

Liens entre les propriétés magnétiques et l'énergie laser déposée, des ferromagnétiques doux issue de la fabrication additive

ZAIED Meher^{1,2}, OSPINA VARGAS Alejandro¹, Favergeon Jérôme¹, Fenineche Nour-edine²

¹Sorbonne universités, Université de Technologie de Compiègne, CNRS EA 1006 Laboratoire Roberval, 60200 Compiègne

²ICB-PMMD-LERMPS, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, site de Sévenans, 90100 Belfort

RESUME – La fusion sélective au laser (LBM), est une technologie de fabrication additive sur lit de poudre capable de produire des pièces en alliage ferromagnétique doux, caractérisées par des propriétés magnétiques quasi-statiques comparables à celles de l'acier électrique. Par conséquent, dans cet article, nous proposons d'étudier l'effet d'un paramètre important comme l'apport énergétique du laser, sur les propriétés magnétiques finales.

Fabrication additive métallique, ferromagnétiques doux, micro-structure, propriétés magnétiques.

1. INTRODUCTION :

Ces dernières années, les technologies de fabrication additive (FA) connaissent un succès croissant grâce à la liberté de conception (formes géométriques complexes, nouvelles formes d'assemblage, intégration des composants...) qu'elles offrent pour la fabrication des pièces plastiques ou métalliques. Contrairement aux procédés de fabrication classiques qui sont basés sur l'extraction de matière (fraisage, contournage). La FA génère les pièces à partir de la superposition progressive des couches. Parmi les différents procédés FA utilisés, la fusion laser sur lit de poudre (LBM) est l'une des techniques les plus répandues dans l'industrie. Dans cette technologie, un laser à haute énergie est utilisé pour fondre des couches minces de poudre suivant un tracé obtenu du découpage en tranches à partir d'un modèle CAO.

Le développement actuel des matériaux par FA se concentre sur l'amélioration des propriétés mécaniques ; cependant, le potentiel de cette technologie de fabrication pour des applications non structurales (thermiques, électriques, magnétiques) est presque inexploré. Plus précisément, l'utilisation de la FA pour les alliages ferromagnétiques doux est marginalement étudiée, surtout pour les applications en électrotechnique. Une revue de certaines études récente [1, 2, 3, 4, 5] sur les matériaux magnétiques produits par FA a montré que l'un des principaux défis est l'amélioration des propriétés magnétiques.

Parmi les alliages ferromagnétiques doux (FeSi, FeNi, FeCo, ...etc) les alliages FeSi qui présentent des propriétés magnétiques très intéressantes telle que (des faibles champs coercitifs $H_c = [50-100 \text{ A/m}]$, des fortes inductions à saturation $B_s [1.6-1.8 \text{ T}]$ et une perméabilité élevée $[10000 \text{ à } 12000]$). Ces alliages FeSi sont fabriqués en général sous forme de tôles laminées très minces avec différentes nuances de Si entre 0.5% à 3.5%. Pour des teneurs en Si plus importantes, supérieur à (> 3%) peut permettre d'améliorer les caractéristiques de l'acier ferromagnétique fabriqué, néanmoins, cette augmentation entraîne une dégradation de ses propriétés mécaniques.

Le but de cette méthodologie est, de faire le lien entre les paramètres d'entrée (caractéristiques de la poudre, paramètres LBM) et les propriétés magnétiques de sortie finales (H_c et B_s).

2. PROCÉDÉ : FUSION LASER

Le procédé de fusion laser sur lit de poudre est illustré schématiquement à la figure 1. Un faisceau laser balaie une section 2D d'un lit de poudre à une vitesse, puissance laser et atmosphère contrôlées, une fois la couche est balayée, le lit de poudre est descendu sur une distance d'une épaisseur de couche, puis un système automatisé distribue une nouvelle couche de poudre. Ce processus est répété jusqu'à l'obtention de la pièce finale.

La machine (figure 1) se compose de 3 parties principales : (1) un laser avec un système de balayage (2) une chambre de fabrication et (3) un système de contrôle. La fusion laser est un processus complexe affecté par un certain nombre de paramètres internes et externes. Les paramètres internes sont liés aux paramètres de fabrication (puissance, vitesse de balayage, le pas de balayage, l'épaisseur de couche déposée) et aux propriétés géométriques des pièces finales. Les paramètres externes sont principalement liés à la caractéristique de la matière première (poudre).

