

Chauffage par induction basse fréquence de composites magnétiques : application médicale

Ziyin XIANG, Benjamin DUCHARNE, Minh-Quyen LE, Pierre-Jean COTTINET, Jean-Fabien CAPSAL

Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon, Villeurbanne, France.

RESUME – Dans cette étude nous nous concentrons sur le chauffage par induction basse-fréquence (LFIH) d'un polymère thermo-plastique (acrylonitrile butadiène styrène, ABS) amélioré à l'aide de particules d'oxyde de fer. L'effet LFIH apparaît dès lors que l'échantillon est exposé à un champ magnétique alternatif et est principalement dû aux courants de Foucault dits « microscopiques » liés aux mouvements des parois des domaines magnétiques. Afin de générer un champ magnétique alternatif d'amplitude significative, un banc de caractérisation spécifique a été mis au point à l'aide d'une motrice électrique grande vitesse et d'aimants permanents. Un modèle de l'hystérésis magnétique associé à la simulation des transferts thermiques dans le composite par éléments finis vérifient la faisabilité d'accroître fortement la température du composite magnétique à l'aide du LFIH. Une comparaison avec un composite amélioré de particules non ferromagnétiques mais conductrices présentant une très faible réponse permet de valider l'origine des pertes et la cause de la source de chaleur à travers notre composite magnétique. Ces premiers résultats semblent très prometteurs, ils permettent d'envisager l'utilisation de ce type de matériaux et de chauffage par induction dans des applications médicales telles que le traitement des varices. Finalement, les basses fréquences utilisées ne permettent que le chauffage unique du composite et non des tissus environnants.

Mots-clés—Composite magnétique, hystérésis magnétique, dépendance en fréquence, chauffage par induction, applications médicales.

1. INTRODUCTION

Les composites magnétiques fabriqués à partir de particules magnétiques noyées dans une matrice de polymère représentent un grand intérêt scientifique. En incorporant des particules, des fibres ou des nanomatériaux, il est possible de fabriquer des composites magnétiques qui peuvent être caractérisés par d'excellentes propriétés mécaniques et de fonctionnalités. En combinant des particules ferromagnétiques à une matrice polymère, il est possible d'améliorer simultanément les propriétés magnétiques et mécaniques. Parmi l'ensemble des applications basées autour des composites magnétiques, le chauffage par induction est actuellement un des sujets les plus étudiés et ceci dans de nombreux domaines, tels que les polymères auto-cicatrisants, la soudure thermique, l'hyperthermie magnétique [1]. Le LFIH qui ne concerne que les basses fréquences présente de nombreux avantages tels qu'une sélectivité importante de la zone traitée, une réponse rapide, un bon rendement. Le chauffage par induction des composites magnétiques peut présenter différentes origines, ceci est

fortement corrélé à la fréquence du champ d'excitation. Dans le cas du LFIH, les basses fréquences du champ d'excitation limitent le développement des courants de Foucault dits « macroscopiques » mais permettent une prolifération des courants de Foucault dits « microscopiques » associés aux mouvements des parois des domaines magnétiques [2][3].

L'objectif final de ces recherches est de développer des composites magnétiques pour des applications médicales, en particulier l'insuffisance veineuse superficielle [4][5]. L'idée de ce nouveau concept est d'introduire des composites magnétiques biocompatibles dans la veine à traiter et de les chauffer jusqu'aux températures requises par le traitement médical. Les pertes magnétiques hystériques étant dominantes, seules les particules seront activées ceci permettant l'échauffement local du composite et non des tissus environnants.

2. ELABORATION DES COMPOSITES

L'objectif final de ces recherches étant lié au domaine du médical, le composite renforcé doit être biocompatible. Pour fabriquer nos composites, des granulés d'ABS sont dissous vigoureusement dans de l'acétone à température ambiante pendant deux heures. Des particules sphériques de diamètre 5 μm , d'oxyde de fer Fe_3O_4 sont ajoutées, la solution résultante est remuée pendant une heure supplémentaire. Le pourcentage volumique de Fe_3O_4 varie entre 3% et 17%, ce qui est suffisamment faible pour éviter le seuil de percolation et maintenir une conductivité électrique macroscopique proche de celle de l'ABS. Pour améliorer la dispersion des particules de fer, la solution est traitée par ultrasons. La solution est ensuite précipitée à l'éthanol pour la figer et éviter les problèmes de sédimentation. Le mélange est ensuite placé dans un four afin d'éliminer le solvant puis pressée à 220 °C sous une pression de 1300 Psi pour obtenir un bloc compact.

