



**HAL**  
open science

# Modélisation phénoménologique de l'évolution du champ d'induction moyen $B$ sous contrainte de champ externe $H$ dans un composite magnétique: matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques.

Ziyin Xiang, Minh-Quyen Le, Benjamin Ducharne

## ► To cite this version:

Ziyin Xiang, Minh-Quyen Le, Benjamin Ducharne. Modélisation phénoménologique de l'évolution du champ d'induction moyen  $B$  sous contrainte de champ externe  $H$  dans un composite magnétique: matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques.. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02983331

**HAL Id: hal-02983331**

**<https://hal.science/hal-02983331>**

Submitted on 29 Oct 2020

**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.

# Modélisation phénoménologique de l'évolution du champ d'induction moyen $B$ sous contrainte de champ externe $H$ dans un composite magnétique: matrice polymère chargée de particules ferromagnétiques.

Ziyin Xiang, Minh Quyen Le, Benjamin Ducharne

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon  
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

**RESUME** – A partir de résultats expérimentaux associés à 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'impression 3D, également appelée fabrication additive (FA), prototypage rapide (PR) ou forme libre solide (FLS), est un processus d'assemblage de matériaux qui permet de fabriquer des objets à partir de modèles 3D, généralement couche par couche, qui a été décrit pour la première fois en 1986 par Charles Hull [1]. Cette technologie permet de créer des objets d'une exactitude géométrique très satisfaisante tout en réduisant le gaspillage de matière.

Les matériaux polymères thermoplastiques tels que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) [2], l'acide poly lactique (PLA) [3], le poly amide (PA) [4] et le poly carbonate (PC) [5] ainsi que les matériaux polymères thermodurcissables comme les résines époxydes peuvent être utilisés pour l'impression 3D. Les résines époxydes sont des matériaux réactifs nécessitant une polymérisation thermique ou assistée par UV pour activer le processus de polymérisation, ils présentent initialement une faible viscosité, qui va s'élever au fur et à mesure du processus de polymérisation [6]. Ces résines époxydes conviennent parfaitement aux procédés d'impression assistés par UV. En fonction du type de matériau, l'impression de polymères 3D présente un gros potentiel dans le domaine de l'industrie

aérospatiale pour créer des structures complexes mais légères [7], celui de l'industrie architecturale pour les modèles structurels [8], celui de l'art pour la création de répliques éducatives [9], et dans le domaine médical pour l'impression de tissus (matériaux biocompatibles, cellules, etc.) et d'organes [10].

Cependant, à l'heure actuelle, la plupart des pièces imprimées 3D sont utilisées comme prototypes conceptuels plutôt que comme composants fonctionnels. Il semble que les polymères purs utilisés pour l'impression 3D manquent de flexibilité et de fonctionnalité par comparaison aux composites conventionnels (pièces porte-charges ...). De tels inconvénients restreignent le nombre d'applications industrielles potentielles pour les polymères imprimés 3D.

L'impression 3D de composites polymères semble la solution, en effet en combinant une matrice polymère à des particules actives, on peut obtenir des matériaux avec des propriétés structurelles et fonctionnelles inaccessibles à l'origine [11]. L'incorporation de particules, de fibres ou de nanomatériaux dans une matrice polymère permet la fabrication de composites qui peuvent présenter des performances mécaniques exceptionnelles ou des fonctionnalités particulières [12].

Le renfort en particules a d'abord été proposé pour l'amélioration des propriétés mécaniques: amélioration du module d'Young par ajout de perles de verre [13], de particules de fer ou de cuivre [14] ainsi qu'une meilleure résistance à l'usure en ajoutant de l'aluminium et de l'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [15]. Une amélioration des propriétés diélectriques a été proposée par l'ajout de particules de céramique [16] ou de tungstène [17]. Un des gros intérêts du développement de l'impression 3D de composites renforcés en particules consiste en la capacité d'imprimer des composants structuraux pour des applications réelles potentielles (composite dissipateur de chaleur ... [18]). L'ajout de particules magnétiques à une matrice polymère ouvre l'accès à un grand champ d'amélioration potentielle telles que: propriétés mécaniques, thermiques, diélectriques ...