Plusieurs auteurs [6, 7, 8] ont mesuré conjointement l'influence de la variation de la puissance et de la vitesse de balayage laser sur la morphologie de monocordons sur des lits de poudre. Ils ont identifié ainsi une plage à laquelle les paramètres faiblement énergétiques ne permettent pas une fusion complète du lit de poudre, ce qui provoque l'apparition de cordons discontinus en chapelets de gouttelettes.

Li [8] a notamment observé l'augmentation des dimensions de monocordons dans le cas de l'inconel 625, avec des puissances croissantes et des vitesses décroissantes, en restant principalement dans un régime conducteur. Garibaldi [5] a conclu aussi que la quantité de porosités irrégulières est réduite avec l'augmentation de l'apport énergétique mais cette augmentation peut être source de formation de pores sphériques et de fissures, il peut donc trouver l'apport énergétique optimale qui empêche la pièce d'atteindre sa pleine densité donc la santé matière de point de vue porosité / densité, directement reliée à ses propriétés mécaniques et magnétiques. Ainsi un réglage optimal de la puissance laser et de la vitesse de balayage détermineraient en grande partie les propriétés finales de la pièce.

2.1. Méthode d'analyse adimensionnelle : calcul de l'énergie normalisé :

Dans cet article, nous utiliserons l'approche développée par Thomas et al [4] pour construire des diagrammes de procédé adimensionnel pour la FA, grâce à l'application d'un modèle analytique de flux thermique pour identifier des groupes de paramètres (puissance et vitesse adimensionnelles), l'optimisation de propriétés des pièces applicables à la FA.

L'approche proposée par Thomas et al est utilisée ici pour identifier la combinaison optimale des paramètres du procédé qui peuvent réduire la porosité et ensuite établir l'influence sur les caractéristiques magnétiques.

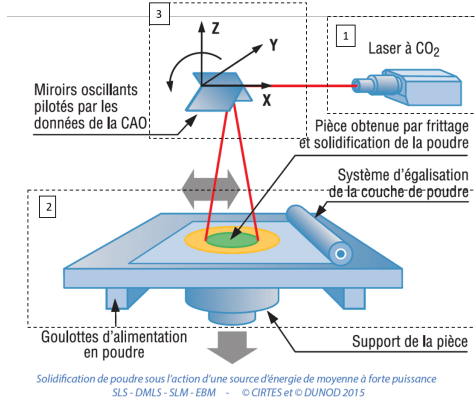


Fig. 1. Schéma de principe de la fabrication additive SLM.[Cirtes][9]

Cette analyse s'inspire des travaux précédents de Ion et al.[10] appliqués au soudage laser. Cette méthode combine des informations empiriques et physiques sous forme de diagrammes qui peuvent aider à identifier les paramètres adéquats. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthodologie permettant de réduire les paramètres tout en conservant une interprétation physique.

Dans cette analyse, les constantes thermiques (c_p chaleur spécifique et A absorption) de l'alliage à la température approximative du lit de poudre (la température du plateau chauffant 240 °C) sont utilisées, nous supposons également que les variables thermo-physiques sont inchangées par la fusion. En plus de la puissance et de la vitesse, qui sont généralement deux des variables clés du procédé de soudage laser, la FA introduit deux autres : l'hauteur de couche ' e ' et le pas de balayage ' h ' (Fig.2).

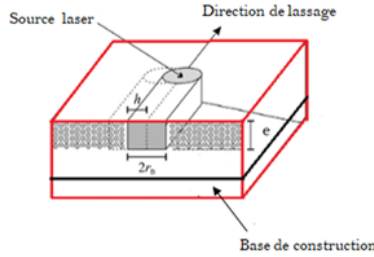


Fig. 2. schéma de la géométrie simplifiée du modèle de fusion laser sur lit de poudre

Comme une première approximation (figure.2), nous allons considérer une source de chaleur mobile chauffant un volume de matière de section ($2 r_b \times e$), avec une densité de remplissage de poudre d'environ 60 à 70%. On suppose que la puissance du faisceau q est choisie pour obtenir la température de fusion T_m du matériau, donc E_v est la quantité minimale d'énergie nécessaire pour atteindre T_m . L'énergie par unité de longueur est exprimé comme le rapport q/v alors l'énergie par unité de volume E_v , nécessaire pour atteindre la température de fusion T_m , s'exprime dans l'équation (1) :

$$E_v = \frac{q}{2ver_b} \quad (1)$$

Deux groupes sans dimensions (puissance et vitesse) du soudage laser sont définis comme étant :

