

Offre de thèse

Sujet de thèse :

Optimisation des pertes dans un alliage ferromagnétique par insertion de couches isolantes obtenues par fabrication additive : Corrélation entre la microstructure et les propriétés magnétiques et mécaniques.

Thesis subject :

Optimization of losses in a ferromagnetic alloy by insertion of insulating layers obtained by additive manufacturing: Correlation between the microstructure and the magnetic and mechanical properties.

Mots clés : Alliages ferromagnétiques, fabrication additive, LPBF, DMD, pertes magnétiques

Keywords: Ferromagnetic alloys, additive manufacturing, LPBF, DMD, magnetic losses

I. Contexte et positionnement du sujet

La fabrication additive (FA) a conduit à une révolution dans la conception mécanique en autorisant la réalisation de formes complexes tout en minimisant la matière nécessaire à la réalisation. Dans le domaine de la conception de machines électriques, la FA est encore peu développée mais de nombreux universitaires et industriels étudient ses multiples potentialités. Une machine électrique est par nature hétérogène (Fig.1a) et la FA peut impacter différents domaines. La Fig. 1b montre les principaux domaines dans lesquels la FA peut apporter des gains et le niveau de maturité correspondant [Wu and El-Refaaie, 2020].

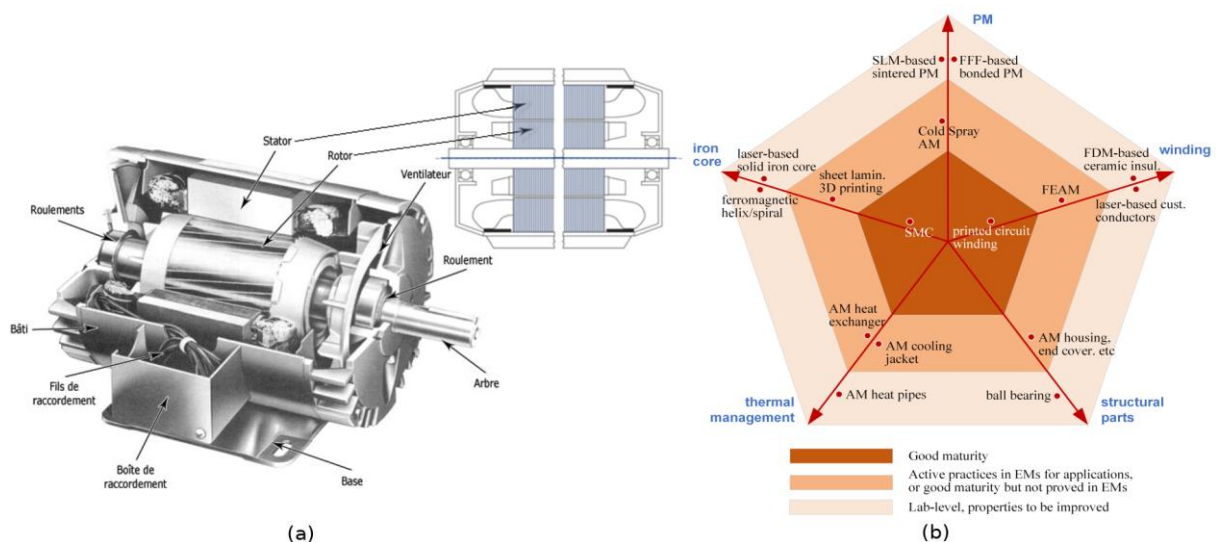


Fig.1 : (a) Structure d'une machine asynchrone avec coupe transversale; (b) Niveau de maturité des possibilités offertes par la FA dans les différents domaines de conception de la machine électrique [Wu and El-Refaaie, 2020]