- Amélioration des propriétés mécaniques

Dans [19], Kokkinis & al. développent une nouvelle plateforme d'impression 3D assistée magnétiquement. Le contrôle de l'orientation des particules est possible grâce à l'incorporation de plaquettes d'alumine magnétisables dans la matrice polymère (figure 1). Grâce à l'alignement des particules anisotropes, on peut améliorer des propriétés cibles des pièces composites imprimées dans des directions privilégiées. De la même façon, des particules d'alumine magnétisables pourraient être mélangées à de la résine sensible aux UV pour de l'impression lithographie stéréo (ILS) et alignées sous champs magnétique pendant le processus d'impression [20].

- Amélioration des propriétés magnétiques

Dans [21], la possibilité d'utiliser l'impression 3D pour imprimer un noyau de transformateur électrique est explorée. Via la fabrication additive, des géométries idéales de noyau de transformateur peuvent être obtenues, ceci doit permettre de créer des transformateurs électriques et des inductances aux rendements optimisés.

- Utilisation comme capteur de fatigue, ou pour des matériaux auto-cicatrisants

Les matériaux composites polymères magnétiques conviennent également parfaitement à la détection de déformations et/ou de dommages [22]. Ils peuvent être utilisés pour de l'auto-guérison (« self-healing ») ou pour du revêtement (guides biocompatibles ...). Des travaux antérieurs ont démontré qu'en raison de la grande souplesse dans le choix de la matrice polymère ainsi que dans celui des particules magnétiques, des composites bien adaptés pour l'auto-cicatrisation peuvent être imprimés. Ces composites sont adaptés pour l'actionnement sans contact à distance, ils présentent en général de fort taux d'actionnement et de déformation, et des réponses rapides peuvent être obtenues [23]. Les particules magnétiques peuvent être utilisées pour déclencher la guérison en chauffant localement le composite grâce à un champ magnétique alternatif externe [24]. La matrice thermoplastique peut supporter de multiples cycles de détection, de déformation et d'auto-guérison à travers un mécanisme de mémoire de forme. Les particules magnétiques peuvent déclencher l'actionnement, l'auto-guérison ou la détection de dommages de façon répétée et pour un grand nombre de cycles. L'application d'un stimulus de température externe déclenche la propriété de mémoire de forme, entraînant la guérison [25]. L'élévation de température qui en résulte déclenche la récupération des agrégats originaux, permettant des réparations répétées sur plusieurs cycles [26].

- Soudure thermoplastique

Le soudage par induction pour les polymères thermoplastiques rassemble l'ensemble des assemblages composites – composites [27] ainsi que les soudures hybrides composites – métal [28]. Le soudage de composites polymères a depuis longtemps suscité des intérêts de recherche, comme en témoignent les nombreuses publications sur le sujet [29]. Le soudage de composite polymère se caractérise par le chauffage des pièces d'assemblage au-delà des températures de fusion et leur mise en contact. La liaison est refroidie sous pression jusqu'à ce que les polymères se reconstituent. Le soudage par induction dit « assisté » utilise un « SUSCPTEUR » qui, dans le meilleur des cas, est placé directement dans la zone de liaison. Dans le cas de la soudure de structures hybrides métal – polymère, la partie métallique peut jouer ce rôle de « SUSCPTEUR » [30]. Les autres paramètres de soudage sont la puissance du générateur, le temps de soudure, la pression de soudure et le temps de refroidissement. Les fréquences

classiques pour le champ magnétique appliqué sont comprises entre 200 et 1000 kHz [31].

