

Fabrication Additive d'Alliages Ferromagnétiques Doux Fe-3.5Si-4.5Cr par Fusion Laser sur Lit de Poudre : Analyse de la Microstructure et des Propriétés Magnétiques

Abilo Andrés VELÁSQUEZ SALAZAR¹, Yuyang Li¹, Alejandro OSPINA VARGAS¹,
Vincent LANFRANCHI¹ et Nouredine FENINECHE²

¹ Roberval (Mechanics, energy and electricity), UTC Compiègne.

² ICB-PMDM UMR 6303, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Belfort, F-90010, France

30/05/2025

RESUME – Cette étude examine la fabrication additive d'un alliage ferromagnétique doux Fe-3,5 Si-4,5 Cr par fusion laser sur lit de poudre (FLLP). L'objectif est d'analyser l'influence des paramètres de procédé, et notamment de la densité d'énergie normalisée, sur la densité, la microstructure, la texture cristallographique, la résistivité électrique et les propriétés magnétiques du matériau produit. Pour cela, des échantillons cubiques et toroïdaux ont été réalisés sur machine Trumpf 1000 en faisant varier la puissance laser, la vitesse de balayage, la distance de hachure et l'épaisseur de couche. La densité relative et la formation d'une texture colonnaire $\langle 100 \rangle$ sont systématiquement corrélées à la valeur de la densité d'énergie normalisée. L'évolution de la résistivité électrique, mesurée selon la méthode de Van der Pauw, est reliée au raffinement de la microstructure et à la distribution des grains, mettant en évidence l'impact du contrôle de la taille de grain sur la diffusion électronique. Enfin, l'induction à saturation et le champ coercitif des échantillons toroïdaux révèlent une fenêtre opérationnelle optimale de densité d'énergie pour minimiser les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. La technique FLLP se révèle ainsi adaptée à la production de composants Fe-Si-Cr aux performances magnétiques et électriques contrôlables.

Mots-clés – Fabrication additive, FLLP, alliage ferromagnétique doux, FeSiCr, microstructure, propriétés magnétiques.

1. INTRODUCTION

La fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (FLLP) est une méthode de plus en plus répandue pour la production de pièces métalliques de géométries complexes, permettant un contrôle fin de la microstructure locale et des propriétés fonctionnelles des matériaux [5, 4]. Parmi les alliages doux, les Fe-Si-Cr se distinguent par leur excellente résistivité électrique et leur faible perte fer, ce qui en fait des candidats de choix pour les applications haute fréquence telles que les transformateurs à moyenne fréquence et les moteurs compacts [3, 1]. Cependant, bien que plusieurs études aient examiné la fabrication sélective par laser d'alliages Fe-Si et Fe-Si-Cr [2, 3], il reste un manque de travaux quantitatifs reliant les paramètres de procédé normalisés à la texture cristallographique et aux performances magnétiques précises de la phase ferritique. En particulier, la notion de densité d'énergie normalisée E_0^* , qui intègre les propriétés thermo-physiques intrinsèques du matériau (absorptivité, capacité calorifique, densité) et la différence de température [6], offre un cadre prometteur pour prédire simultanément la compaction, la taille des grains et la texture cristallographique. Néanmoins, son application systématique aux alliages Fe-3,5Si-4,5Cr n'a pas encore été explorée.

Dans ce contexte, ce travail vise à :

1. Établir un diagramme de procédé basé sur E_0^* reliant directement les paramètres de FLLP à la densité et à la texture $\langle 100 \rangle$ de l'alliage Fe-3,5Si-4,5Cr.
2. Quantifier l'influence de E_0^* sur les propriétés magnétiques clés (induction à saturation, coercitivité) et montrer comment ces paramètres peuvent être optimisés pour minimiser les pertes fer et par courants de Foucault.
3. Proposer des recommandations de plage de E_0^* pour des applications en transformateurs moyenne fréquence, en comparant nos résultats aux performances d'alliages traditionnels et de matériaux manufacturés conventionnellement.

