



Contrat Doctoral Arts et Métiers

Titre : Caractérisation et modélisation du comportement magnéto-mécanique des matériaux ferromagnétiques pour l'optimisation de procédés de fabrication des machines électriques

Laboratoires de recherche impliqués : L2EP (<http://l2ep.univ-lille.fr/>) et MSMP (<http://msmp.eu/>)

Directeur de thèse : **Stéphane Clénet** – stephane.clenet@ensam.eu

Date limite de candidature et modalité : La candidature (CV + lettre de motivation) est à envoyer avant le **6 avril 2019** à **S. Clénet**

1. Présentation synthétique du projet et de son positionnement

De par son faible impact environnemental direct, l'électricité est un vecteur de transport et de conversion d'énergie de plus en plus utilisé, ce qui conduit à une utilisation de plus en plus intensive des machines électriques dans des domaines d'application tels que la production d'énergies renouvelables ou les transports. Face à une nécessité toujours croissante d'efficacité des procédés de conversion, on demande aux machines électriques d'avoir des rendements de plus en plus élevés mais aussi parfaitement maîtrisés par le fabricant. Le rendement est lié aux pertes électromagnétiques qui sont les pertes Joules et les pertes magnétiques qui s'opèrent au sein des matériaux ferromagnétiques doux nécessaires à une bonne circulation du flux magnétique. Les caractéristiques magnétiques des matériaux ferromagnétiques sont sensibles aux contraintes mécaniques. Or, durant le processus de fabrication des machines électriques, il a été montré, dans [1] en effectuant des prélèvements d'échantillons sur une chaîne de fabrication, que les pertes magnétiques dans un stator de machine électrique pouvaient être multipliées par 2 sur le produit final par rapport à la matière première. Aussi, l'approche actuelle qui consiste à considérer que le matériau ferromagnétique se comporte au sein de la machine électrique comme la matière première (et donc à négliger l'impact des procédés) conduit souvent à des modèles de conception qui surévaluent les performances des machines électriques. Cela conduira par exemple à une sous-estimation des pertes magnétiques et donc un rendement théorique trop élevé et donc finalement un risque de rejet de la machine produite qui ne respecte pas le cahier des charges en termes d'efficacité énergétique.

Si on souhaite maîtriser les performances du produit final dès la phase de conception, il est donc nécessaire d'y intégrer l'impact des procédés. Dans la littérature, il existe des études qui montrent clairement l'impact négatif des procédés sur les performances des machines électriques [10]. Il existe aussi des études comparant différents procédés de découpage et leurs effets sur les caractéristiques magnétiques des tôles [5][6][8]. On peut y noter des résultats qui peuvent paraître contradictoires entre par exemple la découpe laser ou par poinçonnage. Ces approches restent souvent très expérimentales et il n'existe pas à notre connaissance de modèles numériques intégrant le modèle du procédé couplé à un modèle électromagnétique de la machine. Cette intégration nécessite de modéliser les procédés de fabrication de manière à bien connaître l'évolution des champs de contrainte et de déformation au sein du matériau ferromagnétique. Ensuite, connaissant ces champs, il est possible d'évaluer l'impact sur les lois de comportement magnétiques (courbe B(H) et pertes) en chaque point. Ces lois de comportement seront donc différentes d'un point à un autre du fait de la répartition non homogène des champs de contraintes et de déformation contrairement à ce

que l'on suppose classiquement quand on dimensionne une machine électrique où la loi de comportement est parfaitement homogène (et est celle de la matière première). Le comportement du matériau ferromagnétique étant mieux décrit, la prédiction des performances de la machine ne peut en être que meilleure. Cette approche couplée permet d'avoir un modèle plus réaliste de la machine électrique et donc de mieux maîtriser la conception. Par ailleurs, elle permettra de développer et d'étudier des procédés de fabrication moins impactant sur les performances des machines électriques.

Un élément clé dans ce chainage est la loi de comportement magnéto-mécanique qui permet de faire le lien entre les modèles numériques du procédé et celui de la machine électrique. La détermination d'un modèle de cette loi nécessite une étape de caractérisation expérimentale. Actuellement, les caractérisations sont effectuées principalement sous contrainte unidirectionnelle dans le domaine élastique et plastique pour la traction et seulement dans le domaine élastique en compression. Cela n'est pas suffisant car pour certains procédés (cintrage, assemblage...), il est nécessaire de connaître le comportement en compression et/ou en cisaillement en régime de déformation élastique ou plastique.