Finalement, l'impression 3D de polymères remplis de particules magnétiques permet l'ouverture sur un grand champ d'amélioration d'applications industrielles. En fonction de l'objectif, l'accent peut être mis sur la capacité à conduire le flux magnétique (noyaux de transformateur électrique, inducteurs) [21], la distribution locale des pertes joules, corrélée aux variations localisées de température (soudage thermoplastique, auto-guérison) [29]. Jusqu'à présent, l'effort scientifique pour améliorer les propriétés magnétiques des polymères composites a été très limité. Chez les matériaux magnétiques massifs ou en couches minces, il est bien connu que les propriétés magnétiques varient radicalement selon la nature, les traitements mécaniques et thermiques [32]. Cependant, la magnétisation semble subir des lois différentes dans les composites polymères, la compréhension de ces processus d'aimantation est donc obligatoire. Dans cet article, un modèle à constante localisée est proposé pour déterminer l'évolution du champ d'induction magnétique moyen  $B$  par rapport au champ d'excitation externe  $H$  à travers une large gamme de fréquences. Une bonne prise en compte numérique du processus d'aimantation au sein du composite magnétique doit conduire à des propositions de solutions pour l'amélioration des propriétés magnétiques de ces matériaux.

## 2. MODELISATION

Dans les matériaux ferromagnétiques, les pertes magnétiques apparaissent dès que l'échantillon testé est soumis à un champ d'excitation magnétique variable dans le temps. Ces pertes magnétiques ont deux origines:

- Les courants de Foucault dits «microscopiques» qui proviennent des interactions entre les parois des domaines magnétiques et la microstructure lors du processus d'aimantation [33].
- Les courants de Foucault dits «macroscopiques» liés à l'équation de diffusion [34] du champ magnétique et qui dépendent fortement des propriétés physiques du matériau (conductivité et perméabilité).

La dépendance en fréquence de ces deux contributions est différente [35]. Il est légitime de supposer que dans une certaine mesure lorsqu'une matrice polymère remplie d'un pourcentage significatif de particules ferromagnétiques, les propriétés observables dans un matériau ferromagnétique continueront d'exister. Si le pourcentage de particules est suffisamment faible pour éviter le seuil de percolation et si la distribution des particules est homogène, chaque particule sera isolée électriquement (cette propriété peut être vérifiée grâce à une étude microscopique). Cette isolation électrique s'oppose à la formation de courants de Foucault macroscopiques et, par conséquent, les pertes ferromagnétiques sont limitées aux mouvements des parois de domaine eux même à l'origine des courants de Foucault microscopiques. Dans [36], une formulation simple est proposée pour considérer les pertes Joule 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:

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

Cette équation peut-être schématisée à partir de schema bloc suivant:

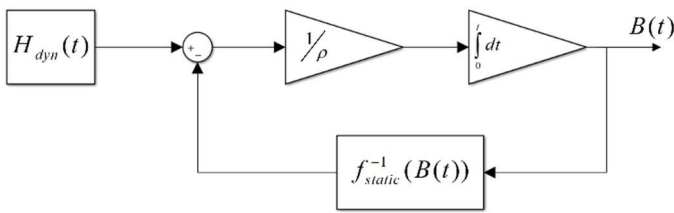


Fig. 1. Schéma bloc pour la résolution de l'équation n°1.

Ici,  $f^{-1}_{static}$  est la contribution quasi-statique de l'hystérésis qui, dans un matériau ferromagnétique, peut être calculée à partir des modèles classiques de Preisach [37] [38] ou de Jiles-Atherton [39].  $\rho \cdot dB/dt$  est la contribution dynamique (pertes dynamiques) et  $\rho$  une constante qui dépend de la géométrie et de la nature du matériau [40].