Par cette approche, nous apportons une compréhension plus fine du lien entre la thermique de procédé, la microstructure et les performances électromagnétiques, ouvrant la voie à la conception de composants magnétiques sur mesure par fabrication additive.

2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Cette section détaille d'abord le matériau et le matériel utilisés, puis précise les paramètres de procédé et leur justification, avant de présenter les protocoles de mesure de densité, microstructure, propriétés magnétiques et résistivité.

2.1. Matériau et Équipement

L'étude a fait appel à une poudre d'alliage Fe-3,5Si-4,5Cr (wt %). La fabrication a été conduite sur une machine Trumpf 1000 équipée d'un laser à fibre/Nd : YAG (longueur d'onde : 515 nm). La morphologie des grains et la microstructure de surface ont été étudiées par microscopie électronique à balayage (FE-SEM, Zeiss Sigma, Allemagne) ainsi que par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD). La résistivité a été déterminée par la méthode de Van der Pauw sur des lamelles rectangulaires à l'aide du système M81 de Lakeshore, intégrant un module de source de courant équilibré (BCS-10) et un module de mesure de tension (VM-10). Les caractéristiques magnétiques ont été mesurées via un hystérésigraph conforme à la norme IEC 60404 (2004).

La distribution granulométrique de la poudre Fe-3,5Si-4,5Cr a été mesurée par diffraction laser, comme illustré en Fig. 1. Les valeurs $d(0.1)$, $d(0.5)$ et $d(0.9)$, correspondant respectivement aux percentiles 10 %, 50 % et 90 % de la distribution cumulée, sont de l'ordre de 20 μm , 30 μm et 40 μm . Cette répartition étroite autour de la médiane (D_{50}), conjuguée à une dispersion

réduite ($D_{90}-D_{10} \approx 20 \mu\text{m}$), assure une bonne fluidité et un dépôt régulier. Sur cette base, l'épaisseur de couche l a été fixée à $30 \mu\text{m}$, soit environ la moitié de la largeur de la piscine de fusion, offrant ainsi un recouvrement optimal des passes et un équilibre thermique favorable à une microstructure fine et dense.

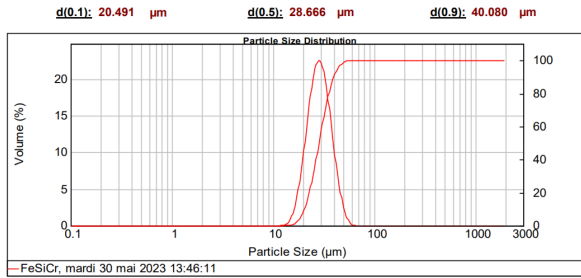


FIG. 1. Granulométrie par diffraction LASER

2.1.1. Choix de la composition alliage

L'ajout de chrome (4,5 wt %) dans l'alliage Fe-3,5Si trouve un fondement expérimental solide dans les travaux de Liu et al. (2022) [8]. Ils montrent qu'une teneur en Cr de 4 %-6 % accroît la résistivité électrique de 40 %-60 % grâce à la formation de couches superficielles d'oxydes de chrome qui limitent efficacement les courants de Foucault. Par ailleurs, cette teneur améliore la stabilité de la phase ferritique lors du recuit (500–650 °C), réduisant la précipitation de phases indésirables et renforçant la texture $\langle 100 \rangle$ favorable à une perméabilité élevée et une coercitivité basse. Enfin, le Cr confère une meilleure résistance à la corrosion et à l'oxydation sous cyclage thermique, prolongeant la durabilité des noyaux magnétiques pour applications moyenne fréquence.

Deux types d'échantillons ont été fabriqués : des cubes (9 mm de côté) pour les mesures de densité et des toroïdes (hauteur 9 mm, diamètre extérieur 35 mm et diamètre intérieur 25 mm) pour la caractérisation magnétique.