La puissance laser adimensionnelle :

$$q^* = \frac{Aq}{r_b \lambda (T_m - T_0)} \quad (2)$$

Tableau 1. Récapitulatif des principaux paramètres thermophysiques et de fabrication (LBM)

Paramètres thermophysiques	Valeurs (unités)
Densité volumique ρ	7500 Kg/m ³
Chaleur spécifique (C_p)	444 J Kg K ⁻¹
Conductivité thermique λ	43 W m ⁻¹ K ⁻¹
Ecart vecteurs (hatch distance)	60 μ m
Absorptivité A	0.3
Température de fusion (T_m)	1773 K
Paramètres procédé	
Puissance laser q	60W à 120W
Rayon - faisceau laser	52 μ m
Vitesse de balayage v	0.1 à 0.6 m/s
Épaisseur - couche de poudre	30 μ m
Stratégie de balayage	(XY) Bidirectionnel

La vitesse laser sous forme adimensionnelle :

$$v^* = vr_b/\alpha \quad (3)$$

Une autre variable adimensionnelle sera rajouté à notre analyse :

Dans son analyse dans le cadre du soudage laser Ion et al.[10] ont conclu que q^* (la puissance adimensionnelle) et v^* (la vitesse adimensionnelle) les deux paramètres étaient des indicateurs les plus pertinents pour surveiller la température de pointe et la vitesse de chauffage du cycle thermique en un point du matériau.

Avec e^*

$$e^* = \frac{2e}{r_b} \quad (4)$$

Pour des raisons de simplicité, une densité relative du lit de poudre de 0,67(2.d.p.) (voir Fig 2) sera adoptée dans cette analyse.

L'énergie minimale volumique adimensionnelle [4] pour faire fondre la matière peut être exprimée comme ceci :

$$E^* = q^*/(v^* e^*) = [Aq/(2ver_b)][1/0.67(\rho C_p(T_m - T_0))] \quad (5)$$

Avec A est l'absorptivité de surface (0,3 et 0,8), r_b le rayon laser, λ et α sont la conductivité thermique et la diffusivité thermique de l'alliage et T_m , T_0 sont les températures respectives de fusion et initiale.

La quantité minimale de chaleur nécessaire pour provoquer la fusion par m³ de matériau, H_{min} , y compris la chaleur latente, L_m , est :

$$H_{min} = \rho C_p(T_m - T_0) + L_m \quad (6)$$

L_m est approximativement $0.5\rho C_p(\Delta T)$ pour les métaux et les alliages.

Avec ces hypothèses, l'eq 6 peut être simplifiée comme étant :

$$H_{min} = 0.67\rho C_p(T_m - T_0) + 0.5(0.67\rho C_p\Delta T) \quad (7)$$

$$H_{min} = 0.67(1 + 0.5)\rho C_p\Delta T = \rho C_p\Delta T \quad (8)$$

La substitution de l'équation 7 en 8 donne :

$$E^* = q^*/(v^* e^*) = [Aq/(2ver_b)][1/(\rho C_p(T_m - T_0))] \quad (9)$$

Tableau 2. Poudre FeSi6.5% : distribution de taille

D_x (μm)	D_{10}	D_{50}	D_{90}
-	9.32	29.79	57.24

Un paramètre important supplémentaire est introduit de manière spécifique dans le contexte FA, il s'agit de la distance entre deux cordons parallèles adjacents, h . Afin de faciliter le calcul, cette variable a été normalisée par rapport au rayon laser pour donner : $h^* = h/r_b$

La densité d'énergie volumique normalisée (E^*) et (h^*) peuvent être utilisés conjointement. Le produit de $1/h^*$ et E^* nous fournit le concept de densité énergétique équivalente normalisée, E_0^* .

$$E_0^* = q^*/v^*e^*h^* = [Aq/(2veh)][1/(\rho C_p(T_m - T_0))] \quad (10)$$

Le terme $Aq/(2v l h)$ de l'équation 10 représente les principaux paramètres FA, qui sont contrôlables et définis avant l'expérimentation. Le deuxième terme $1/(\rho C_p(T_m - T_0))$ représente les propriétés thermophysiques de l'alliage.