Dans le cas du composite polymère considéré dans cette étude, cette formulation est toujours valable, le pourcentage élevé de polymère non ferromagnétique dans le composite limite fortement le niveau d'induction. Un comportement non linéaire (saturation) sous excitation magnétique pour ce type de matériel est tout simplement inconcevable. En conséquence, la contribution quasi-statique  $f^{-1}_{static}$  peut simplement être remplacée par une fonction linéaire  $\mu_0 \cdot \mu_r$ . Une simulation du type éléments finis à l'aide du logiciel @Comsol peut être menée pour la détermination de la perméabilité relative  $\mu_r$ . La figure 2 ci-dessous donne une illustration de la distribution du champ magnétique à travers une matrice polymère remplie de façon homogène de particules cubiques de fer. La perméabilité relative en fonction de la fraction en pourcentage du volume des particules magnétiques est présentée figure 3. Comme prévu, la matrice polymère remplie d'un grand volume de particules magnétiques conduit à une densité accrue de la distribution du champ magnétique, entraînant l'augmentation de la perméabilité magnétique. Le pourcentage de fractions de volume des particules est limité à 40% afin d'éviter le seuil de percolation.

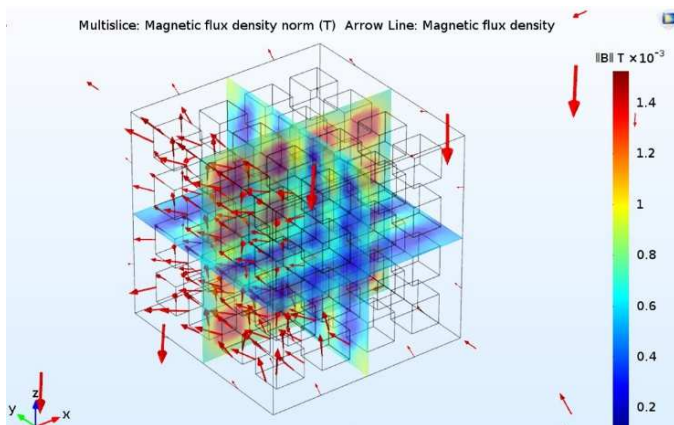


Fig. 2. Distribution du champ d'induction magnétique à travers le polymère rempli de particules magnétiques

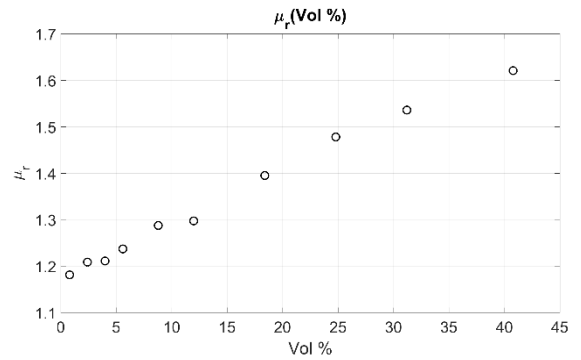


Fig. 3. Perméabilité relative en fonction de la fraction de volume de particules.

### 3. EXPERIMENTAL SETUP

les composites magnétiques imprimables 3D sont relativement nouveaux et, par conséquent, la littérature scientifique sur les propriétés magnétiques de ces composites est très limitée. La possibilité d'imprimer des objets avec des caractéristiques magnétiques améliorées et des propriétés structurelles présente de gros intérêts dans le milieu industriel. En fonction de l'application, l'attention repose principalement sur l'évolution du cycle d'hystérésis  $B(H)$ , les pertes par courant de Foucault (liées aux mouvements des parois des domaines magnétiques à travers le matériau), la perméabilité magnétique (capacité à conduire le champ magnétique), l'induction à saturation, les effets du vieillissement, ou l'uniformité des caractéristiques magnétiques [32].