2.1.2. Paramètres du processus de production

Les paramètres de fabrication (Tableau 1) ont été ajustés afin d'avoir des valeurs de densité élevées.

TABEAU 1. Paramètres des processus laser

Paramètre	Quantité (unités)
Puissance laser (P)	200 – 400 (W)
Vitesse de balayage (v)	0.4 – 1.6 (m/s)
Distance de hachure (h)	78 – 130 (μm)
Épaisseur de couche (l)	30 (μm)
Rayon du faisceau (r_b)	100 (μm)
Température plateforme (T_0)	26.5 (°C)
Angle de balayage	45°

Deux stratégies de balayage ont été testées pour les géométries cubiques : en bandes et en damier.

3. RÉSULTATS ET ANALYSE

Les paramètres montrés à la tableau 1 ont été identifiées à l'aide des diagrammes d'énergie normalisée [6]. Le choix des paramètres primaires – puissance laser (P), vitesse de balayage (v) et diamètre du spot ($2r_b$) – est dicté par les contraintes machines et directement ajustables sur la plupart des systèmes FLLP, où ils déterminent l'apport énergétique fondamental et la géométrie initiale de la piscine de fusion [5, 4]. En particulier, pour les alliages Fe-Si, des études ont montré qu'une plage de

$P = 200\text{--}400 \text{ W}$ et $v = 0,4\text{--}1,6 \text{ m/s}$ permet d'obtenir une compaction élevée tout en limitant la formation de pores par keyholing ou par fusion incomplète [2, 3].

Les paramètres dérivés – distance de hachure (h) et épaisseur de couche (l) – sont quant à eux optimisés pour garantir un recouvrement suffisant des pistes et un équilibre thermique entre couches. Plus précisément, h est choisi pour assurer une recoupe de la piscine d'au moins 50 % de son diamètre mesuré, ce qui permet d'éviter les zones non fusionnées entre deux passes successives [6]. L'épaisseur de couche l est en pratique fixée à environ la moitié du diamètre transversal de la piscine de fusion mesuré expérimentalement, minimisant ainsi la rugosité inter-couches et favorisant une solidification homogène. Ce principe, validé pour Fe-6,5Si par Zaied et al. (2022), a été repris ici pour Fe-3,5Si-4,5Cr afin d'atteindre une densité relative supérieure à 99,5 % sans compromettre la finesse de la microstructure [7].

Enfin, l'angle de balayage à 45° entre couches successives contribue à briser l'alignement des défauts et à homogénéiser la texture cristalline, comme l'ont démontré plusieurs travaux sur les alliages ferromagnétiques doux produits par SLM [5, 4].

Parallèlement, le comportement électrique (résistivité) et magnétique de ces mêmes échantillons a été étudié dans le but de identifier les conditions de fabrication réduisant à la fois les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault.

3.1. Densité

La densité des échantillons cubiques, déterminée par la méthode d'Archimède, croît d'abord avec la densité d'énergie volumique classique :

$$E_v = \frac{P}{v h l}$$

où P est la puissance laser, v la vitesse de balayage, h l'espace entre des passes et l l'épaisseur de couche.

Pour affiner l'analyse, on introduit ensuite la densité d'énergie normalisée :

$$E_0^* = \frac{A E_v}{2 \rho c_p \Delta T},$$

avec A l'absorptivité de l'alliage, ρ sa densité solide, c_p sa capacité calorifique spécifique et ΔT la différence de température entre le matériau fondu et la plateforme. Cette formulation intègre les propriétés thermo-physiques intrinsèques du matériau et se révèle plus pertinente pour prédire à la fois la compaction et la microstructure que la seule quantité E_v .