3. MODELISATION DU COMPORTEMENT MAGNETIQUE

D'après la littérature, les particules d'oxyde de fer de diamètre supérieur à 15 nm présentent un comportement ferromagnétique. Dans notre cas les particules utilisées présentent un diamètre bien supérieur de l'ordre de 5 μm . Un tel diamètre permet de prétendre sans hésitation que les particules sont constituées d'un très grand nombre de domaines magnétiques et d'assimiler leurs comportements à celui d'un matériau beaucoup plus massif tel que celui d'une ferrite. Les ferrites sont des matériaux céramiques produits en mélangeant de grosses proportions d'oxyde de fer à du barium, du manganèse, du nickel ou du zinc. Leur conductivité naturelle très faible, limite l'apparition des courants de Foucault

macroscopiques et en fait de bons candidats pour des applications hautes fréquences. La conductivité macroscopique de nos composites magnétiques étant également relativement faible nous pouvons comme pour les ferrites envisager un développement de courant de Foucault macroscopique très limité. L'absence de courant de Foucault macroscopique implique une distribution homogène du champ d'excitation magnétique à travers le composite magnétique en revanche elle n'exclut pas de dépendance en fréquence du comportement magnétique. Dans cette étude, nous avons opté pour l'équation suivante pour la modélisation du comportement magnétique :

$$\rho \cdot \frac{dB(t)}{dt} = H_{surf}(t) - f_{quasi-static}^{-1}(B(t)) \quad (1)$$

Ici, ρ est la constante de dissipation qui dépend de la nature et de la géométrie, H_{surf} est le champ de surface et $f^{-1}(B(t))$ une contribution hystérétique quasi-statique. Cette équation a été utilisée avec succès plusieurs fois dans le passé pour la modélisation du comportement magnétique de matériaux ferromagnétiques caractérisés par des conductivités macroscopiques faibles [6]-[9]. La figure 1 ci-dessous donne une illustration de la contribution quasi-statique (cycle d'hystérésis basse fréquence) utilisée pour la modélisation de nos composites magnétiques.

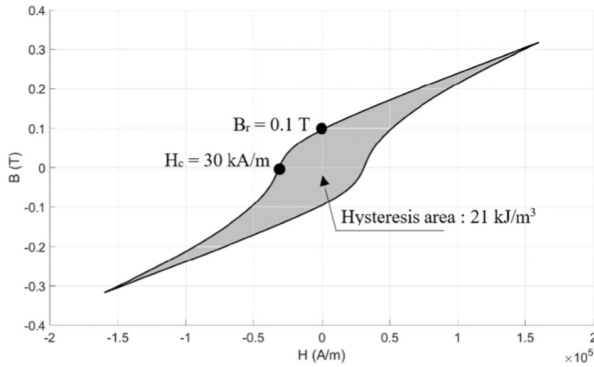


Fig. 1 – Cycle B(H) quasi-statique des particules d'oxyde de Fer.

Dans la version étendue de cet article, cette modélisation du comportement magnétique sera couplée à une modélisation transfert thermique par éléments finis qui permet de prévoir l'évolution de la température du composite magnétique sous influence du champ magnétique alternatif.

4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Pour valider le LFIH de façon expérimentale, un banc spécifique de caractérisation a été développé (figure 2). Pour générer un champ magnétique suffisant, un inducteur de 70 mm de diamètre est fixé sur l'arbre d'un moteur à courant continu haute vitesse. L'inducteur est constitué de 8 aimants positionnés alternativement nord/sud. Notre système dans sa version optimisée permet de générer un champ magnétique de 160 kA/m à une fréquence de 2300 Hz.

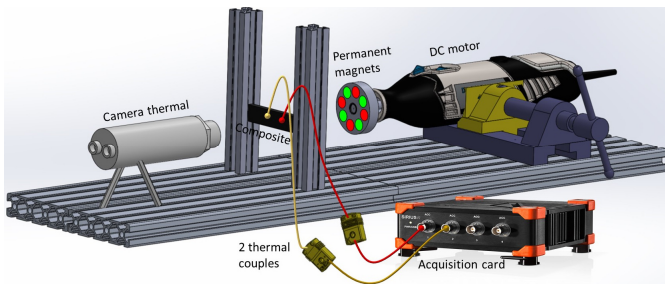


Fig. 2 – Dispositif expérimental

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La figure 3 ci-dessous présente comme première illustration, l'évolution temporelle mesurée et simulée de la température au centre (zone libre du champ magnétique) et à la périphérie (zone sous influence) du composite magnétique.