2.2. Méthode expérimentale :

2.2.1. Caractérisation de la poudre :

Une des premières étapes à effectuer dans le procédé est une caractérisation de la matière première car les caractéristiques de la poudre utilisée par le procédé LBM les paramètres obtenues de cette étape doivent être pris en compte dans la définition des paramètres d'élaboration des pièces. Une modification des paramètres métallurgiques des poudres entrantes a une influence majeur sur la microstructure des pièces élaborées et donc, sur leurs propriétés finales. La poudre a été fournie par la société HL Powder d'alliage FeSi6.5wt%.

Le prétraitement des poudres est réalisé par un tamisage suivi d'une étape de caractérisation afin d'évaluer l'homogénéité du matériau (répartition granulométrique et morphologie). L'homogénéité du matériau et la distribution de taille de la poudre, sont les facteurs clés qui affectent l'absorption d'énergie du laser, la conductivité thermique du lit et la fluidité de la poudre. La poudre de Fe Si6,5% a été tamisée à l'aide d'un tamis de 60 μm et triée pour éliminer les plus petites particules ($10\mu\text{m} <$). La morphologie de la poudre a été analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB-SEM), et la distribution de la taille des particules a été mesurée à l'aide d'un diffractomètre laser Malvern (Fig 3). La distribution granulométrique est un indice de la quantité relative de particules distribuées par tailles, cette quantité est exprimé en pourcentage du volume totale de particules à mesurer.

Une distribution de taille (20 à 80 μm) est obtenue. 10% des particules ont un diamètre inférieur à 9.32 μm , 50% à 19.79 μm et 90% à 57.24 μm . (voir Fig.3)

2.2.2. Procédé :

Le procédé LBM a été conduit sous un système de machine Realizer SLM-250, possédant un laser à fibre d'une puissance maximale de 400 W. Les échantillons ont été fabriqués directement sur un substrat en acier inoxydable austénitique. Ce support a été préchauffé et maintenu à 240°C pendant le processus pour réduire les gradients thermiques.

Les principaux paramètres LBM sont la puissance du laser (60 à 120 W), le diamètre du faisceau (100 μm), l'espacement entre cordon (60 μm), l'épaisseur de couche (30 μm) et la vitesse de balayage du laser (0,15 à 0,50 m/s). Seules la puissance laser et la vitesse de balayage sont modifiées entre les différents essais, les autres paramètres ont été maintenues constants.

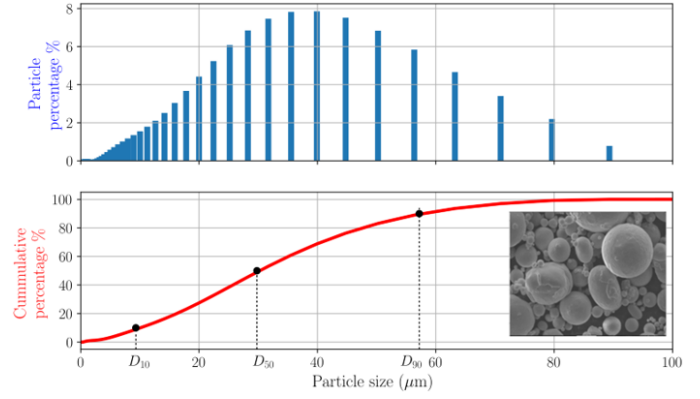


Fig. 3. Distribution de taille de la poudre FeSi, D10, D30,D50 c'est à dire la taille à laquelle 30% ou 50% de la population se situe inférieure à D30 ou D50

Des éprouvettes cubiques ont été produites pour analyser la porosité et la microstructure par microscopie optique (avec des observations complémentaires au MEB/EBSD), ainsi que des éprouvettes toriques en Fe-6.5wtSi de dimensions (8x8x8mm- $D_{int} = 28$ mm $D_{ext} = 40$ mm, $h = 5$ mm et $D_{int} = 28$ mm $D_{ext} = 20$ mm, $h = 8$ mm) ont aussi été fabriquées afin d'analyser les propriétés magnétiques : courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis ($B = f(H)$) ont été mesuré à l'aide d'un banc hystérésigraphe.