3.2. Microstructure

L'analyse EBSD a révélé une texture cristallographique préférentielle (100) parallèle à la direction de fabrication ($\parallel$ BD), indiquant la présence de formations colonnaires des grains parallèles à la direction de fabrication. Une augmentation de la densité d'énergie entraîne une taille de grain plus importante en raison d'un apport thermique accru et d'une refusion plus marquée des couches solidifiées précédentes.

Les Fig. 3 et 4 présentent chacune quatre sous-figures :

- a) et c) montrent respectivement la carte EBSD en coupe longitudinale (a) et la carte en coupe transversale (c) de l'échantillon C1, toutes deux orientées par rapport à la direction de fabrication (BD);
- b) et d) présentent de la même manière les coupes longitudinale (b) et transversale (d) pour l'échantillon C4.

Pour la Fig. 3, les densités d'énergie volumique appliquées pour C1 et C4 sont respectivement $7,80 \times 10^{10}$ et $7,32 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$, correspondant à des valeurs de E_0^* de 2,268 et 2,128. La Fig. 4 reprend le même agencement pour les échantillons C5 et C10, dont les densités d'énergie sont de $1,03 \times 10^{11}$ et $1,59 \times 10^{11} \text{ J/m}^3$ (soit $E_0^* = 2,987$ et 4,615). On y observe qu'en augmentant l'apport d'énergie, la taille des grains s'accroît et leur allongement dans la direction BD devient plus marqué.

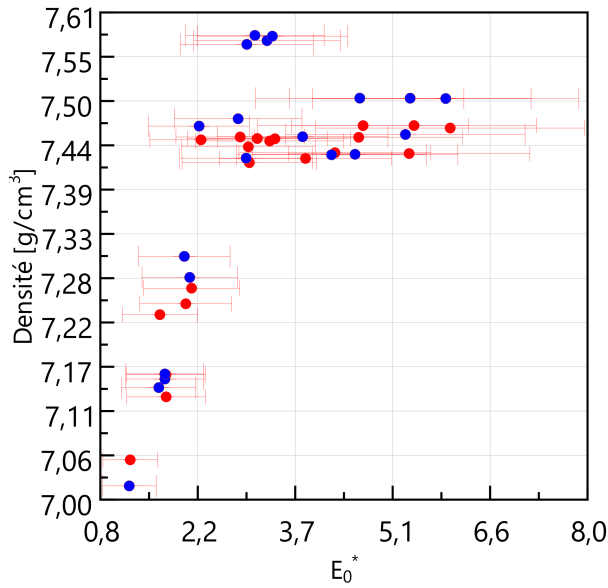


FIG. 2. Densité en fonction de la densité d'énergie normalisée E_0^* pour tous les échantillons cubiques produits.

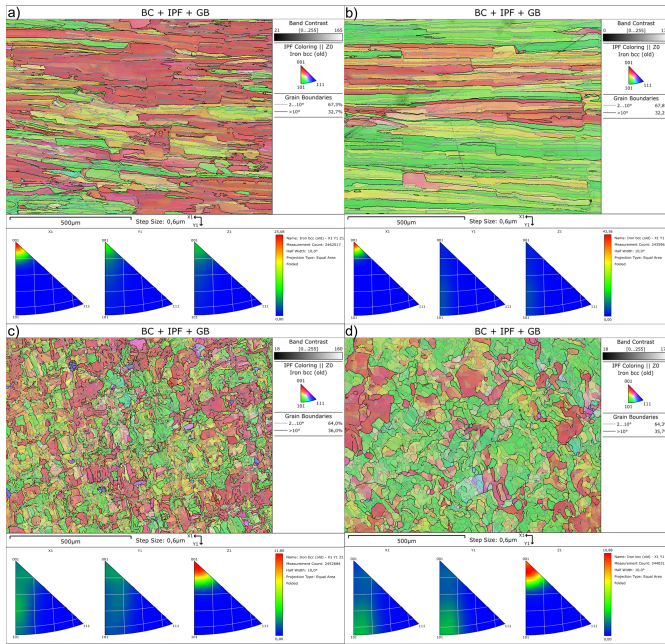


FIG. 3. Images EBSD et cartes IPF des faces perpendiculaire (a, b) et parallèle (c, d) à la BD pour $E_0^* = 2,268$ (a, c) et $E_0^* = 2,128$ (b, d).