Les seuls composites magnétiques 3D imprimables actuellement disponibles dans le commerce se composent généralement d'une matrice de polymère d'acide polylactique (PLA) et d'une phase particulaire de 10 vol% de fer. Malheureusement, les fiches techniques pour ce type de produit fournies par les fabricants ne donnent aucune information sur les propriétés magnétiques, ceci confirmant l'absence de données magnétiques pour ces composites imprimables 3D. Pour avoir accès à ces informations, dans cette étude, un dispositif expérimental dédié a été développé. La figure 4 donne un aperçu global du banc d'essai expérimental. Un électro-aimant, alimenté par un courant alternatif, est utilisé pour créer le champ d'excitation magnétique  $H$ . Ce champ magnétique est monitoré par un Tesla mètre (sonde effet Hall). Dans l'entrefer séparant les deux pôles de l'électro-aimant,  $H$  est supposé colinéaire et constant. Pour assurer une magnétisation homogène, les échantillons testés seront positionnés dans cet entrefer. La largeur de cet entrefer est fixée à 15mm. L'acquisition de données temps réel est mise en place via l'interface @LabVIEW, puis post-analysée grâce à @Matlab.

Pour le champ d'induction moyen  $B$  nécessaire au tracé du cycle d'hystérésis et pour la mesure de la perméabilité, une mesure en deux étapes est effectuée. Deux échantillons de même géométrie (15mm x Ø 3mm) sont imprimés à partir de polymères thermoplastiques du commerce pour le premier, et de composite magnétique PLA-rouillé (proto-pasta) pour le deuxième. Chaque échantillon est encerclé d'une bobine constituée d'un grand nombre de spires (200 spires) afin d'effectuer des mesures précises du champ magnétique d'induction. Il est bon de noter que les deux bobines sont similaires en termes de propriété géométrique ainsi qu'en termes de nombre de tours ceci permet d'assurer la reproductibilité des conditions expérimentales. Finalement, en soustrayant les résultats obtenus avec le composite magnétique à ceux obtenus avec le polymère pur, on effectue une correction naturelle des bruits de manipulation et des dérives. Le signal final nous donne

accès à l'induction magnétique exacte et, par conséquent, à la perméabilité relative précise du composite magnétique.

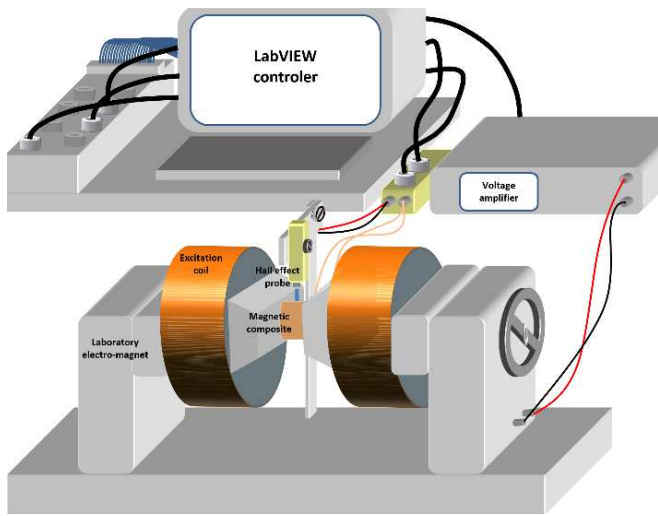


Fig. 4. Dispositif expérimental pour la caractérisation des composites magnétiques

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS - COMPARISON SIMULATIONS/MEASURES

La Fig. 5 donne une illustration des cycles dynamiques simulés et mesurés du composite magnétique commercial lorsque la fréquence (onde sinusoïdale) de l'excitation du champ de surface est comprise entre 100 Hz et 4 kHz et une amplitude de 10 kA/m. Comme on peut l'observer, la pente moyenne du cycle ne varie que très peu en fonction des fréquences choisies, confirmant que la perméabilité est assez constante et ne dépend que des propriétés intrinsèques du composite comme la fraction volumique de particules, la taille des particules et/ou leur nature, la distribution des particules, etc. Dans le cas de notre composite magnétique commercial dont la fraction volumique de particules de fer est 10%, la valeur de perméabilité moyenne observée tourne autour de 1,2, ce qui est en cohérence avec la simulation illustrée dans la figure 3.

