



**HAL**  
open science

# Caractéristiques magnétiques d'un circuit ferromagnétique annulaire construit par fabrication additive

Alejandro Ospina, Nan Kang, Hanlin Liao, Lucas Dembinski

► **To cite this version:**

Alejandro Ospina, Nan Kang, Hanlin Liao, Lucas Dembinski. Caractéristiques magnétiques d'un circuit ferromagnétique annulaire construit par fabrication additive. 3ème édition du Symposium de Génie Electrique SGE 2018, Jul 2018, Nancy, France. hal-01998737

**HAL Id: hal-01998737**

**<https://hal.utc.fr/hal-01998737>**

Submitted on 29 Jan 2019

**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.

# Caractéristiques magnétiques d'un circuit ferromagnétique annulaire construit par fabrication additive

Alejandro OSPINA VARGAS<sup>1</sup>, Nan KANG<sup>2</sup>, Hanlin LIAO<sup>2</sup>, Lucas DEMBINSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sorbonne universités, Université de technologie de Compiègne, EA 1006 Laboratoire Electromécanique, Centre de recherches Royallieu - CS 60319 - 60203 Compiègne cedex, France

<sup>2</sup> ICB-PMDM-LERMPS, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Site de Sévenans, 90010 Belfort Cedex, France

**RESUME** – Une technique de fabrication additive a été employé pour la fabrication d'un circuit ferromagnétique annulaire. Des essais ont été effectués afin de comparer les caractéristiques du circuit magnétique fabriqué (courbe  $B(H)$ ) avec des matériaux couramment utilisés dans la fabrication des dispositifs électrotechniques. Les premiers résultats montrent que les performances magnétiques de l'échantillon restent au dessous de celles des matériaux ferromagnétiques traditionnels (tôles FeSi) bien que celui-ci soit constitué principalement de FeSi. Un post-traitement de la pièce (recuit) pourraient s'avérer déterminant pour l'amélioration des caractéristiques magnétiques.

**Mots-clés** – Fabrication additive, matériaux magnétiques, hystérésis magnétique.

## INTRODUCTION

La fabrication additive (FA) est devenue un procédé de fabrication très populaire grâce à l'utilisation intensive des imprimantes 3D. La caractéristique principale de ce procédé consiste dans la fabrication des structures par la superposition des couches successives. L'impact croissant de la FA dans l'industrie vient accompagner de nouvelles manières d'envisager la conception des dispositifs et des matériaux les constituant en rapprochant le processus de design (CAO) avec le prototypage rapide [1]. La plupart des recherches sur les matériaux autour de la FA sont focalisées sur les propriétés mécaniques, et seulement une fraction marginale des études a été consacrée à la fabrication des matériaux ferromagnétiques [2, 3, 4, 5]. Nous voulons par cet article établir une étude comparative entre un échantillon construit par FA et des matériaux classiques utilisés dans l'électrotechnique. La première partie est dédiée à la présentation du noyau ferromagnétique fabriqué par FA et le dispositif expérimental utilisé pour sa caractérisation. Ensuite les résultats de mesures sont présentés et comparés avec des matériaux magnétiques couramment utilisés en électrotechnique. Enfin, les conclusions et perspectives de ce travail sont exposés.

## PRÉSENTATION DE L'ÉCHANTILLON

Le noyau annulaire a été retenu comme forme géométrique pour les essais. Sa géométrie très simple se prête facilement à la mesure des caractéristiques magnétiques. L'uniformité du champ magnétique à l'intérieur de la section du noyau peut être assuré en rapprochant le plus possible le diamètre interne  $D_i$  du diamètre extérieur  $D_e$  afin d'avoir une section relativement mince ( $D_e/D_i \leq 1.1$ ). Dans notre cas,  $D_e/D_i = 1.42$ , il faut donc considérer la non uniformité du champ magnétique à l'intérieur de la section du circuit magnétique. En conséquence, il est nécessaire de redéfinir la longueur de la ligne médiane du circuit magnétique comme  $l_m = \pi(D_e - D_i)/\ln(D_e/D_i)$ .

Le circuit magnétique annulaire a été créé au laboratoire ICB-

PMDM-LERMPS par une procédure de FA par frittage laser (*Selective Laser Melting*). La pièce a été fabriquée avec une poudre de FeSi enrobé par une couche de Ni, cette couche était nécessaire à cause de la fragilité mécanique du FeSi.

## DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Nous avons effectué des mesures par la méthode de l'hystérésisgraphe. Dans cette méthode, le noyau est bobiné de manière à constituer deux enroulements, primaire et secondaire, afin d'établir les mesures nécessaires pour le traçage de la caractéristique  $B(H)$ . L'idée centrale étant de mesurer de manière indirecte les champs  $H$  et  $B$ , cela est effectué par la mesure du courant primaire qui est relié au champ magnétique  $H$  et de la tension au secondaire à vide qui est reliée à l'induction magnétique  $B$  (voir figure 1).