Dans le cadre de la thèse, il s'agira de mettre en place un dispositif expérimental de caractérisation de loi magnéto-mécanique en régime de compression et/ou de cisaillement et de proposer un modèle adapté en vue d'une implantation dans une chaîne numérique liant les procédés de fabrication aux performances des machines électriques.

Ce travail s'effectuera au sein du L2EP qui possède de fortes compétences dans le domaine de la caractérisation et de la modélisation des matériaux ferromagnétiques mais aussi dans le domaine du développement de modèles numériques par la méthode des éléments finis de machines électriques. Ce travail s'effectuera dans le cadre d'une collaboration avec le MSMP qui possède une expérience reconnue dans le domaine des procédés de fabrication et de leur modélisation. Il fait suite aux travaux de thèse de M. El Youssef effectuée dans le cadre d'une collaboration entre le L2EP et le MSMP.

Présentation détaillée du projet de thèse

De nombreuses études portent sur l'impact des procédés de fabrication sur les caractéristiques magnétiques des matériaux (et plus particulièrement le découpage) avec une comparaison des différents procédés comme la découpe par laser, par jet d'eau, par électroérosion, par poinçonnage [4][6][7][8]. Ces études sont généralement expérimentales et basées sur la caractérisation d'échantillons découpés par différents procédés dont les grandeurs mesurées comme la courbe B(H) ou les pertes sont ensuite comparées de manière à dégager le procédé le moins impactant [6]. Le poinçonnage peut faire l'objet d'une étude en particulier pour étudier l'influence du revêtement ou de l'état d'usure de l'outil [8]. On constate par contre que tous les procédés ne sont pas ou peu couverts comme par exemple le cintrage que l'on le rencontre dans le processus de fabrication de stators de type « slinky », très répandus dans la production de masse en particulier en automobile. Comme cela a été montré dans [2][5], l'impact du cintrage est clairement notable conduisant à un doublement des pertes fer. On note de plus très peu de travaux sur l'impact des procédés d'assemblage (insertion du noyau magnétique du stator dans une culasse, l'assemblage avec les carters, le bobinage autour des dents statoriques) alors que ceux-ci induisent aussi nécessairement des déformations et contraintes et donc une modification des caractéristiques magnétiques.

Des modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis de machines électriques sont proposés dans la littérature pour prendre en compte l'effet du découpage. Dans [7], les auteurs proposent un modèle mathématique de la loi de comportement basé sur une décroissance exponentielle prenant en compte la dégradation des propriétés magnétiques à proximité du bord. Ce modèle est implanté dans une simulation par éléments finis 2D. L'idée consiste à insérer des couches successives avec des propriétés magnétiques différentes. Dans [9], les auteurs étudient l'impact du poinçonnage sur les propriétés magnétiques, en s'appuyant sur la caractérisation des échantillons avec différentes distances entre les bords découpés. Ils proposent un modèle aussi sous

forme exponentielle qui permet de déterminer l'évolution de la perméabilité en fonction de la distance au bord. Dans [10], une loi de comportement magnétique dépendant de la distance au bord de découpe est proposée dont les paramètres sont identifiés à partir d'essais expérimentaux. Ce modèle est ensuite utilisé au sein d'un modèle numérique d'une machine asynchrone. La comparaison des performances simulées de la machine en prenant ou pas en compte l'effet du découpage montre un accroissement du courant magnétisant, une augmentation de la température interne de quelques degrés due à l'accroissement des pertes. On constate que les études portent principalement sur le procédé de poinçonnage. Par ailleurs, pour prendre en compte l'impact des procédés au sein d'un modèle numérique, l'approche retenue nécessite tout d'abord une identification sur la base d'échantillons obtenus par le procédé considéré puis la caractérisation magnétique permet ensuite d'élaborer un modèle de comportement magnétique permettant d'introduire l'effet de ce même procédé. Cette approche nécessite donc que la machine de fabrication soit disponible et adaptée à la production d'échantillon. Par ailleurs, toute variation paramétrique du procédé pour l'optimiser est souvent rendue délicate car les paramètres ne sont pas nécessairement variables ou même connus. Enfin, une extrapolation à d'autres procédés des résultats obtenus n'est pas immédiate du fait d'une caractérisation qui reste globale et pas locale.