Les résultats affichés Fig. 6 ont été obtenus à partir de ceux présentés Fig. 5. La Fig. 6 fournit une comparaison simulation/mesure pour l'évolution de l'aire du cycle d'hystérésis en fonction de la fréquence. Comme prévu, un excellent accord entre la théorie et l'expérience est obtenu. L'évolution de l'aire du cycle d'hystérésis est correctement modélisée pour des fréquences comprises entre 100 Hz et 4 KHz, ceci nous permet de valider le schéma de simulation et confirme que l'évolution de l'hystérésis dynamique dans les matériaux magnétiques présentant une conductivité macroscopique moyenne faible peut être modélisée correctement à partir d'un terme dynamique du premier ordre.

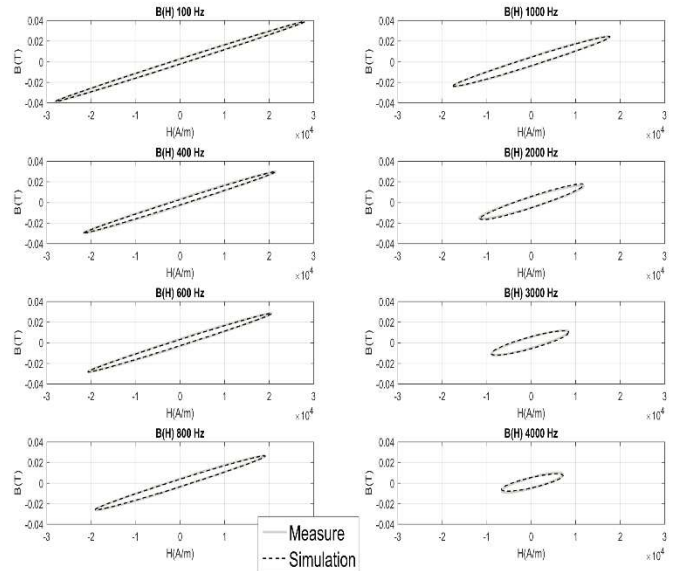


Fig. 5. Comparaison simulation/mesure pour les cycles d'hystérésis (de 100 Hz à 4 kHz).

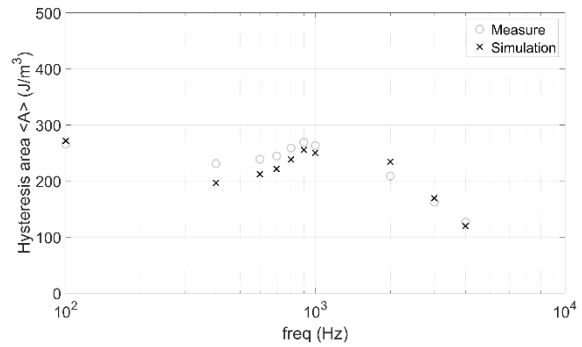


Fig. 6. Comparaison simulation/mesure, évolution de l'aire du cycle d'hystérésis en fonction de la fréquence.

#### 5. CONCLUSIONS

Cet article présente un schéma de modélisation mathématique des propriétés magnétiques d'une matrice polymère imprimable via impression 3D remplie de particules magnétiques. L'approche proposée est basée sur une considération linéaire du produit  $\mu_0 \mu_r$  pour la contribution quasi-statique (déterminée par simulation « éléments finis ») étendue aux effets dynamique à l'aide d'un terme du premier ordre simple (physiquement lié à l'apparition de courants de Foucault microscopiques) et vérifié avec succès de façon expérimentale. Une bonne cohérence entre les mesures et la simulation en termes de comportement dynamique a été obtenue, ce qui confirme la bonne précision du modèle développé ainsi que les propriétés magnétiques intéressantes du composite magnétique rempli de particules de fer. Il est bon de noter que l'air du cycle d'hystérésis, liée à la densité d'énergie, augmente fortement en fonction de la fréquence d'excitation, ce qui devrait permettre d'exploiter le composite magnétique dans des applications pratiques comme du chauffage par induction sous de l'excitation haute fréquence. Dans le but d'améliorer les propriétés intrinsèques des matériaux, les travaux futurs se concentreront sur une analyse plus poussée en testant différents paramètres tels que la fraction magnétique/polymère, la taille des particules et/ou la nature, l'homogénéité, etc. Pour ce faire,