Tableau 3. Récapitulatif des principaux paramètres de fabrication

Type/nature - intitulé éprouvette	Puissance laser (W)	Vitesse laser (m/s)	L'espacement entre cordon (μm)	rayon laser (μm)	épaisseur de couche (μm)
Tore FeSi6.5 AM P18	90w	0.36 m/s	60	52	30 μm
Tore FeSi6.5 AM P14	80w	0.45 m/s	60	52	30 μm
Tore FeSi6.5 AM P08	70w	0.36 m/s	60	52	30 μm

Les éprouvettes ont été orientés comme indiquée à la figure 4.

Le tableau 3 résume les principaux paramètres qui ont servi à fabriquer des pièces toriques. Pour les échantillons (P18, P08 et P14) ont été utilisées, ceux ci représentent des taux densifications élevés.

2.3. Caractérisation magnétique des pièces finales :

2.3.1. Analyse du procédé :

Comme nous l'avons déjà évoqué, de nombreuses publications antérieures ont proposé des expressions analytiques permettant de synthétiser l'apport des paramètres procédé à travers des grandeurs énergétiques. L'intérêt de ces paramètres est, pour un utilisateur du procédé LBM, de pouvoir ajuster rapidement les paramètres opératoires afin de prévoir un état de densification de la matière.

Une étude sur des éprouvettes cubiques a été menée, à l'aide de deux ensembles de paramètres adimensionnels, la densité énergétique volumétrique (E^*) et le pas de balayage (h^*), peuvent être utilisés, conjointement avec les données machine disponibles.

Des mesures de la porosité obtenue de chaque essais (via une corrélation d'image) et un calcul de l'énergie volumique normalisée à l'aide des équations (9,10) ont été faites pour tracer

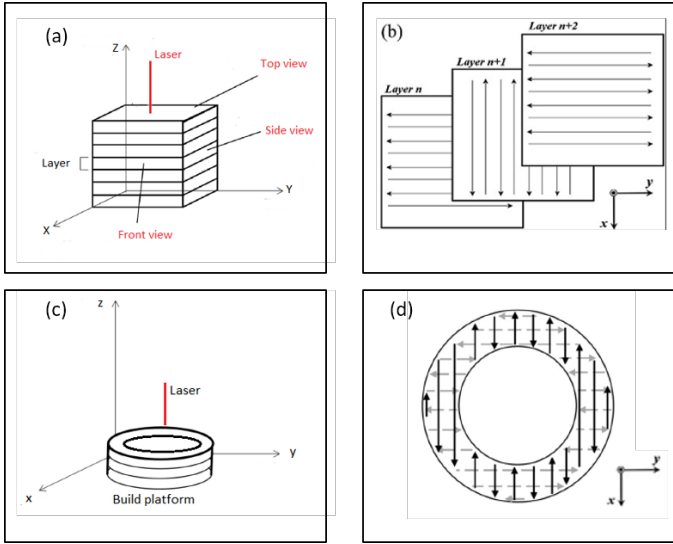


Fig. 4. (a,c) Orientation tridimensionnelle des cubes et tores : direction de fabrication (Z), plan de balayage (XY) et plans latéraux (XZ et YZ) (b,c) la stratégie de balayage

le diagramme d'énergie (r_b/h en fonction E_0^* et le taux de porosité mesuré en fonction E_0^*) Figure 5 (a,b). Mais aussi un calcul de l'énergie volumique.

Par ailleurs, on observe une légère ré-augmentation du taux de porosité à fort vitesse et puissance ($>90\text{w}$, $>0.4\text{m/s}$), qu'on peut attribuer à des porosités de type keyhole (fortes pénétrations dans la zone fondue), ou à l'augmentation du nombre d'éjections des particules de poudre qui se re-déposent sur la surface des pièces en cours de construction).

L'allure de la courbe Fig. 5(b) met bien en évidence le comportement parabolique du taux de porosité en fonction de l'énergie normalisée.

Une énergie très importante permet la densification de la pièce par contre elle s'accompagne d'une éjection des particules de poudre et une très faible énergie ne permet pas une densification complète due à un manque de fusion. Un point optimal peut être identifié à une densité de 98.5%. La courbe Fig. 5(a) étant constante car nous avons choisi de prendre h et r_b constants. Cependant on remarque que plus on s'éloigne aux extrémités de la courbe, le taux de porosité évolue.