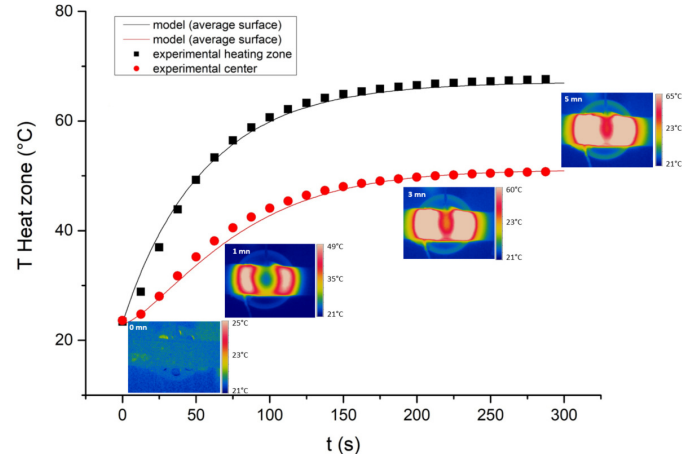


Fig. 3 – Dispositif expérimental

6. CONCLUSIONS

Dans la version étendue de cet article, nous détaillerons la méthode, le banc de caractérisation ainsi que l'outil de modélisation développé dans cette étude. Le traitement thermique des varices impose une température locale d'approximativement 120°C. Les premiers résultats expérimentaux démontrent que de tels niveaux de température peuvent être atteints, des progrès restent toutefois à fournir pour améliorer les constantes de temps.

7. REFERENCES

- [1] B. J. Knauf, D. P. Webb, C. Liu, et P. P. Conway, « Low frequency induction heating for the sealing of plastic microfluidic systems », *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 9, n° 2-3, p. 243-252, 2010.
- [2] Z. Xiang, B. Ducharme, N.D. Schiava, J.F. Capsal, P.J. Cottinet, G. Coativy, P. Lermusiaux, M.Q. Le, « Induction Heating-based Low-Frequency Alternating Magnetic Field: High Potential of Ferromagnetic Composites for Medical Applications », *Mat. & Des.*, vol. 174, 107804, 2019.
- [3] Z. Xiang, B. Gupta, M.Q. Le, P.J. Cottinet, B. Ducharme, « Hysteresis model of 3D printed magnetic particles based polymer composite materials », *IEEE Trans. on Mag.*, 2018 IEEE int. Mag. Conf. (INTERMAG), Singapore.
- [4] T. G. Poder, J. F. Fisette, S. K. Bédard, et M. A. Despatis, « Is radiofrequency ablation of varicose veins a valuable option? A systematic review of the literature with a cost analysis », *Canadian Journal of Surgery*, vol. 61, n° 2, p. 128-138, 2018.
- [5] J.-J. Liu, F. L.-H., X. D.-C., L. X., D. Z.-H., et F. W.-G., « The endovenous laser treatment for patients with varicose veins », *Pakistan Journal of Medical Sciences*, vol. 32, n° 1, p. 55-58, 2016.
- [6] M. A. Raulet, B. Ducharme, J. P. Masson, et G. Bayada, « The magnetic field diffusion equation including dynamic hysteresis: A linear formulation of the problem », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, n° 2 II, p. 872-875, 2004.
- [7] B. Ducharme, M. Q. Le, G. Sebald, P. J. Cottinet, D. Guyomar, et Y. Hebrard, « Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise », *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 432, p. 231-238, juin 2017.
- [8] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, et T. Uchimoto, « Preisach's Model Extended With Dynamic Fractional Derivative Contribution », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, n° 3, p. 1-4, mars 2018.
- [9] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sébald, et T. Uchimoto, « Dynamic Magnetic Scalar Hysteresis Lump Model Based on Jiles-Atherton Quasi-Static Hysteresis Model Extended With Dynamic Fractional Derivative Contribution », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, n° 11, p. 1-5, nov. 2018.