la nature du composite ainsi que l'optimisation ou la modification des processus d'impression seront également étudiés.

## REFERENCES

- [1] C.W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereo lithography", Google Patents, 1986.
- [2] B. Tymrak, M. Kreiger, J. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions", *Mater. & Des.*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [3] P. Tran, T.D. Ngo, A. Ghazlan, D. Hui, "Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings", *Compos. Part B: Eng.*, vol. 108, pp. 210-223, 2017.
- [4] B. Caulfield, P. McHugh, S. Lohfeld, "Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 182 iss. 1-3, pp. 477-488, 2007.
- [5] CR. Garcia, J. Correa, D. Espalin, JH. Barton, RC. Rumpf, R. Wicker, V. Gonzalez, "3D printing of anisotropic metamaterials", *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 34, pp. 75-82, 2012.
- [6] H. Gu, C. Ma, J. Gu, J. Guo, X. Yan, J. Huang, Q. Zhang, Z. Guo, "An overview of multifunctional epoxy nanocomposites", *J. Mat. Chem. C*, iss. 25, 2016.
- [7] E. Kroll, D. Artzi, "Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models", *Rapid Prototyp., J.*, vol. 17 iss. 5, 2011.
- [8] KV. Wong, A. Hernandez, "A review of additive manufacturing", *ISRN Mech. Eng.*, 2012.
- [9] DB. Short, "Use of 3D printing by museums: educational exhibits, artifact education, and artifact restoration", *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 2 iss. 4, pp. 209-215, 2015.
- [10] SV. Murphy, A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs", *Nat. Biotechnol.*, vol. 32 iss. 8, pp. 773-785, 2014.
- [11] SK. Malhotra, K. Goda, MS. Sreekala, "Part One Introduction to Polymer Composites", *Polymer Composites*. 1st ed.1. Wiley-VCH, 2012.
- [12] SH. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67 iss. 5-8, pp. 1191-1203, 2013.
- [13] H. Chung, S. Das, "Processing and properties of glass bead particulate-filled functionally graded Nylon-11 composites produced by selective laser sintering", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 437 iss. 2, pp. 226-234, 2006.
- [14] M. Nikzad, S. Masood, I. Sbarski, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling", *Mater. & Des.*, vol. 32 iss. 6, pp. 3448-3456, 2011.
- [15] K. Boparai, R. Singh, H. Singh, "Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al-AI2O3 and ABS parts fabricated by fused deposition modelling", *Virtual. Phys. Prototyp.*, vol. 10 iss. 2, pp. 59-66, 2015.
- [16] D. Isakov, Q. Lei, F. Castles, C. Stevens, C. Grovenor, P. Grant, "3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features", *Mater. & Des.*, vol. 93, pp. 423-430, 2016.
- [17] M. Kurimoto, Y. Yamashita, H. Ozaki, T. Kato, T. Funabashi, Y. Suzuoki, "3D printing of conical insulating spacer using alumina/UV-cured-resin composite", *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, IEEE Conference on., 2015.
- [18] U. Kalsoom, A. Peristyy, P. Nesterenko, B. Paull, "A 3D printable diamond polymer composite: a novel material for fabrication of low cost thermally conducting devices", *RSC. Adv.*, vol. 6, pp. 38140-38147, 2016.
- [19] D. Kokkinis, M. Schaffner, AR. Studart, "Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials", *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015.