Aujourd'hui, les matériaux utilisés pour les composants ferromagnétiques, en anglais « iron core » (voir Fig 1b, rotor et stator) sont majoritairement des empilements de tôles laminées isolées. La demande en machine de conversion d'énergie mécanique-électrique réversible est importante. On peut citer le cas de la propulsion des véhicules électriques qui demande une conversion d'énergie à faible pertes et forte puissance massique. Les pertes principales dans une machine électrique sont de

deux ordres : (i) Pertes liées au passage du courant dans les conducteurs (pertes Joule) ; (ii) **Pertes au sein des composants ferromagnétiques qui sont fortement liées à la vitesse de variation du champ magnétique au sein même du matériau.**

Objectifs de la thèse

La FA, mettant en œuvre des procédés tels que la FLLP (*Fusion Laser sur Lit de Poudre*, connue aussi sous les acronymes SLM, Selective Laser Melting ou LPBF, Laser Powder Bed Fusion) et DMD (Dépôt de Métal Direct, également appelée DED, *Direct Energy Deposition* ou LENS, *Laser Engineered Net Shaping*), **pourrait permettre de lever le verrou lié au laminage.** Les couches de matériaux ferromagnétiques pourraient être d'épaisseur inférieures à 0,3mm et, grâce aux vitesses de solidification très élevées de ces procédés et aux microstructures très particulières obtenues, l'augmentation de la teneur en Si pourrait être envisagée tout en maintenant des caractéristiques mécaniques adaptées à l'application finale. De plus, la FA en traitant 2 matériaux différents pourrait permettre la réalisation de composants feuilletés alternant des couches ferromagnétiques et isolantes. **L'objectif de la thèse est donc de fabriquer et de positionner des composants feuilletés issus de la FA par rapport aux composants laminés tant sur les performances magnétiques que mécaniques.**

L'utilisation de l'alliage Fe-6,5%Si à la place de l'alliage Fe-3%Si actuellement majoritaire pour ces applications, permet de réduire considérablement les pertes magnétiques (notamment par courant de Foucault) et donc d'augmenter le rendement grâce à leurs propriétés magnétiques (aimantation à saturation et résistivité électrique élevée, constantes électromagnétiques telles que la magnétostriction et l'anisotropie magnétocristalline très faibles, perméabilité élevée, champ coercitif faible etc...).

Cependant, les alliages à forte teneur en Si sont peu ductiles en raison de la formation de phases ordonnées fragiles lors de leur élaboration rendant difficile leurs mises en forme par un procédé économique tel que le laminage à froid. Les technologies de Fabrication Additive (FA), e.g. FLLP (*Fusion Laser sur Lit de Poudre*, connue aussi sous les acronymes SLM, Selective Laser Melting ou LPBF, Laser Powder Bed Fusion) et DMD (Dépôt de Métal Direct, également appelée DED, *Direct Energy Deposition* ou LENS, *Laser Engineered Net Shaping*) ouvrent des opportunités pour réaliser des composants sans les restrictions des méthodes de fabrication traditionnelles.

Une étude de faisabilité de mise en œuvre de composants massifs en alliages de Fer à fort taux de Si par FLLP a été effectuée dans le cadre d'une thèse précédente [M. ZAIED, 2022] pour contourner les limites de ductilité de ces matériaux. Toutefois, l'atténuation des pertes par courants de Foucault est devenue l'un des principaux défis pour ces composants magnétiques doux massifs réalisés par FA. En effet, les pertes en fréquence se sont avérées plus élevées que celles des tôles laminées et isolées commerciales du fait des courants de Foucault. **L'introduction de structures isolantes à l'échelle méso-scopique s'avère une solution prometteuse pour minimiser ces pertes et atteindre des performances comparables à celles de tôles classiques.** Cette stratégie revient à réduire l'épaisseur des couches ferromagnétiques (<0.3mm, épaisseur des tôles dans les dispositifs actuels) et de les alterner avec des couches électriquement isolantes (air, oxyde, métal très résistif ou polymère), afin d'atteindre des performances proches de celles obtenues avec les tôles laminées tout en ouvrant la voie à des designs de pièces complexes. D'autres travaux [Goll et al., 2019, 2020, Riipinen et al., 2019, Andreiev et al., 2021, Koo et al., 2021] ont démontré la faisabilité de réalisation de ces nouvelles structures feuilletées.