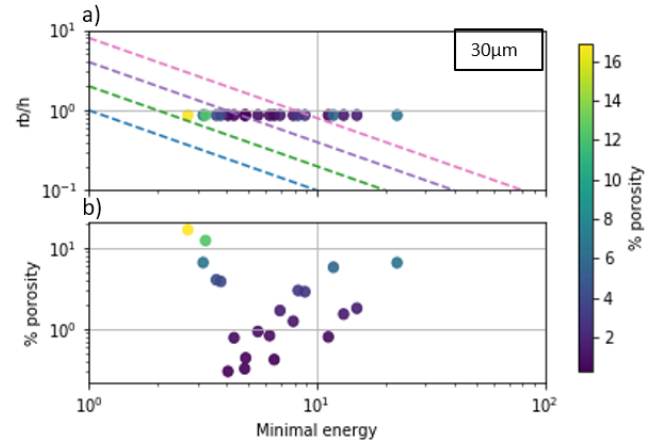


Fig. 5. Diagramme d'énergie volumique délivré sur un lit de poudre d'épaisseur de couche de $30\mu\text{m}$

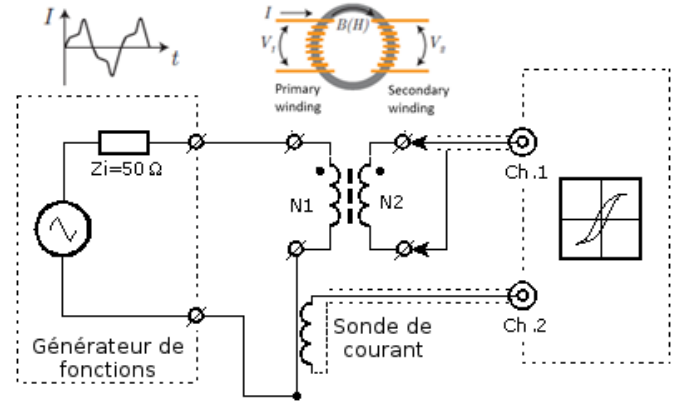


Fig. 6. Schéma d'un montage d'hystérésigraphe avec un échantillon fermé

2.4. Méthodes de caractérisation magnétique :

Les propriétés magnétiques ont été obtenue par des mesures à l'aide de la méthode d'hystérésigraphe . Le noyau torique a donc été retenu comme forme géométrique pour les essais. La géométrie torique choisie est optimale pour la mesure des caractéristiques magnétiques du point de vue de la continuité des flux magnétiques. Le noyau est bobiné de manière à constituer deux enroulements, un primaire et le secondaire afin d'établir les mesures nécessaires. Cependant afin d'assurer une bonne uniformité il faudrait rapprocher le plus possible le diamètre interne D_i du diamètre extérieur D_e afin d'avoir une forme toroïdale relativement mince ($D_e/D_i \leq 1.4$).

Avant chaque mesure, chaque échantillon a été soigneusement (démagnétisé) par magnétisation cyclique, afin d'éliminer toute rémanence des mesures précédentes et/ou de l'exposition au champ environnemental.

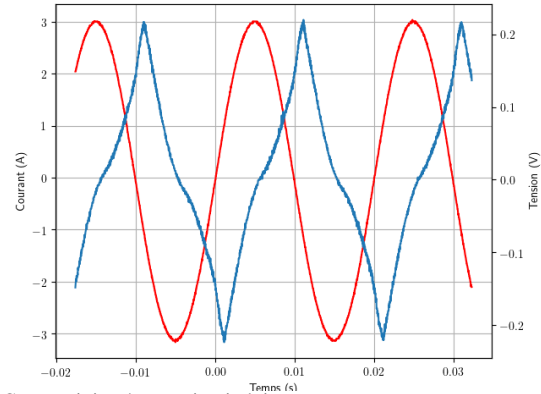


Fig. 7. Courant injecté et tension induite

Le courant sinusoïdale figure (7) est injecté sur la primaire de manière à créer une force magnétomotrice et par conséquent un champ magnétique à l'intérieur ainsi que une mesure de la tension qui est proportionnel à la dérivé du flux magnétique.

Pour chaque pas de temps, le montage mesure et enregistre les variables suivantes : le courant I sortant de l'amplificateur et la tension V_2 induite aux bornes de la bobine.

2.5. Caractéristiques magnétiques a l'issue du procédé :

Les données brutes forment une courbe $B - H$ qui nécessite une correction. Celle-ci consiste à filtrer numériquement le bruit sur le champ magnétique et à recentrer la courbe B-H résultante. Chacune de ces opérations a été appliquée systématiquement aux données expérimentales. Des cycles corrigés pour une fréquence de 50 Hz et des courants entre 1A et 6A sont montrés à la figure 8 de l'éprouvette P18 (voir tableau).