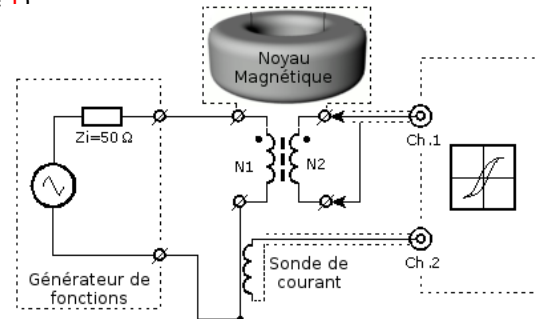


Fig. 1. Méthode de l'hystérésisgraphe

La procédure de mesure est la suivante : sur l'enroulement primaire de nombre de spires  $N_1$  nous avons injecté un courant  $i_1(t)$  qui est mesurée par une sonde de courant. Cette courant va créer une force magnétomotrice et par conséquence un champ magnétique à l'intérieur du noyau, le secondaire étant ouvert, la loi d'Ampère nous donne :

$$H_m(t) = N_1 i_1(t) / l_m.$$

Il est à noter que le champ magnétique  $H_m$  est un champ moyen calculé sur la longueur  $l_m$ . La valeur de l'induction est estimée par intégration de la tension sur le secondaire,  $u_2$ ,

$$B(t) = -\frac{1}{N_2 S} \int u_2(t) dt,$$

avec  $S$  la section du noyau et  $N_2$  le nombre de spires du secondaire. Un autre paramètre important calculé est la puissance moyenne par unité de volume ( $W/m^3$ ), celle-ci a été obtenue par l'expression suivante,

$$P = -\frac{1}{l_m S} \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) u_2(t) dt. \quad (1)$$

Cette grandeur nous renseigne sur la puissance magnétique dissipée à l'intérieur du noyau (pertes).

## RÉSULTATS ET COMPARAISONS

Un post-traitement des mesures a été nécessaire afin d'éliminer des perturbations créées par les sources et les appareils de mesure (composantes continues, *offset*). De façon systématique la composante moyenne a donc été enlevée et un cycle moyen a été défini à partir de la fusion de données de plusieurs cycles. La représentation de la caractéristique magnétique est obtenue par la courbe qui relie l'induction magnétique  $B$  au champ magnétique  $H$ , cette courbe  $B(H)$  est connue comme le cycle d'hystérésis magnétique. Afin d'obtenir des cycles d'hystérésis exploitables, d'autres corrections ont été apportées, nous pouvons les classer en trois types d'actions principales : le centrage, la correction de la dérive (*drift*) et enfin la correction de la pente. Chacune de ces opérations a été appliquée systématiquement aux données expérimentales. Des cycles corrigés pour une fréquence de 50 Hz et des courants entre 1 A et 9 A sont montrés à la figure 2.

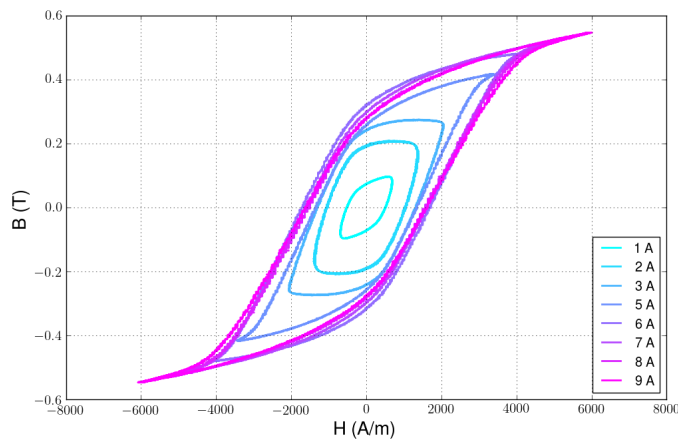


Fig. 2. Cycles d'hystérésis à 50 Hz pour différents niveaux de courants.

À partir des caractéristiques issues des cycles d'hystérésis, notamment du champ coercitif  $H_{cB}$  (la valeur du champ magnétique  $H$  quand l'induction  $B = 0$ ) et de l'induction à saturation  $B_s$ , une première classification peut être établie. L'échantillon est situé dans la limite entre les matériaux doux et durs, proche des ferrites douces (MnZn) et du nickel (Ni) qui ont des  $B_s$  de l'ordre de 0.3 à 0.5 T et des  $H_{cB}$  inférieures à 1 kA m<sup>-1</sup>. Par sa composition (FeSi) il devrait se situer plutôt proche des valeurs des aciers à une faible teneur en silicium avec des  $B_s$  entre 1 et 2 T et des  $H_{cB}$  inférieurs à 100 A m<sup>-1</sup>, nous sommes donc loin des caractéristiques physiques propres des matériaux qui composent le noyau (FeSi) mais proches des caractéristiques magnétiques du matériau qui a été utilisé pour réaliser le recouvrement et donner une rigidité mécanique à l'échantillon (le nickel). La figure 3 illustre les différences entre la caractéristique magnétique de l'échantillon et des tôles FeSi.