Aussi, en vue d'une prédiction au mieux des performances de la machine fabriquée, d'une optimisation de procédés voire du développement d'un procédé innovant, il est nécessaire de disposer d'une chaîne numérique complète permettant de coupler le modèle numérique du procédé avec le modèle numérique électromagnétique de la machine. Le modèle du procédé permettra d'obtenir la répartition des champs de contrainte et de déformation. Connaissant la loi de comportement magnétique en fonction de la contrainte et de la déformation, il sera possible de connaître en chaque point de la pièce ferromagnétique la loi de comportement magnétique et donc de pouvoir simuler de manière plus réaliste la machine électrique. Cette approche permettra aussi de faire varier plus aisément les paramètres du procédé de manière à déterminer les paramètres optimaux en fonction des performances de la machine électrique souhaitée. Ce couplage nécessite néanmoins la détermination de la loi de comportement magnéto-mécanique qui passe par une phase de caractérisation expérimentale spécifique sur banc. Il existe actuellement des bancs de caractérisation magnéto-mécanique souvent sous contrainte uni-axiale allant jusqu'à la déformation plastique en traction et élastique en compression. Si on considère des procédés comme le cintrage ou l'assemblage, il apparaît des déformations plastiques en compression voire en cisaillement si on souhaite aborder des procédés de fabrication innovants [3]. En 2018, [11] a présenté un banc de caractérisation multiaxial en contrainte mais dans le domaine élastique.

Il existe donc actuellement un verrou majeur à la construction de la chaîne numérique permettant de prendre en compte l'impact des procédés qui est la méthode de caractérisation permettant de mesurer les caractéristiques magnétiques sous contrainte et déformation multiaxiales.

L'objectif du travail est donc de développer une méthode de caractérisation expérimentale sous champs de contrainte et de déformation multi-axiaux afin de développer un modèle magnéto-mécanique permettant de réaliser un démonstrateur de chaîne numérique liant les paramètres du procédé aux performances de la machine. On se focalisera sur le procédé de cintrage mis en oeuvre dans le cas de la fabrication de stator slinky qui a un impact réel sur les performances finales de la machine tout en étant un procédé que l'on peut représenter assez précisément en utilisant un modèle numérique. Ce démonstrateur numérique sera ensuite appliqué pour étudier un procédé innovant de fabrication de stator slinky [3]

Le travail de thèse se décomposera comme suit. Tout d'abord un travail bibliographique sur les différentes méthodes de caractérisation magnéto-mécanique des tôles ferromagnétiques sera effectué. Ensuite, le procédé de cintrage sera modélisé finement et validé expérimentalement sur des échantillons de forme simple de manière à bien valider les champs de contrainte et de déformation plastique. Ensuite, la variabilité des paramètres du procédé de cintrage étant bien définis (on choisira des plages de variation qui seront proches d'un procédé existant en production),

la plage de contrainte et de déformation que subit la tôle à caractériser sera déterminée en utilisant le modèle numérique du procédé. Cela permettra de concevoir le dispositif de caractérisation adapté à ce procédé en compression et traction sous déformation plastique et élastique. Une fois le dispositif de caractérisation réalisé, un modèle magnéto-mécanique du matériau sera développé sur la base d'un modèle existant dans la littérature ou, si ceux-ci ne sont pas adaptés, sur un modèle de comportement de type boîte noire en utilisation des techniques d'interpolation ou de régression. La chaîne numérique liant les paramètres du procédé aux performances de la machine sera développée sur des cas simples permettant une validation de chaîne pour être ensuite utilisée pour l'étude et l'optimisation du procédé existant. Enfin, la chaîne numérique développée sera appliquée à l'étude d'un procédé innovant [3] nécessitant le développement d'un banc de caractérisation sous contrainte de cisaillement.