Les propriétés magnétiques sont mesurées à la température ambiante d'environ 20°C. On illustre les pertes totales W_t en J/kg selon une densité approximative de 7500 kg/m^3 . On y inclut la pente (μ_r) de la courbe d'hystérésis pour illustrer le niveau de saturation magnétique (voir tableau 4).

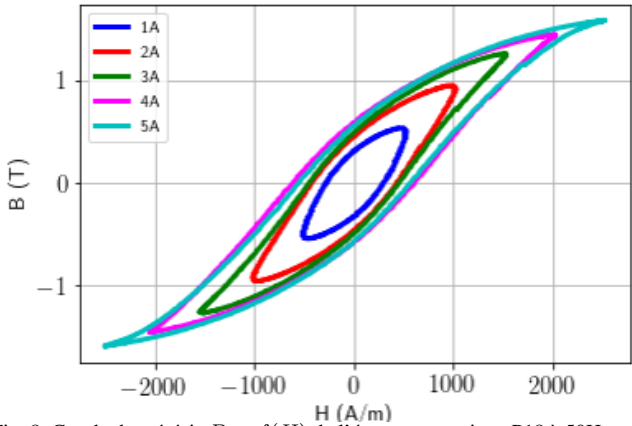


Fig. 8. Courbe hystérésis $B = f(H)$ de l'éprouvette torique P18 à 50Hz suite à une correction $I=[1A-5A]$, propriétés magnétiques FeSi%wt6.5 à l'état brut

Une première comparaison peut être établie entre les cycles d'hystérésis obtenue à partir d'un tore issue de la fabrication additive et un tore de même dimensions issues de la métallurgie traditionnelle. Les propriétés magnétiques sont mesurées et sont montrés à la figure 9. Nous remarquons quelques différences du comportement magnétique.

Le tableau 4 résume les principaux résultats obtenus à partir des caractéristiques issues des cycles d'hystérésis, notamment du champ coercitif H_c (la valeur du champ magnétique H quand l'induction $B = 0$) et de l'induction à saturation B_s . Nous constatons d'abord une sensibilité accrue d'un paramètre laser qui est l'énergie volumique déposée E_0^* (voir Eq 10) sur les propriétés magnétiques finales des pièces obtenues. L'augmentation de cette énergie laser (voir tableau) induit une augmentation relative de H_c (Champ coercitif) et de la perméabilité relative (μ_r). De ce fait une augmentation de l'énergie déposée induit une augmentation de l'énergie magnétique.

Ensuite, les pertes totales (P_t) diminuent avec l'augmentation de l'énergie volumique déposée E_0^* et donc une augmentation de l'énergie magnétique, passant d'environ 31 (J/Kg) à 20.78 J/Kg . La tendance de la perte totale est qualitativement similaire à celle de H_c , ce qui fait varier la surface de la courbe $B(H)$ est donc l'énergie magnétique.

Enfin la variation de l'énergie magnétique suit une variation semblable à celle de H_c .

3. CONCLUSIONS

Le potentiel de la technologie de fabrication additive dans l'élaboration des matériaux ferromagnétiques à haute teneur en Si, est exploré dans cet article suivant une méthodologie ; en partant d'un plan d'expérience, ensuite l'étude des liens entre les paramètres de fabrication (Puissance laser , énergie volumique du laser) et les propriétés finales. Les performances magnétiques des éprouvettes obtenues sont comparables avec celles des matériaux ferromagnétiques traditionnels (type tôles classiques Fe3%Si). Une première étude de l'influence des paramètres procédé a été établie dans cette article. La réalisation d'autres éprouvettes toriques afin d'analyser l'influence de la vitesse et la puissance du laser sur les caractéristiques magnétiques reste encore à établir. Le lien entre la microstructure, l'in-

