite chargé de façon homogène par 25 % de poudre de fer. Pour cette simulation *H* vaut 2000 A/m. Cette modélisation sera utilisée plus tard pour déterminer la perméabilité relative nécessaire à la résolution de l'équation 1.

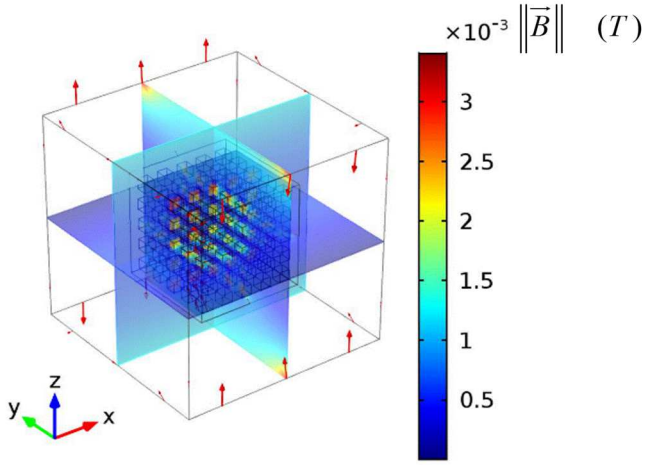

Fig. 2. Distribution du champ d'Induction à travers le polymer magnétique.

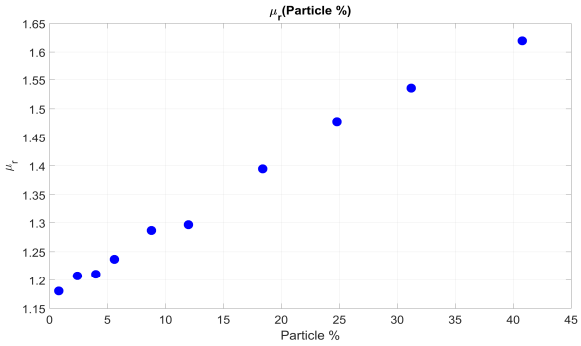

Fig. 3. Evolution de la perméabilité relative en fonction du pourcentage de particule.

Figure 3 présente les résultats de simulation de l'évolution de la perméabilité relative en fonction du pourcentage de particule.

4. Conclusion

Dans cet article des outils de caractérisation et de modélisation d'un composite magnétique imprimable par impression 3D sont proposés. Dans la version élargie de l'article, la configuration expérimentale sera beaucoup plus détaillée. Un grand nombre de simulations de comparaison/résultats expérimentaux sera montré et l'influence de la taille, la forme et la distribution de la particule seront étudiées intensivement.

5. References

[1] A.S. Ahmed, R.V. Ramanujan, "Magnetic field triggered multicycle damage sensing and self-healing", Scientific Reports, 2015.

[2] T. Bayerl, M. Duhovic, P. Mitschang, D. Bhattacharyya, "The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review", Composites: Part A, vol. 57, pp. 27-40, 2014.

[3] L.M. Bollig, P.J. Hilpisch, G.S. Mowry, B.B. Nelson, Cheeseman, "3D printed magnetic polymer composite transformers", J. of Mag. and Mag. Mat, vol. 442, pp. 97-101, 2017.

[4] M. A. Raulet, B. Ducharne, J.P. Masson, and G. Bayada, "The magnetic field diffusion equation including dynamic hysteresis: a linear formulation of the problem", IEEE Trans. on Mag., vol. 40, n° 2, pp. 872 – 875, 2004.

[5] B. Gupta, B. Ducharne, G. Sebald and T. Uchimoto, "Magnetic lump model for the hysteresis frequency dependence of a polymer matrix", proceeding of the 21st international conference on the Computation of Electromagnetic Fields COMPUMAG, 2017.

[6] B. Ducharne, G. Sebald, D. Guyomar, G. Litak, "Dynamics of magnetic field penetration into soft ferromagnets", Journal of Applied Physics, pp. 243907, 2015.

[7] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung". Zeitschrift für Physik, 94: 277-302, 1935.

[8] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis". J. App. Pjys. 55, pp. 2115, 1984.