3.3. Propriétés Magnétiques

Les mesures magnétiques ont été réalisées sur un hystérésigraphe conforme à la norme IEC 60404 (2004), associant oscilloscope, générateur et source de courant contrôlée, sur des échantillons toroïdaux soumis à un champ alternatif de 5 Hz et d'amplitude proche de 1200 A/m. La figure 5 présente :

- sur l'axe de gauche (bleu), l'induction rémanente B_r (mettre le symbole) et l'induction à saturation B_{sat} (symbole rond), en tesla ;
- sur l'axe de droite (rouge), le champ coercitif H_c (symbole triangle), en A/m.

Toutes trois augmentent légèrement avec la densité d'énergie normalisée E_0^* . Ce comportement peut être associé au durcissement magnétique du matériau par cristallisation, entraînant une augmentation de l'énergie liée à l'anisotropie magnétocristal-

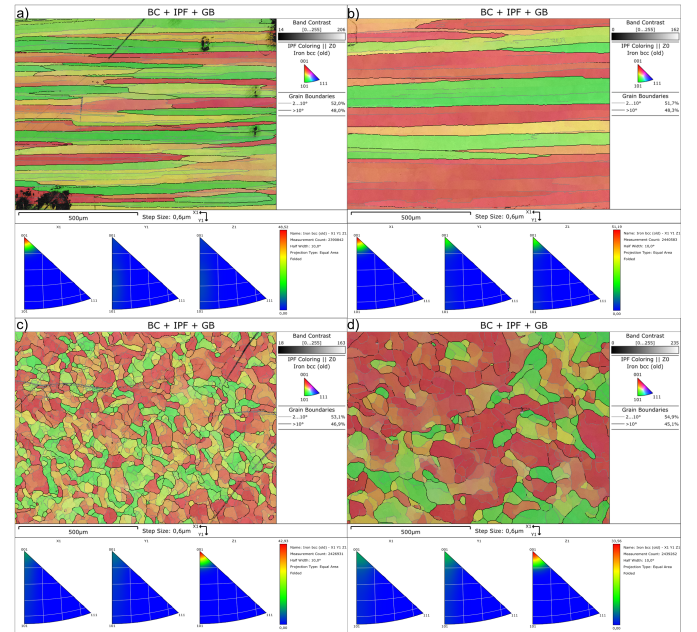


FIG. 4. Images EBSD et cartes IPF des faces perpendiculaire (a, b) et parallèle (c, d) à la BD pour $E_0^* = 2,987$ (a, c) et $E_0^* = 4,615$ (b, d).

line.

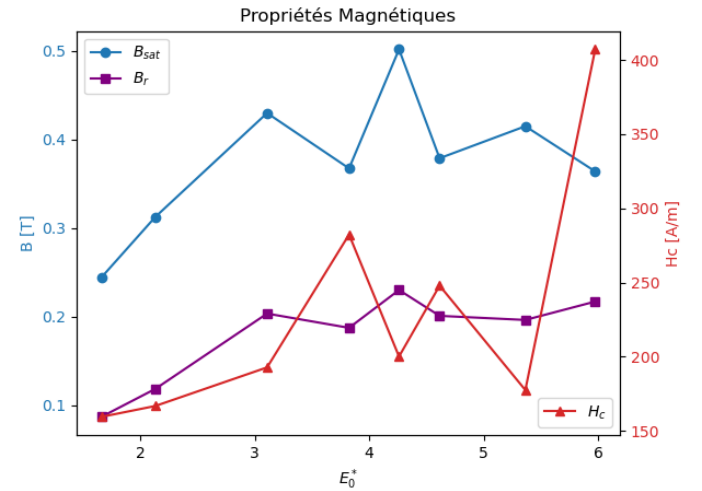


FIG. 5. Induction rémanente (symbole carré) et induction à saturation (symbole rond) sur l'axe de gauche (bleu), et champ coercitif (symbole triangle) sur l'axe de droite, en fonction de E_0^* .