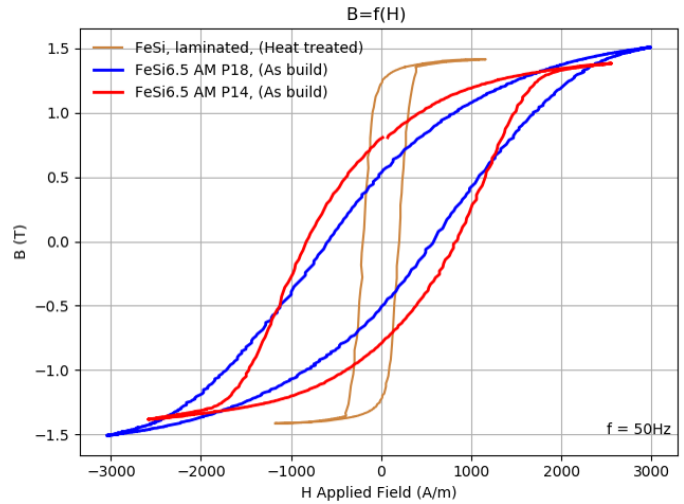


Fig. 9. Comparaison des propriétés magnétiques obtenue entre un tore obtenue en FA et un tore sous forme laminé de même dimensions les Courbes hystérésis $B=f(H)$ à 50Hz

Tableau 4. Récapitulatif des principaux propriétés magnétiques :

Type/nature éprouvettes	Densité (%)	E_0^*	H_c (A/m)	μ_r	B_s (T)	P_t (J/Kg)
Tore FA 'FeSi6.5 AM P18'	98.6	6.219	613	512	1.53	20.78
Tore FA 'FeSi6.5 AM P14'	98	4.383	800	410	1.34	25.8
Tore FA 'FeSi6.5 AM P08'	98.9	3.806	900	380	1.56	31
Tore en tôle laminé 'FeSi3.5 AM'	-	-	201	644	1.42	6.9

fluence corrélée de la vitesse et la puissance du laser sur les propriétés magnétiques de l'échantillon pourrons ainsi être obtenue. Enfin le comportement en fréquence pourra être étudié pour des courants des valeurs 1A, 2A, 3A et 5A et des fréquences de 50Hz, 100Hz, 1kHz, et 5kHz et à partir des cycles d'hystérésis, le comportement des pertes en fonction de l'énergie injectée. D'autres aspects de post traitement des pièces (recuit) pourraient s'avérer déterminants pour l'amélioration des caractéristiques magnétiques en fréquence.[2]

Ce procédé a donc un potentiel pour le développement de nouvelles géométries de noyau, en particulier dans les applications où la conception géométrique complexe est avantageuse, alors que l'emploi d'une pièce en tôle laminée n'est pas viable.

4. RÉFÉRENCES

- [1] A. Ospina, N. Kang, H. Liao, and L. Dembinski, "Caractéristiques magnétiques d'un circuit ferromagnétique annulaire construit par fabrication additive," in *3ème édition du Symposium de Génie Electrique SGE 2018*, Nancy, France, Jul. 2018. [Online]. Available : <https://hal.utc.fr/hal-01998737>
- [2] 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*, vol. 142, pp. 121–125, 2018.
- [3] B. Zhang, N.-E. Fenineche, and H. Liao, "Magnetic properties of in-situ synthesized feNi3 by selective laser melting fe-80Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 336, pp. 49 – 54, 2013.
- [4] M. Thomas, G. J. Baxter, and I. Todd, "Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys," *Acta Materialia*, vol. 108, pp. 26 – 35, 2016.
- [5] M. Garibaldi, I. Ashcroft, M. Simonelli, and R. Hague, "Metallurgy of

high-silicon steel parts produced using selective laser melting,” *Acta Materialia*, vol. 110, pp. 207–216, 2016.

- [6] J.-P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs, and J. Van Humbeeck, “Part and material properties in selective laser melting of metals,” Curran, 2010, pp. 1–12. [Online]. Available : <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/106724>
- [7] M. Garibaldi, I. Ashcroft, and N. Hillier, “Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted fe-6.9144 – 151, 2018, metal Additive Manufacturing : Microstructures and Properties.
- [8] C. Li, Y. Guo, and Z. Jibin, “Interfacial phenomena and characteristics between the deposited material and substrate in selective laser melting inconel 625,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 243, pp. 269–281, 01 2017.
- [9] A. B. Claude Barlier, *Fabrication Additive du prototypage rapide à l’impression 3D*, Dunod, Ed. Dunod2015, 2015.
- [10] J. Ion, H. Shercliff, and M. Ashby, “Diagrams for laser materials processing,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 40, no. 7, pp. 1539 – 1551, 1992.