- [20] JJ. Martin, BE. Fiore, RM. Erb, "Designing bioinspired composite reinforcement architectures via 3D magnetic printing", *Nat. Commun.*, vol.6, 2015.
- [21] LM. Bollig, PJ. Hilpisch, GS. Mowry, BB. Nelson-Cheeseman, "3D printed magnetic polymer composite transformers", *J. of Mag. and Mag. Mat.*, vol. 442, pp. 97-101, 2017.
- [22] BCK. Tee, C. Wang, R. Allen, Z. Bao, "An electrically and mechanically self-healing composite with pressure- and flexionsensitive properties for electronic skin applications", *Nat. Nano.*, vol. 7, pp. 825-832, 2012.
- [23] VQ. Nguyen, AS. Ahmed, RV. Ramanujan, "Morphing Soft Magnetic Composites", *Adv. Mater.*, vol. 24, pp. 4041-4054, 2012.
- [24] CC. Corten, MW. Urban, "Repairing Polymers Using Oscillating Magnetic Field", *Adv. Mater.*, vol. 21, pp. 5011-5015, 2009.
- [25] BJ. Adzima, CJ. Kloxin, CN. Bowman, "Externally Triggered Healing of a Thermoreversible Covalent Network via Self Limited Hysteresis Heating", *Adv. Mater.*, vol. 22, pp. 2784-2787, 2010.
- [26] G. Li, D. Nettles, "Thermomechanical characterization of a shape memory polymer based self-repairing syntactic foam", *Polymer*, vol.51, pp. 755-762, 2010.
- [27] M. Wacker, L. Moser, AK. Schlarb, HR. Tradt, "Flexible 3D joining process for complex fibre composite components", *Join. Plast.*, vol. 2 iss. 4, pp. 266-271, 2008.
- [28] P. Mitschang, R. Velthuis, M. Didi, "Induction spot welding of metal CFRPC hybrid joints", *Adv. Eng. Mater.*, 2013.
- [29] VK. Stokes, "Joining methods for plastics and plastic composites: an overview", *Polym. Eng. Sci.*, vol. 29 iss. 19, pp. 1310-24, 1989.
- [30] S. Zinn, "Nontraditional applications for induction heating", *Heat. Treat. Progr.*, vol. 5 iss. 6, pp. 54-57, 2005.
- [31] R. Keller, E. Schmidbauer, "Magnetic properties and rotational hysteresis losses of oxidized 250 nm Fe3O4 particles", *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 162, pp. 85-90, 1996.
- [32] H. Shokrollahi, K. Janghorban, "Soft magnetic composite materials (SMCs)", *J. of Mat. Proc. Tech.*, vol. 189, pp. 1-12, 2007.
- [33] B. Ducharme, MQ. Le, G. Sebald, PJ. Cottinet, D. Guyomar, Y. Hebrard, "Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise", *J. of Mag. And Mag. Mat.*, pp. 231-238, 2017.
- [34] B. Ducharme, G. Sebald, D. Guyomar, G. Litak "Dynamics of magnetic field penetration into soft ferromagnets", *Journal of Applied Physics*, pp. 243907, 2015.
- [35] M. A. Raulet, B. Ducharme, 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 iss. 2, pp. 872-875, 2004.
- [36] B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "A space discretized ferromagnetic model for non-destructive eddy current evaluation", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 54 Iss. 3, 2018.
- [37] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Preisach's model extended with dynamic fractional derivation contribution", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 54 iss. 3, 2017.
- [38] Y. Bernard, H. Maalej, L. Lebrun, B. Ducharme, "Preisach modelling of ferroelectric behavior", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 25, Iss. 1-4, pp. 729-733, 2007.
- [39] Jiles D.C., Atherton D.L., "Theory of ferromagnetic hysteresis". *J. App. Pjys.* 55, pp. 2115, 1984.
- [40] B. Gupta, B. Ducharme, 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.