3.4. Résistivité Électrique

La figure 6 regroupe quatre sous-figures : a) résistivité en fonction de l'énergie normalisée pour un échantillon cubique découpé en coupe plane fine (épaisseur ~ 1 mm) parallèlement à la direction de fabrication (BD) ; b) mêmes mesures en coupe transversale à BD ; c) taille moyenne des grains en fonction de l'énergie normalisée pour une coupe perpendiculaire à BD ; d) variation de la résistivité en fonction de la taille moyenne des grains, également sur coupe perpendiculaire.

Les observations suivantes se dégagent des graphiques :

1. Pour les coupes parallèles à BD (fig. a), la résistivité apparaît très dispersée en raison de l'anisotropie des grains allongés le long de BD, compromettant l'homogénéité requise par la méthode de Van der Pauw.

2. La résistivité diminue de façon continue avec l'augmentation de l'énergie normalisée, corrélant avec le raffinement et la distribution homogène des grains observés sur les coupes perpendiculaires (fig. b et c).
3. La taille moyenne des grains croît avec l'énergie normalisée, et cette évolution s'accompagne d'une baisse de la résistivité (fig. d), conformément aux effets de diffusion électronique aux frontières de grains.

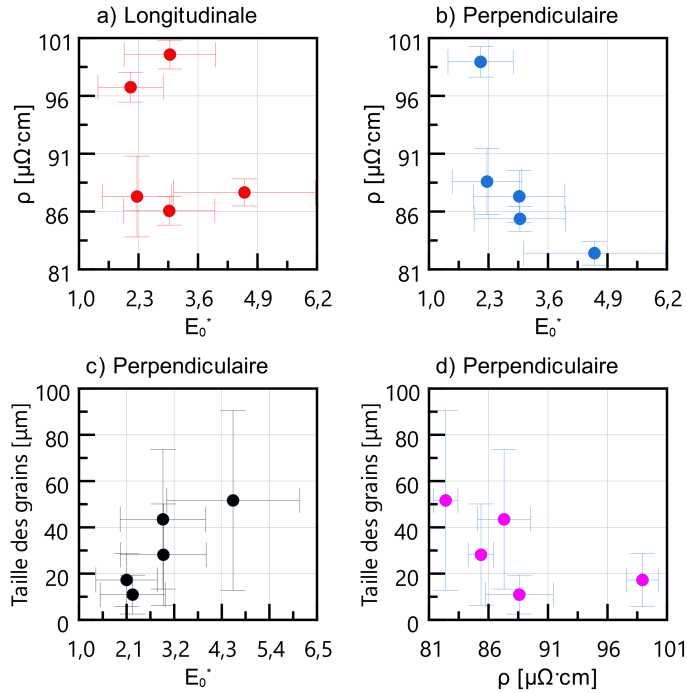


FIG. 6. a)–b) Résistivité en fonction de la densité d'énergie normalisée pour coupes parallèles et transversales à BD; c) taille de grain vs. énergie normalisée (coupe perpendiculaire); d) résistivité vs. taille moyenne des grains.

4. CONCLUSIONS

Cette étude démontre que la fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre permet de produire de l'alliage Fe-3,5Si-4,5Cr avec une densité relative supérieure à 99,5 % et une texture cristallographique maîtrisée. Le diagramme de procédé basé sur la densité d'énergie normalisée E_0^* s'affirme comme un outil prédictif pour optimiser simultanément la compaction, la taille des grains et les performances magnétiques.