Le laboratoire ICB-LERMPS de l'UTBM a participé à la mise au point d'un procédé novateur [Frechard et al., 2019] basé sur le principe du DMD pour élaborer des feuilletages multi-matériaux 3D dans différentes directions de l'espace permettant de limiter la circulation des courants induits. La thèse proposée s'inscrit dans le contexte de ces travaux et propose d'exploiter ce nouveau procédé pour explorer des nouvelles voies pour architecturer des composants massifs en alliages magnétiques sous forme de structures feuilletées dans les 3 directions de l'espace (3D). Ces composants combineront des structures magnétiques et isolantes permettant de limiter les pertes au sein du matériau dans le domaine des hautes fréquences (>400Hz).

Outre l'enjeu relatif à la réalisation de composants feuilletés 3D par FA, **le projet vise à comprendre les effets des paramètres des procédés sur l'état microstructural et les réponses mécanique, électrique et magnétique des structures réalisées.**

Les différences de température de fusion des isolants par rapport à celle des alliages magnétiques, ainsi que les différences de dilatation thermique, nécessitent une caractérisation fine des feuilletages pour connaître les compositions chimiques interfaciales et les contraintes résiduelles locales. En fonction des retours obtenus par caractérisation structurellement et des propriétés mécaniques (en collaboration avec l'UTC), des tores et des blocs rectangulaires seront fabriqués pour faire des caractérisations magnétiques (en collaboration avec l'UTC et APERAM). Les résultats ainsi obtenus seront comparés à des procédés réalisés parallèlement au CEA-LITEN. Des traitements thermiques (cycles thermiques et atmosphères de recuit, interaction métal/isolant) seront nécessaires afin d'aboutir aux caractéristiques magnétiques, électriques et mécaniques optimales, ces traitements thermiques seront effectués en étroite collaborations avec APERAM et le CEMEF (modélisation).

Tâches :

- Investigations microstructurales, analyses chimiques locales de composants avant TTH
- Investigations microstructurales, analyses chimiques locales de composants après TTH
- Caractérisations mécaniques par micro-dureté et détermination par DRX des contraintes internes de composants avant et après TTH
- Étude des liens paramétrie des procédés – microstructure – propriétés mécaniques et magnétiques.

Laboratoires d'accueil :

La thèse sera menée dans le cadre du projet ANR FALSTAFF au sein du laboratoire ICB-PMDM LERMPS à Belfort et l'UTC-Roberval à Compiègne,

Profil du candidat et candidature :

Le candidat devra avoir un goût pour la recherche, la caractérisation expérimentale et une grande autonomie. Une expérience pratique de la fabrication additive et du développement de procédés serait appréciée. Motivé(e) par la recherche, il/elle a obtenu de très bons résultats au cours de ses études (classement demandé) et possède une bonne qualité rédactionnelle en français et en anglais. Son niveau d'anglais lui permettra de comprendre aisément des publications et pouvoir communiquer ses résultats lors de conférences scientifiques. Des déplacements entre Belfort et Compiègne sont à prévoir aussi.

Démarrage de la thèse : Début Octobre 2023

Pour candidater, merci d'adresser : CV + relevés de notes + lettres de recommandation à :

Nouredine FENINECHE

Enseignant Chercheur, ICB-PMDM LermPS
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Campus de Sevenans - 90010 Belfort cedex
Tél +33 (0) 3 84 58 31 16
nour-eddine.fenineche@utbm.fr.

Alejandro OSPINA

Enseignant Chercheur
Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval, Rue Roger Couitolenc, CS 60319
60203 Compiègne Cedex
Téléphone : 33 (0)3 44 23 45 09
Fax : 33 (0)3 44 23 79 37 ; E-mail : alejandro.ospina@utc.fr