2. Impact scientifique et retombées du projet

L'approche expérimentale de caractérisation du comportement magnéto-mécanique des matériaux ferromagnétiques ainsi que le développement de modèles qui en découlera permettront de mettre en place un élément indispensable pour le couplage entre le modèle du procédé de fabrication et le modèle électromagnétique de la machine qui permet de prédire ses performances. Il fait donc partie intégrante de la chaîne numérique indispensable à la prise en compte des procédés de fabrication dès la phase de conception puis d'industrialisation de machines électriques. De plus, la chaîne numérique étant disponible il sera plus aisé d'optimiser les procédés et de développer des procédés innovants moins impactant car actuellement tout cela nécessite obligatoirement une mise en œuvre d'une analyse paramétrique du procédé qui nécessite du temps et coûte cher.

A l'heure où les fabricants doivent accroître le rendement de leurs machines et dans un avenir proche devront être capables de certifier leurs performances, les résultats des travaux permettront de développer des partenariats avec ceux-ci et/ou leurs sous-traitants. En effet les fabricants ont besoin d'une chaîne numérique fiable et représentative de leurs procédés et de leurs impacts sur les performances des machines ce qui à notre connaissance n'existe pas actuellement et correspond pourtant à un réel besoin. Des travaux de recherche en partenariat avec des industriels pourront donc naturellement découler des résultats de la thèse.

Par ailleurs, l'existence d'un réel outil numérique de prise en compte de l'impact des procédés sur les performances de la machine pourra permettre une meilleure adéquation produit/process et d'être beaucoup plus innovant en particulier dans le domaine des structures des machines électriques. En effet l'absence d'outils numériques disponibles et le coût et le temps de prototypage restent un frein très important à la conception de nouvelles structures de machines mieux adaptées aux procédés de fabrication. De même, ces outils peuvent nous amener à imaginer et tester de nouveaux procédés ce qui est difficile actuellement faute d'outils comme celui proposé dans [3].

- [1] M. El Youssef, A. Van Gorp, S. Clenet, A. Benabou, P. Faverolle, J.-C. Mipo, Y. Lavalley, C. Cour, T. Lecuppe, Slinky stator: The impact of manufacturing process on the magnetic properties, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017
- [2] M. El Youssef Impact des procédés de fabrication de stator slinky sur les caractéristiques des matériaux, Thèse de l'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2017
- [3] A. Van Gorp, M. El Youssef, Noyau magnétique pour machine de conversion électrique Brevet en cours de dépôt
- [4] M. El Youssef, A. Benabou, T. Coorevits, A. Van Gorp, S. Clénet, P. Faverolle, J.C. Mipo, Y. Lavalley, T. Lecuppe, Study of the punching effect directly on stator samples of electrical machine, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019 (to appear)
- [5] R. Ramarotafika, A. Benabou, S. Clénet, Stochastic Modeling of Soft Magnetic Properties of Electrical Steels: Application to Stators of Electrical Machines, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, N°. 10 (2012)
- [6] Bourchas K., Stening A., Soulard J., Broddefalk A., Lindenmo M., Dahlén M., Gyllensten F., "Quantifying Effects of Cutting and Welding on Magnetic Properties of Electrical Steels", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.53 , No. 5, 2017
- [7] Kedous-Lebouc, A., Messal, O., Youmssi, A., 2017. "Joint punching and frequency effects on practical magnetic characteristics of electrical steels for high-speed machines". J. Magn. Mater. 426, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.150>
- [8] Leuning, N., Steentjes, S., Hameyer, K., Schulte, M., Bleck, W., 2016. "Effect of Material Processing and Imposed Mechanical Stress on the Magnetic, Mechanical, and Microstructural Properties of High-Silicon Electrical Steel". Steel Res. Int. 87, 1638–1647. <https://doi.org/10.1002/srin.201600039>
- [9] Bali M., De Gersem H., Muetze A., "Finite-Element Modeling of Magnetic Material Degradation Due to Punching", IEEE transaction on Magnetics, Vol.50, No.2, Feb. 2014.
- [10] Sundaria, R., Nair, D.G., Lehtikoinen, A., Arkkio, A., Belahcen, A. "Loss Model for the Effects of Steel Cutting in Electrical Machines", XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Alexandroupoli, pp. 1260–1266, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506822>.
- [11] Aydin U., Martin F., Rasilo P., Arkkio A., "Rotational Single Sheet Tester for Multiaxial Magneto-Mechanical Effects in Steel Sheets", IEEE Transactions on Magnetics, 2018, DOI: 10.1109/TMAG.2018.2889238