Plus précisément, le contrôle de E_0^* autorise :

- la modulation de l'induction à saturation B_{sat} dans une plage adaptée aux transformateurs moyenne fréquence ;
- le réglage du champ coercitif H_c entre 150 et 200 A/m, minimisant les pertes par hystérésis ;
- l'ajustement de la taille moyenne des grains, offrant une stratégie robuste pour réduire les pertes par courants de Foucault à basse fréquence.

Par ces contributions, cette recherche fournit une méthodologie claire pour la conception de composants magnétiques sur mesure par fabrication additive, ouvrant de nouvelles perspectives pour les applications haute fréquence. Ces résultats ouvrent la voie à l'industrialisation de noyaux Fe-3,5Si-4,5Cr par FLLP, avec un coût énergétique optimisé et une reproductibilité capable de répondre aux exigences des transformateurs moyenne fréquence.

5. PERSPECTIVES

Des mesures de conductivité électrique en cours analysent l'anisotropie entre la direction des colonnes cristallines et la direction transversale. Les premiers résultats indiquent une forte

anisotropie, suggérant que la microstructure influence les pertes par courants induits et les mécanismes de magnétisation. Ces observations ouvrent des perspectives pour optimiser les propriétés électromagnétiques des alliages Fe-Si-Cr selon les paramètres de fabrication et les traitements post-fabrication.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet EE4.0 (Énergie Électrique 4.0). EE4.0 est cofinancé par l'Union européenne, avec le soutien financier du Fonds européen de développement régional (FEDER), de l'État français et de la Région Hauts-de-France.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Andreas Krings, Marco Cossale, Alberto Tenconi, Juliette Soulard, Andrea Cavagnino, et Aldo Boglietti. Magnetic materials used in electrical machines : A comparison and selection guide for early machine design. *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(6) :21–28, 2017.
- [2] Kai Jyun Jhong, Wei-Chin Huang, et Wen Hsi Lee. Microstructure and magnetic properties of magnetic material fabricated by selective laser melting. *Physics Procedia*, 83 :818–824, 2016.
- [3] Kai-Jyun Jhong, Tsung-Wei Chang, Wen-Hsi Lee, Mi-Ching Tsai, et I-Hua Jiang. Characteristic of high frequency Fe-Si-Cr material for motor application by selective laser melting. *AIP Advances*, 9(3) :035317, 03 2019.
- [4] Tsung-Wei Chang, Kai-Wei Liao, Ching-Chih Lin, Mi-Ching Tsai, et Chung-Wei Cheng. Predicting magnetic characteristics of additive manufactured soft magnetic composites by machine learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(9) :3177–3184, June 2021.
- [5] D. Goll, D. Schuller, G. Martinek, T. Kunert, J. Schurr, C. Sinz, T. Schubert, T. Bernthaler, H. Riegel, et G. Schneider. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Additive Manufacturing*, 27 :428–439, 2019.
- [6] A. A. Velasquez Salazar et al., "Density Analysis Based on Normalized Process Diagrams : A Comparative Review of Ferromagnetic Alloys Produced by Laser Powder Bed Fusion," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-6, doi : 10.1109/ICEM60801.2024.10700463.
- [7] M. Zaied, A. Ospina-Vargas, N. Buiron, J. Favergeon, N.-E. Fenineche. Additive Manufacturing of Soft Ferromagnetic Fe 6.5%Si Annular Cores : Process Parameters, Microstructure, and Magnetic Properties. *IEEE Transactions on Magnetics*, doi : 10.1109/TMAG.2022.3202631.
- [8] Liu, X. and Dupont, N. and Martin, P. Enhancement of Electrical Resistivity and Phase Stability in Fe-Si Alloys by Chromium Addition for High-Frequency Applications, *Journal of Soft Magnetic Materials*, doi : 10.1016/j.jmmm.2022.10.004