Le comportement en fréquence a été étudié pour des courants entre 1 A et 5 A et des fréquences entre 50 Hz et 5 kHz, les résultats sont montrés à la figure 4. Il peut être observé une réduction considérable de l'induction maximale lorsque la fréquence change, pour le même niveau de courant. Par exemple, un changement de fréquence de 50 Hz à 5 kHz divise l'induction maximale d'un facteur proche de 10. Ce comportement suggère que l'échantillon est fortement affecté par les courants induits.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les performances magnétiques de l'échantillon restent au dessous de celles des matériaux ferromagnétiques traditionnels (tôles FeSi). Afin de mieux comprendre la façon comme le procédé de fabrication agit sur les caractéristiques physiques de ma-

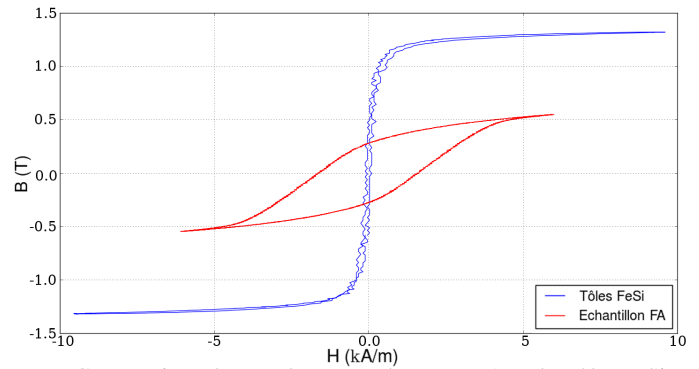


Fig. 3. Comparaison des courbes  $B(H)$  du noyau FA et des tôles FeSi.

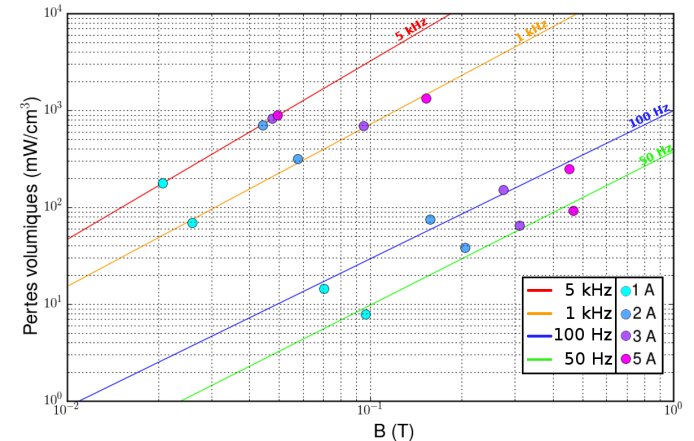


Fig. 4. Pertes en fonction de l'induction magnétique maximale.

ériaux utilisés, il est nécessaire d'aborder une étude plus précise de la composition de l'échantillon, dans le même esprit que celle réalisée par l'équipe du LERMPS sur un échantillon de Fe-30%Ni [2] et d'autres équipes sur de FeSi (à 6% Si) [3, 4]. Ceci implique l'utilisation des techniques de spectroscopie ainsi que la caractérisation de la microstructure par des mesures au microscope électronique.

La réalisation d'autres échantillons afin d'analyser l'influence de la vitesse et la puissance du laser sur les caractéristiques magnétiques reste encore à faire. Des renseignements sur la taille du grain, l'influence corrélée de la vitesse et la puissance du laser sur les propriétés magnétiques de l'échantillon pourront ainsi être obtenues. D'autres aspects en rapport à la modification de la procédure de fabrication (application d'un champ magnétique pendant l'impression) et des post-traitements de la pièce (recuit) pourraient s'avérer déterminants pour l'amélioration des caractéristiques magnétiques [4].

## RÉFÉRENCES

- [1] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Wang, C. C.; Shin, Y. C.; Zhang, S. and Zavattieri, P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering Computer-Aided Design, 2015, 69, 65-89
- [2] B. Zhang; N.-E. Fenineche; H. Liao and C. Coddet, Magnetic properties of in-situ synthesized FeNi3 by selective laser melting Fe-80%Ni powders, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 336, 49 - 54.
- [3] M. Garibaldi; I. Ashcroft; M. Simonelli and R. Hague, Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting Acta Materialia, 2016, 110, 207 - 216.
- [4] M. Garibaldi; I. Ashcroft; J. Lemke; M. Simonelli and R. Hague, Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing Scripta Materialia, 2017, 142, 121 - 125.
- [5] Misra, A. Nano-Magnets and Additive Manufacturing for Electric Motors Presented at the 8th Annual CAFE Electric Aircraft Symposium, 2014, url : <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140010481.pdf>